

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut de Technologie
Département de Génie Civil



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

**Effet de la carbonatation sur les mortiers à base de
la pouzzolane et la poudre de marbre.**

Présenté Par :

- 1) HANAFI Wissam
- 2) BOUDISSA Karim Abdelkader

Devant les jurys composés de :

Mme. BEN DOUINA	Khadidja	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Mme. DERBEL	Ahlem	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur
Mr. HOUMADI	Youcef	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

Année universitaire 2018/2019

• *Remerciements :*

- D'abord je remercie avant tout mon dieu c'est grâce à lui seul que j'ai pu achevé ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur madame **DERBEL Ahlem**, pour ses précieux conseils pour leur soutien ainsi que pour la pertinence de ses remarques dans la construction de ce travail de recherche.

Je remercie : **Mr KADDOU, Melle Nadjat et Melle Kawthar** : les ingénieurs de laboratoire des matériaux de construction du département de génie civil du Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, Pour leurs aides jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

J'aimerais également remercier mes enseignants (es) du département de génie civil.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace :

Je dédie ce mémoire à tous qui me sont chers :

A la plus belle mère qui a ma aider pour ma réussite avec tendresse et
compassion.

A mon père qui ma toujours poussée et motivée merci papa que dieu te protège.

Amour et respect pour leurs grands sacrifices.

A ma chère sœur : Ahlem.

A mes grande mère et mes deux frères : Mohamed & Abdelrafie.

A mon mari qui a toujours était à mes cotés.

Mes camarades, mes amies surtout Asmaa & Narimane.

Ma famille grands et petits et tous mes enseignants.

Et tous ceux qui portent l'Algérie dans leurs cœurs.

Wissam

Dédicace :

Je dédis ce mémoire a

Ma mère, qui ma encouragé de reprendre mes études.

Mon père qui a nous quitté le 21/01/2014. (ربي یرحمه ویدخله فسیح جناته).

A mes deux frères : Kamel et Kheireldinne.

A mes deux chères sœurs.

A mon oncle qui mon soutien ou cours de mes études.

A tous mes amis

A toute ma famille et toute personne que j'aime.

Karim

Sommaire

Introduction Général :	3
<u>Chapitre I : Etude bibliographique sur les mortiers</u>	
I.1. Introduction :	2
I.2. Définition du béton :	2
I.3. Les mortier :	2
I.3.1. Définition :	3
I.3.2. Constituants des mortiers :	3
I.3.2.1. Ciment :	3
I.3.2.1.1. Type de ciment :	4
I.3.2.2. Le sable :	4
I.3.2.3. L'eau de gâchage :	5
I.3.2.4. Les adjuvants :	5
I.3.2.5. Les ajouts :	7
I.3.2.5.1. Les ajouts minéraux actifs :	7
• La pouzzolane :	7
• La pouzzolane naturelle :	7
➤ Leurs compositions chimiques :	8
• La pouzzolane artificielle :	8
➤ Effet de la pouzzolane :	8
➤ Propriétés de la pouzzolane :	9
➤ L'utilisation de la pouzzolane :	9
• Le laitier :	9
• Les poudres fines :	10
➤ Les cendres volantes :	10
➤ Fumée de silice :	10
I.3.2.5.2. Les ajouts inertes :	10
• La poudre de marbre :	10
➤ Classification de marbre :	11

• Les fillers calcaires :	11
➤ Rôles des fillers de calcaires :	12
I.3.3. Différents types des mortiers :.....	12
I.3.3.1 Selon leur domaine d'utilisation :.....	12
I.3.3.2 Selon la nature du liant :.....	13
• Les mortiers de ciment :.....	13
• Les mortiers bâtards :.....	13
• Les mortiers de chaux :	13
• Les Mortiers réfractaire :.....	13
• Les Mortiers rapide :.....	13
• Les Mortiers industriel :.....	13
I.3.4. Classes des mortiers :.....	14
I.3.5. Caractéristique de mortiers :.....	14
I.3.5.1. L'ouvrabilité :	14
I.3.5.1.1. Table à secousses :	15
I.3.5.1.2. Maniabilimètre du LCPC :	16
I.3.5.1.3. Le cône :	16
I.3.5.2. La résistance :	16
I.3.5.3. Caractéristique mécanique des mortiers :	16
I.3.5.3.1. Résistances mécaniques :	16
• Résistance à la compression :.....	17
• Résistance à la flexion :	17
• Résistance à la traction :.....	17
I.3.5.4 Retrait et gonflement.....	18
I.3.5.4.1. Le Retrait :	18
I.3.5.4.2. Le gonflement :	19
I.3.6. Masse volumique apparente :	19
I.3.7. Masse volumique absolue :	19
I.3.8. Porosité et compacité :	19
I.3.8.1. La porosité :	19

