

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf- M'sila  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil



جامعة محمد بوضياف- المسيلة  
كلية التكنولوجيا  
قسم الهندسة المدنية

THESE

Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES Spécialité: Génie Civil – Option: Matériaux

DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée par

**BOUALLEG Saida**

THEME

---

**INFLUENCE DE LA CURE HUMIDE SUR LES  
CARACTERISTIQUES DU MORTIER ET BETON SOUS L'EFFET  
D'UN MILIEU AGRESSIF  
(CARBONATATION)**

---

**Soutenue le 07/11/ 2017**

**Devant le jury d'examen composé de :**

<b>Mr. KHEMISSA Mohamed</b>	Prof	Université de M'sila	Président
<b>Mr. BENCHEIKH Mohamed</b>	Prof	Université de M'sila	Rapporteur
<b>Mr. BOUDAUD Zine Eddine</b>	Prof	Université D'oum EL Bouagui	Examinateur
<b>Mr. TAALLAH Bachir</b>	M.C.A	Université de Biskra	Examinateur
<b>Mr. RAHMOUNI ZineEl Abiddine</b>	Prof	Université de Msila	Invité

---

## *Remerciements*

---

# *Remerciements*

Je remercie...

**Mr. KHEMISSA Mohamed**, Président du jury

**Mr. BENCHEIKH Mohamed**, Rapporteur

**Mr. BOUDAUD Zine Eddine**, Examineur

**Mr. TAALAH Bachir**, Examineur

**Mr. RAHMOUNI Zine EL Abiddine**, Invité

*Ma famille*

---

## *Résumés*

---

## RÉSUMÉ

La dégradation des constructions en béton résulte de la corrosion de son armature par suite de la carbonatation du béton et un autre agent agressive (ions de chlorure, pluie acide ....etc.). L'armature corrodée augmente de volume, le béton le recouvrant s'effrite et la construction se détruit. La conception d'un béton est extrêmement liée à l'environnement dans lequel le béton va être exposé durant la durée de vie d'un ouvrage, Le ciment est la principale source des impacts sur l'environnement de l'utilisation du matériau béton. Afin d'optimiser ce dernier d'un point de vue environnemental, il est nécessaire de réduire son dosage en ciment. Cela, peut être entrepris en remplaçant une partie du ciment par des additions minérales lors de sa fabrication.

Ces travaux de thèse visent à étudier et mieux comprendre les phénomènes physico-chimiques impliqués dans le mélange hydraté (clinker + addition) au cours du processus de carbonatation naturelle pour caractériser des ciments avec des taux élevés de substitution par des additions, quantifier l'effet de la maturation initiale humide sur les différentes propriétés physico chimiques et mécaniques des matrices étudiées .Cette étude apporte un éclairage sur l'adéquation de la cure sur les performances à l'état durci des mortiers et bétons.

Les paramètres de l' étude sont le type de ciment, la nature de l' addition minérale et le régime de cure. Les résultats obtenus montrent l'influence considérable de la cure sur les caractéristiques physiques, mécaniques et microstructurales des matrices cimentaires. Ainsi, une parfaite corrélation entre les différents paramètres étudiés est constatée.

**Mots clefs :** *Carbonatation, Environnement, Clinker, Résistance mécanique, Addition minérale.*

## ABSTRACT

The deterioration of concrete structures results from the corrosion of the steel reinforcement due to the carbonation of concrete and other aggressive agents (chloride ions, acid rain , etc...). The corroded reinforcement steel bars increases in volume, the concrete covering it is affected and hence the construction damage. The design of concrete is highly related to the concrete environment exposure during a project life. The cement is the main source of environmental impacts of the use of such concrete material. In order, to optimize the latter from an environmental point of view, it is necessary to reduce its cement dosage. This can be done by the cement replacement with mineral additions during its manufacturing.

The present thesis work aims to study and better understand the physic-chemical phenomena involved in the hydrated mixture products (clinker + addition) during the natural carbonation process, to characterize cement with a high rate of substitution additions, quantify the effect of initial wet curing maturation on the different physico- chemical and mechanical properties of studied cementitious matrices .The investigation of study here in sheds light on the adequacy of the treatment cure modes on the performances of the mortars and concrete at hardened state.

The parameters so far considered are the type of cement, the nature of the mineral addition and the curing regime mode. The results obtained show the considerable influence of the cure on the physical, mechanical and microstructural characteristics of the cementitious matrices. Further, a perfect correlation between the different parameters studied is noted.

***Keywords:*** Carbonation, Environment, Clinker, Mechanical resistance, Mineral additive.

## المخلص

تدهور الانشاءات ناتج من تآكل حديد التسليح نتيجة لكاربونات الخرسانة وغيرها (أيونات الكلوريد، والأمطار الحمضية ... الخ). تصميم الخرسانة يرتبط إلى حد كبير على البيئة التي سوف تعرض الخرسانة. لذلك من الناحية البيئية من الضروري الحد من محتوى الاسمنت. من أجل تحسين هذا الأخير من وجهة نظر بيئية، يمكن القيام بذلك عن طريق استبدال جزء من الأسمنت مع إضافات معدنية خلال تصنيعه.

ويهدف هذا العمل لدراسة وفهم الظواهر الفيزيائية والكيميائية تشارك في خليط رطب (الكلنكر + إضافة) أثناء عملية الكربنة الطبيعية لوصف ارتفاع معدل الاسمنت من الإضافات ، بتقييم أثر نضج الرطب الأولي على الخصائص الفيزيائية الميكانيكية والكيميائية المختلفة والتحقيق يلقي الضوء على مدى كفاية أداء العلاج الرطب الأولي على الخرسانة. أما عناصر الدراسة فهي نوع الإسمنت وطبيعة الإضافة المعدنية. اظهرت النتائج وجود تأثير على الخصائص الفيزيائية الميكانيكية والمجهرية على الخرسانة.

**كلمات البحث:** البيئة، الكلنكر، المقاومة الميكانيكية، الكربنة الطبيعية، الإضافات المعدنية.

---

## *Sommaire*

---

**Liste des tableaux****Liste des figures****Notations**

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>Le contexte de l'étude</b> .....	3

**Synthèse bibliographique****CHAPITRE 1****LA DURABILITE DANS LE CONTEXTE NORMATIF**

1. Introduction.....	5
1.1. La durabilité des bétons selon la norme NF EN 206-1 et classes d'exposition... ..	5
1.2. Les indicateurs de durabilité.....	6
1.2.1. Les indicateurs généraux de durabilité.....	6
1.2.2. Les indicateurs spécifiques .....	7
1.2.3. Les indicateurs de substitution .....	7
1.2.4. Les essais de performances et caractérisation.....	7
1.3. Etapes de la démarche performantielle.....	8
1.4. Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte algérien.....	8
1.4.1. Facteurs influant la durabilité des bétons en Algérie.....	9
1.4.1.1 La qualité des matériaux.....	9
1.4.1.2. Climat et environnement.....	9
1.4.1.3. L'action sismique.....	10
1.5. Adaptation de l'approche performantielle au contexte Algérien.....	10
1.6. Durabilité et économie.....	12
1.7. Conclusion.....	14

**CHAPITRE 2****PARTIE - A LA CARBONATATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES**

2. Carbonatation des structures en béton.....	15
2.1. Introduction.....	15
2.2. Dioxyde de carbone atmosphérique.....	16
2.3. Processus de carbonatation des bétons .....	16
2.3.1. Dissolution du CO <sub>2</sub> .....	16
2.3.2. Carbonatation de la Portlandite.....	16

---

2.3.3.	Les silicates de calcium hydraté C H S.....	18
2.3.4.	Dissolution des autres constituants du ciment.....	18
2.4.	Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons.....	19
2.4.1.	Paramètres intrinsèques aux bétons.....	19
2.4.1.1.	Rapport eau/ciment (E/C).....	19
2.4.1.2.	Dosage en ciment.....	19
2.4.1.3.	Additions minérales.....	20
2.4.1.4.	Résistance à la compression.....	20
2.4.1.5.	Perméabilité au gaz.....	21
2.4.1.6.	Degré de saturation des pores en eau liquide.....	21
2.4.2.	Paramètres extrinsèques aux bétons.....	21
2.4.2.1.	Cure.....	21
2.4.2.2.	Humidité relative.....	22
2.4.2.3.	Concentration en CO <sub>2</sub> .....	22
2.4.2.4.	Température.....	22
2.5.	Caractérisation expérimentale de la carbonatation.....	23
2.5.1.	Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine.....	23
2.5.2.	Analyse thermogravimétrique ATG.....	24
2.5.3.	Microscopie électronique à balayage «MEB».....	25
2.5.4.	Gammadensimétrie.....	25
2.5.5.	Diffraction des rayons X «DRX».....	25
2.5.6.	Résonance magnétique nucléaire «RMN».....	25
2.6.	Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires.....	25
2.6.1.	Variation de PH.....	25
2.6.2.	Variation de la porosité.....	26
2.6.3.	Retrait de carbonatation.....	26
2.6.4.	Variation de la résistance mécanique.....	26
2.6.5.	Modification de la teneur en eau.....	26
2.6.6.	Modification des propriétés de transfert.....	27
2.6.7.	Carbonatation des bétons contenant des additions minérales.....	27
2.6.8.	Les fissurations.....	27
2.7.	Conclusion.....	29

**PARTIE -B LA CURE DU BETON ; UNE PREVENTION CONTRE  
LA FISSURATION PRECOCE**

2.2.	Définition.....	30
2.3.	Le rôle de la cure vis-à-vis du phénomène de dessiccation.....	30
2.4.	Les différentes étapes du déroulement de la cure.....	31
2.5.	Les différents procédés de cure du béton .....	32
2.5.1.	La cure à l'eau.....	32
2.5.1.1.	L'arrosage continu.....	32
2.5.1.2.	L'immersion de la pièce.....	33
2.5.1.3.	L'utilisation de toiles, paillasons, tous revêtements absorbant.....	33
2.5.1.4.	L'usage de matériaux fins humide (sable).....	33
2.5.2.	La cure par des matériaux d'étanchéité .....	33
2.5.2.1.	L'usage de produits de cure .....	33
2.5.2.2.	L'usage de feuilles étanches .....	33
2.5.2.3.	Le maintien des coffrages.....	34
2.6.	Importance et nécessité de la cure.....	34
2.6.1.	La fragilité du béton frais.....	34
2.7.	Les défauts de cure.....	35
2.7.1.	La fissuration de béton de surface.....	35
2.7.2.	L'hydratation insuffisante du béton.....	35
2.8.	Conclusion.....	37

**CHAPITRE 3**

**MATÉRIAUX ET METHODES**

3.	Programme expérimental.....	38
3.1.	Introduction.....	38
3.2.	Caractérisation des matériaux.....	38
3.2.1.	Le clinker Portland .....	38
3.2.2.	Le gypse.....	39
3.2.3.	Laitier de haut fourneau.....	40
3.2.4.	La pouzzolane.....	41
3.2.5.	Les granulats .....	42
3.2.5.1.	Sable normalisé.....	42

3.2.5.2.	Sable de dune .....	44
3.2.5.3.	Le Gravier.....	44
3.2.5.4.	Caractérisation physico-mécanique des granulats.....	46
3.2.5.5.	Le superplastifiant (SP).....	46
3.2.5.6.	Eau de gâchage.....	46
3.3.	Choix des formulations.....	47
3.3.1.	Préparation des différents mélanges.....	47
3.3.2.	Analyse des ciments.....	49
3.3.2.1.	Analyse chimique du ciment.....	49
3.3.2.2.	Analyse granulométrique du ciment.....	49
3.3.2.3.	Consistance normale et temps de prise.....	51
3.3.3.	Confection et conditions de conservation des éprouvettes.....	51
3.4.	Méthodes expérimental.....	54
3.4.1.	Essai mécanique sur mortier.....	54
3.4.2.	Détection de la profondeur de carbonatation par la phénolphthaléine.....	54
3.4.4.	Essais de caractérisation du béton.....	57
3.4.4.1.	Essais sur le béton à l'état frais.....	57
3.4.4.1.1.	Le malaxage .....	57
3.4.4.1.2.	Affaissement au cône d'Abrams (Slump test) .....	57
3.4.4.1.3.	Serrage du béton.....	57
3.4.4.2.	Essais sur béton durci.....	57
3.4.4.2.1.	Durcissement de béton.....	57
3.4.4.2.2.	Mode de conservation de béton.....	57
3.4.4.2.3.	Essai mécanique sur béton .....	57
3.4.5.	Mesure du taux d'absorption d'eau .....	58

## CHAPITRE 4

### INFLUENCE DE LA CURE SUR LES MATRICES CIMENTAIRES

4.1.	Influence de la cure sur le mortier.....	59
4.1.1.	Influence du type de ciment sur la résistance mécanique (sans cure) à différente ..59 Différente âges	
4.1.2.	Influence du type de cimente sur la profondeur de carbonatation (mm) sans cure à Différente âges.....	62
4.1.3.	Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la résistance à la.....	65

---

Compression (MPa)	
4.1.4. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la profondeur de.....	66
Carbonatation (mm)	
4.2. Résistance à la compression et Profondeur de carbonatation .....	74
4.3 Application au béton standard.....	75
4.3.1 Influence de la cure sur le béton.....	75
4.3.2. Influence du type de ciment et le mode de conservation sur la résistance à la .....	75
Compression du béton (sans cure)	
4.3.3 Influence du type de ciment et le milieu de conservation sur l'absorption du béton...77	
Sans cure	
4.3.4. Influence du type de ciment et le milieu de conservation sur la profondeur de .....	79
Carbonatation sans cure	
4.3.5. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la résistance à la.....	81
Compression (MPa).	
4.3.6. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la résistance à la.....	82
Compression (MPa).	
4.3.7. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la Profondeur de.....	83
Carbonatation (mm)	
4.3.8. Résistance à la compression et Profondeur de carbonatation.....	84
4.3.9. Résistance à la compression et Coefficient d'absorption d'eau (%).....	85
4.3.10. Profondeur de carbonatation et l'absorption d'eau (%) .....	86
4.4. Conclusion .....	87
Conclusion Général .....	88
Références bibliographiques .....	90

---

## *Liste des tableaux*

---

## Liste des tableaux

### CHAPITRE 3

<b>Tableau 3.1</b>	Principaux constituants chimique du clinker (Cimenterie A.T).....	38
<b>Tableau 3.2</b>	Principaux modules caractéristiques du clinker (Cimenterie A.T).....	38
<b>Tableau 3.3</b>	Composition chimique du gypse (Cimenterie A.T).....	39
<b>Tableau 3.4</b>	Composition chimique de laitier (Cimenterie A.T).....	40
<b>Tableau 3.5</b>	Composition chimique de la pouzzolane (Cimenterie A.T).....	41
<b>Tableau 3.6</b>	Analyse Granulométrique de Sable Normalisé.....	43
<b>Tableau 3.7</b>	Analyse granulométrique du sable.....	44
<b>Tableau 3.8</b>	Propriétés physico-mécaniques des granulats.....	46
<b>Tableau 3.9</b>	Composition des différents mélanges (% massique).....	48
<b>Tableau 3.10</b>	Composition chimique des ciments préparés « Fluorescence X » .....	49
<b>Tableau 3.11</b>	la composition minéralogique des ciments étudiés.....	50
<b>Tableau 3.12</b>	Caractéristiques des ciments.....	51
<b>Tableau 3.13</b>	Mélanges, constituants et propriétés du béton frais (Kg/m <sup>3</sup> ).....	53

---

## *Nomenclature des figures*

---

## Nomenclature des figures

### Chapitre 1

Figures	Intitulé	Page
Figure 1.1	<i>L'approche performantielle proposée au contexte de L'Algérie</i>	12

### Chapitre 2

Figures	Intitulé	Page
Figure 2.1	<i>Augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à l'échelle mondiale</i>	16
Figure 2.2	<i>Mécanisme de carbonatation de Ca(OH)<sub>2</sub></i>	17
Figure 2.3	<i>Variation des quantités de portlandite et de carbonate de calcium avec la durée d'exposition en air (20°C, 65 %HR)</i>	18
Figure 2.4	<i>Evolution de la carbonatation en Fonction du rapport E/C pour différentes conditions De cure, d'après</i>	19
Figure 2.5	<i>Evolution de la profondeur carbonatée en fonction de la racine carrée du Temps</i>	19
Figure 2.6	<i>Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment</i>	20
Figure 2.7	<i>relation entre résistance à la compression à 28 jours Et profondeur carbonatée</i>	21
Figure 2.8	<i>Vitesse de carbonatation d'un matériau cimentaire en fonction de l'humidité relative d'équilibre du milieu environnant</i>	22
Figure 2.9	<i>Les trois zones caractéristiques (carbonatée, mixte, saine)</i>	23
Figure 2.10	<i>Gradient de pH au niveau du front de carbonatation</i>	24
Figure 2.11	<i>schéma de dégradation des armatures au cours du temps</i>	26
Figure 2.12	<i>Mesure par gamma densimétrie du taux de saturation</i>	27
Figure 2.13	<i>Fissuration</i>	28
Figure 2.14	<i>Evolution de l'évaporation suivant le mode cure</i>	31
Figure 2.15	<i>Différentes étapes de la cure des bétons pour des opérations de construction Sous des conditions idéales</i>	32
Figure 2.16	<i>exemple de cure à l'eau du tablier d'un pont la maîtrise de la fissuration à jeune âge</i>	33
Figure 2.17	<i>Arrosage continue</i>	34
Figure 2.18	<i>Pulvérisation du produit De cure à la surface du béton</i>	34
Figure 2.19	<i>Usage d'un polyane recouvrant La surface du béton</i>	34
Figure 2.20	<i>Maintien des coffrages en Place</i>	34

<b>Figure 2.20</b>	<i>Evolution de la pâte Interstitielle du béton frais</i>	35
<b>Figure 2.21</b>	<i>Fissure de retrait de plastique</i>	35
<b>Figure 2.22</b>	<i>L'altération du béton d'enrobage Modèle de POWERS</i>	36

### Chapitre 3

<b>Figures</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 3.1</b>	<i>Composition minéralogique de gypse.</i>	39
<b>Figure 3.2</b>	<i>Gypses broyés</i>	39
<b>Figure 3.3</b>	<i>Composition minéralogique de laitier</i>	40
<b>Figure 3.4</b>	<i>Laitier broyés</i>	41
<b>Figure 3.5</b>	<i>Composition minéralogique de la pouzzolane naturelle (Cimenterie A.T)</i>	42
<b>Figure 3.6</b>	<i>La pouzzolane broyée</i>	42
<b>Figure 3.7</b>	<i>Sable Normalisé</i>	43
<b>Figure 3.8</b>	<i>Analyse Granulométriques de Sable Normalisé</i>	43
<b>Figure 3.9</b>	<i>La courbe granulométrique du sable (0/5)</i>	44
<b>Figure 3.10</b>	<i>La courbe granulométrique des graviers (3/8)</i>	45
<b>Figure 3.11</b>	<i>La courbe granulométrique des graviers (8/16).</i>	45
<b>Figure 3.12</b>	<i>Appareil à l'eau distillé</i>	47
<b>Figure 3.13</b>	<i>Appareil granulométrie à laser de type MASTERSIZER (Lafarge)</i>	49
<b>Figure 3.14</b>	<i>Granulométrie des ciments de mortier</i>	50
<b>Figure 3.15</b>	<i>Malaxeur automatique de mortier (Laboratoire Cimenterie A.T).</i>	52
<b>Figure 3.16</b>	<i>La chambre humide (Laboratoire de Cimenterie A.T).</i>	52
<b>Figure 3.17</b>	<i>Des échantillons de la pâte pure et mortier Laboratoire de Cimenterie de A .T</i>	52
<b>Figure 3.18</b>	<i>Machine de Compression (Cimenterie de A.T)</i>	54
<b>Figure 3.19</b>	<i>Profondeur de carbonatation par la phénolphaléine</i>	55
<b>Figure 3.20</b>	<i>Dispositif utilisé pour l'analyse thermogravimétrique.</i>	56
<b>Figure 3.21</b>	<i>Organigramme du programme expérimental</i>	56
<b>Figure 3.22</b>	<i>Appareil de mesure de la résistance à la compression (laboratoire de Génie Civil).</i>	58

## Chapitre 4

<b>Figures</b>	<b>Intitulé</b>	<b>Page</b>
<b>Figure 4.1</b>	<i>Résistance à la traction par flexion à l'eau.</i>	60
<b>Figure 4.2</b>	<i>Résistance à la traction par flexion à l'air</i>	60
<b>Figure 4.3</b>	<i>Résistance à la compression à l'eau</i>	61
<b>Figure 4.4</b>	<i>Résistance à la compression à l'air.</i>	62
<b>Figure 4.5</b>	<i>Profondeur de carbonatation à l'air à 1 an</i>	63
<b>Figure 4.6</b>	<i>Profondeur de carbonatation à l'eau</i>	64
<b>Figure 4.7</b>	<i>Profondeur de carbonatation à l'air</i>	64
<b>Figure 4.8</b>	<i>Effet du régime de cure humide sur la résistance à la compression des ciments à un an.</i>	66
<b>Figure 4.9</b>	<i>Effet du régime de cure humide sur la profondeur de carbonatation des ciments de mortier à un an</i>	68
<b>Figure 4.10</b>	<i>TG / ATD la pâte de ciment conservé à la chambre humide (HR = 95 °, T = 20 ° C) pour 2 jours; (a): CPA / (b): CRS / (c): CL30% (30% laitier) / (d): CZ3% (30% pouzzolane)</i>	69
<b>Figure 4.11</b>	<i>TG / ATD la pâte de ciment conservé à l'air pour 2 jours (HR = 65 °, T = 20 ° C); (e): CPA / (f): CRS / (g): CL30% (30% laitier) / (h): CZ3% (30% pouzzolane)</i>	70
<b>Figure 4.12</b>	<i>TG / ATD la pâte de ciment conservé à l'air (HR = 65 °, T = 20 ° C) pour 28 jours (e'): CPA - (f'): CRS - (g'): CL30% (30% laitier), (h'): CZ3% (30% pouzzolane)</i>	70
<b>Figure 4.13</b>	<i>TG / ATD la pâte de ciment conservé à la chambre humide (HR = 95 °, T = 20 ° C) pour 28 jours : CPA - (a'): CRS - (b'): CL30% (30% laitier), (c'): CZ3% (30% pouzzolane) (d').</i>	71
<b>Figure 4.14</b>	<i>Teneur en portlandite des pâtes de ciments conservé dans la chambre humide</i>	72
<b>Figure 4.15</b>	<i>Teneur en portlandite des pâtes de ciments conservé à l'air</i>	73
<b>Figure 4.16</b>	<i>Teneur en portlandite en fonction du milieu de cure pour tous les types de ciment.</i>	73
<b>Figure 4.17</b>	<i>Résistance à la compression en fonction du Profondeur de carbonatation à l'âge d'un an</i>	74
<b>Figure 4.18</b>	<i>Résistance à la compression à 1 an en fonction de la teneur de portlandite à 28 jours.</i>	74
<b>Figure 4.19</b>	<i>Profondeur de carbonatation à 1 an en fonction de la teneur en portlandite à 28 jours</i>	75
<b>Figure 4.20</b>	<i>Résistance à la compression en fonction de l'âge à l'eau</i>	76
<b>Figure 4.21</b>	<i>Résistance à la compression en fonction de l'âge à l'air</i>	76
<b>Figure 4.22</b>	<i>Coefficient d'absorption d'eau en fonction de l'âge à l'eau</i>	78
<b>Figure 4.23</b>	<i>Coefficient d'absorption d'eau en fonction de l'âge à l'air</i>	78
<b>Figure 4.24</b>	<i>Profondeur de carbonatation du béton conservé à l'air 1 an</i>	80
<b>Figure 4.25</b>	<i>Profondeur de carbonatation en fonction du type de béton à l'air</i>	81

<b>Figure 4.26</b>	<i>Effet du régime de cure humide sur la résistance à la compression à 90jours</i>	82
<b>Figure 4.27</b>	<i>Effet du régime de cure humide sur le C.A.E (%) à 90jours</i>	83
<b>Figure 4.28</b>	<i>Effet du régime de cure humide sur la profondeur de carbonatation (mm) à 1an.</i>	84
<b>Figure 4.29</b>	<i>Résistance à la compression en fonction du Profondeur de carbonatation.</i>	85
<b>Figure 4.30</b>	<i>Résistance à la compression en fonction du Coefficient d'absorption d'eau(%).</i>	86
<b>Figure 4.31</b>	<i>Profondeur de carbonatation en fonction du Coefficient d'absorption d'eau</i>	86

---

## *Notations*

---

## Notations

**Cimenterie A.T** ; Cimenterie de Ain Touta ( W Batna).

**M h** ; Module hydraulique.

**M s** ; Module silicique.

**M af** ; Module Alumino- Ferrique.

**M sat** ; Module de saturation.

**Lafarge** ; Cimenterie de Lafargeholcim (Hamamedelaa).

**CPA= CEMI 52.5** : ciment Portland artificiel (sans addition) = 0/clinker = 0/100.

**CRS= CEMII 42.5** : ciment résistant au sulfate (Addition Secondaire) AS/clinker=07/93.

**CL30%** = **CEMII/B-S32.5** : ciment avec addition de laitier = L/clinker = 30/70.

**CZ30%** = **CEMII/B-P32.5** : ciment avec addition de pouzzolane = PZ/clinker= 30/70.

**BT** ; Béton témoin sans addition minérale.

**BL15%** ; Béton avec un teneur de laitier (15%) du poids de ciment.

**BZ15%** ; Béton avec un teneur de pouzzolane (15%) du poids de ciment.

**BL30%** ; Béton avec un teneur de laitier (30 %) du poids de ciment.

**BZ 30%** ; Béton avec un teneur de pouzzolane (30 %) du poids de ciment.

**C.A.E (%)** ; Coefficient d'absorption d'eau.

**Eau- MT** ; Mortier (sans cure) conservé à l'eau.

**Air-MT** ; Mortier (sans cure) conservé à l'air.

**Air-MC3J** ; Mortier (avec une cure 3 jours) conservé à l'air.

**Air-MC7J** ; Mortier (avec une cure 7 jours) conservé à l'air.

**Air-MC28J** ; Mortier (avec une cure 28 jours) conservé à l'air.

**Eau-BT** ; Béton (sans cure) conservé à l'eau.

**Air-BT** ; Béton (sans cure) conservé à l'air.

**Air-BC3J** ; Béton (avec une cure 3 jours) conservé à l'air.

**Air-BC7J** ; Béton (avec une cure 7 jours) conservé à l'air.

**Air-BC28J** ; Béton (avec une cure 28 jours) conservé à l'air.

---

## *Introduction Générale*

---

## INTRODUCTION GENERALE

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...), c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétique. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours du temps.

Les altérations du béton sont variées. Elles atteignent soit la matrice cimentaire soit les armatures, parfois les deux. Leurs origines sont très nombreuses : chaque étape depuis la formulation, jusqu' à sa mise en œuvre, mais aussi l' agressivité de l' environnement peuvent être source de dégradation. La corrosion des armatures est la première cause de désordres affectant le domaine de bâtiment. La corrosion des armatures peut avoir comme origine la carbonatation du béton d'enrobage.

Ce processus de carbonatation se manifeste par une succession de mécanismes physicochimiques. La pénétration du CO<sub>2</sub> dans le matériau et sa diffusion dans les pores, sa réaction avec les produits d'hydratation du ciment, principalement la portlandite qui joue un rôle de tampon sur le pH. Les différentes formes de carbonates formées (calcite, vaterite, aragonite) peuvent être considérés comme bénéfiques dans le sens où ils obturent partiellement les pores du béton et augmentent sa résistance à la diffusion d'agents agressifs.

On parle communément de 5 principales causes physico-chimiques de dégradation.

- ✓ **La carbonatation,**
- ✓ L'attaque par les chlorures,
- ✓ L'attaque par les sulfates,
- ✓ Les cycles gel-dégel,
- ✓ L'alcali-réaction.

Une des conséquences principales de la carbonatation est de favoriser la corrosion des armatures, lorsque le front de carbonatation les atteint. En effet, les armatures, passivées dans le béton sain de fort pH, ne sont plus protégées dans le béton carbonaté. Quand le processus de dégradation est fort, la rouille provoque l'éclatement du béton d'enrobage et laisse apparaître, à partir d'épaufrures, les armatures oxydées.