I.3.8.2. La compacité :.....	19
1.3.9. Fluage :.....	19
I.3.10. Module d'élasticité :.....	20
1.4. Conclusion :	21

Chapitre II: Durabilité du béton

II.1. Introduction :	22
II.2. Indicateurs de durabilité généraux :	22
II.2.1. La carbonatation :	22
II.2.1.1. Définition :.....	22
II.2.1.2. La profondeur de carbonatation:	23
II.2.1.3. Conséquence :.....	24
II.2.2. La porosité :.....	24
II.2.2.1. Définition :.....	24
II.2.2.2. La porosité accessible à l'eau :.....	25
II.2.2.3. Propriétés des pores :	25
II.2.3. Coefficient de diffusion des ions chlorures.	25
II.2.3.1. Définition :.....	25
II.2.4. Perméabilité :.....	26
II.2.4.1. Définition :.....	26
II.2.4.2. Perméabilité aux gaz :.....	28
II.2.4.3. Perméabilité au l'eau :	28
II.2.4.4. Pour diminuer la perméabilité d'un matériau poreux :.....	28
II.4. Conclusion :.....	29

Chapitre III: Carbonatation des bétons

III.1. Introduction :.....	30
III.2. Définition de phénomène de carbonatation :.....	30
III.2.1. Carbonatation des bétons :.....	31
III.3. Le dioxyde de carbone :.....	32

III.4. Données physico-chimiques pour le gaz carbonique.....	32
III.5. Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère :	33
III.6. Le gaz carbonique en phase aqueuse.	33
III.6.1. Diffusion du CO ₂ dans le béton et sa dissolution dans la solution interstitielle.	33
III.6.2.Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone :.....	34
III.7. Durabilité des bétons :	35
III.8. Mécanismes de la carbonatation du béton :.....	36
III.9. Carbonatation des constituants du béton :	36
III.9.1. Carbonatation de la portlandite :.....	36
III.9.2. Carbonatation des autres hydrates des bétons :	37
III.10. Principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons :.....	37
III.10.1. Paramètres intrinsèques aux bétons :.....	37
➤ Rapport eau/ciment (E/C) :	37
➤ Dosage en ciment :.....	38
➤ Effet de pouzzolanes sur la carbonatation du ciment :	38
➤ Résistance à la compression :.....	39
➤ Perméabilité au gaz :.....	39
➤ Degré de saturation des pores en eau liquide :	39
III.10.2. Paramètres extrinsèques aux bétons :.....	39
➤ Influence des conditions de cure :	39
➤ Humidité relative :	40
➤ Concentration en CO ₂ :	41
➤ Température :.....	43
III.11. Principales conséquences de la carbonatation :.....	43
III.11.1. Diminution du pH et amorçage de la corrosion :.....	43
III.11.2. Modification de la porosité :.....	44
III.11.3. Retrait de carbonatation :	45
III.11.4. Modification des propriétés mécaniques :.....	45
III.11.5. Modification des propriétés de transfert :.....	46
III.11.6. Modification de la teneur en eau :.....	46

II.12. Profondeur de carbonatation :	46
III.13. Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation :	46
III.13.1. Carbonatation Naturelle.	47
III.13.2. Carbonatation accélérée :	47
II.13.3. Détection de pulvérisation à la phénolphtaléine :	47
III.14. Conclusion :	50

Chapitre IV: Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

IV.1. Introduction :	52
IV.2. Matériaux utilisés :	52
IV.2.1. Sable :	52
IV.2.1.1. Sable de mer :	52
IV.2.1.2. Sable concassé :	53
IV.2.2. Ciment :	54
IV.2.2.1 Composition chimique et minéralogique du ciment :	54
IV.2.3. L'eau de gâchage :	54
IV.2.4. L'adjuvant :	55
IV.2.4.1. Caractéristiques :	55
IV.2.4.2. Domaines d'application :	56
IV.2.5. la pouzzolane :	56
IV.2.6. La poudre marbre blanche :	59
IV.3. Méthodes d'essais :	61
IV.3.1. Masse volumique apparent des granulats et ciments :	62
IV.3.2. Masse volumique absolue :	63
IV.3.3. Equivalent de sable :	63
IV.3.4. Foisonnement :	64
IV.3.5. analyse granulométrique du sable :	64
IV.3.5.1. Analyse granulométrique du sable de carrière :	65
IV.3.5.2. Analyse granulométrique du sable de mer.	66
IV.4. Mortiers étudiés :	67

IV.4.1. La composition de mortiers :.....	67
IV.4.2. Mortiers prismatiques :.....	67
IV.4.3 Procédure de gâchage :.....	68
IV.4.5.Préparation des éprouvettes :.....	69
➤ Moulage des éprouvettes :.....	69
IV.4.6. Âge des éprouvettes pour les essais sur les mortiers :.....	71
IV.4.7.Essais à l'état frais des mortiers :.....	71
IV.4.7.1. Maniabilité :.....	71
IV.4.7.2. L'air occlus.	72
IV.4.8. Les essais mécaniques sur les mortiers :.....	73
IV.4.8.1. Essais de flexion:.....	73
IV.4.8.2. Essais de compression :.....	74
IV.4.9. Essai de carbonatation accélérée en laboratoire :.....	74
➤ Principe de l'essai :.....	75
➤ Conduite de l'essai :.....	75
IV.4.9.1. Suivi de la progression de la carbonatation :.....	75
IV.4.9.1.1. Mesure de la profondeur de carbonatation :.....	75
IV.5. Conclusion :.....	77

Chapitre V: résultats des essais et interprétations

V.1. Introduction :.....	79
V.2. Interprétations des résultats :.....	79
V.2.1. Essai sur mortier frais.	79
V2.2. Le rapport E/C ET E/L :.....	80
V.2.3. Essai sur mortier durci.	80
V.2.3.1. Résultats des essais de la résistance à la flexion :.....	80
V.2.3.1.1. La résistance a la flexion :.....	81
V.2.3.1.2 Résultats des essais de la résistance à la flexion pour la carbonatation naturelle.	82

V.2.3.1.3. Résultats des essais de la résistance à la flexion pour la carbonatation accélérée.	84
V.2.3.2. Résultats des essais de la résistance à la compression.	86
V.2.3.2.1. Résultats d'essai de la résistance à la compression des éprouvettes : 86	
V.2.3.2.2. Résultats des essais de la résistance à la compression pour la carbonatation naturelle.	87
V.2.3.2.3. Résultats des essais de la résistance à la compression pour la carbonatation accélérée.	89
V.2.3.3. Relation entre les résistances à la flexion et à la compression du matériau :	90
V.2.3.4. Résultats d'essai de carbonatation.....	91
V.2.3.4.1. Epreuve après conservation dans l'eau.....	91
V.2.3.4.2. Essai de carbonatation naturelle :.....	92
V.2.3.4.3. Essai de carbonatation accélérée :	93
V.3. Conclusion :	95
Conclusion générale :.....	97
Références bibliographiques :	96
Annexe A.....	98
Annexe B	100
Annexe C	102
Annexe D	Erreur ! Signet non défini.
Annexe E	Erreur ! Signet non défini.

Introduction Générale

Introduction Général :

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

La carbonatation atmosphérique c'est un phénomène naturel qui dégrade les bétons armés et est notamment responsable de la mise à nu de ses armatures en acier. La carbonatation du béton entraîne des problèmes de résistance sur les structures en béton armé. Les barres d'aciers, censées garantir cette résistance, gonflent sous effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage, les aciers sont alors mis à nu.