De nombreux chercheurs [9-10] se sont intéressés à l'influence des paramètres tels que la composition chimique et les caractéristiques physiques (porosité, perméabilité, résistance) du Béton, les conditions climatiques (température, humidité), la formation des carbonates de calcium sur la vitesse de carbonatation du béton ou encore la durée de cure.

On entend par la cure du béton tout procédé susceptible de maintenir une humidité et une température favorables à l'hydratation du ciment, durant une période bien définie (3 à 7 jours). Elle permet au béton de développer les propriétés requises, telles que, la durabilité, la résistance au gel/dégel, la résistance en compression, ...etc.

L'objectif de la cure est de prévenir la perte d'eau du béton et, si nécessaire, l'approvisionnement en eau supplémentaire et de maintenir une température favorable au matériau pour une période de temps suffisante, pour bien s'hydrater. Si la quantité d'eau initialement contenue dans le béton (eau de gâchage) parvient à maintenir une hydratation suffisante pour le développement des propriétés mécaniques du béton alors une cure est nécessaire pour s'assurer que cette eau de gâchage reste dans le béton jusqu'à ce que les propriétés recherchées soient atteintes. La cure est nécessaire dès que le béton est soumis au séchage car le séchage peut entraîner des dommages au béton ou empêcher le développement des propriétés requises.

Un contexte normatif et réglementaire encadre désormais l'utilisation du matériau béton. Les normes pour le béton, d'une part, et les normes pour les produits en béton, d'autre part, ainsi que les recommandations constituent un ensemble cohérent, homogène, logique et complet qui permet de prendre en compte, dès la conception, tous les critères de durabilité. Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages.

Les additions minérales sont largement utilisées comme substituant du ciment Portland dans la confection du béton, afin d'améliorer les propriétés mécaniques, de durabilité et l'apport économique et écologique. Pour cela, leur utilisation s'avère plus bénéfique par rapport au ciment ordinaire, néanmoins le développement faible de ses résistances au jeune âge demeure une préoccupation importante des chercheurs. Pour surmonter ce problème, plusieurs travaux ont été entamés pour améliorer la résistance au jeune âge du ciment sans toutefois nuire à ses meilleures performances. La cure humide, dans le but d'améliorer l'hydratation du ciment et remédier au problème soulevé surtout face à la carbonatation naturelle.

L'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. Ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis.

Nous avons fixé un objectif pour quantifier l'influence de la carbonatation naturelle sur les propriétés physico mécanique et les caractéristiques microstructurales du ciment.

En effet, il s'agit de mettre en évidence expérimentalement à partir des effets de la carbonatation sur la résistance mécanique et le coefficient d'absorption d'eau.

L'objectif final est de fournir des éléments quantitatifs pour une meilleure maîtrise de la durée de vie des ouvrages en béton. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes particulièrement intéressés à mesurer ces paramètres de durabilité sur les différentes matrices étudiées carbonaté et non carbonaté afin de tenter de mettre en évidence l'influence de la carbonatation sur certain propriétés du béton durci.

### **CONTEXTE DE L'ETUDE**

Le problème de fissuration précoce et la carbonatation naturelle est fréquemment résolu par la cure du matériau à l'état plastique. La cure protège le béton à un moment où ce dernier est sujet à ces problèmes au très jeune âge, il est impératif de contrôler la qualité du béton pour garantir l'esthétique et la durabilité des matériaux cimentaires.

C'est dans ce souci que notre travail de recherche trouve son importance Il vise à mettre en lumière des mécanismes physico-mécaniques qui régissent le comportement du mortier et du Béton, tout d'abord d'essayer de quantifier expérimentalement l'effet de la carbonatation naturelle Nous proposerons pour cela une campagne expérimentale qui a pour objectif est de confirmer les observations expérimentales. Enfin, pour nous inscrire dans les préoccupations vis-à-vis la durabilité des ouvrages. Il s'agit également d'étudier et de faire ressortir, non seulement, des paramètres de formulation (rapport E/C, type de ciment, le type d'addition minérale...etc.), mais aussi les conditions de séchage et les effets de la cure, qui ont une influence sur le comportement du matériau en cours d'hydratation. Les différents éléments, liés au comportement du matériau, qui seront identifiés, permettront par la suite l'analyse du matériau.

Cette thèse s'articule sur cinq chapitres :

- ✓ Le premier chapitre présente un état d'art sur la durabilité, les indicateurs et les critères généraux qui reposent sur une nouvelle approche performantielle de la durabilité. L'approche performantielle est une démarche globale qui permet de prendre en compte tous les aspects techno-économiques spécifiques. Nous essayons de voir les possibilités d'application et de son adaptation au contexte de l'Algérie dans le but d'éviter les techniques de réparation souvent très employées et qui causent des pertes économiques colossales.

- ✓ le deuxième chapitre présente les phénomènes physico-chimiques auront lieu lors du processus de carbonatation de bétons à un taux de remplacement du ciment. Nous nous sommes focalisés sur l'effet de la carbonatation qui intéresse la quasi-totalité des parements en béton exposés à l'atmosphère. La carbonatation traduit l'action de diffusion du  $\text{CO}_2$  dans les pores du béton et les réactions consécutives de dissolution/précipitation avec les hydrates, notamment de la portlandite, les paramètres influençant la carbonatation ainsi les conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires sont présentées.

Nous exposons aussi dans ce chapitre l'effet de cure humide sur le comportement du ciment dans les constructions en combinaison avec d'autres facteurs, le mode, les procédés de cure, les paramètres qui influe, dans le but d'améliorer les performances De notre ciment.

- ✓ Dans le troisième chapitre, nous présentons les différentes caractéristiques des matériaux utilisés dans l'expérimentation ainsi les normes utilisés. Les techniques expérimentales détaillées dans ce chapitre, la caractérisation physique, chimique des matériaux. Nous exposons aussi dans ce chapitre les différents matériels qui ont servi à la mise en place des essais.
- ✓ Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats expérimentaux de différentes matrices étudiées et les essais effectués, les résultats obtenus comme conclusion. Au terme de cet exposé, nous tirerons quelques conclusions, recommandations et nous Indiquerons les voies qui nous semblent possibles, pour le développement futures.

---

***CHAPITRE 1***  
***La durabilité dans le***  
***contexte normatif***

---

## CHAPITRE 1 LA DURABILITE DANS LE CONTEXTE NORMATIF

### 1. Introduction

Il est possible désormais de définir des objectifs de durabilité et de choisir avec précision les caractéristiques du béton en fonction de l'agressivité du milieu dans lequel se trouve l'ouvrage et d'optimiser ses caractéristiques afin de les adapter à la durée d'utilisation souhaitée. Les spécifications concernent la nature et le dosage minimal en ciment, la compacité minimale, la valeur maximale du rapport Eau/Ciment, l'enrobage minimal des armatures et la teneur maximale en chlorures dans le béton.

Un contexte normatif et réglementaire encadre désormais l'utilisation du matériau béton. Les normes pour le béton, d'une part, et les normes pour les produits en béton, d'autre part, ainsi que les recommandations constituent un ensemble cohérent, homogène, logique et complet qui permet de prendre en compte, dès la conception, tous les critères de durabilité. Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages [1].

#### 1.1. La durabilité des bétons selon la norme NF EN 206-1 et classes d'exposition

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. Les environnements sont redéfinis et pour chacun de ces environnements ou « expositions », l'obligation de moyens et l'obligation de résultats sont présentés comme deux alternatives (AFNOR NF EN 206-1) [1].

La norme NF EN 206-1 définit des classes d'exposition en fonction des actions dues à l'environnement auxquelles les bétons de l'ouvrage ou de la partie de l'ouvrage vont être soumis pendant leur durée de service [1].

- Classe XO : aucun risque de corrosion ou d'attaque.
- Classe XC : corrosion induite par carbonatation.
- Classe XD : corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine.
- Classe XS : corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer.
- Classe XF : attaque gel / dégel avec ou sans agent de déverglaçage.
- Classe XA : attaques chimiques.

Pour chaque ensemble, les classes sont définies par des indices, selon des niveaux de risque croissants. Selon ces définitions des classes, un environnement donné peut correspondre à plusieurs classes d'exposition, par exemple XC (carbonatation) et XD (chlorures issus de sels de déverglaçage). A l'inverse, une même classe d'exposition peut

correspondre à plusieurs actions environnementales et mécanismes de dégradation, par exemple la classe XF2 : Attaque gel/dégel, saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage [1].

## 1.2. Les indicateurs de durabilité

Ils sont choisis sur la base, d'une part de leur pertinence théorique dans la quantification et la prévision de la durabilité (par exemple propriétés de transport impliquées dans les équations fondamentales), et d'autre part, de leur aptitude à être déterminés de façon fiable et facile, au moyen de méthodes de laboratoire bien définies et reproductibles. Ces paramètres qui apparaissent comme fondamentaux dans l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation considéré [2].

Ces paramètres doivent être aisément quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur des éprouvettes ou sur des prélèvements, de façon reproductible et selon des modes opératoires bien définis.

Trois catégories d'indicateurs de durabilité sont distinguées dans le guide **AFGC (association française de génie civil)**[3].

- les **indicateurs de durabilité généraux** (valables pour la plupart des dégradations).
- les **indicateurs de durabilité spécifiques** à un processus de dégradation donné (par Exemple l'alcali-réaction).
- les **indicateurs de substitution**.

### 1.2.1. Les indicateurs généraux de durabilité

Les indicateurs de durabilité généraux sont des paramètres déterminants pour la durabilité des bétons, utilisables aussi bien pour la prévention de la corrosion des armatures, de l'alcali-réaction ou de toute autre dégradation. Le nombre de ces paramètres est très petits et ils sont complémentaire et ne sont pas systématiquement nécessaires pour chaque cas pratique.

Les indicateurs généraux définis dans le guide AFGC sont les suivants :

- la porosité accessible à l'eau (mode opératoire AFPC-AFREM, 1997) [4].
- le coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure (mode opératoire).  
RGCU Grandubé, 2007 ) [5].

- la perméabilité aux gaz (mode opératoire AFPC-AFREM, 1997) [4].

– la perméabilité à l'eau liquide.

- la teneur en portlandite [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] (mode opératoire RGCU Grandubé, 2007)[5].

Selon le processus de dégradation considéré, il peut s'avérer nécessaire de compléter Le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques à ce processus.

### 1.2.2. Les indicateurs spécifiques

Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques retenus peuvent être classés en deux catégories :

- **les indicateurs chimiques** (relatifs aux constituants du béton) spécifiques à l'alcali-réaction
- **les indicateurs globaux et macroscopiques** (relatif au béton durci).

Le guide AFGC introduit également la notion d'indicateurs de substitution. La démarche proposée ayant pour vocation de rester très souple et modulable afin de s'adapter aux besoins de chaque utilisateur, il peut être envisagé de remplacer la détermination directe de certains des indicateurs de durabilité généraux proposés par celle de paramètres de substitution.

Les indicateurs de substitution pourront être utilisés directement (notamment pour un simple classement de bétons, à condition bien entendu qu'un système de classement soit disponible) ou permettre, via des méthodes indirectes, d'accéder aux indicateurs de durabilité généraux

### 1.2.3. Les indicateurs de substitution

Les indicateurs généraux de durabilité peuvent être substitués, après accord du maître d'ouvrage, par des paramètres qui sont plus facile à déterminer, plus spécifiques aux problèmes posés ou plus adaptés aux modèles mis en œuvre ces paramètres sont comme suit :

- la porosité accessible au mercure (mode opératoire RGCU Grandubé , 2007)[5].
- la résistivité électrique [6] à noter que ce paramètre est considéré comme un des indicateurs de base dans l'approche performantielle développée par l'Institut des sciences de la construction) [7].
- la quantité d'électricité selon l'essai AASHTO (norme ASTM C1202) [8] .
- le coefficient de diffusion du CO<sub>2</sub> [9].
- le coefficient de diffusion de l'eau [10].
- le coefficient d'absorption capillaire (mode opératoire AFPC-AFREM, 1997) [4].

### 1.2.4. Les essais de performances et caractérisation

Les essais de performance ont pour vocation première de permettre un classement pertinent des bétons vis-à-vis de leur résistance à une agression particulière. Ces essais sont conçus pour accroître l'intensité de la sollicitation, qu'elle soit physique ou chimique. La difficulté dans la mise au point de ces essais est de ne pas provoquer de phénomènes parasites du fait de la méthode d'accélération. Ces essais consistent à disposer les échantillons de béton dans un milieu tel que la quantité de béton qui réagit par unité de temps est importante : carbonatation accélérée, essai de performance pour l'alcali-réaction, essai de lixiviation à pH constant. [11] Certains essais utilisent les deux principes. [12-13].

### 1.3. Etapes de la démarche performantielle

La démarche performantielle se déroule en général de la manière suivante

- Définition de la catégorie de l'ouvrage en déterminant son importance économique Et stratégique, en particulier en sélectionnant la **durée de vie exigée**,
- Définition des conditions environnementales incluant par exemple le type d'agressivité, les variations de l'humidité,... etc.
- Définition des risques de dégradation : corrosion des armatures, alcali réaction,...
- Choix des indicateurs de durabilité et des caractéristiques du matériau en fonction Des caractéristiques de l'ouvrage, de son environnement et des dispositions Constructives.
- Sélection des spécifications relatives aux indicateurs de durabilité en fonction de L'importance de l'ouvrage, du type d'environnement, de la durée de vie exigée et Des dispositions constructives ;
- Réalisation des essais de laboratoire sur béton suivant un mode opératoire bien Déterminés, sur des éprouvettes conservées dans des conditions précises et pendant Une durée préconisée;
- Choix d'un modèle prédictif de durée de vie où les indicateurs de durabilité Paraissent comme des données d'entrée [14].

### 1.4. Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte algérien

D'après l'étude de **Oualit** [15] sur la durabilité des matériaux cimentaires et des bétons en particulier une approche performantielle fondée sur la notion d'indicateurs de durabilité adaptée au contexte de l'Algérie. La non-prise en charge de la problématique de la durabilité qui est pour objectif de comprendre les principes physico-chimiques associés aux différents types d'agressions des structures en béton, comprendre l'effet des principaux paramètres environnementaux qui influencent l'ampleur des dégradations. La compréhension de ces phénomènes permettra de formuler un béton durable dès la phase de conception, susceptibles de protéger les ouvrages en béton armé contre une dégradation donnée, pendant une durée de vie fixée et dans des conditions environnementales bien précises, se référant à une approche performantielle fondée sur la notion d'indicateurs et sur la spécifications de critères performantiels . Cette approche est une méthodologie novatrice structurée en différentes étapes, dont l'usage devrait se systématiser dans l'avenir en Algérie en remplacement aux techniques de réparations souvent employées qui engendrent des pertes économiques colossales.

### **1.4.1. Facteurs influant la durabilité des bétons en Algérie**

Selon **Oualit** [15] les études et les expertises munies par différents chercheurs et organismes spécialisés en la matière, on peut conclure que les principaux facteurs qui influent sur la durabilité du béton et des ouvrages en béton et béton armé en **Algérie**, sont essentiellement liés à :

#### **1.4.1.1 La qualité des matériaux**

Pour mettre en évidence des lacunes et des manquements qui ont des conséquences sur les performances du béton, et par voie de conséquence sur sa durabilité, notamment à moyen et à long terme. Les règles de l'art permettant d'assurer les qualités de fabrication et de mise en œuvre du béton ne sont pas systématiquement observées dans la pratique sur les chantiers du bâtiment.

#### **1.4.1.2. Climat et environnement**

La zone maritime, qui génère des embruns marins et une importante humidité relative sur l'ensemble de la bande côtière qui constitue le littoral, la zone chaude et semi-aride concerne principalement la région des hauts plateaux, puis celle qui couvre le Sahara correspondant à un climat très sec avec des températures élevées notamment en été. Pour ce climat, la prédominance de la chaleur caractérisée par un fort gradient thermique est à relever dans l'ensemble. Concernant l'environnement, il y a lieu de relever la présence des **chlorures** sur tout le littoral, la **carbonatation** dans les zones urbaines et industrielles, ce qui va engendrer le phénomène de la **corrosion des armatures** ainsi que l'existence de **sulfates** dans les sols Dans les régions du sud en particulier.

Le climat Algérien est intermédiaire entre le climat tempéré humide et le climat désertique. Il est caractérisé par une pluviométrie régissant le régime des eaux souterraines et superficielles caractérisé par deux saisons pluvieuses (une dominante en automne, une secondaire au printemps). Le climat est caractérisé également par des précipitations irrégulières à l'échelle journalière, annuelle et interannuelle, et une sécheresse estivale forte Le Climat, méditerranéen au nord et désertique au sud un climat méditerranéen couvre le nord, tandis qu'un climat désertique règne sur le sud. Durant l'été, les mois les plus chauds sont juillet et août, [15]. Au centre, dans les montagnes de Kabylie et des Aurès ainsi que dans les hauts plateaux de la région de Djelfa, la température avoisine les 5 °C voire -7 °C en hiver. La neige y est fréquente en hiver. La température estivale varie de 35 °C à 45 °C. Le relief de l'Algérie est constitué de trois grands ensembles : le Tell au nord, les hauts plateaux et l'Atlas saharien au centre, et le Sahara au sud.

### 1.4.1.3. L'action sismique

A tous ces facteurs cités agissant sur la durabilité s'ajoute, les agressions des secousses sismiques au nord du pays, qui provoque des fissures et des microfissures due aux vibrations, ce qui facilite la pénétration des agents agressifs.

-Il est utile de signaler d'autres facteurs de dégradation tels :

- Mauvaise conception.
- Absence d'entretien.

## 1.5. Adaptation de l'approche performantielle au contexte Algérien

Ce présent travail a permis de sérier les facteurs à prendre en compte pour l'appréhension de la problématique de la **durabilité des bétons en Algérie**. Ces facteurs sont essentiellement **le climat, l'environnement, les agressions chimiques** ainsi que **l'aléa sismique** dans les régions à forte sismicité et de proposer par la suite une méthodologie générale, structurée en différentes étapes ou modules (processus).

Cette approche **novatrice** propose de fournir à l'ingénieur et au concepteur une « méthodologie » pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité, sur la base d'un petit nombre de propriétés du matériau béton. Ces propriétés ont une signification physique précise et sont facilement accessibles par des méthodes bien définies et validées (**Figure 1.1**).

-Par rapport à la corrosion des armatures et l'alcali-réaction relatives aux indicateurs de durabilité sélectionnés, en fonction de la durée de vie exigée pour la structure et de son type d'environnement. Ainsi, les « recommandations » proposées permettent de spécifier des durées de vie (par exemple 30, 50, 100, 120 ans ou plus) pour les ouvrages en béton, les deux pathologies sont très fréquentes dans notre pays compte tenu des conditions climatiques et environnementales [15].

-la deuxième pathologie prise en considération qui est l'alcali-réaction, même si ce type d'agression est rarement rencontré en Algérie, il a été jugé utile de la maintenir en raison de la gravité des dégâts causés par cette agression et de le prendre comme mesure de sécurité sur les granulas locaux employés

-Cependant, l'incorporation de critères performantiels spécifiques est nécessaire afin de lutter contre d'autres pathologies existantes en Algérie et que cette approche n'a pas pris en compte tel que l'effet de la chaleur intense et l'influence des attaques sulfatiques ainsi que l'aléa sismique qui provoque des fissures et microfissures ce qui facilite la pénétration des agents agressifs et par conséquent, compromettre la durabilité de l'ouvrage et remis en cause toutes les théories mentionnées par l'approche.

-Enfin, Il est important de souligner que ce type de démarche et les spécifications correspondantes, aussi élaborés, rigoureux et précis soient-t-ils, ne pourront porter leurs Fruits que si les recommandations pour une mise en œuvre correcte du béton et le contrôle d'exécution sont appliqués avec la même rigueur [15].



**Figure 1.1 :** L'approche performantielle proposée au contexte de L'Algérie [15].

## 1.6. Durabilité et économie

La durabilité est un objectif de qualité pour l'ingénieur, et le métier de ce dernier consiste à atteindre les objectifs fixés au moindre coût. Il en résulte deux règles qui permettent de concilier au mieux économie et durabilité.

- ✓ *Règle 1* : l'expérience du temps : Toute innovation doit être évaluée par comparaison avec ce qui est connu pour avoir subi avec succès l'épreuve du temps.
- ✓ *Règle 2* : la communication des règles de comparaison : Les règles de comparaison entre l'innovant et le traditionnel doivent donner lieu à une délibération intra et interprofessionnelle en vue de déterminer celle qui, à chaque époque, paraissent les mieux adaptées.

De nos jours, l'application de la règle 1 se fait principalement dans les laboratoires et la règle 2 se traduit par l'élaboration de normes, de codes et de règlements. Le fondement d'une approche économique de la durabilité réside donc dans le lien nécessaire entre les résultats expérimentaux et le cadre normatif [16].

### 1.7. Conclusion

La démarche performantielle constitue actuellement un outil indispensable et permet de spécifier dès la phase de conception, notamment pour les projets importants, des critères performantiels très pertinents et objectifs en matière de durabilité.

cette démarche performantielle permettra de disposer des formules de références régionales en tenant compte des indicateurs de durabilité, ces derniers sont déterminés en fonction des caractéristiques des matériaux locaux, du taux d'agressivité du milieu et de la nature de vie exigée.

les actions environnementales envisagées dans les classes d'expositions de la norme EN 206-1 et existant en Algérie, et cet état de l'art permis d'identifier parmi ces actions, celle qui nécessitent de justifier des choix d'essais ou de méthodes ou de les développer ; la carbonatation, la pénétration des ions chlorures, les attaques sulfatiques externes, l'action de l'eau de mer, la lixiviation et l'action de l'eau de pluie etc.

---

***CHAPITRE 2***

***PARTIE - A***

***La carbonatation des matériaux cimentaires***

---

**CHAPITRE 2****PARTIE - A LA CARBONATATION DES MATERIAUX CIMENTAIRES****2. Carbonatation des structures en béton****2.1. Introduction**

Les exigences relatives à la durabilité sont définies dans les normes et recommandations de conception des produits telles que l'EN 206-1.

De nombreux phénomènes environnementaux sont connus pour influencer de manière significative la durabilité des structures en béton armé [17-18-19]. La carbonatation est l'un des facteurs principaux de détérioration des structures en béton armé exposées à l'atmosphère et plus encore pour les structures exposées à de fortes concentrations de dioxyde de carbone comme les tunnels routiers, les ouvrages urbains, les parkings souterrains, etc.

Le dioxyde de carbone pénètre dans le béton par le réseau poreux ou fissural. Sa diffusion à travers la structure poreuse du béton est conditionnée par l'état hygroscopique des pores du matériau. Selon [20] deux types de pénétration du dioxyde de carbone peuvent coexister :

- par l'intermédiaire de la phase liquide lorsqu'il y a transfert d'eau chargée en dioxyde de carbone dissous ou lorsque l'eau est déjà présente par diffusion en phase aqueuse ;
- par l'intermédiaire de la phase gazeuse lorsque le réseau poreux accessible est désaturé. Le dioxyde de carbone se dissout dans la solution interstitielle et provoque une décalcification de la pâte de ciment hydratée. Les ions calcium issus notamment de l'hydroxyde de calcium (portlandite)  $\text{Ca(OH)}_2$  et des gels de C-S-H, passent en solution pour se combiner avec les ions carbonates et former de la calcite  $\text{CaCO}_3$ .

En raison de la consommation de la réserve basique que constitue la portlandite, la carbonatation abaisse le pH de la solution interstitielle du béton (initialement entre 12,5 et 13,5) jusqu'aux environs de 8,5. La carbonatation réduit la porosité du béton et augmente la résistance mécanique, ce qui constitue un effet positif, mais d'autre part conduit à une baisse du pH et à la dépassivation de l'acier.

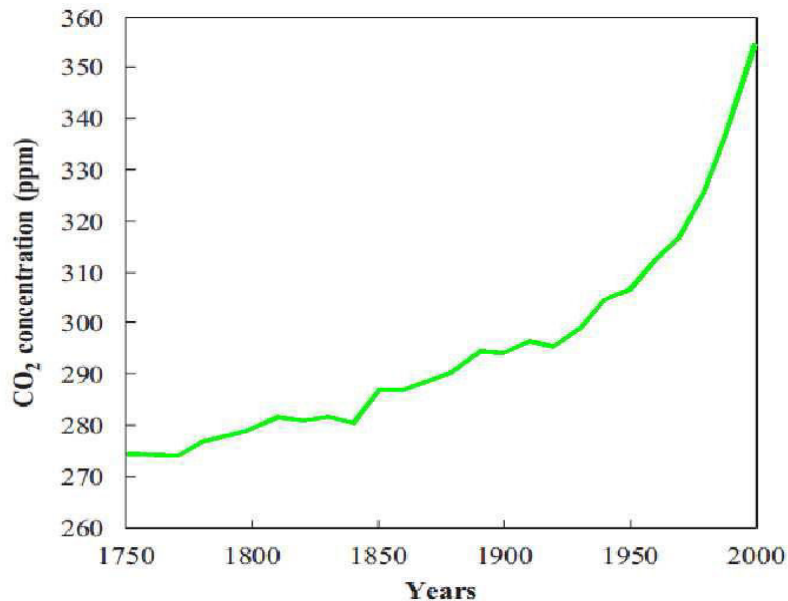
La carbonatation est à l'origine de deux principaux effets qui s'avèrent antagonistes [21]:

- elle est bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives,
- elle est néfaste en réduisant la protection chimique des armatures.

**2.2. Dioxyde de carbone atmosphérique**

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% [20-23-24]. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO<sub>2</sub>.



**Figure 2.1.** : Augmentation de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à l'échelle mondiale [25].

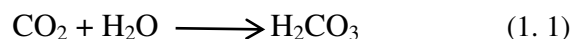
Le réchauffement de la planète est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, tel que le CO<sub>2</sub> : il s'agit d'un des problèmes environnementaux les plus critiques pour le 21<sup>ème</sup> siècle. La concentration de CO<sub>2</sub> dans la couche atmosphérique a augmenté constamment depuis la révolution industrielle (**figure 2-1**). Depuis 1950 elle augmente de 0,5 % par année sur une échelle globale, et particulièrement dans les zones urbaines [25]. Il est probable que le changement climatique ait ainsi dans le futur une incidence sur la carbonatation des structures en béton.

### 2.3. Processus de carbonatation des bétons

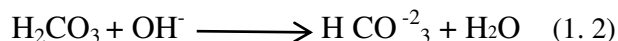
#### 2.3.1. Dissolution du CO<sub>2</sub>

Lorsqu'une solution est soumise à une pression partielle de CO<sub>2</sub>, le gaz se dissout et s'hydrate sous forme d'acide carbonique H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, le CO<sub>2</sub> en solution peut prendre différentes formes [26-27], selon la réaction ;

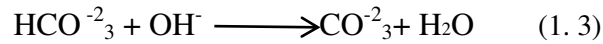
-Il se forme de l'acide carbonique si  $pH < 4$



-Il se forme de l'ion bicarbonate si  $6 < pH < 10,5$



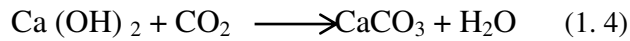
-Il se forme de l'ion carbonate si  $pH > 10,5$



Cette dernière configuration prédomine dans le cas de bétons sains, avant toute attaque Chimique.