Ce travail de recherche consiste à étudier la carbonatation des bétons contenant de pouzzolane et de marbre. On cherchant dans la littérature on a constaté que l'ajout de la pouzzolane peut entraîner des modifications sur le comportement des bétons surtout vis-à-vis la durabilité.

Notre objectif est la valorisation des produits naturelle algériens comme la pouzzolane et la poudre de marbre qui est déchet industriel de la production du marbre.

Le but principal de cette étude est de caractériser expérimentalement et numériquement les effets de dioxyde de carbone (CO_2) sur les propriétés mécanique des bétons, ainsi que nous avons étudié les principaux paramètres influençant la carbonatation des bétons et leurs conséquences.

Enfin ces résultats sont obtenus à travers deux essais principaux : Carbonatation Naturelle et Accélérée.

Notre mémoire sera organiser de Cinque chapitre : le premier est une étude bibliographique sur les mortiers, le deuxième c'est une présentation de la durabilité des bétons puis le troisième chapitre on va décrire d'une manière détaillé la carbonatation et ces causes ainsi que ces conséquences sur les bétons et les dégradations quelle peut engendrer. Dans le quatrième et le cinquième chapitre c'est la partie expérimentale de notre travail ou nous présentant les différents matériaux utilisés et leurs méthodes d'essais puis dans le suivant on présentera les résultats obtenus et leurs interprétations et en fin on termine par une conclusion générale

Chapitre I

Etude bibliographique sur les mortiers.

I.1. Introduction :

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau- et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un mortier, qui se distingue du béton par l'absence de gravillons. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liants (types et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. Le mortier est un mélange de liant- chaux ou ciment -, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants.

I.2. Définition du béton :

Le béton est matériau obtenu après malaxage de l'eau, ciment, granulats (sable, gravier, caillons) et éventuellement d'adjuvants dans les proportions bien déterminées et en fonction des caractéristique voulues, l'ensemble doit être homogène et la pâte résultats des réactions entre le ciment et l'eau et l'élément actif du béton.

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques ; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies,

La mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux :

- Les données du projet : caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferrailage.
- Les données du chantier : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques.
- Les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, aspect, On mesure donc l'importance de l'étude de la formulation du béton, d'autant plus nécessaire que les caractéristiques requises sont élevées.

I.3. Les mortier :

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, Ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon.

I.3.1. Définition :

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat de mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différents selon les réalisations.

Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types ainsi que les caractéristiques principales telles que l'ouvrabilité, la prise, le retrait. [1]

I.3.2. Constituants des mortiers :

I.3.2.1. Ciment :

Le ciment est une poudre minérale fine obtenue au terme d'un processus de fabrication très précis. Mélangée à de l'eau, cette poudre forme une pâte qui se fige et durcit, même sous l'eau. Selon la composition et la finesse de la poudre, les propriétés du ciment ne sont pas les mêmes.



Fig.I-1 : Matières premières de ciment. [3]

Son emploi le plus habituel est sous forme de poudre utilisée avec de l'eau pour agréger du sable et du gravier. Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant du béton, auquel il confère un certain nombre de propriétés, et notamment sa résistance. Il s'agit d'un matériau de construction de haute qualité, économique, utilisé dans les projets de construction du monde entier. Le ciment est obtenu par broyage et cuisson à 1450°C, d'un mélange de

calcaire et d'argile. Appelé clinker, ce matériau granulaire est pour l'essentiel une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer. [3]

I.3.2.1.1. Type de ciment :

- Le CEM I (ciment portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontrainte car il offre un niveau de résistance élevé.
- Les CEM II A ou B (ciment portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils peuvent être durables.
- Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.
- Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants.

I.3.2.2. Le sable :

C'est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière. Le terrain dans lequel le sable grossier domine, manque d'homogénéité, sa trop grande perméabilité ne lui permet pas de retenir les engrais solubles, qui sont entraînés par les eaux avant d'avoir produit leur effet, amenant, en outre, l'assèchement rapide du sol. Des amendements sont nécessaires pour corriger les défauts des sols sableux ; l'apport de marne argileuse donne de la cohésion aux terrains qui en manquent, mais le fumier de ferme, en augmentant l'humus, est dans tous les cas le meilleur des traitements : il apporte au sable grossier l'agglomérant dont il a besoin et au sable fin l'allègement et l'aération qui lui font défaut.