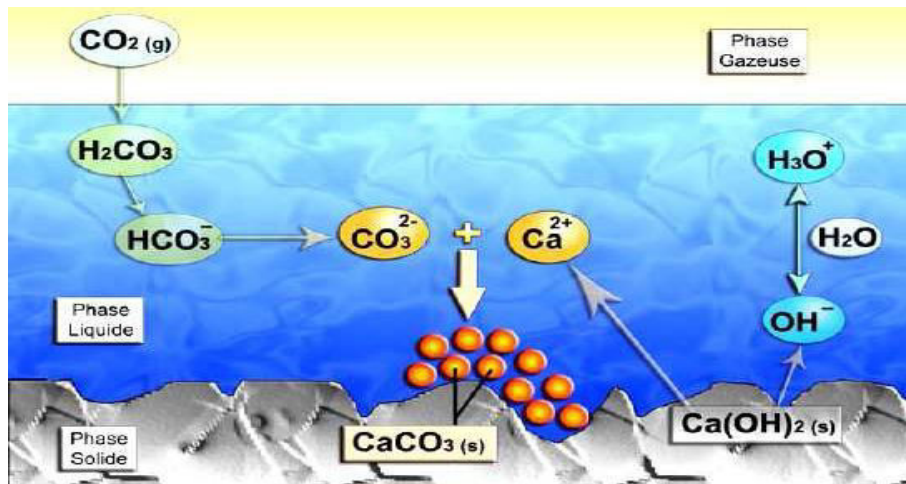
### 2.3.2. Carbonatation de la Portlandite

La carbonatation de la  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante :

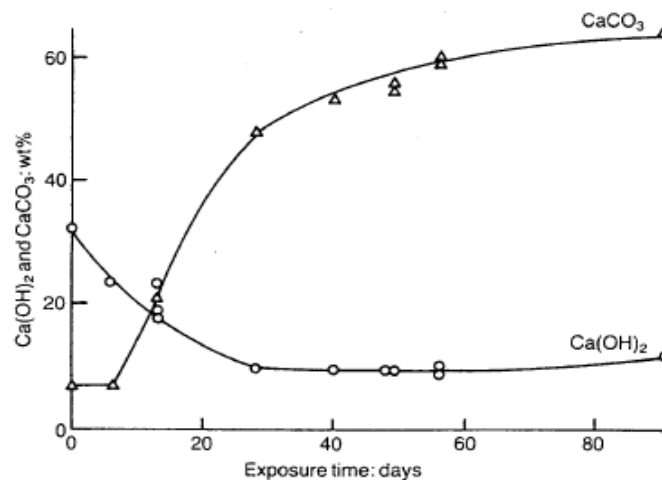


Elle a l'avantage d'indiquer que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure.

La **figure 2.2** illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite [23].



**Figure 2.2 :** Mécanisme de carbonatation de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  d'après [23].

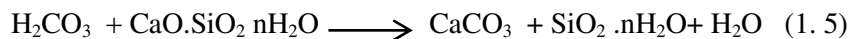


**Figure 2.3 :** Variation des quantités de portlandite et de carbonate de calcium avec la durée d'exposition en air (20°C, 65 % =HR) [28].

### 2.3.3. Les silicates de calcium hydraté C H S

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

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



La nature des différents isomorphes de carbonate de calcium dépend principalement de l'humidité relative à laquelle les hydrates se carbonatent. La vaterite se forme préférentiellement à une humidité relative faible (65 %) lorsqu'un très fin film d'eau recouvre la surface des hydrates. L'aragonite n'est observée que très rarement [28-30] cet isomorphe pourrait être un intermédiaire réactionnel lors de la transformation de la vaterite en calcite [29]. Quant à la calcite, elle est identifiée pour les humidités relatives élevées et/ou pour les durées importantes de carbonatation [29-30].

### 2.3.4. Dissolution des autres constituants du ciment

Le trisulfoaluminate de calcium (étringite) AFt et le monosulfoaluminate de calcium AFm ont des structures cristallines complexes, en colonne pour l'étringite et en feuillet pour le monosulfoaluminate.

## 2.4. Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons

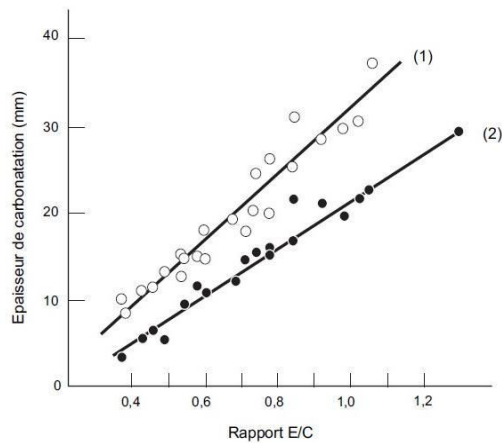
La cinétique de carbonatation des bétons est influencée par une multitude de paramètres liés aux caractéristiques des bétons et à leur milieu environnant.

### 2.4.1. Paramètres intrinsèques aux bétons

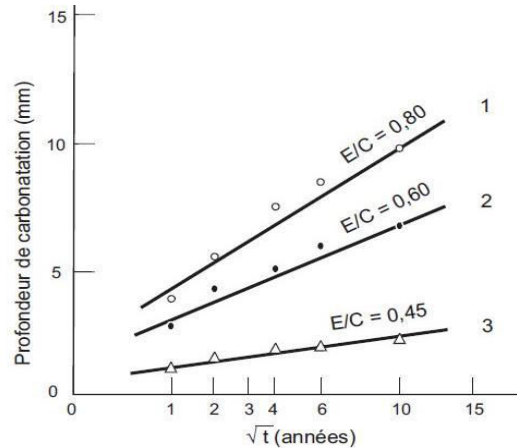
#### 2.4.1.1. Rapport eau/ciment (E/C)

Les études réalisées pour déterminer l'influence du rapport E/C sur la cinétique de carbonatation figurent et s'accordent à conclure que plus ce rapport est bas, plus la vitesse de Carbonatation est faible [31-32-33-34].

En effet, la porosité d'un béton dépend en grande partie du rapport E/C. Plus il est élevé, plus la quantité d'eau libre évaporable est grande. En s'évaporant, cette eau laisse des vides qui favorisent la diffusion du CO<sub>2</sub>.



**Figure 2.4** : Evolution de la carbonatation en fonction du rapport E/C pour différentes conditions de cure, d'après [35].



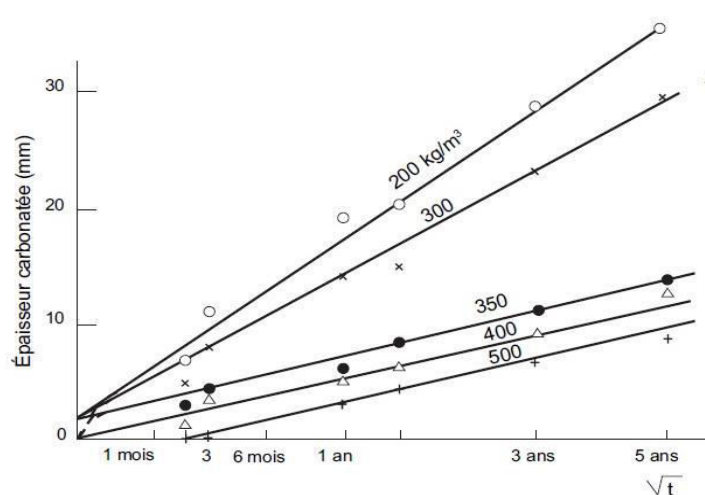
**Figure 2.5** : Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps, d'après [31].

La figure 2.4 correspond à des éprouvettes de bétons préparés avec des ciments de type CEM I conservées 24 heures en moule puis 6 ans à l'air.

Pour la figure 2.5, les bétons ont subi une cure de 24 heures en moule suivie de 27 jours dans l'eau puis 6 ans dans l'air (20 °C, 50 % HR). La carbonatation est réduite lorsque le béton jeune est conservé suffisamment dans l'eau avant d'être exposé au milieu ambiant.

#### 2.4.1.2. Dosage en ciment

Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation [36-37-38] car il réduit la porosité du béton, améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonatables.



**Figure 2.6** : Relation entre épaisseur carbonatée et dosage en ciment, d'après [38].

Éprouvettes 7 × 7 × 28 cm de béton préparé avec du CEM I et des granulats 0/20 mm, de même maniabilité, conservées à 20 °C et 50 % HR pendant 5 ans. Les courbes 1 à 5 correspondent à des dosages en ciment respectifs de 200, 300, 350, 400 et 500 kg/m<sup>3</sup>. Pour

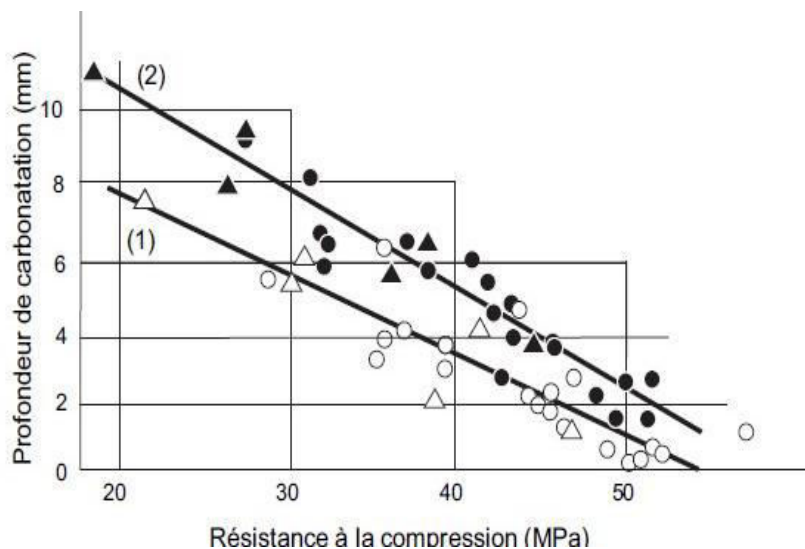
des bétons fabriqués à même maniabilité, l'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage en ciment est plus élevé.

#### 2.4.1.3. Additions minérales

Des travaux réalisés sur divers matériaux cimentaires, avec des protocoles expérimentaux différents, montrent que la présence dans le ciment (ciments avec ajouts) ou le béton cendres volantes, laitiers de haut-fourneau ou pouzzolanes augmente la profondeur carbonatée; [39-40-41-42-43-32]. Ces additions minérales génèrent des bétons à faible teneur en portlandite (produit carbonatable). Toutefois, elles permettent de diminuer la porosité et l'effet négatif peut être annulé.

#### 2.4.1.4. Résistance à la compression

La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît; [44-36]. 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.



**Figure 2.7** : Relation entre résistance à la compression à 28 jours Et profondeur carbonatée, d'après [45].

La courbe présente est relative à un béton de ciment de type CEM I (○△, courbe 1) et un béton de ciment CEM II à 30 % de cendres volantes (●▲, courbe 2), exposées 2 ans à l'extérieur (●○) ou à l'intérieur (▲△).

#### 2.4.1.5. Perméabilité au gaz

La profondeur de carbonatation diminue avec la diminution de la perméabilité [46-47].

#### 2.4.1.6. 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 [23].

#### **2.4.2. Paramètres extrinsèques aux bétons**

##### **2.4.2.1. Cure**

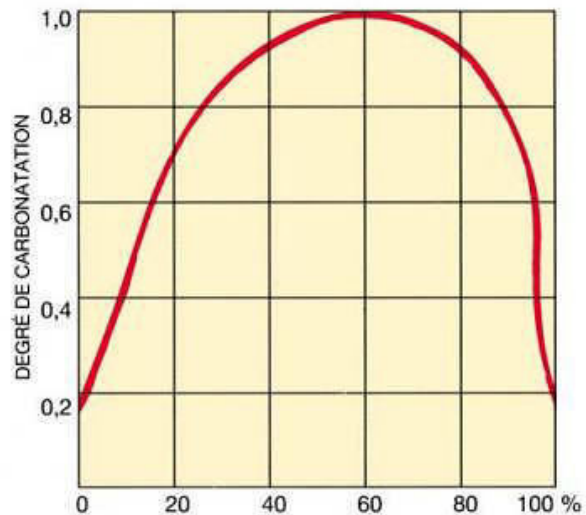
Une bonne cure, qui consiste à maintenir le béton dans des conditions de température et d'humidité relative propice à une meilleure hydratation [48], diminue la vitesse de carbonatation [49-50-51]. Contrairement à une conservation à l'air libre, une cure dans l'eau favorise l'hydratation du ciment et 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.

##### **2.4.2.2. Humidité relative**

La vitesse de carbonatation est considérablement influencée par l'humidité relative du milieu environnant [52-53-54]. 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 [3]. 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 [55].

##### **2.4.2.3. 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 [44 -36 -56]. En fournissant du CO<sub>2</sub> en quantités continuellement suffisantes, les produits carbonatables à une profondeur donnée se carbonatent rapidement et se consomment donc d'autant. Ainsi, le front de carbonatation avance plus vite.



**Figure 2.8** : Vitesse de carbonatation d'un matériau cimentaire en fonction de l'humidité relative d'équilibre du milieu environnant [57].

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

#### 2.4.2.4. Température

L'augmentation de température a deux effets opposés sur la vitesse de carbonatation : d'une part, elle accélère les réactions chimiques [53], favorise le séchage des pores et ainsi l'accès du  $\text{CO}_2$  dans le réseau poral. D'autre part, elle diminue la solubilité du  $\text{CO}_2$  et réduit sa concentration dans la phase gazeuse [20].

## 2.5. 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*.

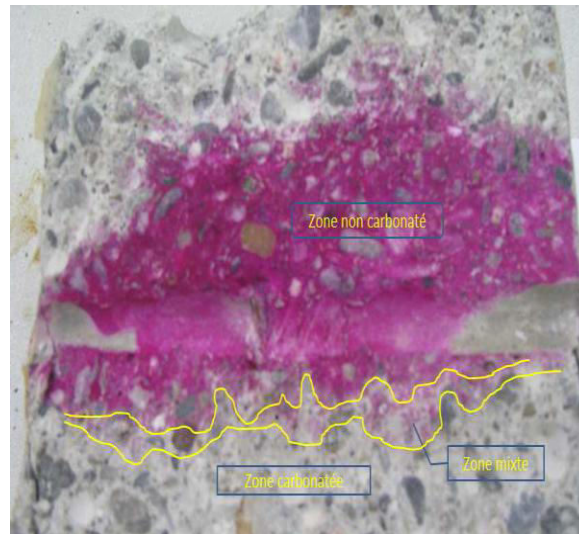
### - Carbonatation accélérée

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

#### 2.5.1. Détection par pulvérisation à la phénolphthaléine

La technique expérimentale la plus répandue pour identifier la profondeur de carbonatation est le test à la phénolphthaléine qui permet d'identifier un virage de pH de la solution interstitielle. La détection d'une limite en deçà de laquelle le *pH* avoisine 9 appelée front de carbonatation détecté par le virage coloré de la phénolphthaléine. Cette dernière est

répandue sur un échantillon fraîchement fendu, la partie non carbonatée se colore alors en rose tandis que la partie carbonatée reste incolore (**figure 2.9**).



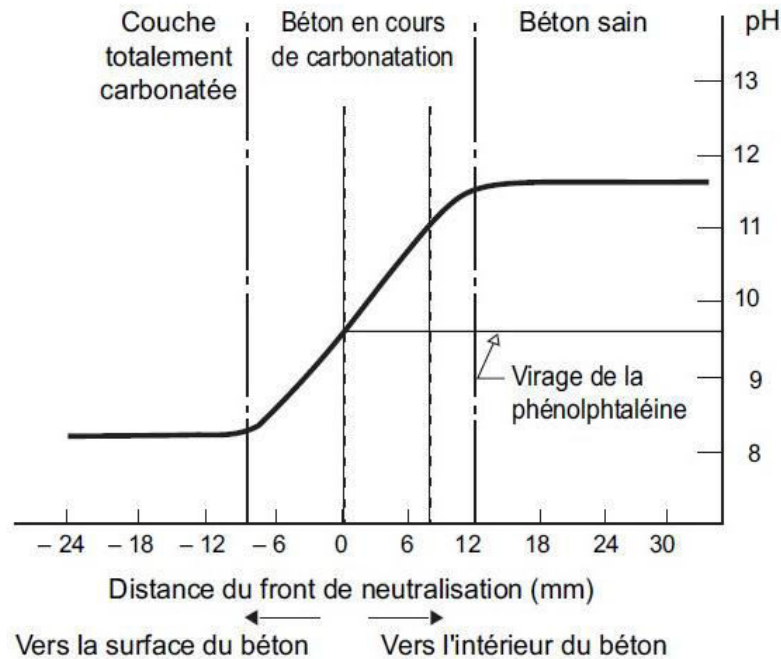
**Figure 2.9** : Les trois zones caractéristiques (carbonatée, mixte, saine) [58].

Plusieurs auteurs montrent que la zone de virage de la phénolphthaléine est toujours en amont de la zone de formation de carbonate de calcium [59-60] relèvent différentes zones caractéristiques depuis la surface extérieure :

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

La mesure de la profondeur de carbonatation s'effectue de manière normalisée en faisant la moyenne des valeurs mesurées en différents points.

Il est utile de connaître la profondeur à laquelle le pH atteint une valeur de l'ordre de 9 car une armature d'acier située à cette profondeur est dans la zone de corrosion du diagramme. La technique la plus simple à mettre en œuvre le test à la phénolphthaléine qui consiste à mesurer le changement de couleur de cet indicateur coloré en fonction du pH (**figure 2.10**). Le virage de la phénolphthaléine est représentatif d'une zone de pH de l'ordre de 9,5. Le béton non carbonaté se colore en rose tandis que le béton carbonaté ne change pas de couleur. La profondeur de carbonatation mesurée par la phénolphthaléine correspond à un pH dans la gamme 8,3- 9,5.



**Figure 2.10 :** Gradient de pH au niveau du front de carbonatation, d'après [61].

Échantillons de bétons confectionnés avec un rapport E/C=0,7. De part et d'autre du front de neutralisation décelé par le virage de l'indicateur, le pH évolue progressivement sur une épaisseur de 20 mm environ de 8,5 jusqu'à 11.

### 2.5.2. 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 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 [62].

### 2.5.3. 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 [48].

#### **2.5.4. 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 [23].

#### **2.5.5. 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 [63-64]. Toutefois, cette technique ne permet pas d'identifier les composés semi-cristallins ou amorphes [65].

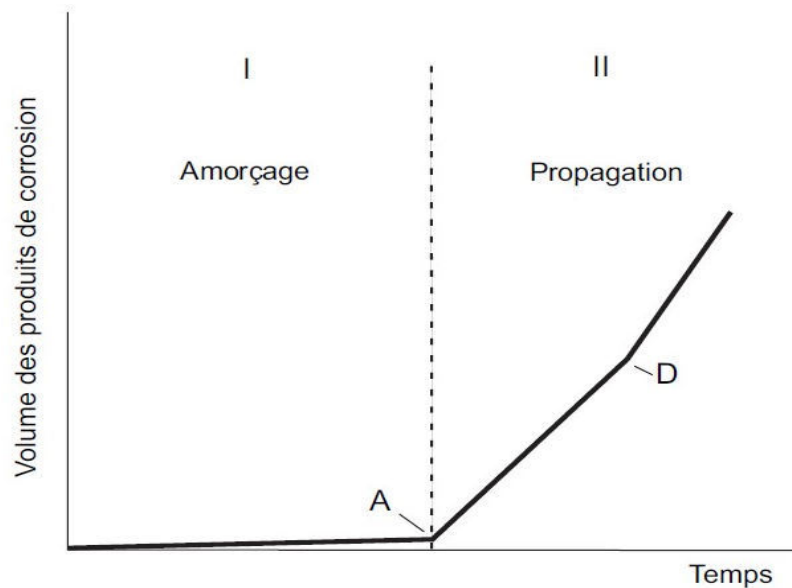
#### **2.5.6. Résonance magnétique nucléaire « RMN »**

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 [66-67]. Comme les CSH contiennent une proportion de silice ( $\text{SiO}_2$ ), leur formation ainsi que leur carbonatation sont suivies grâce à cette technique [48].

### **2.6. Conséquences de la carbonatation sur les matériaux cimentaires**

#### **2.6.1. Variation de $pH$**

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.



**Figure 2.11** : Schéma de dégradation des armatures au cours du temps, d'après [68].

D'après la **figure 2.11** une période d'amorçage, ou d'incubation (zone I), la corrosion débute (point A). Elle se poursuit dans une phase de propagation (zone II) et conduit à une dégradation progressive du béton qui s'accélère après la destruction de l'enrobage (point D).

### 2.6.2. Changement de 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 [57], se traduit par une notable réduction de porosité modifiant ainsi la distribution des tailles de [69-70-71-72].

### 2.6.3. 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. [73] émettent 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.

### 2.6.4. Changement de la résistance mécanique

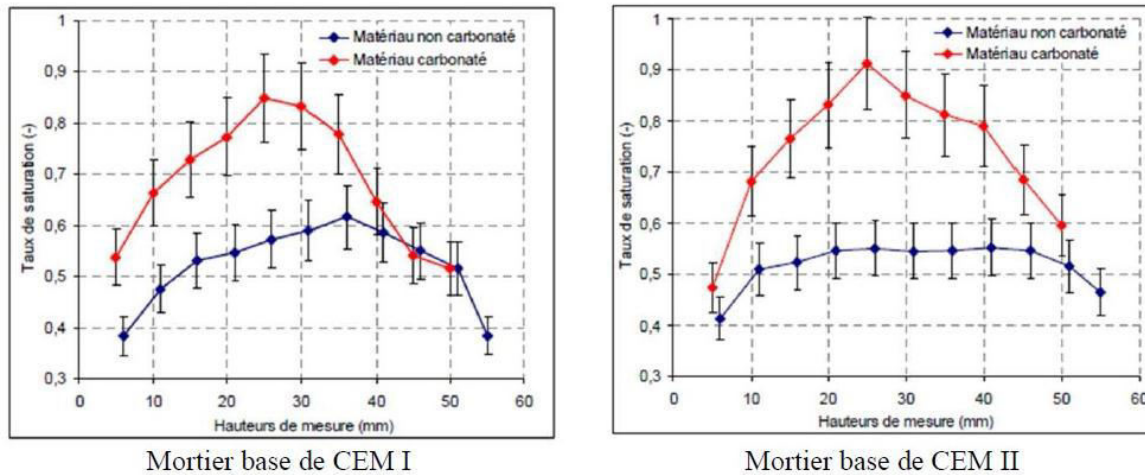
La réduction de porosité liée à la carbonatation entraîne corrélativement une augmentation de résistance mécanique. La calcite qui s'est formée consolide la microstructure. Il est en effet bien connu que le carbonate de calcium est un excellent liant : c'est lui qui d'ailleurs assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux [74].

### 2.6.5. Modification de la teneur en eau

La réaction de carbonatation libère de l'eau de structure dans la solution interstitielle. Cette eau libérée, qui augmente la teneur en eau évaporable dans le réseau poral du béton [75-76 - 77], peut participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport

d'agents agressifs [23]. Elle peut aussi augmenter le degré de saturation et ralentir ainsi la progression de la carbonatation.

On observe expérimentalement sur matériau carbonaté une augmentation de la teneur en eau évaporable par séchage à 105°C [75-76], ainsi qu'une augmentation du taux de saturation **Figure (2.12)**, d'après [65] Cette eau relarguée peut évidemment participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs.



**Figure 2.12** : Mesure par gamma densimétrie du taux de saturation [65].

### 2.6.6. Modification des propriétés de 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 [77] ni la perméabilité à l'eau liquide [78].

### 2.6.7. Carbonatation des bétons contenant des additions minérales

D'après [79], la profondeur de carbonatation naturelle, mesurée sur des bétons de 2 ans, augmente linéairement avec l'augmentation du taux de substitution massique du ciment Portland par des cendres volantes. Pour chaque augmentation de 10 % du taux de substitution, la profondeur de carbonatation augmente d'environ 0,3 mm. D'autres travaux concluent que la résistance à la carbonatation est d'autant plus faible que le taux de substitution du ciment Portland par des additions plus élevé [39-80-32].

### 2.6.8. Les fissurations du béton

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 [81].



**Figure 2.13** : Fissuration [21].

## 2.7. Conclusion

Du point de vue de la durabilité des structures en béton armé, la carbonatation a deux effets. L'un est positif : la diminution de la porosité, qui s'accompagne d'une augmentation de la résistance mécanique et de la résistivité électrique. L'autre est négatif : la baisse du pH de la solution interstitielle conduisant à la dépassivation de l'acier.

On distingue trois zones de différents niveaux de pH liées à la carbonatation : une zone amont par rapport au front de carbonatation où  $\text{pH} \approx 13$ , une zone aval où  $\text{pH} \approx 9$ , et une zone de pH intermédiaire, située également en amont, qui n'est pas détectée par l'indicateur coloré usuel.

Le gaz carbonique  $\text{CO}_2$  pénètre dans le béton sous forme gazeuse et réagit avec l'eau présente dans les pores. Il provoque ainsi un phénomène dit 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. Hormis quelques investigations expérimentales sur la carbonatation se sont majoritairement focalisées sur les mortiers et les bétons à base de ciment CEM I.

Entre ces mortiers et bétons et ceux à base de ciment CEM II et CEM III existe une différence notable sur la nature des hydrates, et davantage sur les caractéristiques du milieu poreux. Par ailleurs ces ciments contiennent moins de clinker que le CEM I et seront donc vraisemblablement davantage utilisés dans l'avenir, pour des raisons écologiques et économiques. Ces considérations ont également guidé nos choix expérimentaux.

---

***CHAPITRE 2***

***PARTIE -B***

***La cure du béton ; une prévention contre***

***La fissuration précoce***

---

---

## **PARTIE -B LA CURE DU BETON ; UNE PREVENTION CONTRE LA FISSURATION PRECOCE**

### **2.2. Définition**

Le béton frais qui sort du malaxeur est un matériau essentiellement plastique, capable d'absorber des déformations relativement importantes pendant quelques heures, ce qui permet d'assurer son transport, sa mise en place...etc. les principaux risques encourus par le béton jeune sont de plusieurs natures mais essentiellement liés aux conditions environnementales :

- retraits précoces résultant du départ d'eau de gâchage,
- une dessiccation sévère qui risque d'altérer les qualités du béton en surface.

On entend par cure du béton tout procédé susceptible de maintenir une humidité et une température favorables à l'hydratation du ciment, durant une période bien définie (3 à 7 jours). Elle permet au béton de développer les propriétés requises, telles que, la durabilité, la résistance au gel/dégel, la résistance en compression, ...etc [82-83].

L'objectif de la cure est de prévenir la perte d'eau du béton et, si nécessaire, l'approvisionnement en eau supplémentaire et de maintenir une température favorable au matériau pour une période de temps suffisante, pour bien s'hydrater [84-85]. Si la quantité d'eau initialement contenue dans le béton (eau de gâchage) parvient à maintenir une hydratation suffisante pour le développement des propriétés mécaniques du béton alors une cure est nécessaire pour s'assurer que cette eau de gâchage reste dans le béton jusqu'à ce que les propriétés recherchées soient atteintes.

La cure est nécessaire dès que le béton est soumis au séchage car le séchage peut entraîner des dommages au béton ou empêcher le développement des propriétés requises [86].

### **2.3. Le rôle de la cure vis-à-vis du phénomène de dessiccation**

La cure est entreprise dès que le matériau commence à sécher en surface, c'est-à-dire dès que l'eau disponible en surface s'évapore trop vite [87-88-89]. La cure doit être maintenue jusqu'à ce que le séchage n'engendre pas de dommages à la surface du béton, et jusqu'à ce que l'hydratation ait progressé, afin que le matériau continue à se structurer même en absence de cure.

Dans ces conditions on comprend que le béton frais doit être protégé pendant un temps suffisant, après sa mise en place, pour limiter une évaporation trop importante, pouvant engendrer une hydratation incomplète et par conséquent amorcer l'apparition de fissures.

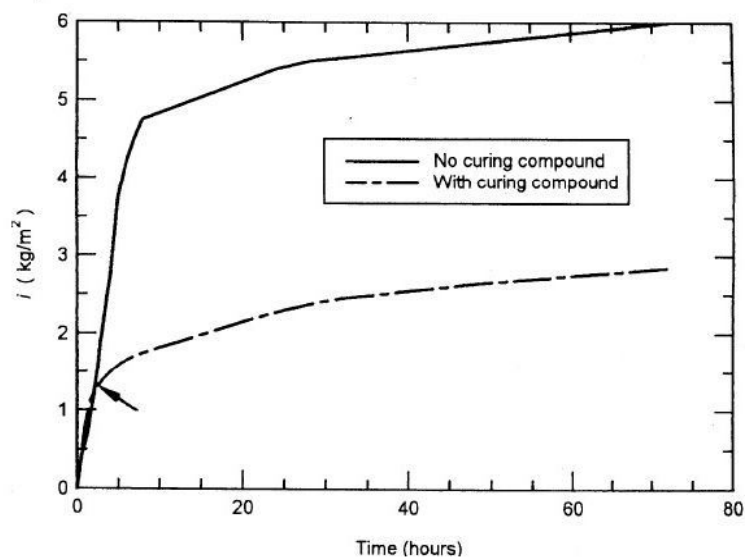
La nécessité de protection du béton frais est d'autant plus impérieuse que le risque de dessiccation est grand, surtout avant la prise où une évaporation trop rapide peut entraîner

d'importantes fissures de retrait plastique et donc une perte de résistance près de la surface [90].