L'introduction des sables permet de diminuer le retrait du liant (ossature mortier) en augmentant les résistances mécaniques, ajoutant à cela, sa disponibilité et son aspect esthétiques (couleur). Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros.

Les grains fins se disposent dans intervalles entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important : Ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide. [1]

I.3.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau de gâchage est nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton.

L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matière organiques, alcalis).

L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. La quantité d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs (teneur en essentiel ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 210 l/m³. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simple connus. Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre de l'ouvrabilité du béton et de sa qualité, résistance mécanique à la compression, durabilité. [2]

I.3.2.4. Les adjuvants :

Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés lors du malaxage et faiblement dosés lors de la préparation (moins de 5% de la masse du mélange). Ces produits offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du mortier telles que son temps de prise ou son étanchéité. Très répandus aujourd'hui, il existe différents types d'adjuvants qui vous permettront d'obtenir le mortier de vos rêves.

Tab.I-1 : Les types des adjuvants.[1]

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

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

I.3.2.5. Les ajouts :

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

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

Ils existe plusieurs types d'ajouts :

- Les poudres fines.
- La pouzzolane.
- Le laitier .

I.3.2.5.1. Les ajouts minéraux actifs :

- **La pouzzolane :**

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédants des propriétés liantes. [6]

- **La pouzzolane naturelle :**

Est un produit d'origine volcanique essentiellement composé de silice, d'alumine et d'oxyde de fer, ayant naturellement des propriétés pouzzolanique, elle peut être d'origine volcanique : verre volcanique, ponce et zéolite ou d'origine sédimentaire : terre à diatomées, diatomites.[6]

➤ **Leurs compositions chimiques :**

- SiO_2 : 43 à 55% ;
- Al_2O_3 : 12 à 24% ;
- Fe_2O_3 : 8 à 20 % ;

L'analyse chimique doit révéler moins de 1,5 % de sulfures et de sulfates.

• **La pouzzolane artificielle :**

C'est une matière essentiellement composée de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolanique, les roches traitées thermiquement : argile et latérite. [6]

➤ **Effet de la pouzzolane :**

La pouzzolane confère aux bétons les propriétés suivantes : [6]

▪ **A l'état frais**

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

▪ **A l'état durci**

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

- Accroissement de la résistance finale.
- Légère diminution du retrait et du fluage.
- Réduction de la perméabilité à l'eau jusqu'à des valeurs d'étanchéité.
- Amélioration de la résistance aux sulfates, aux chlorures et à d'autres types d'agressions chimiques.
- Protection des armatures contre la corrosion.
- Une réduction générale de la teneur en hydroxyde de calcium dans le béton avec deux conséquences bénéfiques.
- Une réduction notable du risque d'apparition d'efflorescences de chaux sur les faces Exposées du béton.

- Une très nette amélioration de la résistance du béton aux eaux douces. [6]

➤ **Propriétés de la pouzzolane :**

Les pouzzolanes sont des roches " acides " ayant des teneurs élevées en silice et en alumine (entre 70 et 80% pour les deux composants ensemble), puis en fer, en alcalins, en magnésie et en chaux. [6]

▪ **Propriétés hydrauliques**

La pouzzolane réagit avec l'eau, en présence d'une quantité suffisante de chaux, pour former des hydrates stables, peu solubles et résistants à long terme. [6]

▪ **Propriétés physiques de remplissage**

En plus de leur effet pouzzolanique, elles jouent un rôle de remplissage des pores des produits hydratés et de correcteurs granulaires, ce qui améliore la compacité et diminue la perméabilité. [6]

➤ **L'utilisation de la pouzzolane :**

La pouzzolane est utilisée essentiellement.

- L'hiver, elle sert pour le sablage des routes verglacées.
- Dans les travaux publics elle est utilisée comme matériau de remblai léger, pour la réalisation de terrains de sport : piste d'athlétisme, amendement terrains gazonnée, carrière à chevaux.
- Dans l'industrie ajoutée au ciment elle permet la confection de matériaux réfractaires comme les boisseaux de cheminées de parpaing de béton léger très utile pour la construction de bâtiment ; elle entre dans la fabrication d'argiles à tuiles.
- Elle possède des propriétés intéressantes pour l'isolation thermique et phonique. [6]

• **Le laitier :**

de haut fourneau ou le laitier broyé comme il voudrait peut-être mieux l'appeler est un sous-produit de la fabrication fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau, C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé, il se présente sous forme de la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium 40 à 50% et la silice entre 25 à 35% de l'alumine entre 12 à

30%, ainsi que la magnésie et d'autre d'oxyde très faibles quantités tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux de clinker.[6]

- **Les poudres fines :**

Les poudres sont composées de :

- **Les cendres volantes :**

Les cendres volantes sont des particules très fines récupérées par les systèmes de dépoussiérages des gaz des chaudières des centrales thermiques. Les cendres volantes peuvent avoir différentes compositions chimiques et différentes compositions de phase parce que celles-ci sont reliées exclusivement au type d'impuretés qui sont contenues dans le charbon que l'on brûle dans la centrale thermique [1]

D'une façon générale, l'introduction de cendre volante dans le béton diminue la porosité et la perméabilité, elle diminue la sensibilité de béton aux eaux agressives en fixant progressivement la chaux, la cendre volante permet au béton de conserver sa compacité et de reste imperméable, elles jouent également d'autre rôles dans le béton tels que l'amélioration de l'ouvrabilité, la diminution de la proportion d'eau pour le béton et l'imperméabilité des surfaces. [6]

- **Fumée de silice :**

Est sous-produit de fabrication de silicium, d'un point vue chimique, la fumée de silice est essentiellement composé de silice, elle s'appelle aussi micro silice, la fumée de silice est un matériau peu économique, ce produit se présente sous forme d'une poudre ultra fine de couleur claire ou grise, comme substitue de ciment, pour réduire les quantités de ciment utilisées en générale pour des raisons économie comme ajouts pour améliorer les propriétés de béton aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci.[1]

I.3.2.5.2. Les ajouts inertes :

- **La poudre de marbre :**

Le mot marbre dérive du mot latin « marmor » qui vient lui-même du grec marmaros ou marmorique qui signifie blanc et éclatant.

On appelle marbre toute roche calcaire de texture assez dense pour permettre un bon polissage.

Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières.

Un marbre est un calcaire ayant subi un faible métamorphisme, la densité Du marbre est élevée en moyenne de 2,7. En atmosphère sèche, ils sont pratiquement inaltérables, bien que leur dureté soit médiocre dans l'air humide Ou légèrement acide, ils ont tendance à s'effriter [« résistance au cisaillement de l'argile stabilisé » [4].

➤ Classification de marbre :

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, roses, gris, jaunes, vertes, violettes ou noires. La production marbrière en France est faible et on constate une régression par rapport à des pays comme l'Italie, le Portugal, la Grèce et la Grande-Bretagne.[mémoire wahiba]