Le graphe ci-dessous (**figure 2.13**) montre l'évolution des pertes de masse moyennes d'un béton sans et avec cure (usage d'un produit de cure).

On observe une importante évaporation les cinq premières heures qui suivent la période de gâchage, pour le béton non protégé. Une très faible évaporation est observée pour le béton protégé par le produit de cure. Cette évaporation trop rapide, observée au niveau du béton non protégé, est caractéristique d'une dessiccation sévère.

Ainsi, les départs d'eau au jeune âge, liés à la température, l'humidité du béton, la vitesse du vent, et la température de l'air, ne permettent pas de maintenir dans le béton l'humidité nécessaire au bon processus d'hydratation [91-92]. L'évaporation trop prématurée de l'eau se traduit d'abord par une augmentation du retrait plastique (retrait avant prise) qui peut être considérable lorsque la vitesse de dessiccation est élevée (turbulence de l'air).



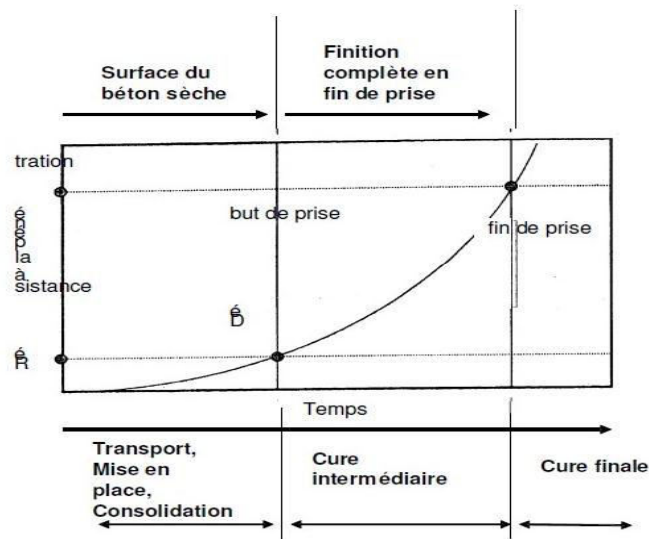
**Figure 2.13** : Evolution de l'évaporation suivant le mode cure [93].

#### 2.4. Les différentes étapes du déroulement de la cure

Trois étapes distinctes dans la cure sont définies par les techniques utilisées (**figure 2.14**) :

- la cure initiale, c'est-à-dire la cure avant la prise, visant à réduire la perte d'eau trop rapide en surface.
- la cure intermédiaire, est réalisée avant la fin de prise. Pendant cette période l'évaporation est réduite et la structuration du matériau se poursuit.
- la cure finale fait référence à la fin de prise.

Dans le cadre de cette étude, seule la cure finale sera étudiée, c'est à dire la période durant laquelle le matériau durcit complètement. Sous de telles conditions, il est nécessaire de réduire la perte d'eau soit par des techniques de cure, ou bien en modifiant l'environnement dans lequel est exposé le matériau.



**Figure 2.14 :** Différentes étapes de la cure des bétons pour des opérations de construction Sous des conditions idéales [85].

## 2.5. Les différents procédés de cure du béton

Plusieurs méthodes de cure sont utilisées sur le chantier, parmi lesquelles, on distingue:

### ➤ 2.5.1. La cure du béton

L'utilisation de l'eau comme produit de cure du béton correspond à une solution très satisfaisante du point de vue technique. Selon **SLOWICK [94]** lors de son étude menée sur le développement de la pression capillaire dans les matériaux cimentaires, humidifiait la surface du béton frais avant que la pression d'entrée d'air ne soit atteinte. Ainsi, il évitait la fissuration précoce du matériau en surface tout en contrôlant la cure. Les procédés de cure directe par l'eau sont satisfaisants si la présence d'eau est continue. Plusieurs procédés existent.

#### 2.5.1.1. L'arrosage continu

Qui constitue une cure excellente s'il n'y a pas de risque de gel. La pulvérisation d'un brouillard. La vapeur d'eau peut être utilisée à la pression atmosphérique pour maintenir un film d'humidité au contact du béton (**Figure 2.15 et 2.16**).

### 2.5.1.2. *L'immersion de la pièce*

Supprime tout risque de dessiccation ou de défaut d'hydratation. L'eau ne devant pas être beaucoup plus froide que le béton pour éviter de provoquer des contraintes trop importantes donc des risques de fissuration.

### 2.5.1.3. *L'utilisation de toiles, paillasons, tous revêtements absorbant*

Est possible mais il faut encore veiller à leur propreté. La fréquence de réhumidification de la couverture diminue lorsque sa rétention d'eau augmente.

### 2.5.1.4. *L'usage de matériaux fins humide (sable)*

Tout en vérifiant qu'ils ne contiennent pas de substances pouvant retarder la prise du ciment.



**Figure 2.15** : Exemple de cure à l'eau du tablier d'un pont  
La maîtrise de la fissuration à jeune âge [95].

## ➤ 2.5.2. *La cure par des matériaux d'étanchéité ;*

### 2.5.2.1. *L'usage de produits de cure*

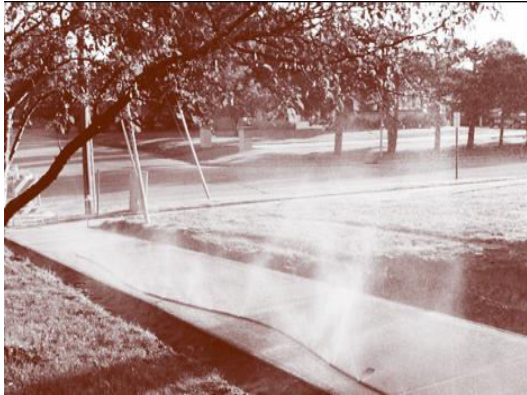
Consiste à former à la surface un film s'opposant à la dessiccation. Avec un temps de séchage rapide, ces produits offrent une protection efficace pendant 3 à 4 semaines (**Figure 2.17**).

### 2.5.2.2. *L'usage de feuilles étanches*

Tel un film plastique, appliqué à la surface humide du béton frais, et doit recouvrir toutes les faces exposées du matériau, puis lesté de manière à rester au contact du béton pendant toute la durée de la cure (**Figure 2.18**).

### 2.5.2.3. Le maintien des coffrages

En place permet d'éviter une grande évaporation à la surface du béton, une fois le béton coulé (**Figure 2.19**).



**Figure 2.16** : Arrosage continue [86]



**Figure 2.17** : Pulvérisation du produit De cure à la surface du béton [86].



**Figure 2.18**: Usage d'un polyane recouvrant La surface du béton [86].



**Figure 2.19**: Maintien des coffrages en Place [86].

## 2.6. Importance et nécessité de la cure

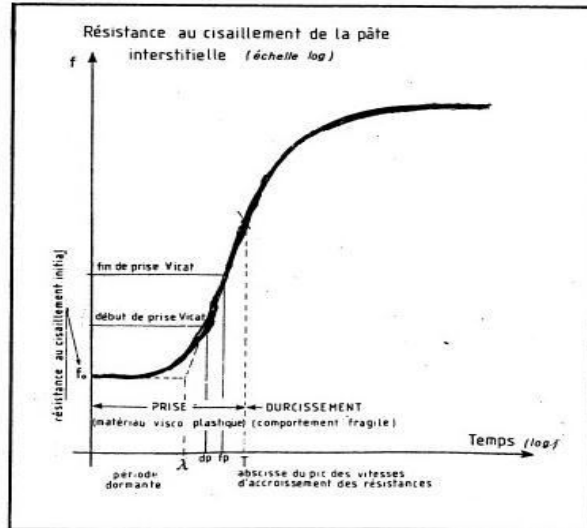
### ➤ 2.6.1. La fragilité du béton frais

A sa sortie du malaxeur, le béton est essentiellement plastique et donc capable de subir des Déformations relativement importantes pendant quelques heures (la période dite) «dormante » L'évolution de la résistance au cisaillement de la pâte interstitielle des bétons, à partir de la fin du malaxage, est présentée sur **la figure (2.20)** Les courbes représentatives en fonction du temps présentent deux phases de la vie de la pâte de ciment en cours d'hydratation, bien distinctes [83].

La première phase qui comprend la prise est caractérisée par l'ébauche des liaisons ; elle dépend de la teneur en eau, de la composition granulométrique et du serrage. Cette phase

correspond à un matériau plastique car les liaisons sont faibles et permettent facilement des déformations permanentes.

La seconde phase est la phase de consolidation des liaisons, le matériau est de moins en moins déformable et de plus en plus fragile.



**Figure 2.20** : Evolution de la pâte Interstitielle du béton frais [84].

## 2.7 Les conséquences d'une mauvaise cure

### ➤ 2.7.1. La fissuration de béton de surface

Une dessiccation précoce peut entraîner certains défauts de cure (**figure 2.21**). Afin de s'assurer que les propriétés requises du béton soit bien atteintes, et de limiter ses déformations plastiques, il est alors nécessaire de maîtriser ces départs d'eau trop rapide, en procédant à une cure, que l'on peut définir comme un procédé permettant de limiter une évaporation trop importante en surface. Car le départ d'eau en surface entraîne un développement de la pression capillaire qui pourrait Impliquer un risque de fissuration de l'ouvrage [96].



**Figure 2.21** : Fissure de retrait de plastique [96]

### ➤ 2.7.2. L'hydratation insuffisante du béton

Une dessiccation prématurée est à l'origine de l'arrêt de l'hydratation. Lorsque que l'hydratation n'est pas suffisante, la porosité capillaire est beaucoup plus importante (Modèle de Powers [97] (**figure 2.22**)). Dans le cas par exemple d'un rapport E/C=0.5, la porosité

capillaire est de 39% contre 20% d'anhydres. En proportion l'effet est plus marqué pour des rapports E/C plus faible. Cette porosité plus ouverte rend le matériau sensible aux agents agressifs, à l'usure du matériau (l'altération du béton d'enrobage à long terme).

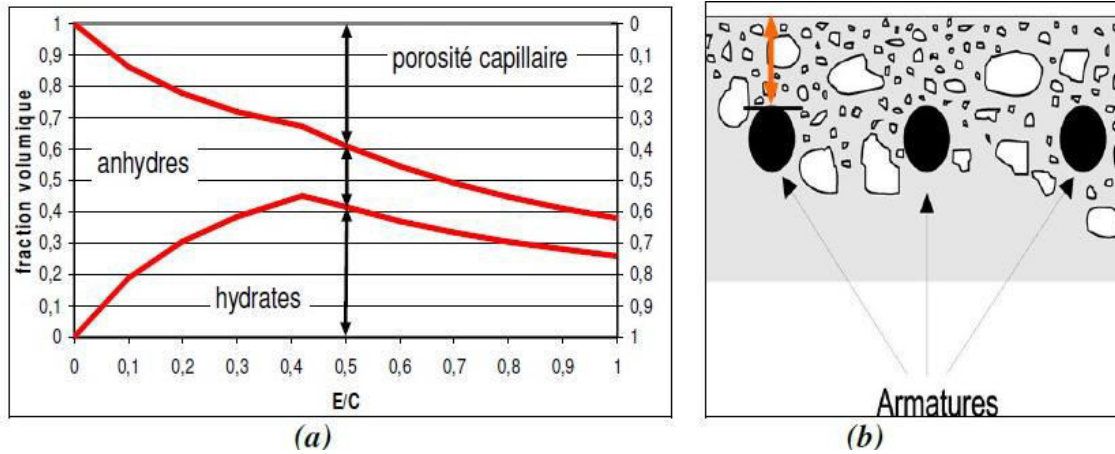


Figure 2.22 : L'altération du béton d'enrobage Modèle de POWERS [97].

## 2.8 Conclusion

Les recherches actuelles menées sur les matériaux cimentaires (pâtes de ciment, mortiers, très peu les bétons), avant et pendant la prise, portent principalement sur le processus d'hydratation et la caractérisation des contraintes et des déformations. Ces études ont montré que plusieurs paramètres interviennent et agissent de manière importante sur l'évolution de la microstructure du matériau. Principalement, les conditions environnementales (la température ambiante, l'humidité relative, la vitesse de l'air), les conditions de cure et la composition du mélange (la teneur en eau, la porosité).

L'hydratation entre le ciment et l'eau, caractérisée par une réaction complexe, peut être étudiée à l'échelle macroscopique, à partir du degré d'hydratation. Elle est à l'origine de l'évolution de la microstructure hétérogène, identique à un milieu poreux évolutif composé d'une matrice solide et d'un réseau poreux.

Sur le plan mécanique, la diminution de la porosité pendant l'hydratation influe sur le comportement du matériau. L'évolution volumique de la matrice solide ne dépend que de l'eau et du ciment, car les granulats sont supposés être non réactifs au très jeune âge. La proportion des hydrates augmente avec l'hydratation, d'où une consommation d'eau libre, en plus de celle de l'évaporation superficielle, présente dans le réseau poreux.

C'est une des raisons pour lesquelles, il est primordial d'éviter une perte trop importante d'eau en surface, pour permettre une hydratation complète du matériau et donc faciliter la formation des hydrates nécessaires à la structuration du matériau. D'où l'importance de procéder à une cure du matériau. Car le départ d'eau en surface entraîne un développement de la dépression capillaire qui pourrait impliquer un risque de fissuration de l'ouvrage [98-90].

Dans la littérature certains auteurs ont relié la fissuration prématurée du béton, non pas seulement à la formation des hydrates, mais en grand partie au retrait plastique.

La fissuration prématurée des matériaux à matrice cimentaire constitue un problème d'actualité qui nécessite une grande attention dans la mesure où les fissures plastiques remettent en cause la durabilité et/ou la pérennité de l'ouvrage.

Bien que l'utilisation de ce critère de déformation reste ambiguë dans l'étude de la fissuration précoce.

---

***CHAPITRE 3***  
***Matériaux et Méthodes***

---

## CHAPITRE 3 : MATÉRIAUX ET METHODES

### 3. Programme expérimental

#### 3.1. Introduction

Les additions minérales sont habituellement utilisées en combinaison avec le ciment portland. Le désavantage dans leur utilisation est leur faible développement de la résistance sous des conditions standards de température (20°C). Valoriser partiellement remplacer ou non le ciment portland pour l'obtention d'un nouveau matériau ayant les mêmes performances que celles du mortier ordinaire, et d'autre part d'améliorer ses propriétés hydrauliques liantes particulièrement au jeune âge.

Une partie de cette étude a été menée au niveau de laboratoire de contrôle de la qualité de la cimenterie de AinTouta (**Batna**) et au laboratoire de matériaux du département de Génie Civil (Université de M'sila). Cette étude comprend la préparation et la caractérisation des matériaux crus utilisés dans l'expérience, les méthodes de formulations, le régime de cure et les techniques expérimentales (Norme) adopté. Des détails sur la méthode de préparation des échantillons ont été analysés en effectuant les différents essais.

#### 3.2. Caractérisation des matériaux

##### 3.2.1. Le clinker Portland

La composition chimique en oxydes du cru détermine la composition minéralogique du clinker, donc on doit apporter un grand soin aux matières introduites dans le four pour obtenir un taux élevé de C<sub>3</sub>S.

Les compositions chimiques du clinker utilisé sont présentées dans le tableau (3.1) selon la norme (EN 196-2, (2002) [99].

**Tableau 3.1** : Principaux constituants chimique du clinker (Cimenterie de Ain Touta Batna) [99].

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CL <sup>-</sup>	P.A.F	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
<b>clinker</b>	20,39	5,34	3,60	66,56	1,60	0,70	0,30	0,82	0,026	0,65	67,93	6,43	8,06	12,97

##### 3.2.1.1. Modules caractéristiques du clinker

**Tableau 3.2** : Principaux modules caractéristiques du clinker (Cimenterie de Ain Touta Batna) [99].

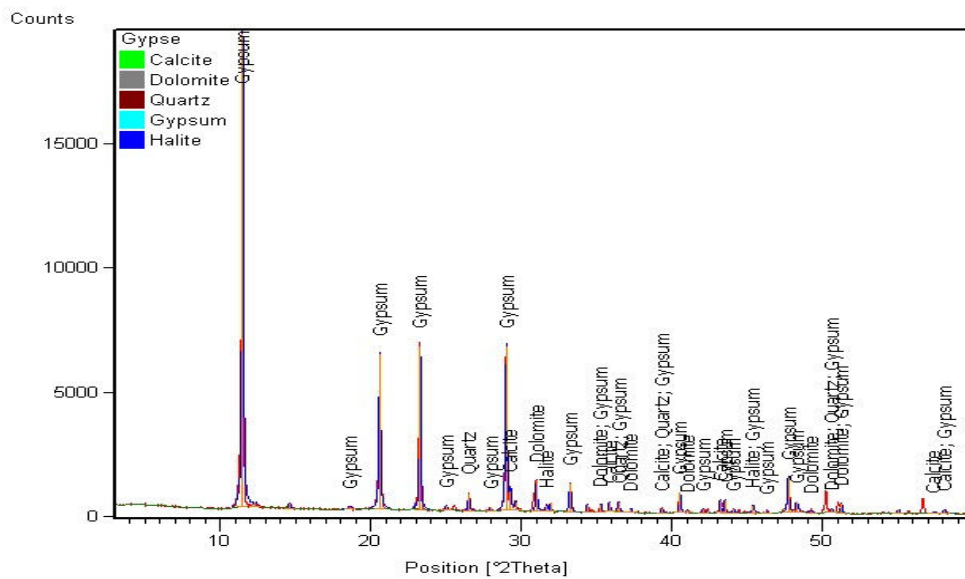
Modules caractéristiques	M h	M s	M af	M sat
<b>Clinker</b>	2.26	2.28	1.48	0.9

### 3.2.2. Le gypse

Le dosage du gypse naturel (sulfate de calcium déshydraté,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) a été maintenu constant à 5% dans la préparation de tous les ciments, pour deux raisons, réguler la prise et Ne pas masquer l'influence de la teneur en ajouts sur les propriétés mécaniques du ciment. La composition chimique présentée dans le tableau (3.3).

**Tableau 3.3 :** Composition chimique du gypse (Cimenterie de Ain Touta Batna)

Eléments(%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOL	CL
<b>Gypse</b>	3.11	0.68	0.38	31.06	3.31	40.05	0.01	0.02	23.57	0.015



**Figure 3.1 :** Composition minéralogique de gypse (Cimenterie de Lafarge).



**Figure 3.2 :** Gypse broyé.

### 3.2.3. Laitier de haut fourneau :

Le laitier granulé de haut fourneau, sous-produit de l'élaboration de la fonte, est obtenu par refroidissement rapide de la scorie fondue à la sortie du haut fourneau.

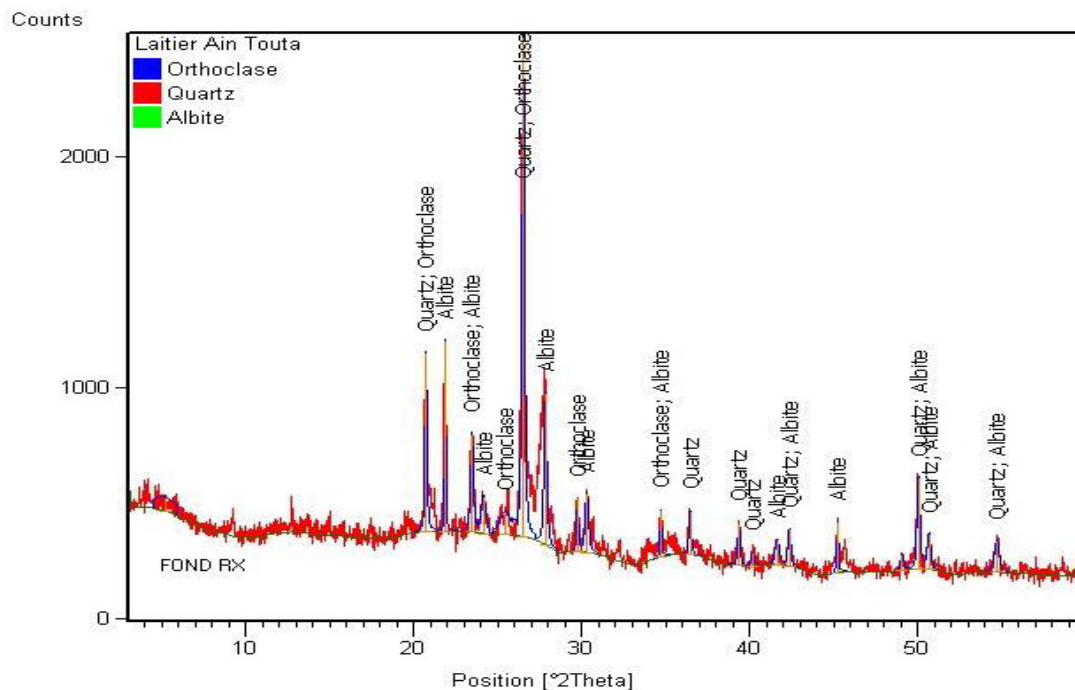
Le laitier granulé est largement utilisé comme substituant du ciment Portland dans le béton pour améliorer les propriétés mécaniques et de durabilité du béton et apporter des intérêts économiques et de l'environnement. L'utilisation du laitier possède des avantages dus à leurs excellentes propriétés hydrauliques par rapport au ciment Portland ordinaire, mais aussi des inconvénients liés à la faible résistance initiale, qui ont limité son utilisation. Plusieurs recherches ont été réalisées dans le but d'améliorer la réactivité du laitier.

La composition chimique est indiquée dans le tableau (3.4).

Elle a été déterminée par l'essai de Spectrométrie à Fluorescence aux rayons X au laboratoire de Lafarge.

**Tableau 3.4 :** Composition chimique de laitier (Cimenterie de Ain Touta Batna).

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOL
<b>Laitier</b>	39.48	4.17	1.91	41.35	3.61	1.5	-	0.4	0.024



**Figure 3.3 :** Composition minéralogique de laitier (Cimenterie de Lafarge).

L'analyse par diffraction aux rayons X du laitier montre que le laitier présente une structure amorphe.



**Figure 3.4 :** Laitier broyé.

### 3.2.4. La pouzzolane

Les pouzzolanes sont exploitées pour la production des ciments composés. Ceux sont des matériaux naturels ou artificiels riches en silice et en alumine capables de réagir avec la chaux en présence de l'eau et de former à l'issue de cette réaction des produits manifestant des propriétés liantes.

Les avantages du remplacement partiel du ciment par les matériaux pouzzolaniques sont divers. Ils participent au renforcement de la résistance aux attaques chimiques et la durabilité, à la réduction des réactions alcalins agrégats et du retrait au séchage.

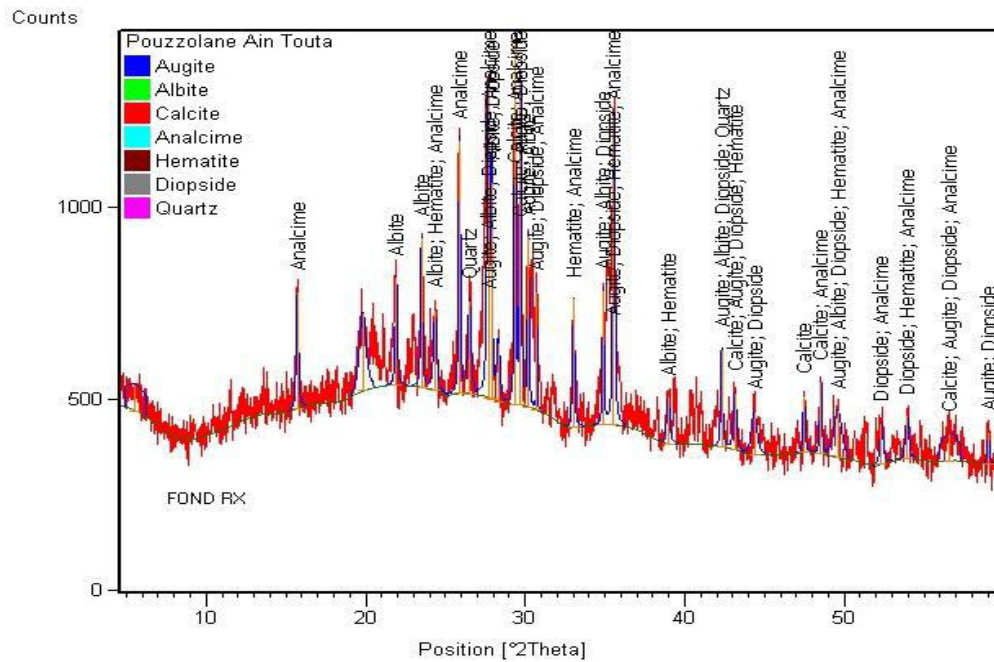
Ils permettent la réduction de la quantité de clinker utilisée dans la composition du ciment. Les ciments aux pouzzolanes sont obtenus en mélangeant les produits pouzzolaniques finement broyés avec le portland.

La pouzzolane naturelle (PZ) locale issue du gisement de Béni-Saf se présente sous forme de roche concassée de type pierre ponce et scorie [100].

**Tableau 3.5** Composition chimique de la pouzzolane (Cimenterie de Ain Touta Batna).

Élément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
<b>Laitier</b>	39.13	15.61	8.12	11.98	2.78	0.1	1.3	1.67

L'analyse par diffraction X (**Figure 3.5**) met en évidence une prédominance d'analcime (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.Na<sub>2</sub>O.4SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O), de faibles quantités d'hématite (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).



**Figure 3.5** : Composition minéralogique de la pouzzolane naturelle (Cimenterie de Lafarge).



**Figure 3.6** : La pouzzolane broyée.

### 3.2.5. Les granulats

#### 3.2.5.1. Sable normalisé

Le sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) (**Norme EN 196-1**) [101] est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité.

Le sable est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\,350 \pm 5$  g.

Le mortier est constitué par le mélange suivant :

- 1350 g sable normalisé (EN 196-1) [101].
- 450 g du ciment.
- 225 g l'eau de gâchage



Figure 3.7 : sable normalisé.

Tableau 3.6 : Analyse Granulométrique de sable Normalisé.

Tamis en (mm)	refus cumules en (g)	refus cumules en %	Tamisats en %
2	0	0	100
1,6	110,2	8,16	91,84
1	465,3	34,47	65,53
0,5	911,1	67,49	32,51
0,16	1162,3	86,10	13,90
0,08	1348,5	99,89	0,11

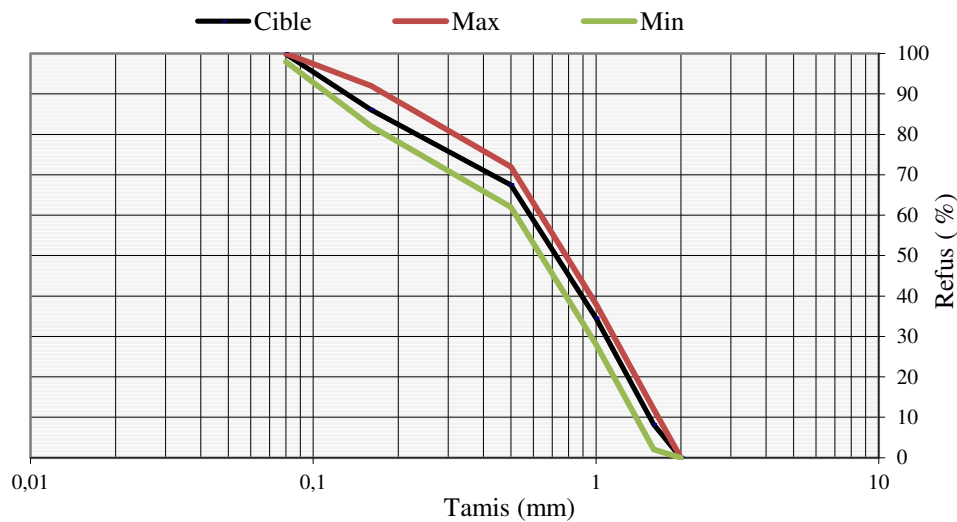


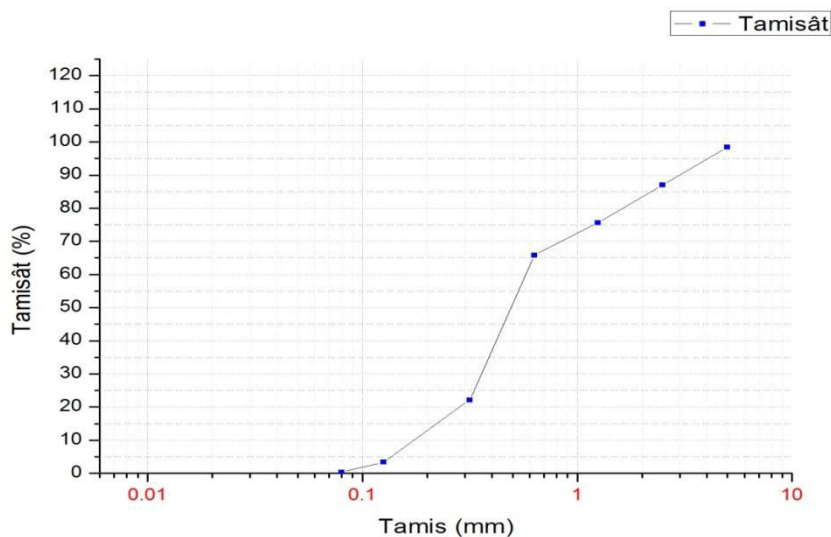
Figure 3.8 : Analyse Granulométriques de sable Normalisé (Cimenterie de Lafarge).

### 3.2.5.2. Sable de d'oued Maïter (Boussaada)

Le sable utilisé dans cette étude provient des abords de l'oued Maïter. Cet oued est situé entre les collines de Boussaâda, entre lesquelles souffle un vent provenant du sud chargé de grains fins. L'avancée du désert a permis donc au fil des ans le dépôt du sable dans l'oued, qui par la suite a assuré son transport et son étalement. Fraction (0-5) mm.

**Tableau 3.7 :** Analyse granulométrique du sable

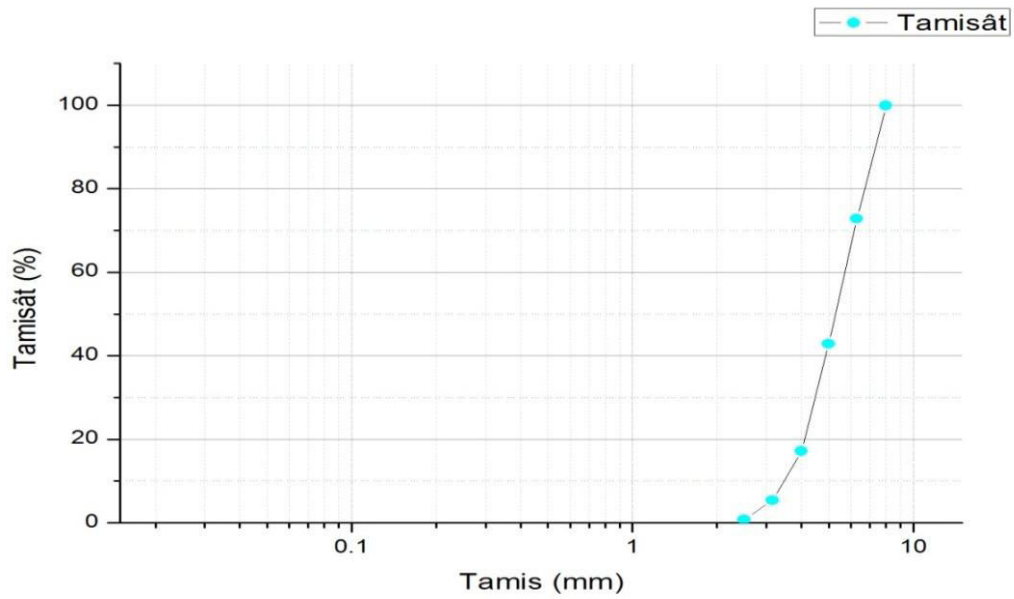
Tamis (mm)	Refus partiel (gr)	Refus cumulé (gr)	Refus Cumulé (Rc) (%)	Tamisât (Ti) (%)
5	23.9	23.9	1.59	98.41
2.5	170.6	194.5	12.97	87.03
1.25	170.7	365.2	24.35	75.65
0.63	147.4	512.6	34.18	65.82
0.315	655.3	1167.9	77.88	22.12
0.125	282.4	1450.3	96.71	3.29
0.08	44.8	1495.1	99.69	0.31



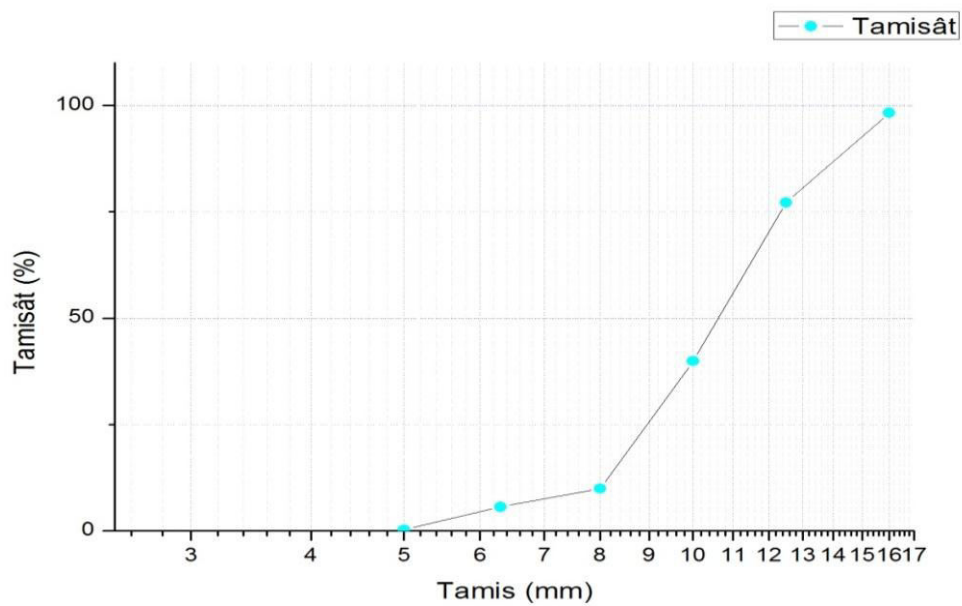
**Figure 3.9 :** Courbe granulométrique du sable (0/5).

### 3.2.5.3. Le Gravier

Un gravier local a été utilisé pour fabriquer les bétons. Le gravier est d'origine calcaire, concassé, composé de deux fractions 3/8, 8/15 provenant de la carrière par concassage de la roche d'une carrière située à 25Km de M'sila, en allant vers B.B.A (carrière COSIDER). Les courbes granulométriques des granulats sont montrées sur **les figures (3.10) et (3.11)** selon (EN 933 -1, (2002) [102].



**Figure 3.10 :** Courbe granulométrique du gravier (3/8).



**Figure 3.11:** Courbe granulométrique du gravier (8/16).

#### 3.2.5.4. Caractérisation physico-mécanique des granulats

Les propriétés physiques des granulats sont regroupées dans le tableau (3.8).

Les résultats présentent la moyenne de trois essais.

**Tableau 3.8** : Propriétés physico-mécaniques des granulats.

Classe granulaire	0/5	3/8	8/15
Masse volumique apparente (kg/l) [103]	1.269	1.414	1.33
Masse volumique absolue (kg/l) [103]	2.5	2.56	2.54
Porosité (%) [104]	38.84	45.63	49.06
Degré d'absorption (%) [104]	2.22	0.62	1.42
Teneur en eau (%) [104]	0.26	0.33	0.46
Module de finesse [105]	2.033	-	-
Equivalent de sable (%) (NF P 18-598) [106]	78.14	-	-
Coefficient Los Angeles (%) (NF P 18-573) [107]	-	23.24	20.74

D'après le tableau précédent on constate que:

$$E_{sv}=78.14 \text{ et } 75 \leq E_s \leq 85$$

$$E_{sp} = 73.40 \text{ et } 70 \leq E_s \leq 80$$

On a un sable propre à faible pourcentage de fines argileuses qui convient parfaitement Pour des bétons courants de qualité.

### 3.2.5.5. Le superplastifiant (SP)

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau fabriqué par la société Granitex-NP et commercialisé sous le nom de «MEDAFLOW 30», il est à base de polycarboxylates, sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0,5 à 2 % (en extrait sec) du poids de ciment [108] .

Les caractéristiques du MEDAFLOW 30 sont :

- Forme .....liquide
- Couleur.....jaunâtre.
- Densité .....1,07 ± 0,01
- pH .....6 - 6,5.
- Teneur en chlore.....< 1 g/l

### 3.2.5.6. Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être aussi pure que possible, elle ne doit pas contenir une quantité excessive de vase, matériaux organique, acides, sels, matières sucrées ...etc.

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude pour la confection des bétons est une eau potable fournie au niveau du laboratoire de génie civil. Cette eau est acceptable pour la

confection du béton étudié selon la norme (EN - 1008) [109] et L'eau distillée utilisée pour la confection des mortiers et pates pure la figure (3.12) est préparé au laboratoire de la cimenterie de Ain Touta (Batna).



**Figure 3.12 :** Appareil de production de l'eau distillé (Cimenterie de Ain Touta).

### 3.3. Choix des formulations

#### 3.3.1 Préparation des différents mélanges

Dans une première phase, trois ciments composés (CPA, CL30% CZ30%) ont été fabriqués en substituant une partie du clinker par des additions disponibles localement, (la pouzzolane naturelle, le laitier de haut fourneau). Le ciment CRS disponible au niveau de la chaîne de production.

Le but de cette substitution nous donne des ciments avec des compositions chimiques et minéralogiques qui diffèrent, ce qui nous permettra d'évaluer l'effet de la composition du ciment sur les caractéristiques de la durabilité et le comportement des mortiers et les pates de ciment étudiés.

Les produits ont été concassés à une granulométrie inférieure à (1mm) avant d'être soigneusement mélangés, puis quartés et préparés suivant les proportions arrêtées dans le Tableau (3.9) Une désignation conforme à la norme (EN 197-1- (2002) [110].

Dans une première phase, une étude a été réalisée en confectionnant les mortiers à base de sable normalisé, en optant pour un rapport eau/liant ( $E/C = 0.5$ ) Pour mieux mettre en évidence les modifications engendrées par l'utilisation des fines minérales.

Une comparaison est faite entre les résultats obtenus à partir de l'essai direct la résistance à la compression, la flexion et la carbonatation naturelle, ces essais étant effectués sur des éprouvettes de mortier prismatiques ( $4 \times 4 \times 16$ )  $\text{cm}^3$  selon la norme (EN 196-1)[111] et (EN 196-3)[112], en fonction de l'âge et le régime de cure humide.

Une partie de ce travail est consacré à l'étude du béton avec et sans additions minérales tel que le laitier de haut fourneau et la pouzzolane à différents pourcentages de (0%, 15%, 30%) à

l'état frais et durci, les essais de la résistance mécanique et la porosité seront effectués sur les éprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup> et l'essai de la profondeur de carbonatation sera effectué sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm<sup>3</sup>.

Une comparaison est faite entre les résultats obtenus à partir de l'essai direct d'écrasement, l'essai de porosité et la profondeur de carbonatation naturelle à l'âge de 7, 28, 42 et 90 jours.

**Tableau 3.9 :** Composition des différents mélanges (% massique) [110].

Dénomination Ciment	Clinker [%]	Gypse [%]	Laitier [%]	Pouzzolane [%]	Addition secondaire [%]	Type mélange	NF EN197-1
CPA	95	5	0	0	0	Ciment témoin	CEMI52.5
CRS	88	5	0	0	7	Ciment binaire	CEMII42.5
CL30%	65	5	30	0	0	Ciment binaire	CEMII/B- S32.5
CZ30%	65	5	0	30	0	Ciment binaire	CEMII/B- P32.5

### Repérage des ciments utilisés ;

(CPA= CEMI52.5) : ciment Portland artificiel

(CRS= CEMII42.5): ciment résistant au sulfate (Addition Secondaire)

(CL30%= CEMII/B-S32.5): ciment avec addition de laitier .

(CZ30%= CEMII/B-P32.5) : ciment avec addition de pouzzolane .

### 3.3.2. Analyse des ciments

#### 3.3.2.1. Analyse chimique du ciment

**Tableau 3.10 :** Composition chimique des ciments préparés « Fluorescence X » [99-110].

Ciment	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	P.A.F
CPA	64.24	20.25	5.13	3.73	1.69	0.26	0.16	0.62	0.11	2.28	1.53
CRS	63.29	21.18	4.37	4.77	1.46	0.19	0.12	0.29	0.17	1.14	3.02
CL30%	44.4	36.1	4.73	4.57	2.3	0.29	0.49	0.16	1.98	2.19	3.06
CZ30%	43.66	35.25	8.42	3.67	1.5	0.34	1.01	1.65	0.13	2.41	1.96

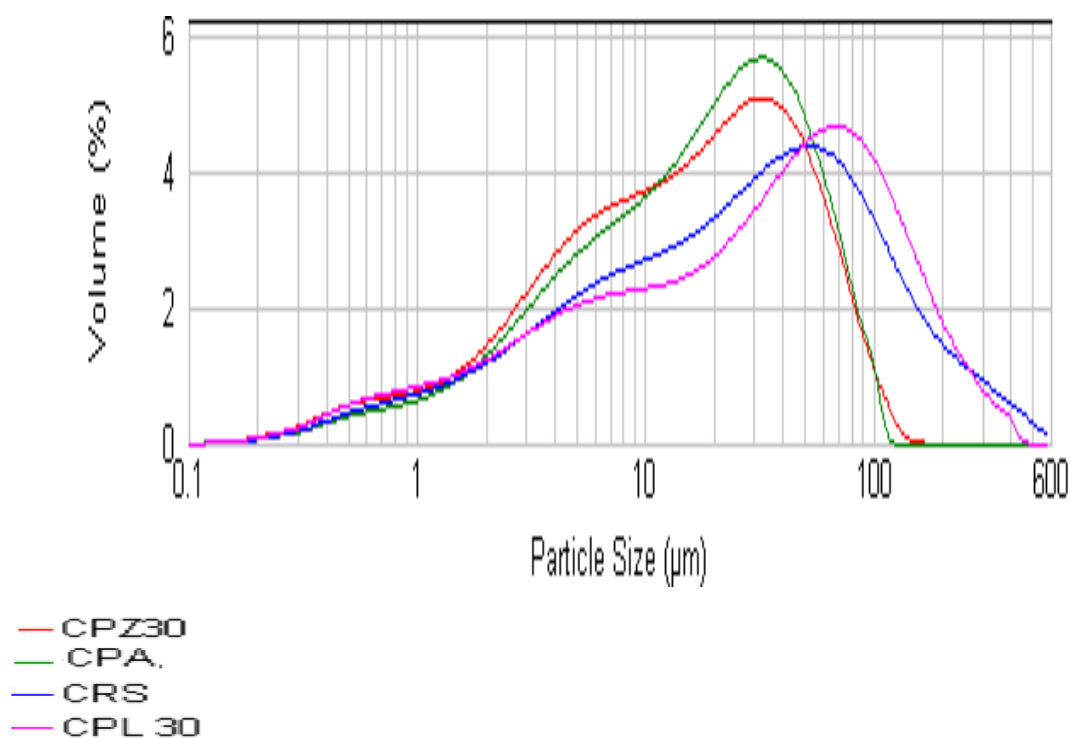
L'analyse chimique montre la présence de l'anhydride sulfurique ( $\text{SO}_3$ ) à des teneurs inférieures à 4 % conformément à la norme (EN 197-1)[110]. On remarque que l'incorporation d'ajouts actifs (laitier et/ou pouzzolane) dans le ciment diminue les teneurs de  $\text{CaO}$  et  $\text{SiO}_2$  mais augmente légèrement les oxydes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (avec un effet significatif de la pouzzolane).

### 3.3.2.2. Analyse granulométrique du ciment

Les essais d'analyse granulométriques des ciments. Sont réalisés au niveau Laboratoire Lafarge de la cimenterie M'sila à l'aide d'une granulométrie à laser de type MASTERSIZER (figure 3.13).



Figure 3.13 : Appareil granulométrie à laser de type MASTERSIZER (Lafarge).



**Figure 3.14** : Granulométrie des ciments de mortier (Cimenterie de Lafarge).

Les résultats explicités dans **la figure 3.14** montrent que la distribution des dimensions des grains concorde parfaitement avec les surfaces spécifiques de Blaine de différentes finesses des ciments. Ainsi, la distribution en fines particules augmente progressivement avec la surface spécifique de Blaine.

**Tableau 3.11** : la composition minéralogique des ciments étudiés [113-114].

Type de ciment	SSB	Densité	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
	(cm <sup>2</sup> /g)	Spécifique (g/cm <sup>3</sup> )				
CPA-CEM I	3420	3.15	59	13	07	11
CRS -CEMII	3210	3.18	54	20	04	15
CZ30%	3750	3.1	57	17	07	11
CEMII/B P32.5						
CL30%	3210	3.12	59	17	07	11
CEMII/B S32.5						

La composition minéralogique théorique (C<sub>3</sub>S-C<sub>2</sub>S-C<sub>3</sub>A-C<sub>4</sub>AF) du clinker déterminée d'après la formule de BOGUE [113].

Les densités ont été déterminées à l'aide d'un densimètre (le Chatelier) en utilisant l'essence de Térébenthine. Les surfaces spécifiques Blaine ont été déterminées par le perméabilimètre de Blaine norme dont le principe est de déterminer le temps mis par l'air pour traverser une certaine quantité de poudre (EN 196-6, (2002) [114].

D'après ce tableau récapitulatif des différentes compositions minéralogiques, nous remarquons que nous avons un pourcentage en silicates de calcium plus important dans un CPA et CL30% par rapport au CRS.

La lecture du tableau nous montre que le ciment CZ30% a une surface spécifique plus grande que des autres ciments.

### 3.3.2.3. Consistance normale et le temps de prise

Nous présentons dans cette partie les résultats d'essais de la maniabilité effectués sur la pâte pure et le mortier à l'état frais.

La consistance normale et début et fin de prise selon la norme (EN196-3-(2002) [112] des pâtes de ciment ont été suivie par l'appareil de Vicat, la résistance à la compression à 28 jours selon la norme [111].

**Tableau 3.12** : Caractéristiques des ciments [112].

Caractéristiques	CPA	CRS	CL30%	CZ30%
Consistance normale (%)	0.24	0.24	0.23	0.23
Début de prise (h)	02 :25	02 :03	03 :10	03 :23
Fin de prise (h)	03 :08	03 :00	04 :39	04 :05

Les résistances à la compression à 28 jours pour les ciments de mortier CPA et CRS sont plus importantes que celles des ciments de mortier CL30% et CZ30% ceci est dû au pourcentage d'hydrates qui est plus important pour les ciments de mortier CPA et CRS, donc moins de porosité libre.

### 3.3.3. Confection et conditions de conservation des éprouvettes

Quatre mortiers sont étudiés dans ce travail expérimental: mortier de contrôle basé sur CPA CEM I, mortier à base de (CRS-CEMII), mortier à base de laitier (CL30% -CEMII / BS) et un mortier à base de pouzzolane (CZ30% -CEMII / BP).

Les mortiers sont préparé conformément à la norme (EN 196-1) [111] (sable normalisé, E / C = 0,5 et C / S = 1/3). La taille des échantillons utilisés est (4x4x16) cm<sup>3</sup>. Les échantillons sont retirés des moules après avoir été conservé dans une ambiance humide pendant 24 h, les échantillons de contrôle (témoin sans cure) ont été conservés dans l'eau et à l'air pour une cure continue, et nous avons conservé les éprouvettes (traité avec la cure) après une certaine période de cure humide initiale de (3,7,28) jours à l'air pendant 1 an [115].



**Figure 3.15** : Malaxeur automatique de mortier (Laboratoire de la Cimenterie Ain Touta).



**Figure 3.16** La chambre humide (Laboratoire de la Cimenterie Ain Touta).

Les essais de mortier seront effectués à l'âge de 2,7, 28, 90,180 et 365 jours. Chaque ensemble comprend trois échantillons. La résistance à la compression est le rapport de la charge de rupture par la section transversale de l'échantillon.

En ce qui concerne le béton les caractéristiques physiques et mécaniques permettent de remplir plusieurs fonctions en même temps comme par exemple l'étanchéité et la résistance structurelle.

Une formulation de béton selon la méthode de Dreux Gorisse [105] le béton étudié avec des additions minérales tel que le laitier de haut fourneau et la pouzzolane à différents pourcentages de (0%,15%, 30%) à l'état frais et durci, le superplastifiant est introduit à 1.5% du poids du liant.

Cinq formulations de béton ont été fabriquées en utilisant la méthode de Dreux, la substitution de 15% à 30% du ciment par le laitier et la pouzzolane conduit à l'obtention de cinq types de béton notés BT béton témoin sans addition et BL15%, BL30%, BZ15%, BZ30%. Avec un dosage fixe en liant de 400 kg/m<sup>3</sup>.

On fixe le même critère d'ouvrabilité à tous les bétons confectionnés, L'essai d'affaissement au cône d'Abrams norme (EN 12350-2 – (2009) [116].

Un affaissement qui varie de 6 à 7 cm. Les compositions des mélanges de bétons sont portées dans le tableau 3.7.

**Tableau 3.13 : Mélanges, constituants et propriétés du béton frais (Kg/m<sup>3</sup>) [105].**

Désignations Composants	BT	BL15%	BL30%	BZ15%	BZ30%
<b>Ciment</b>	400	340	280	340	280
<b>Sable 0/5</b>	583.1	583.1	583.1	583.1	583.1
<b>Gravier 3/8</b>	143	143	143	143	143
<b>Gravier 8/15</b>	1043.5	1043.5	1043.5	1043.5	1043.5
<b>laitier</b>	-	60	120	-	-
<b>Pouzzolane</b>	-	-	-	60	120
<b>Adjuvant</b>	6	6	6	6	6
<b>Densité du béton frais</b>	2653	2545	2475	2420	2375
<b>Eau de gâchage</b>	132	136	140	136	148
<b>E/C</b>	0.33	0.34	0.35	0.34	0.37
<b>Affaissement</b>	6	7	6.5	7	6.5

### 3.4. Méthodes expérimental

#### 3.4.1. Essai mécanique sur mortier

Les essais mécaniques normalisés sont réalisés sur des éprouvettes en mortier (Cimenterie de AinTouta) de forme prismatiques  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ , confectionnées conformément à la norme (EN 196 – 1) [111].

Les éprouvettes sont démoulées après 24 h de coulage et conservées dans une ambiance humide à une température ambiante de 20 °C. Après un certain traitement de cure humide de façon à observer l'évolution progressive de leurs performances en compression simple et en traction par flexion à différentes échéances de 2, 7, 28, 90, 180 et 365 jours conformément à la norme (EN 196 – 1) [111]. Le nombre d'éprouvettes écrasées en flexion est de 3.



Figure 3.18 : Machine de Compression (Cimenterie de AinTouta))

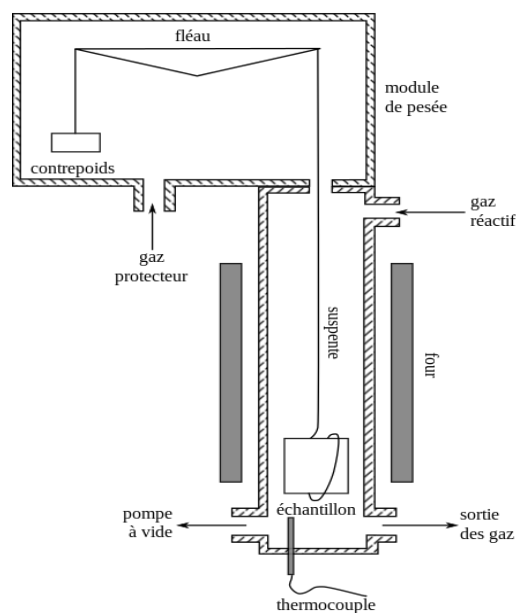
#### 3.4.2. Détection de la profondeur de carbonatation par la phénolphthaléine

Les techniques les plus couramment utilisées pour quantifier la cinétique de carbonatation est une limite de détection en dessous de laquelle le pH est d'environ 9 décarbonaté appelé front détecté par le changement de couleur de la phénolphthaléine. La carbonatation dans l'air à différentes échéances de 2, 7, 28, 42, 90, et 365 jours entre le mortier et le béton.



**Figure 3.19** : Profondeur de carbonatation par la phénolphtaléine [62].

Pour évaluer la profondeur de carbonatation, un indicateur coloré est généralement utilisé, la phénolphtaléine. Le test à l'indicateur coloré consiste à pulvériser une solution de phénolphtaléine à l'aide d'un pulvérisateur [117] réalisée à la surface soumise à la carbonatation [118- 119] (figure 3.19).



**Figure 3.20** : Dispositif utilisé pour l'analyse thermogravimétrique [121].

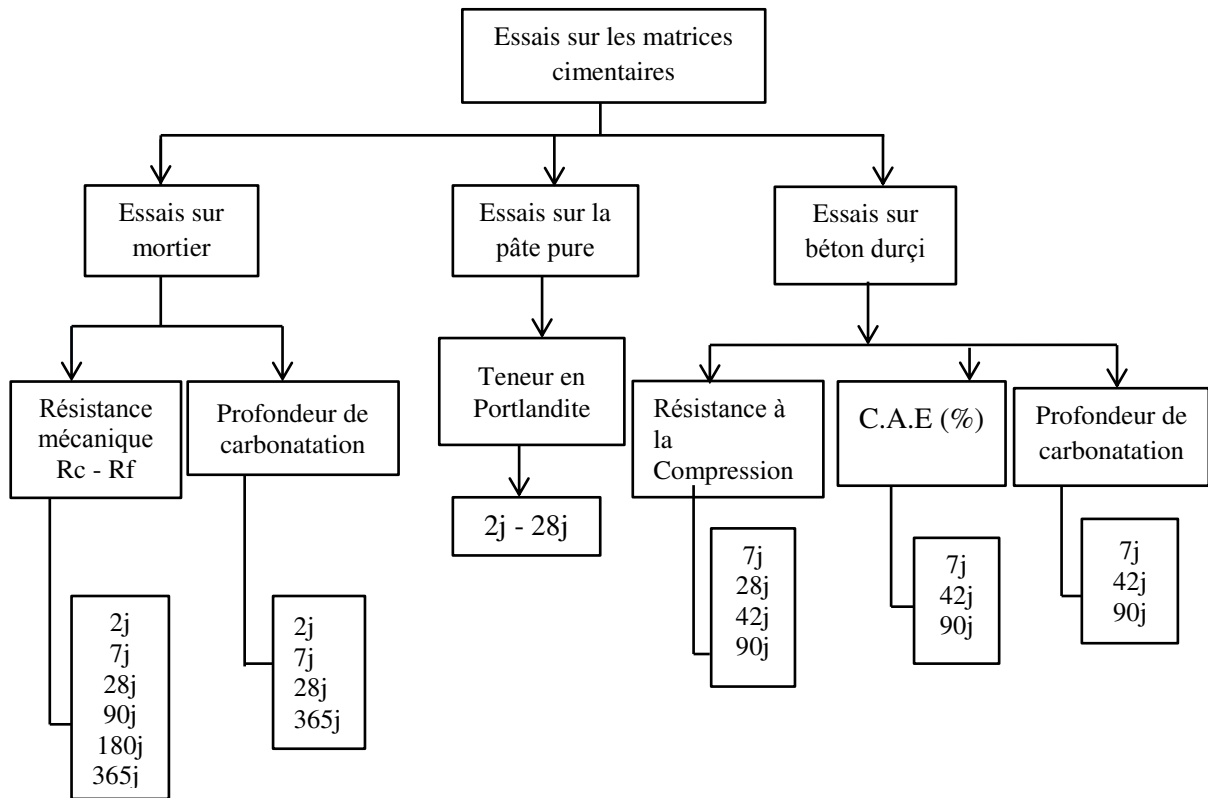


Figure 3.21 : Organigramme du programme expérimentale.

### 3.4.4. Essais de caractérisation du béton

#### 3.4.4.1. Essais sur le béton à l'état frais

##### 3.4.4.1.1. Malaxage du béton

Les constituants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre selon la norme (EN 12390-2, (2009) [122].

##### 3.4.4.1.2. Essai d'ouvrabilité des bétons (Slump test)

Cet essai est effectué conformément aux prescriptions de la norme (EN 12350-2, (2009) [116].