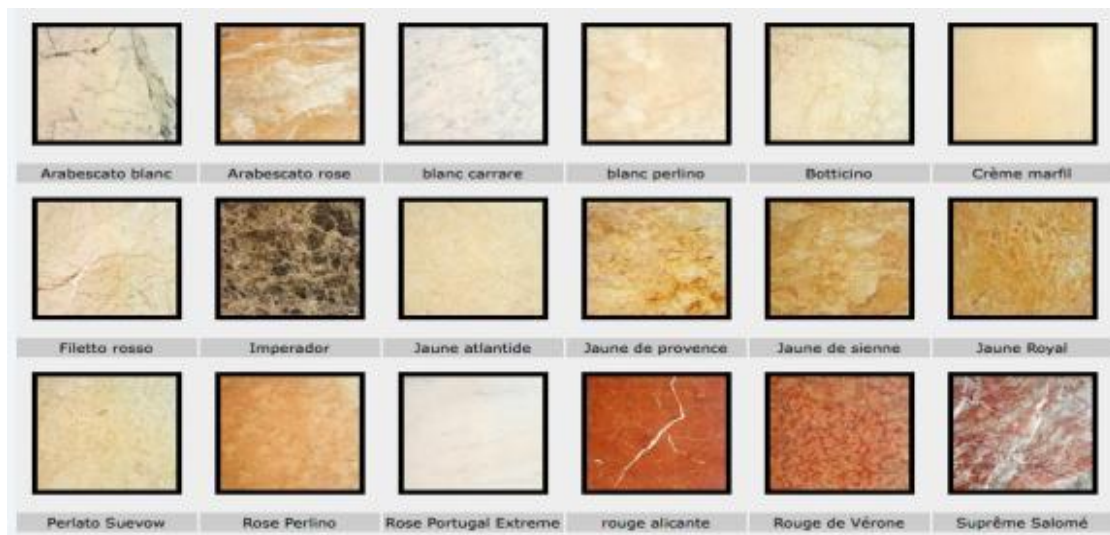


Fig.I-2 : les couleurs de marbre. [7]

• Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des produits obtenus par broyage fin de roches naturelles (calcaires, basalte, bentonite, etc.) présentant une teneur en carbonate de calcium CaCO_3 supérieure à 75%. Ces produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométries contrôlées et dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 micron. Les fillers se différencient les uns des autres par :

- Leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qui ils contiennent.
- Leur finesse, la forme des grains, leur état de surface.
- Leur dureté, leur porosité. Un filler est dit calcaire s'il contient au moins 90% de carbonate de calcium. Dans les autres cas, le filler est désigné par le nom de sa roche d'origine. [1]



Fig I-3 : Fillers de calcaire. [1]

➤ **Rôles des fillers de calcaires :**

- ✓ **Les fillers ajoutés au ciment ou au béton jouent plusieurs rôles :**
- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe Granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du C3S et du C3A et à la formation de carboaluminates, germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat. [8]

I.3.3. Différents types des mortiers :

Les mortiers se partagent en différents types :

I.3.3.1 Selon leur domaine d'utilisation :

Généralement les mortiers varient selon leur domaine d'application, on peut citer les catégories suivantes : [1]

- ✓ Mortier de pose.
- ✓ Mortiers de joints.
- ✓ Mortiers pour les crépis.
- ✓ Mortiers pour le sol
- ✓ Mortier pour les stucs.
- ✓ Pierres artificielles.
- ✓ Support pour les peintures murales.
- ✓ Mortier pour les mosaïques

- ✓ Mortier d'injection.
- ✓ Mortier de préparation pour pierres.

I.3.3.2 Selon la nature du liant :

On peut classer les mortiers selon la nature du liant en :

- **Les mortiers de ciment :**

Les mortiers de ciment, très résistants, prennent et durcissent rapidement. De plus un dosage en ciment suffisant les rend pratiquement imperméables. Les dosages courants sont de l'ordre de 300 à 400 kg de ciment pour 1 m³ de sable. [2]

- **Les mortiers bâtards :**

Le mélange de ciment et de chaux permet d'obtenir conjointement les qualités de ces deux liants. Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales ; mais on mettra une quantité plus ou moins grande l'un ou de l'autre suivant l'usage et la qualité recherché. [2]

- **Les mortiers de chaux :**

C'est le composant traditionnel du mortier, il possède une plasticité et un pouvoir de rétention d'eau excellent, mais sa résistance mécanique est faible et sa cure est lente. La chaux grasse, obtenue par extinction de la chaux vive en laissant vieillir, est le produit de qualité que l'on devrait utiliser, mais le vieillissement prend beaucoup de temps et le travail de la chaux grasse est très salissant. C'est pourquoi il est plus pratique d'utiliser la chaux hydratée sèche. La cure des mortiers de chaux s'effectue lentement par carbonatation sous l'effet du gaz carbonique de l'air, ce processus peut être fortement ralenti par un temps froid et humide. [2]

- **Les Mortiers réfractaire :**

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues. [1]

- **Les Mortiers rapide :**

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements. [1]

- **Les Mortiers industriel :**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés conditionnés en sac, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins : [1]

- ✓ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié.
- ✓ Mortiers d'imperméabilisation.
- ✓ Mortier d'isolation thermique.
- ✓ Mortier de jointoiment.
- ✓ Mortier de ragréage.
- ✓ Mortier de scellement, mortiers pour chapes.
- ✓ Mortier-colle pour carrelage, sur fond de plâtre ou de ciment.
- ✓ Mortier de réparation.