C'est au niveau de sa confection que doit se porter toute l'attention des spécialistes du béton. Hormis, sa mise en oeuvre proprement dite et sa conservation, c'est à la fabrication elle-même que se joue pour une grande partie la qualité du béton. Nous ne reviendrons pas sur la nature et la qualité des constituants qui doivent faire l'objet d'un choix et d'une surveillance rigoureuse.

L'étude rhéologique du béton frais est importante, on peut considérer que les propriétés rhéologiques des bétons frais résultent des effets de surface dus à l'élément fin et des effets de masse dus aux plus gros grains.

### 3.4.4.1.3. Serrage du béton

La vibration est la méthode de compactage la plus répandue, le degré de compactage d'un béton frais par vibration dépend de la fréquence et de l'aptitude des oscillations, ainsi que de la durée de vibration selon la norme (EN 12350-4, (2009) [123].

### 3.4.4.2. Essais sur béton durci

#### 3.4.4.2.1. Durcissement de béton

Il est bien connu que la progression des résistances mécaniques d'un béton se passe de plus en plus lentement. Le durcissement d'un béton avec le temps est essentiellement dû à l'hydratation progressive du ciment. La vitesse d'hydratation des grains de ciment décroît Elle-même avec le temps ou le béton mûri atteint sa résistance désirée.

#### 3.4.4.2.2. Mode de conservation de béton

Le degré d'humidité du milieu de conservation a une influence importante sur la résistance du béton (DREUX G et FESTA J, 1998). Les éprouvettes du béton étudié sont conservées dans l'eau et à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  selon (EN 12390-2, (2009) [124].

#### 3.4.4.2.3. Essai mécanique sur béton

L'essai de compression simple est réalisé sur le béton éprouvettes cubiques (10x10x10) cm<sup>3</sup> Selon la norme (EN 12390-3, (2009) [125] À différentes échéances 7 j, 28 j, 42 j et 365 jours et le nombre d'éprouvettes écrasées par échéance est égal à 3.



**Figure 3.22 :** Appareil de mesure de la résistance à la compression (laboratoire de Génie Civil-Université de M'sila).

### 3.4.5 Mesure du taux d'absorption d'eau

La norme (NA EN 1097) [126] a pour objet d'exposer la technique de la mesure du coefficient d'absorption d'eau des bétons. Avant tout essai, les éprouvettes sont séchées à la température de 105° C jusqu'à une masse constante. Généralement, il suffit de 15 heures à l'étuve pour atteindre cette masse. L'absorption d'eau à la pression atmosphérique est  $M_h - M_s$ .

Alors le taux d'absorption est calculé à partir de cette formule :

$$A_{bs} = (M_h - M_s) / M_s$$

**A<sub>bs</sub>** : taux d'absorption.

**M<sub>s</sub>** : masse d'éprouvette après l'étuvage.

**M<sub>h</sub>** : masse d'éprouvette saturée d'eau.

---

***CHAPITRE 4***

***Résultats et Discussion***

---

## CHAPITRE 4 INFLUENCE DE LA CURE SUR LES MATRICES CIMENTAIRES

### 4.1. Influence de la cure sur le mortier

Dans le but d'examiner l'effet de la cure humide sur le développement de la résistance mécanique, la carbonatation naturel et le coefficient d'absorption d'eau des différentes matrices étudiées. Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus du programme d'essais et l'analyse et l'interprétation des résultats.

#### 4.1.1. Influence du type de ciment sur la résistance mécanique (sans cure) à différentes âges

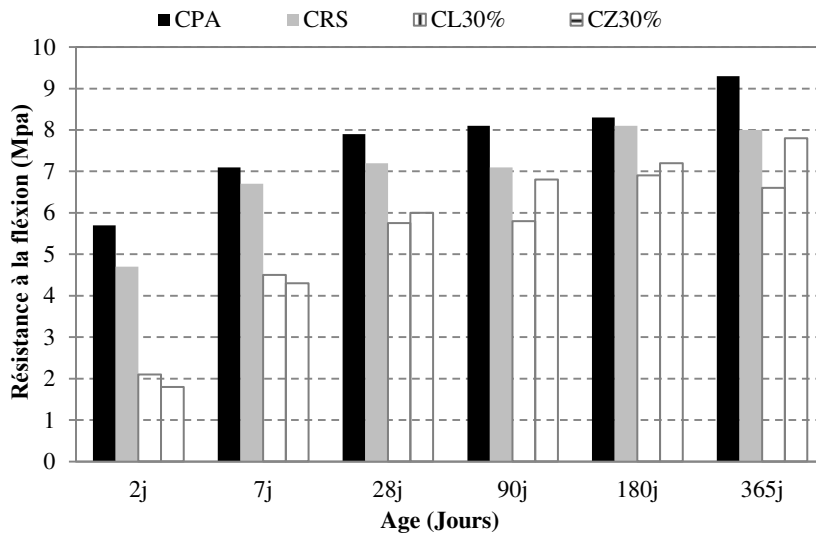
Le tableau 4.1 suivant présente les résultats de la résistance à la flexion et à la compression pour les différents types de mortier étudiés sans traitement de cure initiale en fonction de l'âge. Ces résultats sont illustrés sur **les figures (4.1 et 4.2)** qui représentent l'évolution de la flexion en fonction de l'âge sous forme de courbes croissantes.

D'après les figures **les figures (4.1 et 4.2)** suivantes présentent les valeurs des résistances à la flexion des mortiers en remplaçant une partie du ciment par une addition, est une fonction croissante du temps aux différentes échéances, quel que soit la nature du ciment et le type d'addition. Il apparaît que les valeurs de la résistance en flexion des deux mortiers le cas de CPA et le CRS sont du même ordre de grandeur.

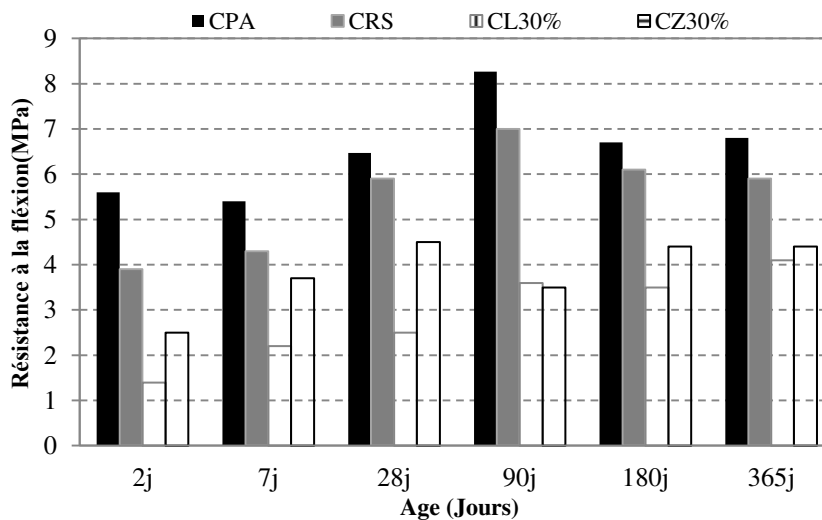
Des résistances en flexion supérieures à celles des mortiers additionnés pour la simple raison, les deux compositions minéralogiques sont presque identiques. Nous constatons, par ailleurs, que la résistance en flexion varie globalement de manière semblable à la résistance en compression.

La conservation à l'air diminue à long terme cela est dus au processus d'hydratation faible par manque d'eau. Une absence d'influence du type d'addition sur les résistances aux courtes échéances pour ce type de ciment.

Le cas des deux ciments CL30% et CZ30% le remplacement partiel du clinker par une addition minérale (l'effet pouzzolaniques latent).



**Figure 4.1 :** Résistance à la flexion à l'eau.



**Figure 4.2 :** Résistance à la flexion à l'air

D'après les résultats obtenus des **figure (4.3 et 4.4)** en remarque que la résistance à la compression des mortiers augmente proportionnellement en fonction de l'âge. L'évolution de la résistance à la compression dans les deux types de conservation à l'eau et à l'air est marquée aussi en fonction de type d'addition.

Il y a une diminution systématique de la résistance à la compression à l'égard de remplacement par du laitier et la pouzzolane particulièrement aux jeunes âges (**voir figure 4.3 et 4.4**) en comparant avec le mortier de ciment CPA et le CRS.

L'influence positive des additions minérales n'est pas remarquée durant les premiers jours car l'hydratation est lente. Au-delà de 28 jours, une amélioration de la résistance est observée.

En effet, [127] a montré par une étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-chargeurs dans les mortiers que les additions minérales pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges.

On observe le taux de gain de la résistance à 28 jours du mortier témoin CPA est 89% à l'eau et 55% à l'air, pour le mortier renfermant 30% de pouzzolane CZ30% est 294% à l'eau et est 38.6% à l'air. Le mortier CL30% est de 253% et de 71% à l'eau et à l'air.

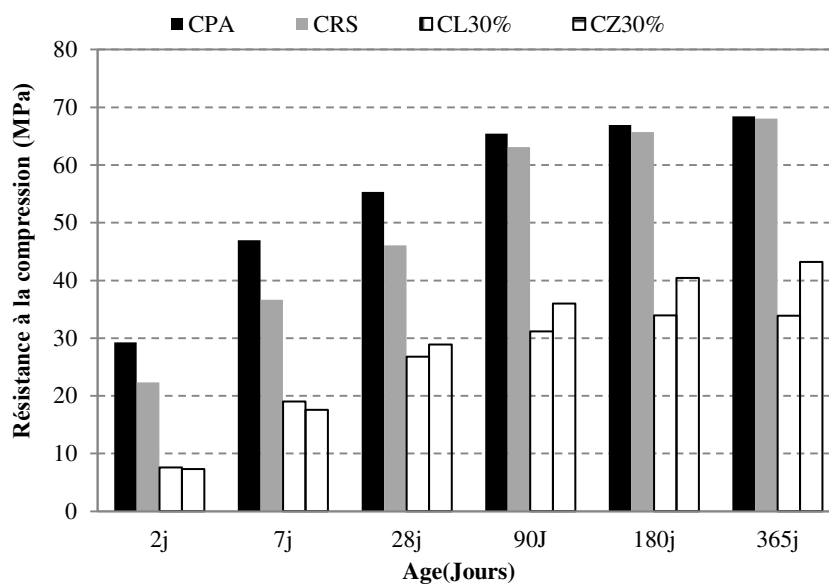


Figure 4.3 : Compression à l'eau.

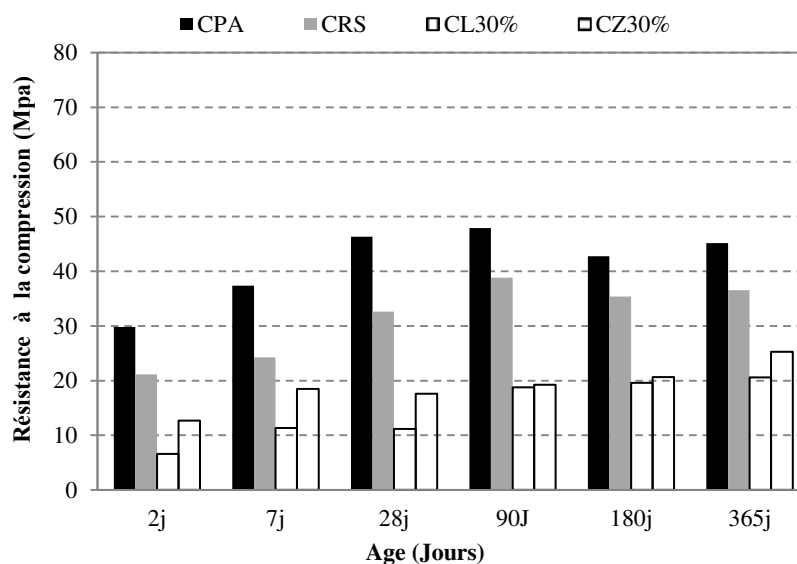


Figure 4.4 : Compression à l'air.

#### **4.1.2. Influence du type de cimente sur la profondeur de carbonatation (mm) sans cure à différentes âges**

L'objectif de cette étude est d'étudier l'effet de la nature et la nature et la teneur d'addition minérale (structure poreuse) du ciment sur la cinétique de carbonatation. Des échantillons de mortier (4 x4 x16) cm<sup>3</sup> et de béton (7 x 7 x 28) cm<sup>3</sup>. Les zones carbonatées sont mises en évidence par la phénolphtaléine.

Après quelques minutes, pour chaque face, la profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide d'un double décimètre. Les mesures correspondent aux distances en mm entre la surface externe de l'éprouvette et le front de coloration. L'épaisseur carbonatée se caractérise par le changement de couleur de l'indicateur qui vire au rose foncé dans la zone non carbonatée et incolore dans la zone carbonatée.

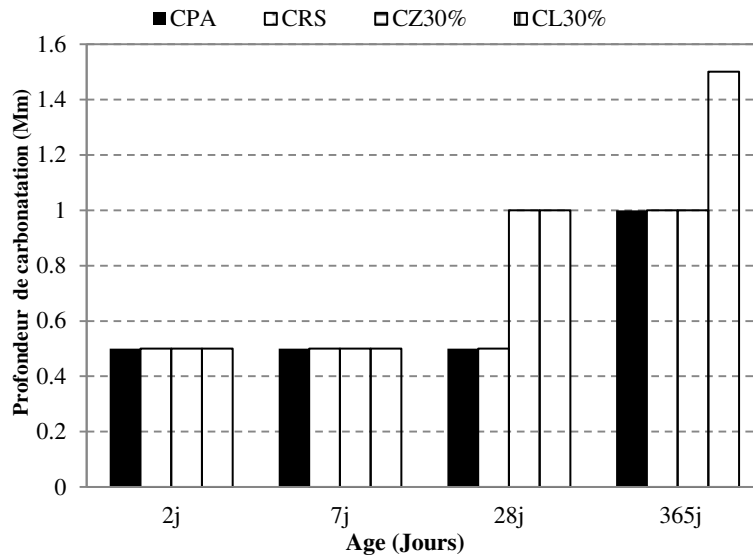
En effet, cet Indicateur devient incolore à un pH inférieur à 9. Par ailleurs, le pH habituel de la matrice cimentaire s'élève aux alentours de 12,5 avant la carbonatation (pH d'équilibre de la portlandite) [128] et baisse rapidement jusqu'à 8 une fois carbonatée. La carbonatation naturelle des éprouvettes est 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. [129]

D'après **la figure (4.6.et 4.7)** ces échantillons de mortier n'ont pas subi une cure initiale humide.

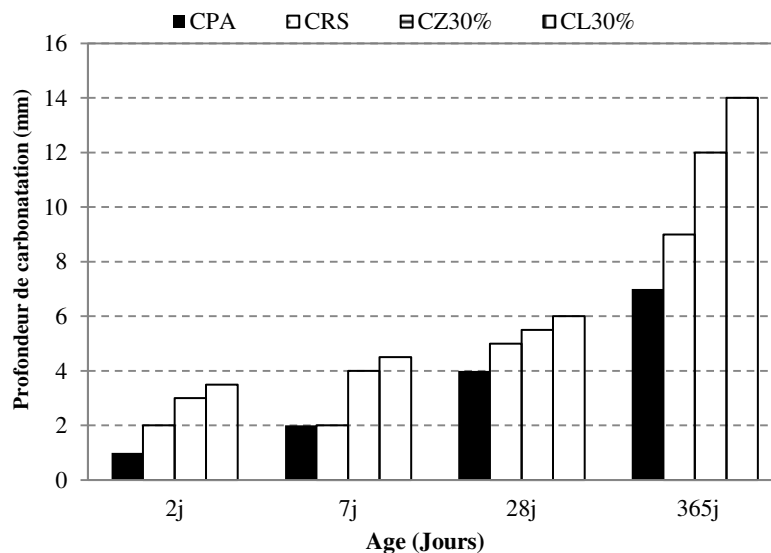
D'après les résultats les mortiers conservés à l'eau sont plus résistants à la carbonatation que ceux exposés directement à l'air libre après démoulage.

Les résultats de carbonatation naturelle en laboratoire montrent que la cure à l'eau réduit les profondeurs de carbonatation atteintes dans le cas de la conservation à l'air. [34-51].

Pour La carbonatation naturelle à l'air au bout de 28 jours génère dans le cas de mortier de CPA Une altération 3 fois plus profonde que la carbonatation par rapport aux 2 jours. Pour le mortier de BL30% et BZ30% une altération de 2.5 fois.



**Figure 4.6 :** Profondeur de carbonatation à l'eau.



**Figure 4.7 :** Profondeur de carbonatation à l'air.

#### 4.1.3. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la résistance à la Compression (MPa).

La résistance à la compression augmente en fonction de l'augmentation de la durée de cure humide pour les différents types de ciment de mortier.

Le régime de murissement humide favorise le développement de la réaction pouzzolanique, surtout La concentration sous l' eau, permet à l' eau de pénétrer dans le corps d' éprouvette, ce qui est nécessaire aux réactions d' hydratation du ciment et au développement de la résistance à la compression.

**La figure 4.8** met bien en évidence l'effet de la cure humide qui consiste à maintenir le mortier dans des conditions de température et d'humidité relative propices à une meilleure hydratation à titre d'exemple les éprouvettes conservé dans une ambiance humide[129-51].

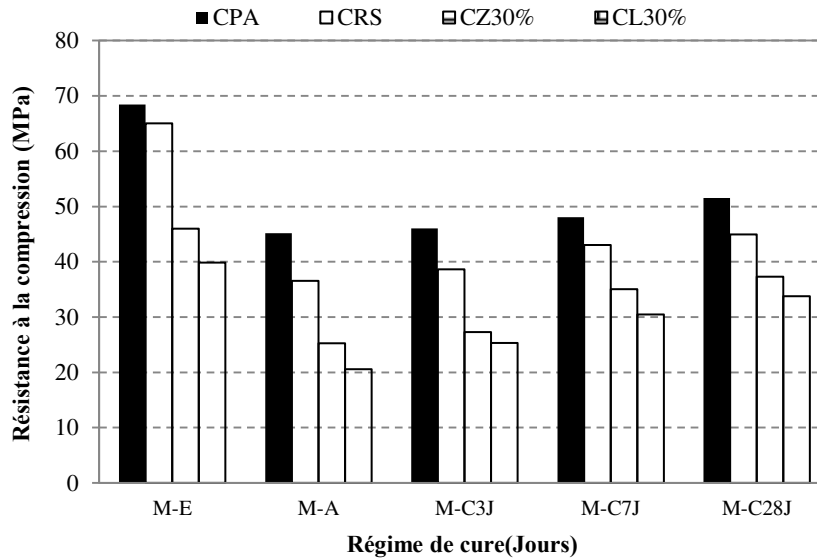
pour un mortier de CPA, une augmentation de la cure humide de 3 jours par rapport au mortier témoin à l'air augmente la résistance de 2%, 6,4% pour (7 jours de cure / témoin) et 14% (28 jours de cure / témoin), pour un mortier de CRS pour une cure humide de 3 jours par rapport au mortier témoin à l'air augmente la résistance de 5.5%, 17.61% pour (7 jours de cure / témoin) et 23% (28 jours de cure / témoin), pour un mortier de CZ30% pour une cure humide de 3 jours par rapport au mortier témoin à l'air augmente la résistance de 8.2%, 39% pour (7 jours de cure / témoin) et 48% (28 jours de cure / témoin), pour un mortier de CL30% pour une cure humide de 3 jours par rapport au mortier témoin à l'air augmente la résistance de 23.05%, 48.1% pour (7 jours de cure / témoin) et 64.15% (28 jours de cure / témoin).

Si on compare entre les deux modes de conservation des échantillons de mortier sur la résistance à la compression :

La résistance à la compression croît plus lentement pour les mortiers à forte teneur en addition. C'est le cas pour le mortier de CZ30% est de 46 MPa à l'eau est de 25.23 MPa à l'air , le CL30% est de 39.86 MPa à l'eau est de 20.56 MPa à l'air, phénomène est dû à l'évolution de la réaction d'hydratation au cours de laquelle les additions ne sont activé qu'une fois l'hydratation de la portlandite amorcée [11].

Pour un mortier de CPA à 1 an, qui voit sa résistance à l'eau passer de 68.43 MPa à 45.16 MPa à l'air , le mortier de CRS sa résistance est de 65.03 MPa à 36.6 MPa , Ceci signifie que la qualité d'un mortier n'est pas la quantité de ciment en soi, mais plutôt la quantité d'hydrates.

L'augmentation de la teneur d'addition de 15% à 30% pour les deux types de ciments BZ et BL est une fonction décroissante de la résistance à la compression, en effet pour le béton conservé à l'air (BZ) à 90 jours le taux de diminution des deux types de teneur de 15% et 30% par rapport au béton témoin est de 36.4% et 30.8%.



**Figure 4.8 :** Effet du régime de cure humide sur la résistance à la compression des ciments à un an.

#### 4.1.4. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la profondeur de carbonatation (mm)

Nous avons regroupé tous les résultats des tests à la phénolphtaléine et de la mesure des fronts de carbonatation des différents mortiers à différentes échéances.

La figure 4.9 nous montre l'évolution de la cinétique de carbonatation en fonction du temps,

La profondeur de carbonatation en fonction du type de ciment pour les différentes durées de cure qui décroît en fonction de l'augmentation de cette durée.

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.

Une cure dans à l'eau favorise l'hydratation du ciment et réduit ainsi la porosité du mortier ce qui conduit à un mortier plus résistant à la carbonatation. [51].

L'eau favorise l'hydratation, notamment à la peau des échantillons, ce qui réduit progressivement leurs porosités. Tandis que dans le cas de la conservation « Air », la peau est rapidement séchée[135-136-137].

Se dégrade plus rapidement au jeune âge que celui à base du CPA et CRS. Le taux de diminution de la carbonatation pour un mortier de CPA à l'âge d'un an par rapport à une cure de 28jours est de 57%, pour les mortiers de CRS, CZ30%, CL30% est de 55.5%,50%,43% respectivement.

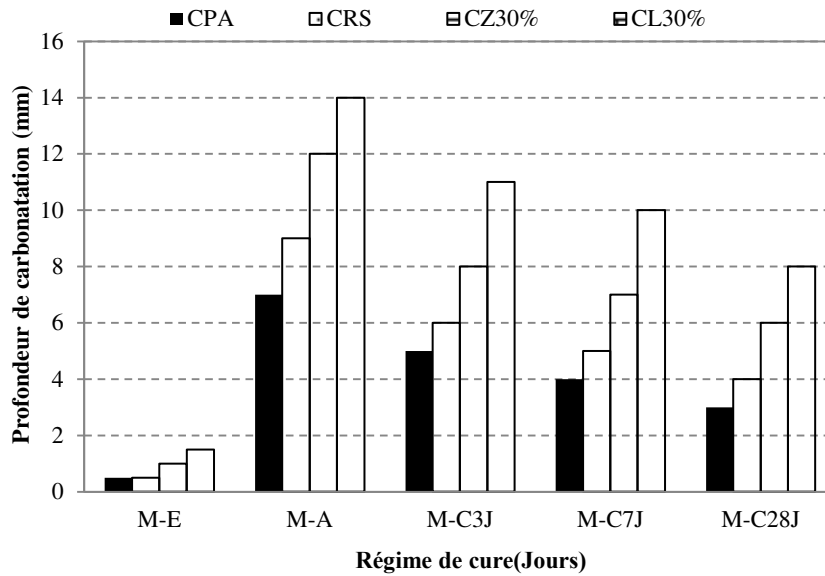


Figure 4.9 : Effet du régime de cure humide sur la profondeur de carbonatation des ciments de mortier à 1 an.

### 4.3. Résistance à la compression et Profondeur de carbonatation

Nous avons tracé les tendances pour les différents paramètres étudiés (Figure 4.17) La tendance générale de la diminution de la profondeur de carbonatation avec l'augmentation de leurs résistances en compression est en accord avec la littérature [143-45].

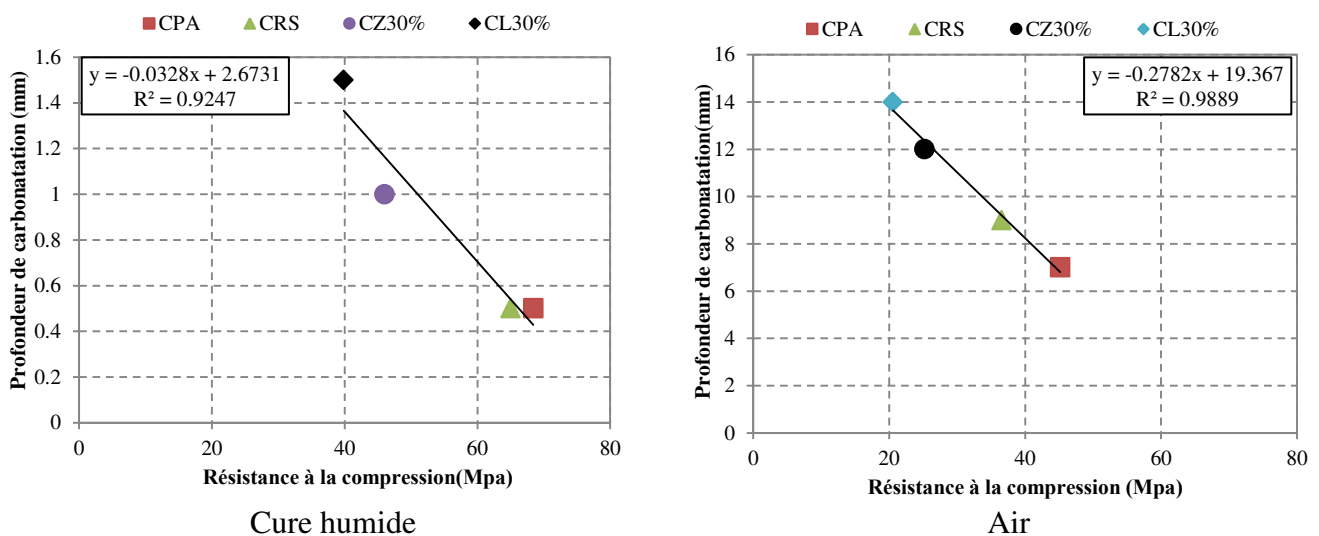


Figure 4.17 : Résistance à la compression en fonction du Profondeur de carbonatation à l'âge d'un an.

## 4.6 APPLICATION AU BETON STANDARD

### 4.6.1 Influence de la cure sur le béton

#### 4.6.1.1 Contexte de l'étude

L'étude des bétons en utilisant des ciments avec une addition minérale nous à permet de valider les résultats obtenus sur les mortiers, et de vérifier l'influence du type de ciment sur l'ouvrabilité et le régime de cure humide sur les caractéristiques du béton étudiés.

Cette partie est consacré à la présentation des résultats obtenus du programme d'essais et d'analyse de propriétés physico-mécaniques pour des bétons ordinaire de différents pourcentages d'additions minérales (0%, 15%, 30%) à l'état durci. Les paramètres de caractérisation étudiés tel que la résistance à la compression, le coefficient d'absorption d'eau et la Profondeur de carbonatation.

### 4.6.2. Influence du type de ciment et le mode de conservation sur la résistance à la

#### Compression du béton (sans cure)

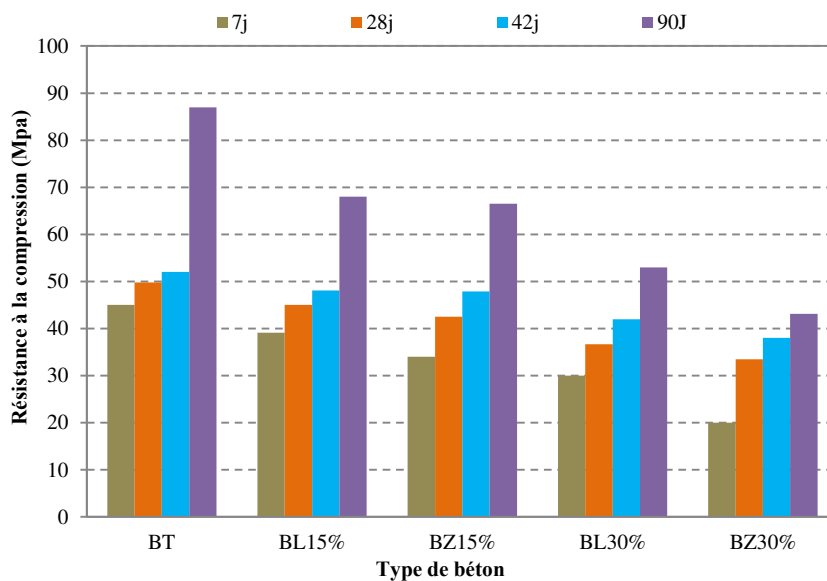
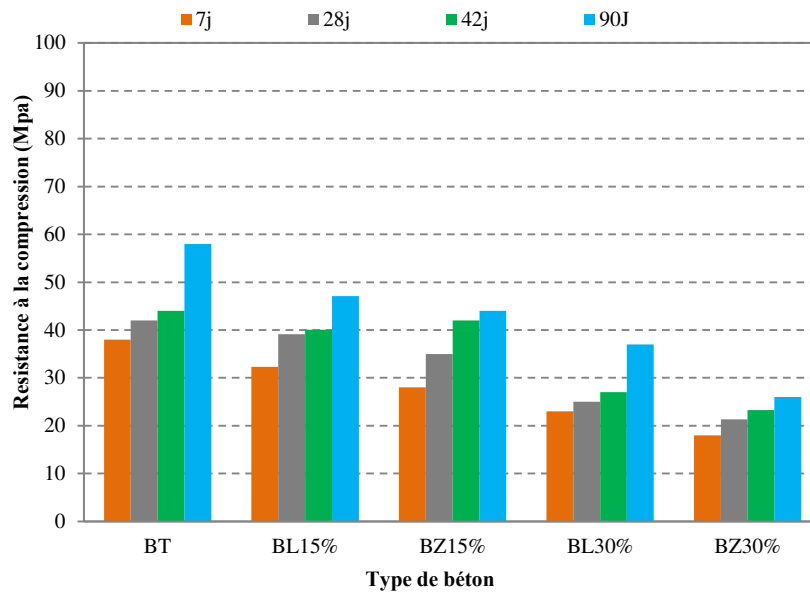


Figure 4.20 : Résistance à la compression en fonction de l'âge à l'eau.



**Figure 4.21:** Résistance à la compression en fonction de l'âge à l'air.

D'après les résultats (voir **Figure 4.20 et 4.21**) nous constatons les points suivants :

La résistance à la compression augmente avec le temps quel que soit le mode de conservation. Le mode de durcissement humide favorise le développement de la réaction des ciments de béton surtout pouzzolanique, qui conduit à une augmentation de la résistance à la compression, la résistance à la compression augmente avec la diminution de la teneur d'addition minérale pour les deux milieux de conservation.

La résistance de béton témoin BT est plus importante que celles des bétons à base d'addition minérale ceci est dû à la porosité plus élevée. Le taux d'augmentation du béton témoin à l'eau à 90 jours est 48.3% par rapport à l'air qui est de 34.5%. Pour les autres bétons à base d'addition à l'eau tel que BL15% , BZ15% , BL30% et BZ30% le taux est de 45.5%, 49% 43.4% et 53.6% respectivement, par rapport à l'air qui présente les taux de 31.5%, 36.4% ,38.5% et 30.8% respectivement . Le taux d'augmentation plus important présenté par l'addition pouzzolanique surtout à l'eau.

L'augmentation de la teneur d'addition de 15% à 30% pour les deux types de ciments BZ et BL est une fonction décroissante de la résistance à la compression, en effet pour le béton conservé à l'air (BZ) à base d'addition pouzzolanique à 90 jours le taux de diminution des deux types de teneur de 15% et 30% par rapport au béton témoin est de 36.4% et 30.8%.

En effet, Husson [127] a montré par une étude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-chargeurs dans les mortiers que les additions minérales pouvaient avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges.

### z4.6.3 Influence du type de ciment et le milieu de conservation sur l'absorption du béton

Sans cure :

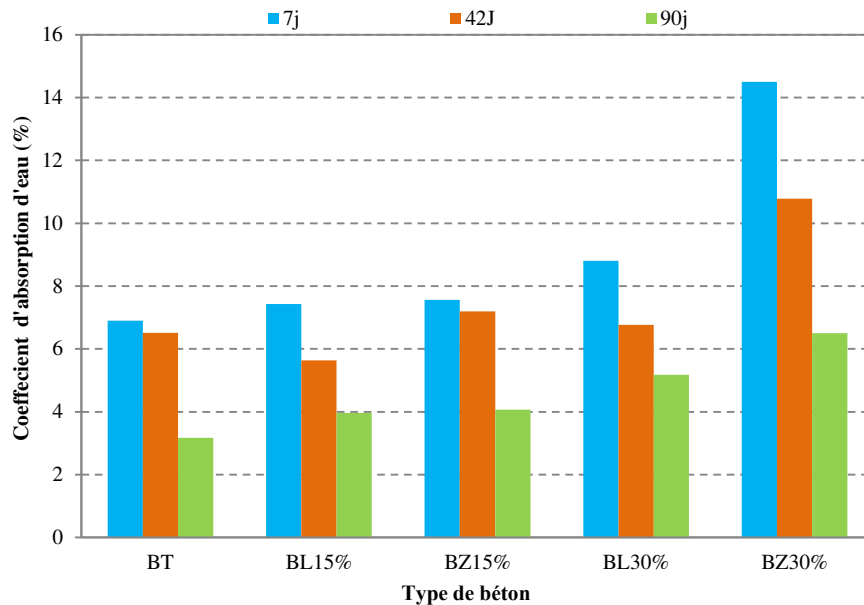


Figure 4.22 : Coefficient d'absorption d'eau en fonction de l'âge à l'eau.

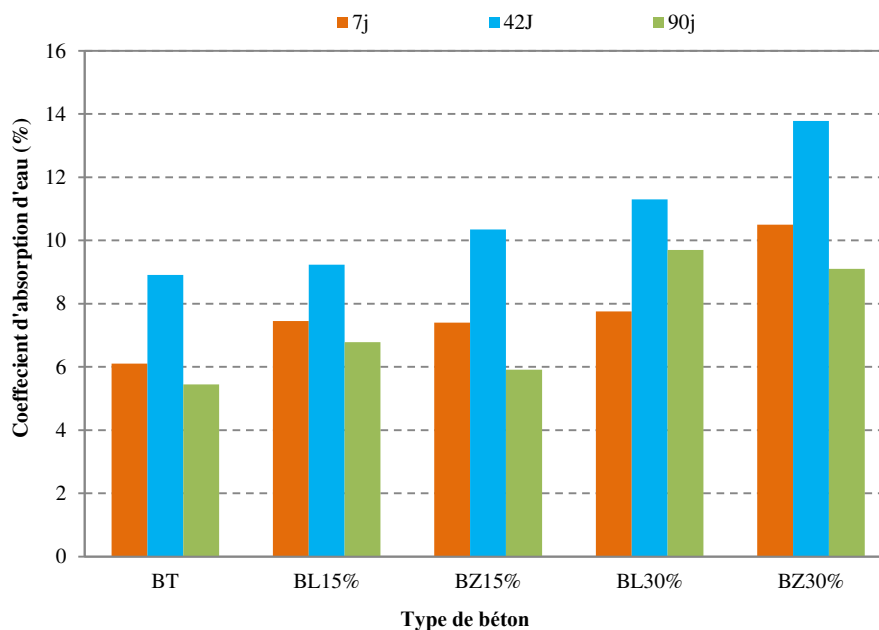


Figure 4.23 : Coefficient d'absorption d'eau en fonction de l'âge à l'air.

Les résultats de cet essai sont dans les figures (4.22 et 4.23) présentent les résultats de la cinétique d'absorption des différents bétons élaborés.

Le mode de conservation (Air ou Eau) ont une influence importante sur le phénomène d'absorption, en remarque que le taux d'absorption des éprouvettes du béton conservé à l'air

est plus importantes est que celle conservé à l'eau, ceci indique que la capacité de remplissage de la porosité par la formation de produits hydratés est plus importante pour les ciments de béton à faible teneur d'addition en raison des différences dans leur processus d'hydratation [146].

Les ciments avec additions à 42 jours présentent une hydratation lente et par conséquent incomplète alors que le clinker portland présent à 97% dans le ciment de béton témoin qui s'hydrate de manière quasi-complète à cette échéance. Le volume d'hydrates produits est donc plus faible dans le cas du ciment de béton avec additions. Il apparaît que la porosité augmente et d'une façon considérable pour les éprouvettes conservé à l'air [147].

#### ***4.6.4. Influence du type de ciment et le milieu de conservation sur la profondeur de Carbonatation sans cure***

La carbonatation naturelle des éprouvettes est évidemment la méthode la plus proche de la Réalité. **La Figure 4.24** nous montre l'évolution de la cinétique de carbonatation en fonction du temps des éprouvettes de béton à l'air. Ces échantillons de béton n'ont pas subi une cure initiale humide.

Comme nous montre la figure la zone non carbonatée (saine) prend une couleur rose foncé,

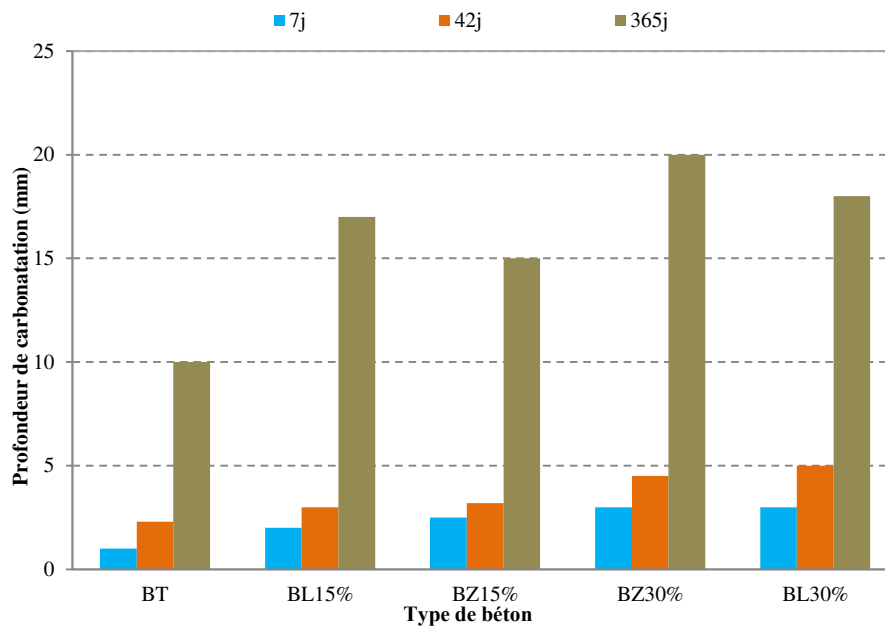
Par contre la zone carbonatée reste incolore. La phénolphtaléine offre donc une lecture assez Simple de la profondeur de carbonatation du fait que le front est net et génère de bons contrastes de couleur.

**La Figure 4.24, (a-BT)** nous observons que l'échantillon de référence (béton témoin) avec des petits signe de carbonatation au front, ce qui nous rassure que nous sommes bien partis d'un état sain.

Il est bien visible que les bétons avec additions de 30% les plus carbonatés pour toutes les échéances étudiés le cas de **Figure (e-BL30% et f-BZ30%)**.

A titre d'exemple pour un béton avec addition BL15% et BZ15% un taux d'augmentation par rapport au béton témoin est de 70% et 50%, pour des bétons de 30% laitier et pouzzolane et de 100% et 80% respectivement. En remarque que le front de carbonatation est plus important à long terme, il augmente avec le temps quel que soit le type de béton.

Ces résultats sont en accord avec les résultats d'Al-Akchar [90].

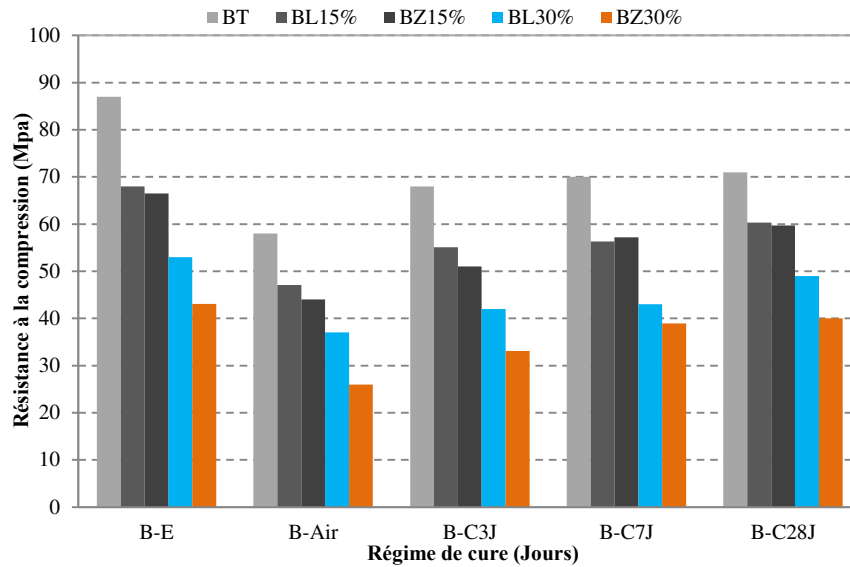


**Figure 4.25** : Profondeur de carbonatation en fonction du type de béton à l'air.

#### 4.6.5. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la résistance à la compression

La figure 4.26 met en évidence non seulement l'influence du régime de murissement mais aussi le type et le taux d'addition dans le ciment, ce qui est nécessaire aux réactions d'hydratation du ciment et au développement de la réaction pouzzolanique

Le prolongement de la cure humide qui Influence sur l'amélioration de la résistance à la compression. La cure à 28 jours pour le BT à l'air (90 jours) est marquée par un taux d'augmentation de 22.4%, pour les autres bétons BL15%, BZ15%, BL30%, BZ30% est de 28.1% ,35.7% ,32.4, 54% respectivement.

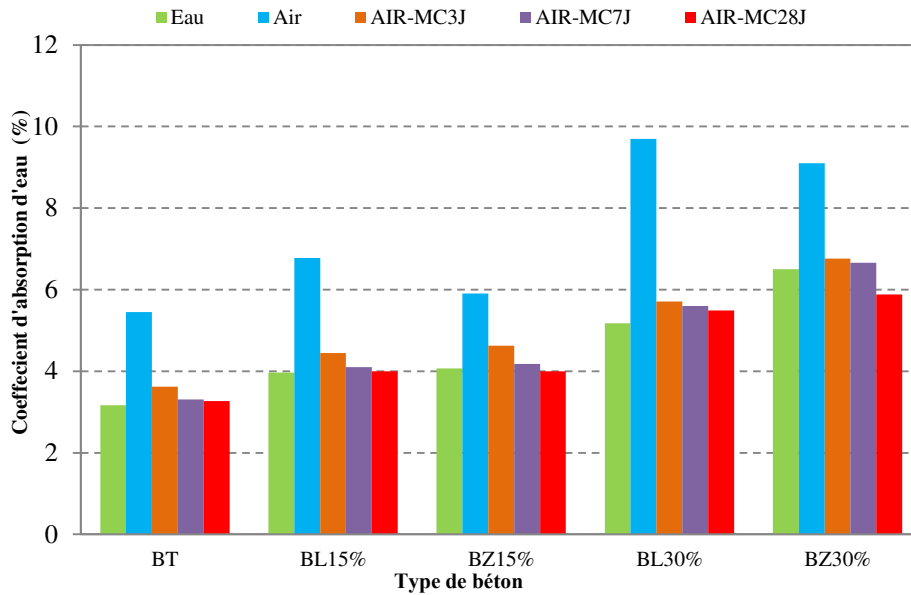


**Figure 4.26** : Effet du régime de cure humide sur la résistance à la compression à 90 jours.

#### 4.6.6. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur l'absorption du béton (%)

La figure 4.27 montre Le C.A.E (%) en fonction du type de béton, la porosité des différents bétons étudiés sous l'influence de régime de cure, plus l'effet du mode de conservation à l'air et à l'eau, il apparaît clairement sur ces résultats des bétons témoins que la cure sous l'eau de 90 jours conduit à des bétons moins poreux que ceux laissés à l'air libre après démoulage. En effet, la capacité de remplissage de la porosité par la formation de produits hydratés est plus importante pour les bétons conservés à l'air [148-11], les résultats mette en évidence l'effet bénéfique de la cure humide aussi sur le développement des hydrates dans les ciments de béton [135-136-137]. La porosité est influencée aussi par la teneur des additions dans les ciments de béton.

Le prolongement de la cure humide diminue le taux de porosité des bétons en général, pour un béton témoin (BT), une cure de 28 jours le taux de diminution est de 40%, le cas d'une cure de 3 jours et 7 jours le taux calculé est de 34% et 39.3% respectivement. Pour un béton avec laitier (BL15%) pour les trois régimes de cure 3,7 et 28 jours le taux respectivement ; 34.4%, 39.5%, 41%.



**Figure 4.27:** Effet du régime de cure humide sur le C.A.E (%) à 90 jours.

#### 4.6.7. Influence du type de ciment et du régime de cure humide sur la Profondeur de Carbonatation (mm)

La Figure 5.28 nous montre l'évolution de la cinétique de carbonatation en fonction du temps. Les échantillons de bétons sont conservés à l'air après une durée de cure humide bien déterminé. Les résultats montrent que le régime de cure humide appliqué a un effet remarquable sur la diminution de la cinétique de carbonatation.

Le prolongement de la cure humide diminue le taux de carbonatation des bétons en général, pour un béton témoin (BT) une cure de 28 jours le taux de diminution est marqué de 45%, le cas d'une cure de 3 jours et 7 jours le taux calculé est de 41% et 13% respectivement. Pour un béton avec laitier (BL15%) pour les trois régimes de cure 3,7 et 28 jours le taux respectivement ; 12 %, 24%, 33%. Pour un béton avec la pouzzolane (BZ15%) pour les trois régimes de cure 3,7 et 28 jours le taux respectivement ; 13 %, 27%, 33%. Pour un béton avec laitier (BL30%) pour les trois régimes de cure 3,7 et 28 jours le taux respectivement ; 9.5 %, 32%, 49.5%. Pour un béton avec la pouzzolane (BZ30%) pour les trois régimes de cure 3,7 et 28 jours le taux respectivement ; 11.4 %, 33%, 50% [145].

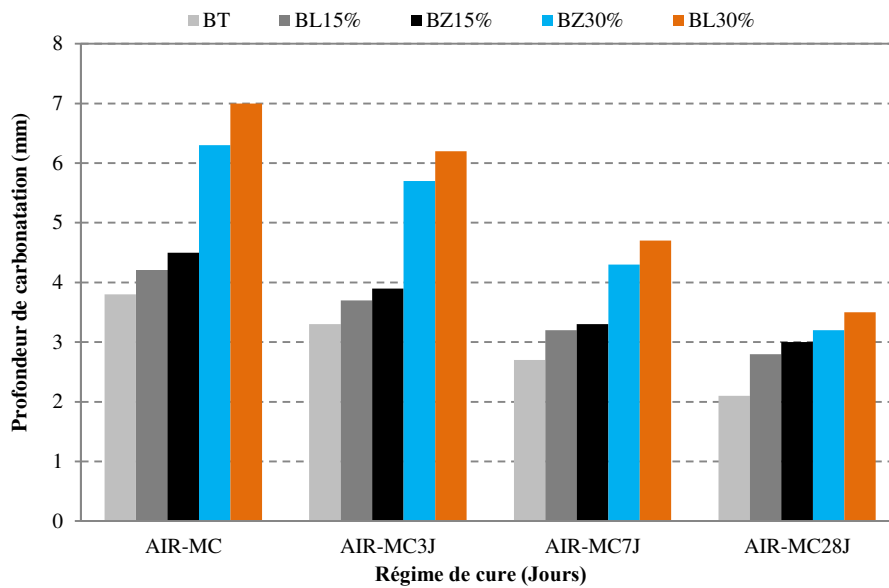


Figure 4.28 : Effet du régime de cure humide sur la profondeur de carbonatation (mm) à 1an.

4.6.8. Résistance à la compression et Profondeur de carbonatation

La Figure 4.29 nous montre l'évolution des fronts de carbonatation (1an) en fonction de la résistance à la compression des différents bétons d'étude à 90 jours. La tendance générale de diminution des profondeurs de carbonatation des bétons étudiés avec l'augmentation de leurs résistances en compression à 90 jours est en accord avec la littérature; [45-144-44-36].

D'après la tendance de la courbe, Il n'est pas possible d'en dégager une bonne corrélation ( $R^2 = 0.4199$ ) Nous observons que plus la résistance augmente plus le front de carbonatation est faible, cela est dû à sa bonne compacité.

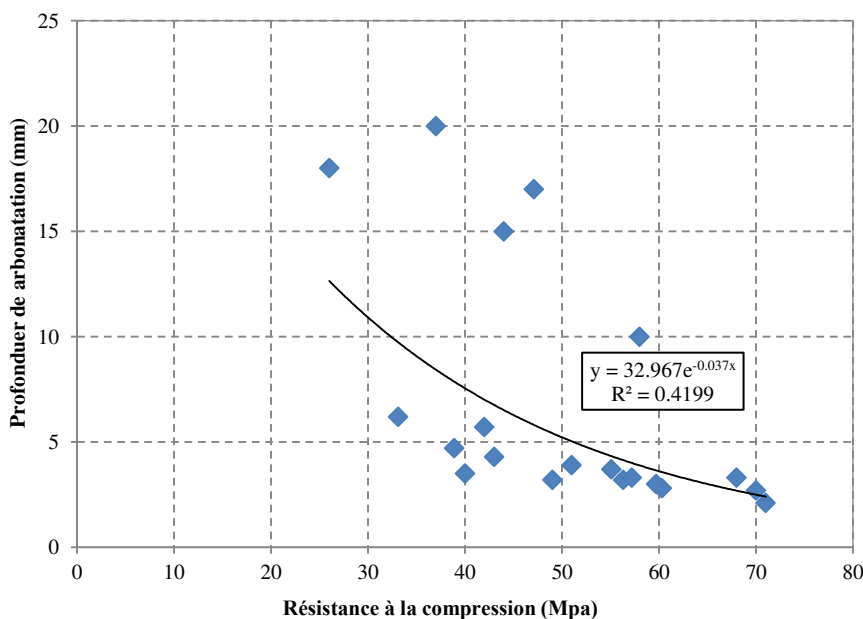
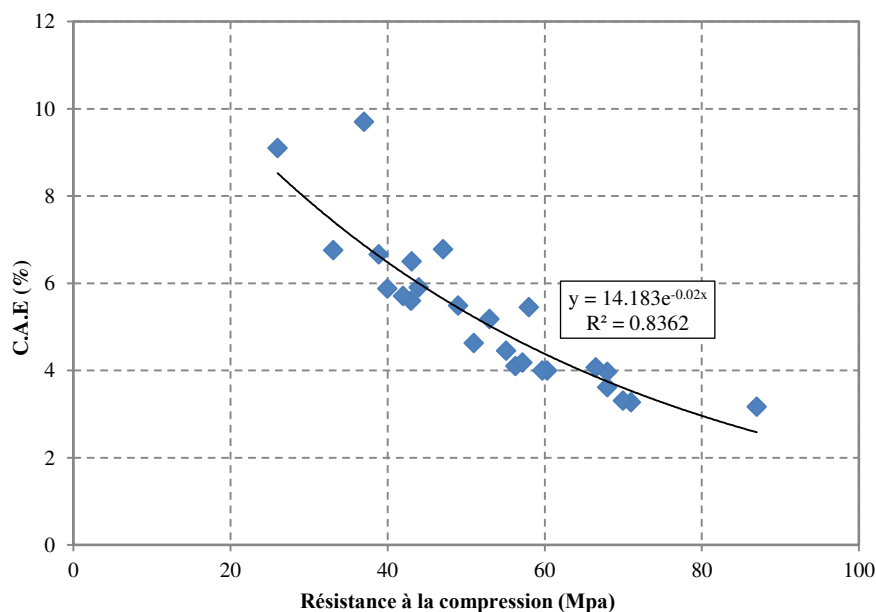


Figure 4.29 : Résistance à la compression en fonction du Profondeur de carbonatation.

#### 4.6.9. Résistance à la compression et Coefficient d'absorption d'eau (%)

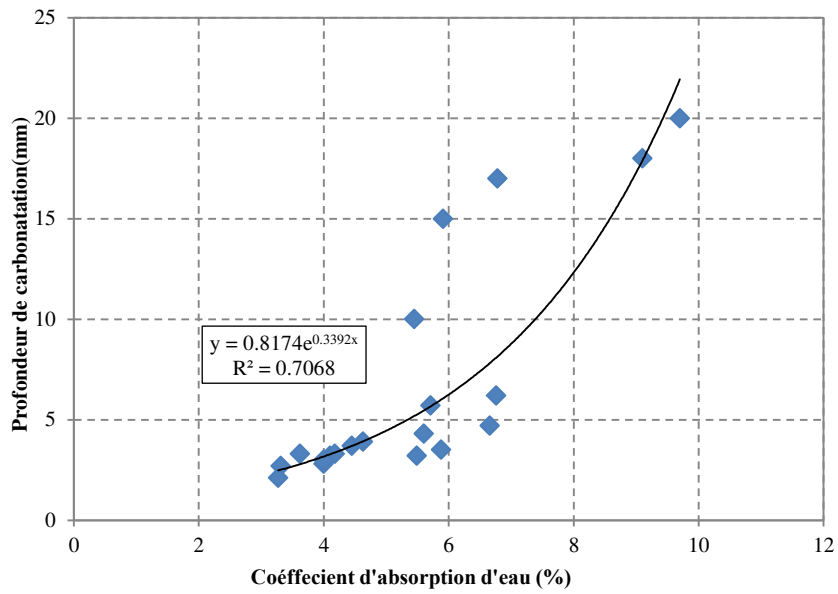
La Figure 4.30 trace l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la porosité des différents bétons ( $R^2 = 0.8362$ ). L'augmentation de la porosité entraîne la diminution de la résistance à la compression. Ceci est vérifié pour tous les types de bétons étudiés. Ceci peut s'expliquer par le fait que le béton qui possède un teneur d'addition important entraîne une porosité plus importante par conséquent une diminution de la résistance à la compression.



**Figure 4.30 :** Résistance à la compression en fonction du Coefficient d'absorption d'eau(%).

#### 4.6.10. Profondeur de carbonatation et l'absorption d'eau (%)

D'après La Figure 4.31 la relation entre la porosité et la profondeur de carbonatation pour tous les bétons est vérifiée. Nous observons une bonne corrélation linéaire ( $R^2 = 0.7068$ ). Entre ces deux paramètres. Cela signifie qu'une simple mesure de la porosité représente déjà un bon estimateur de l'état de la carbonatation. [149].



**Figure 4.31** : Profondeur de carbonation en fonction du Coefficient d'absorption d'eau.

#### 4.7. Conclusion

Cette partie de la campagne d'essais a permis de confirmer un certain nombre de résultats Concernant l'influence de la cure humide et certains types d'additions minérales sur les propriétés physico-mécanique et microstructurales des différentes matrices étudiées ;

-La prolongation de la cure humide favorise le développement de la réaction pouzzolanique seulement si les différentes matrices sont conservées dans l'eau. Dans le cas contraire, son action est presque négligeable. D'une manière générale, la conservation sèche n'est pas favorable à la réaction pouzzolanique.

-En effet un faible dosage en ciment provoque des réponses mécaniques faibles par la suite, L'accroissement de résistance par effet pouzzolanique qui prend toute son ampleur à long terme ce comportement est exprimé par des faibles résistances au jeune âge.

-la résistance à la compression à 365 jours de ciment de mortier à base d'addition tel que (BL30%) (BZ30%) sont plus faible par rapport au mortier témoin CPA. la même remarque pour le béton.

-en ce qui concerne la profondeur de carbonatation, les épaisseurs carbonatées des différentes matrices avec un certain teneur d'addition sont plus importantes .

-Les résultats montrent que la cure humide a un effet remarquable sur les cinétiques de Carbonatation en réduisant les profondeurs de carbonatation atteintes dans le cas de la conservation à l'air.

-la capacité de remplissage de la porosité par la formation de produits hydratés est plus importante pour les ciments sans addition. En raison des différences dans leur processus d'hydratation, un ciment avec un certain teneur d'addition présente une hydratation lente et par conséquent incomplète, alors que le clinker portland présent à 90% dans le ciment témoin S'hydrate de manière quasi-complète. Le volume d'hydrates produits est donc plus important dans le cas du ciment sans addition

- la relation étudiée souligne l'intérêt de la mesure de la résistance à la compression qui permet d'estimer la durabilité à la carbonatation et sa porosité quel que soit son dosage en ciment mais surtout indépendamment de son histoire de conservation.

---

*Conclusions Générales et  
recommandations*

---

### **Conclusions général et recommandations**

Ce présent travail avait pour objectif de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la bibliographie concernant l'influence de la cure humide sur les caractéristiques du mortier et béton étudiées à l'état durci, ainsi la microstructure de la pâte pure.

Pour donner à l'étude un caractère pertinent et assez généralisé, il a été décidé de procéder aux travaux de recherche en considérant des additions minérales disponible en Algérie, afin de pouvoir mettre en évidence tous les effets mécaniques, physiques par ces additions sur les matériaux cimentaires et comparer les résultats obtenus avec les travaux de recherches. Quelques enseignements peuvent malgré tout être tirés de cette étude :

-l'effet bénéfique du mode de conservation (sans cure): les échantillons conservé dans l'eau montre une amélioration des performances, ce mode augmente les résistances mécaniques des différents type de ciment de mortier et béton étudiés, il affine la porosité et par conséquence il diminue la profondeur de carbonatation. Cet effet positif est plus marqué pour les mortiers avec addition par rapport au mortier témoin CPA. Pour le béton c'est le cas de témoin (BT) sans additions.

-Concernant la profondeur de carbonatation ; du point de vue cinétique, la carbonatation dépend plusieurs facteurs, notamment le type de ciment, de la nature et de la teneur de l'addition minérale. Il se dégage de l'étude que la conservation l'eau a pour effet de minimisé les profondeurs de carbonatation des mortiers par rapport à l'air. La carbonatation naturelle à l'air au bout de 28 jours génère dans le cas d'un mortier à base d'addition une altération 3 fois plus profonde que la carbonatation à 2 jours, pour les bétons avec des teneurs de laitier et pouzzolane de 15% (BL15%) (BZ15%) l'altération présente un effet de 6 fois et 5 fois respectivement plus profonde que la carbonatation à 7 jours.

-la durée de cure humide à des effets immédiats sur l'acquisition des caractéristiques mécaniques et physiques de différentes matrices étudiés.

- La résistance mécanique des mortiers et béton élaborés est d'autant plus remarquable que le dosage en ciment est faible, on a pu souligner une plus grande sensibilité des mortiers et béton avec addition vis-à-vis la cure.

-Le coefficient d'absorption d'eau est d'autant plus fort qu'il est mesuré sur des bétons à faible dosage en ciment, en outre l'augmentation de la cure diminue d'autant plus ce coefficient.

-La profondeur de carbonatation croit avec l'augmentation de la teneur d'addition dans les mortiers et bétons étudiés. Une teneur importante en addition entraîne une profondeur de carbonatation importante.

- un ciment qui génère plus d'hydrate par rapport au ciment avec addition et donc de porosité moins grossière nettement plus faible, ceci explique les performances mécaniques plus élevées .

-Enfin la relation entre l'absorption la profondeur de carbonatation la résistance mécanique et qui permet de prendre en compte à la fois les facteurs de composition et les conditions de conservation, pourrait donc être un élément à considérer dans la prévision de la durabilité.

-Les résultats de cette étude pourraient être bénéfiques pour l'industrie de construction en général et spécifiquement leur impact positif sur les conditions de maturation des bétons face aux émissions poussiéreuses et de gaz CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

Des études cependant sont nécessaires afin d'asseoir les résultats de ce présent travail qui pourraient d'ailleurs être étendus à d'autres indicateurs de durabilité et essais de performance, comme la perméabilité au gaz ou le coefficient de diffusion des ions chlorure, Une modélisation de l'interaction hydratation/séchage/carbonatation.

Ces voies proposées doivent permettre de mieux appréhender le comportement vis-à-vis d'attaques agressives, autrement dit, lié à la durabilité de matériaux dont l'utilisation ne peut que prendre de l'ampleur au regard des exigences environnementales qui ne feront que s'accroître dans l'avenir.

---

## *Références bibliographiques*

---

**Références bibliographiques**

- [1] **Ollivier J-P et Vichot A.** « La durabilité dans le contexte normatif européen », chapitre 7. La durabilité des bétons: Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008 ; 251-267.
- [2] **BAROGHEL-Bouny V.** « Durability indicators: relevant tools for performance- based evaluation and multi-level prediction of durability». International RILEM Workshop on Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability, Madrid, 2006, mars 19-21.
- [3] **AFGC (Groupe de travail).** «Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité, Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages». Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali Réaction, éd. AFGC, Bagneux, 2004, 30-41.
- [4] **AFPC-AFREM.** «Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité ». Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM, 1997, décembre 11 -12.
- [5] **GranDuBé.** Grandeurs associées à la durabilité des bétons, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Presses des Ponts et Chaussées, 2007.
- [6] **ANDRADE C, ALONSO C, ARTEAGA A et TANNER P.** « Methodology based on the electrical resistivity for the calculation of reinforcement service life ». L'industria italianna del cement , n° 764, 2001, 330-339.
- [7] **BAROGHEL-Bouny V, Cussigh F et Rougeau P .**« l'approche performantielle de la durabilité des bétons », Chapitre 8. La durabilité des bétons: Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [8] **ASTM C 1202.** «American society for testing and materials ASTM C1202 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration» ,2009.
- [9] **PAPADAKIS V G, VAYENAS C G and FARDIS M N.** «Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete ». ACI materials journal, vol. 88, n° 2, 1991, 186-196.
- [10] **BAROGHEL-BOUNY V, GAWSEWITCH J, BELIN P, OUNOUGH K , ARNAUD S , OLIVIER G et BISSONNETTE B.** « Vieillissement des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXIe siècle. IV : résultats issus des prélèvements

effectués sur les corps d'épreuve de différents sites aux premières échéances de mesure ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, n° 249, mars-avril, 2004, 49-100.

[11] **ROZIERE E.** « Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle ». Thèse de doctorat de l'École Centrale de Nantes, 2007.

[12] **LCPC.** « Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis d'une réaction sulfatique interne ». Méthode d'essai LPC n° 66.

[13] **PAVOINE A.** « Évaluation du potentiel de réactivité des bétons vis-à-vis de la formation différée de l'ettringite ». Thèse de doctorat, université Pierre et Marie Curie Paris VI, 2003.

[14] **KASSOUMI L, AIT ELAAL M. OUALI A, ESSAMOUD R, et GHAFIRI A.** « Approche performantielle et prédictive du béton des ouvrages d'art sur la base d'indicateurs de durabilité » Département de Géologie, Faculté des sciences Ben M'sik, Université Hassan II – Mohammadia, Maroc.

[15] **OUALIT M.** « Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien ». Mémoire de Magistère, Université M'Hamed Bougara- BOUMERDES, 2009.

[16] **Rical Khelifa M .** « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplacants » Thèse de doctorat de l'université de Constantine, 2009.

[17] **IHEKWAB N M, HOPE B B , et HANAAON C M.** « Carbonation and Electrochemical Chloride Extration from concrete », Cement and concrete Research, 1996, 206: 1095-1107.

[18] **CASTRO P , MORENO E I, et GENESCA J.** « Influence of Marine Micro-Climates on Carbonation of Reinforced concrete Buildings ». Cement and Concrete Research, 2000, 30: 1565-1571.

[19] **ROPER H. ET BAWEJA D.** « Carbonation-Chloride Interaction and their influence on Corrosion Rates of Steel in Concrete ». Durability of concrete. ACI SP- 126, 1991, 295-315.

[20] **CHAUSSADENT T.** « État des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé ». Rapport technique, Thème de recherche OA9, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1997.

[21] **BAROGHEL-BOUN V et CAPRA B et LAURENS S.** « La durabilité des armatures et du béton d'enrobage ». Chapitre 9. La durabilité des bétons, Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008, 311.

- [22] **CHAUSSADENT T.** « Etat des lieux et réflexions sur la carbonatation du béton armé » Septembre, 1999.
- [23] **THIERY M.** « Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons – Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique », Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2005.
- [24] **CHANG J, YEIH W, HUANG R ET CHEN C.** « Suitability of several current used concrete durability indices on evaluating the corrosion hazard for carbonated Concrete ». Materials Chemistry and Physics, 2004, 84: 71–78.
- [25] **YOON I K, LU O C, ET PARK K.** «Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete». Atmospheric Environment Journal, 2007, 41, 7274 – 7285.
- [26] **Pascal P.** « Nouveau traité de chimie minérale ». Propriétés physiques de l'analyse carbonique, 8, Masson, 1968.
- [27] **Valsaraj K T.** « Elements of environmental engineering ». Thermodynamic sand kinetics, CRC Press, 1995, 649.
- [28] **DUNSTER A M.** « An investigation of the carbonation of cement paste using trimethylsilylation ». Advances in Cement Research, 1989, 2, 99-106.
- [29] **SAUMAN Z.** « Carbonization of porous concrete and its main binding Components », Cement and Concrete Research, 1971, 1: 645-662.
- [30] **BENSTED J.** « A discussion of the paper decomposition of synthesized ettringite by carbonation by T. Nishikawa, K. Suzuki, S. Ito, K. Sato, T. Takebe », Cement and Concrete Research, 1992, 22, 719-720.
- [31] **SCHIESSL, P.** « Zur Frage der zulässigen Rissbreite und der erforderlichen Betondeckung im Stahlbetonbau unter besonderer Berücksichtigung der Karbonatisierung des Betons ». Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau , 255, 1976, 39-49.
- [32] **Sulapha P ,Wong S F, Wee T H and Swaddiwudhipong S.** « Carbonation of Concrete Containing Mineral admixtures ». Journal of Materials in Civil Engineering, 15 (2), 2003, 134-143.
- [33] **Song H W , Kwon S J , Byun K J and Park C K .** Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. Cement and Concrete Research, 36 (5), 2006, 979-989.
- [34] **Younsi A.** «Carbonatation de béton à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales». Thèse de Doctorat d'Université de la Rochelle, 2011.
- [35] **BARON J.** « Formation de la microstructure. Hydratation, prise, durcissement ». Le béton et l'eau, Séminaire Saint-Rémy-lès-Chevreuse, 18-20 juin 1985, Conseil international de la langue française, 1987, 26-45.

- [36] **Parrott L J.** « A review of carbonation in reinforced concrete ». British cement Association, 1987, 126.
- [37] **Duval R.** « La durabilité des armatures et du béton d'enrobage, dans La durabilité des bétons ». Collection de l'ATHIL3. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. 1992, 492.
- [38] **VENUAT M and ALEXANDRE J.** « De la carbonatation du béton ». Revue Matériaux Construction. n° 638 et 639, 1968, p. 421-427 et p. 469-481, n° 640, 1969, 5-15.
- [39] **Paillère A M , Raverdy M and Grimaldi G.** « Carbonation of concrete with low-calcium fly ash and granulated blast furnace slag: influence of air-entraining agent sand freezing-and-thawing cycles ». 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, 1986.
- [40] **Bier T A.** « Influence of the type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes », Materials Research Society Symposium Proceedings, 85, 1986, 123 doi:10. 1557/PROC-85-123.
- [41] **Lin X X and Y Fu.** « Influence of the type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes ». 4th International Conference on Durability of Buildings Materials and Components, 1987.
- [42] **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, 25 (5), 1992, 293-304.
- [43] **Thomas J and Matthews D.** «Carbonation of fly ash concrete ». Magazine of Concrete Research, 44 (160), 1992, 217-228.
- [44] **Nischer P.** « Effect of environment and concrete quality on carbonation ». Betonwerk und Fertigteil-Technik, 50 (11), 1986, 752-757.
- [45] **TSUKAYAMA R, ABE H and NAGATAKI S.** «Long-term experiments on the neutralization of concrete mixed with fly ash and the corrosion of reinforcement ». 7e Congrès international de la chimie des ciments, Paris, 3, 4, 1980, 30-35.
- [46] **Lawrence C D.** «Transport of oxygen through concrete». British Ceramics Society Proceedings, 35, 1984, 277-293.
- [47] **Schölink K and Hilsdorf H K.** « The potential durability of concrete ». 9<sup>th</sup> European Ready Mixed Concrete Organisation Congress, ERMCO 89, Oslo, 1989.
- [48] **Delmi M M Y.** «Étude de l'hydratation et du couplage carbonatation échanges hydriques dans les mortiers et bétons». Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2004.

- [49] **Fattuhi N I.** « Concrete carbonation as influenced by curing regime». *Cement and Concrete Research*, 18 (3), 1988, 426-430.
- [50] **Loo Y H , Chin M S , Tam C, Ong T. and K C G A .** « Carbonation prediction model for accelerated carbonation testing of concrete». *Magazine of Concrete Research*, 46 (168), 1994, 191-200.
- [51] **Atiş C D.** « Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash ». *Construction and Building Materials*, 17 (3), 2003, 147-152.
- [52] **De Ceukelaire L. D and Van Nieuwenburg.** «Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete ». *Cement and Concrete Research*, 23 (2), 1993, 442-452.
- [53] **Van Balen, K and Van Gemert, D.** « Modelling lime mortar carbonation » .*Materials and Structures*, 27 (7), 1994, 393-398.
- [54] **Saetta A V, Schrefler B A and Vitaliani R V.** « 2-D Model for carbonation and moisture/heat flow in porous materials». *Cement and Concrete Research*, 25 (8), 1995, 1703-1712.
- [55] **Houst Y F.** «Diffusion de gaz, carbonatation et retrait de la pâte de ciment durcie ». Thèse de Doctorat de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1992.
- [56] **Sanjuán M A and Del Olmo C.** « Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating ». *Building and Environment*, 36 (8), 2001, 949-953.
- [57] **Venuat M.** «Relation entre la carbonatation du béton et les phénomènes de la corrosion des armatures du béton ». *Annales de l'ITBTP*, 364, 1978 42-47.
- [58] **Ngoc Tru VU.** « Contribution à l'étude de la corrosion par carbonatation du béton armé : approche expérimentale et probabiliste », Université de Toulouse .2011, 16.
- [59] **RAFAÏ N, HORNAIN H, VILLAIN G, BAROGHEL BOUNY V, PLATRET G et CHAUSSADENT, T.** «Comparaison et validité des méthodes de mesure de carbonatation », *Revue française de génie civil*, 2000, 6 : 251-274.
- [60] **Parrott L J and Killoh D C.** « Carbonation in 36 years old, in-situ concrete ». *Cement and Concrete Research*, 19(4): 649-656, 1989.
- [61] **KASHINO N.** « Investigation into limit of initial corrosion in existing RC structures ». *Durability building materials and components*, 3, 1984, 176-186.
- [62] **Mounanga P.** «Étude expérimentale du comportement de pâtes de ciment au très jeune âge : hydratation, retrait, propriétés thermophysiques ». Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.

- [63] **Rafai N, Letolle R, Blanc P, Person, A and Gegout P.** «Isotopes geochemistry (13C, 18O) of carbonation processes in concrete». *Cement and Concrete Research*, 21 (2-3), 1991, 368-377
- [64] **Fumiaki M, Yoshimichi A, and Sumio S.** « Carbonation degree of autoclaved aerated concrete ». *Cement and Concrete Research*, 30 (11). 2000, 1741-1745.
- [65] **HYVERT N.** «Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton », Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, 2009.
- [66] **Richardson I G. Groves G W. Brough A R and Dobson C M.** « The carbonation of the opc /silica fume of hardened cement pastes in air under conditions of fixed humidity ». *Advances in Cement Research*, 5 (18), 1993, 81-86.
- [67] **Valls S and Vásquez E.** «Accelerated carbonation of sewage sludge cement- sand mortars and its environmental impact » *Cement and Concrete Research*, 31 (9), 2001, 1271-1276.
- [68] **TUUTTI K.** «Corrosion of steel in concrete ». Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- [69] **Miragliotta R, Rougeau P, Aït-Mokhtar and Amiri O.** « A methodology for predicting the advance of carbonation in concrete: Influence of the microstructure of the skin layer on concrete carbonation kinetics ». 16th BIBM International Congress, Venezia, 1999.
- [70] **Delmi M M Y, Aït-Mokhtar K and Dumargue P.** « Experimental quantification of the products of carbonation of cement-based materials ». 10th DBMC International conference on Durability of Building Materials and Components, Lyon, 17- 20 April 2005.
- [71] **Metalssi O O.** « Étude des couplages hydratation-échanges hydriques carbonatation dans les mortiers modifiés polymères ».Thèse de Doctorat de l'Université de La Rochelle, 2006.
- [72] **Metalssi O O and Aït-Mokhtar A.** « A proposed methodology for a quantitative investigation of carbonation in polymer-modified mortars». *Experimental Techniques*, 33 (6), 2009, 59-65.
- [73] **Powers, T.C** «A Hypothesis on Carbonation Shrinkage ». *Journal of the PCA Research and Development Laboratories*, 4 (2), 1962, 40-50.
- [74] **YOUNG J F, BERGER R L ET BREESE J.** « Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO<sub>2</sub> ». *Journal of the American Ceramique Society*, 1974, 57: 384 – 397.
- [75] **Pihlajavaara S E.** «Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste». *Materials and Structures*, 1 (6), 1968, 521-525.

- [76] **Swenson E G and Sereda P J.** « Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. *Journal of Applied Chemistry*, 18 (4), 1968, 111- 117.
- [77] **Daimon M, Akiba T and Kondo R.** «Through pore size distribution and kinetics of the carbonation reaction of Portland cement mortars». *Journal of the American Ceramic Society*, 54 (9), 1971, 423-428.
- [78] **Meyer A.** «Investigations on the carbonation of concrete », 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.
- [79] **Khan M I and Lynsdale C J.** « Strength, permeability, and carbonation of high performance concrete ». *Cement and Concrete Research*, 32 (1), 2002, 123-131.
- [80] **Ohga H and Nagataki S.**« Prediction and evaluation of the depth of carbonation of concrete by accelerated tests ». *Concrete library of JSCE*, 12, 1989, 93-106.
- [81] **Medgyesi I.** « Nouveaux résultats dans la protection contre la corrosion ». 10th Triennial Congress of the International Council for Building Research (USA) , 6,1986, 2179-2185.
- [82] **A C I.** «Standard Practice for Curing Concrete ». **1997**, 11.
- [83] **BOMBLED J P.** « La cure du béton. Publication CERILH n°280 de la revue» .*Ciment, Bétons, Plâtres, Chaux*, n°746, 1984 , 45-48.
- [84] **ABQ (Association Béton Québec - 2005).** « La cure ». *Bulletin technique Techno-Béton*, n°8, 2005, 1-5.
- [85] **ACI.** «Guide to Curing Concrete» . 31. **2001**.
- [86] **Elanga-Poaty MBEMBA-KIELE.** «Influence du vent et de la cure sur le comportement des bétons au très jeune âge ». *Ecole Centrale de Nantes*, 2010.
- [87] **AL-FADHALA M and HOVER K C.** « Rapid evaporation from freshly cast concrete and gulf environmental » . *Construction and Building Materials*, 15, 2001,1-7.
- [88] **KOSMATKA S H.** «Bleeding. Significance of tests and properties of concrete and concrete ». *Making materials*, ASTMSTP 169C, P. Klieger and Lamond, eds. ASTM, West Conshohocken, Pa. 1994.88-111.
- [89] **LERCH W.** «Plastic shrinkage». *ACI Journal proceeding*, 53, 1975, 797-802.
- [90] **ACKER P, BARCELO L, BOVIN S & Al.** «Early age shrinkage of concrete: back to physical mechanism». *Concrete science and Engineering (Revue RILEM)*, 3, 2001, 85-91.
- [91] **BALAYSSAC J-P, DETRICHE Ch H & DIAFAT N.** «Influence de la durée de cure humide sur les caractéristiques mécaniques de bétons d’usage courant ». *Materials and Structures*, 30, 1997. 284-292.

- [92] **EL-DIEB A S.** «Self-curing concrete: Water retention, hydration, and moisture transport ». *Construction and Building Materials revue*, 21, 2006, 1282-1287.
- [93] **McCARTER W J. & BEN-SALEH A M.** «Influence of practical curing methods on evaporation of water from freshly placed concrete in hot climate». *Building and Environment*, 36, 2001. 919- 924.
- [94] **SLOWICK V, SCHMIDT M. & FRITZSCH R.** «Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry Value ». *Cement and Concrete composites*, 30, 2008. , 557-565.
- [95] **Ollivier J P et Angélique V.** « La maîtrise de la fissuration à jeune âge », *La durabilité des bétons, Bases scientifiques pour la formulation de béton dans leur environnement »* chapitre 6, Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 2008.
- [96] **BUSHLAIBI A H & ALSHAMSI A M.** « Efficiency of curing on partially exposed high-strength concrete in hot climate ». *Cement Concrete Research*, 32, 2002, 949-953.
- [97] **POWERS T C.** «The properties of fresh concrete». J. Wiley & Sons, Inc. 1968.
- [98] **ACI,** «Standard Practice for Curing Concrete ». 9, 1998.
- [99] **EN 196-2, (2002)** ; « Méthodes d'essais des ciments — Partie 2 : Analyse chimique des ciments ».
- [100] « Collection technique ciment béton fiches techniques », *Le ciment et ses applications* Nouvelle édition 2001
- [101] **EN 196-, (2002)**, « sable normalisé ISO), La norme européenne Sable est délivrée par AFNOR (Association Française de Normalisation) », certifiée EN 196-1, ISO Standard Sand, selon ISO 679.
- [102] **EN 933 -1, (2002)** , « Analyse granulométrique des agrégats ».
- [103] **EN 12350-6, (2009)**, «Essai pour béton frais - Partie 6: Masse volumique ».
- [104] **NF P 18-555, (1990)**, *Granulats - Mesures des Masses Volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des granulats*, Paris.
- [105] **DREUX G and FESTA J.** «Nouveau guide du béton et de ces constituants». Eyrolles , 1998;
- [106] **NF P 18-598.** *Granulats –Equivalent de sable*, Paris, 1990.
- [107] **NF P18-573.** *Granulats – Los Angeles*, Paris, 1990.
- [108] « Dossier technique de la société Granitex-NP », BP 85, 16270 Oued Smar, Alger.
- [109] **EN-1008, 2003**, « Eau de gâchage pour bétons Spécifications d'échantillonnage »
- [110] **EN 197 – 1, (2002)**, « Composition, spécifications et critères de conformité des Ciments courants ».

- [111] **EN 196-1, (2002)**, « Méthodes d'essais des ciments — Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques ».
- [112] **EN 196-3, (2002)**, « Méthodes d'essais des ciments — Partie 3 : Détermination du temps de prise et de la stabilité ».
- [113] **Bogue R H.** « Chemistry of Portland cement». 2nd Ed. New York: Reinhold Publishing Corp, 1955.
- [114] **EN 196-6, (2002)**, « Méthodes d'essais des ciments — Partie 6 : Détermination de la finesse ».
- [115] **Balayssac J P, Detriche Ch H and Diafat N.** « Effect of wet curing duration upon cover concrete characteristics », *Materials and structures*, **31**,1998 ,325-28.
- [116] **EN 12350- 2, (2009)**, «Essai pour béton frais - Partie 2: Essais D'affaissement ».
- [117] **Baroghel- Bouny V.** « Nouvelle approche de la durabilité du béton. Méthodologie et exemples », C 2246 (1-13);
- [118] « Essai de carbonatation accélérée. Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté ». Mode opératoire recommandé par l'AFREM. Compte rendu des journées techniques AFPC-AFREM « Durabilité des bétons », 11 et 12 décembre 1997, Toulouse, pp.153-158;
- [119] **Baroghel-Bouny V , Chaussadent T, Croquette G, Divet L , Gawséwitch J , Godin J, Henry D, Platret G. et Villain G.** « Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons -Méthodes de mesures et d'essais de laboratoire, Méthodes d'essai n°58 ». Dans: *Techniques et Méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, L.C.P.C. Paris, 2002.
- [120] **Bier Th A.** « Influence of the type of cement and curing on carbonation and pore structure of hydrated cement pastes », *MRS Symp Proceeding of Boston*, 85, 1986.
- [121] [http://www.wikiwand.com/fr/Analyse\\_thermogravim%C3%A9trique](http://www.wikiwand.com/fr/Analyse_thermogravim%C3%A9trique).
- [122] **EN 12390-2, (2009)**, « Essai pour béton durci - Partie 2: Confection et conservation.
- [123] **EN 12350-4, (2009)** , EN 12350-4, (2009), « Essai pour béton frais - Partie 4: Indice de serrage ».
- [124] **EN 12390-2, (2009)**, « Essai pour béton durci - Partie 2: Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance ».
- [125] **EN 12390-3, (2009)** , « Essai pour béton durci - Partie 3:Résistance à la norme Compression des éprouvettes ».
- [126] **EN 1097-10, (2003)**, « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et Physiques des granulats - Partie 10: Hauteur de succion d'eau ».
- [127] **Husson S,** *Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment-fillers.*

Application aux mortiers, Thèse de Doctorat, Université Saint-Etienne, 1991.

[128] **Prince W**, et al. « Interaction between ettringite and a polynaphtalene sulfonate superplasticizer in a cementitious paste » In: *Cement and Concrete Research* 32 (2002) pp: 79-85;

[129] **Sickert G**, «Extended modelling for the advance of carbonation in concrete». *Betonwerk und Fertigteil-Technik* , 63,1997, pp: 74-88.

[130] **Bakker (R.F.M)**, «Model to Calculate the rate of carbonation in concrete under different climatic conditions » Ijmuiden ; CEMIJ bv laboratorium ; 26 August 1993.

[131] **Schiessl P**, « Corrosion of steel in concrete » RILEM Report 25-46; Londres, 1988.

[132] **Baron J et Ollivier J.P**, « La durabilité des bétons », 1992.

[133] **Al-Akchar N**, « Modélisation de la diffusion gazeuse et du processus de carbonatation Dans les pâtes de ciment ». Thèse de doctorat, 1999.

[134] **Vernet C**, « Chemical stability of hydrates - Defense mechanism of concrete against Chemical attacks », the durability of concrete. Presses of l'ENPC, 1992.

[135] **Patel R G, Killoh D C, Parrott L J and Gutteridge W A**, « Influence of curing at Different relative humidities upon compound reactions and porosity of Portland cement Paste ». *Materials and Structures*, 21 (3), 1988, 192-197.

[136] **Ewertson C, Petersson P E** , « The influence of curing conditions on the permeability and durability of concrete. Results from a field exposure test ». *Cement and Concrete Research*, 23 (3), 1993, 683-692.

[137] **Baron R, Ollivier J P**, « Viser la durabilité Dans Les Bétons», Bases et données pour leur formulation. Collection de l'ATHIL, Edition Eyrolles, 1996, 307-363.

[138] **Garbev K**.« Structure, properties and quantitative Rietveld analysis of calcium silicate hydrates (C-S-H Phases) crystallised under hydrothermal conditions ». PhD Thesis, Institute for Technical Chemistry of the Faculty of Chemistry and Geosciences of the Ruprecht-Karls-Universitat Hiedelberg , Germany, June, 2004.

[139] **Taylor HFW**, « Cement chemistry ». 2nd ed. London, Thomas Telford Publication, 1998

[140] **Lam L, Wong Y L, and Poon C S**. « Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems ». *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 5, pp. 747-756, 2000.

[141] **Darquennes A**. « Comportement au jeune âge de bétons formulés à base de ciment au laitier de haut-fourneau en condition de déformations libre et restreinte ». Thèse de Doctorat de l'Université Libre de Bruxelles, 2009.

- [142] **Price W H.** « Factors influencing concrete strength », Journal of the American Concrete Institute, 47 (2), 1951, 417-432.
- [143] **Smolczyk H.** « Physical and chemical phenomena of carbonation ». RILEM International Symposium on Carbonation of Concrete, C&CA, Fulmer grange, 1976.
- [144] **Wierig H.** « Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure », RILEM Seminar, Hannover, 1984.
- [145] **Papadakis VG .** « Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress». Cement and Concrete Research, 30 (2), 2000, 291-
- [146] **HANZIC L and ILIÉ R.** «Relationship between liquid sorptivity and capillarity I concrete». Cement and concrete Research, 33, 2003, 1385-1388.
- [147] **BALAYSSAC , DETRICHE J P et GRANDET J.** « Intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage». Materials and Structures, 1993, Vol. 26, pp 226-230.
- [148] **Monge J.** «Fissuration des mortiers en couches minces – Effets de l'hydratation, du séchage et de la carbonatation, Thèse de Doctorat de l'École Normale Supérieure de Cachan, 2007.
- [149] **Miragliotta R.** « Modélisation des processus physico-chimiques de la carbonatation des bétons préfabriqués - Prise en compte des effets de parois ». Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle, 2000.