I.3.4. Classes des mortiers :

- **Classe 1** : Adjuvant modifiant les caractéristiques de mortiers, bétons et coulis à l'état frais.
- **Classe 2** : Adjuvant modifiant les caractéristiques des mortiers, bétons et coulis pendant la prise et le durcissement.
- **Classe 3** : Adjuvant modifiant la teneur en air ou en autre gaz.
- **Classe 4** : Adjuvant modifiant la résistance des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 5** : Adjuvant améliorant la durabilité des mortiers, bétons et coulis.
- **Classe 6** : Adjuvant modifiant des propriétés spéciales. [1]

I.3.5. Caractéristique de mortiers :

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

I.3.5.1. L'ouvrabilité :

L'ouvrabilité est une qualité essentielle du béton ; elle peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour remplissage parfait du coffrage et du ferrailage.

L'ouvrabilité du béton dépend de toute une série de facteurs : Genre de ciment teneur à l'eau et en mortier de ciment, grossier des agrégats, contenu de sable.

Les bétons de même composition, mais avec des ciments différents ont une fluidité (ouvrabilité) différent, ceci s'explique par le fait que le besoin en eau des ciments varie de l'un à l'autre. La fluidité du mélange de béton croît avec l'augmentation de la quantité d'eau.

Au fur et à mesure de l'augmentation de la teneur en pâte de ciment la fluidité du mélange de béton croît elle aussi, si la teneur en pâte de ciment est plus haute, la pâte non seulement remplit les vides et enrobe les grains des agrégats, mais écarte « également les uns des autres,

en créons entre eux des couches abondantes qui diminuent le frottement entre les grains ceci provoque l'augmentation de la fluidité. [2]

L'augmentation de la quantité de sable au-dessus de la quantité optimale déterminée par la pratique, diminue la fluidité de la pâte par suite de l'accroissement de la surface total des agrégats. La forme de grains influe aussi sur la fluidité : la surface des grains étant arrondie est lisse, la surface totale et le frottement entre eux sont plus petites que les formes angulaires et la surface ré gueuse. Donc, le mélange de béton au gravier et au sable roulé est plus fluide que le mélange formé de pierre concassé et de sable d'arène.

Il existe de nombreux essais et testes diverse le mesure de certaine caractéristique dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques-uns, les plus couramment utilisés dans la pratique. [1]

I.3.5.1.1. Table à secousses :

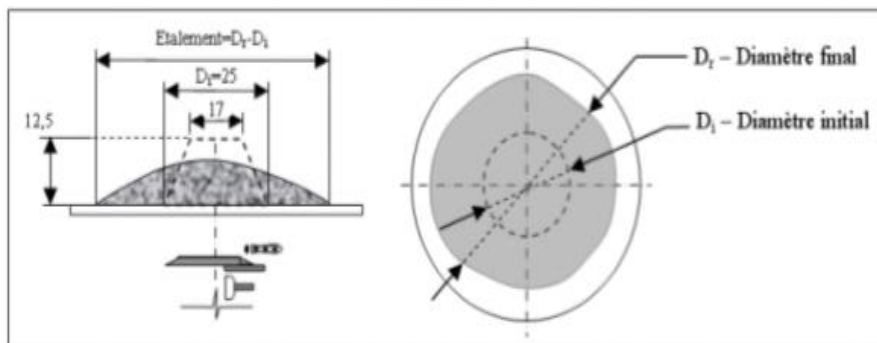


Fig.I-4 : Table à secousses. [1]

I.3.5.1.2. Maniabilimètre du LCPC :

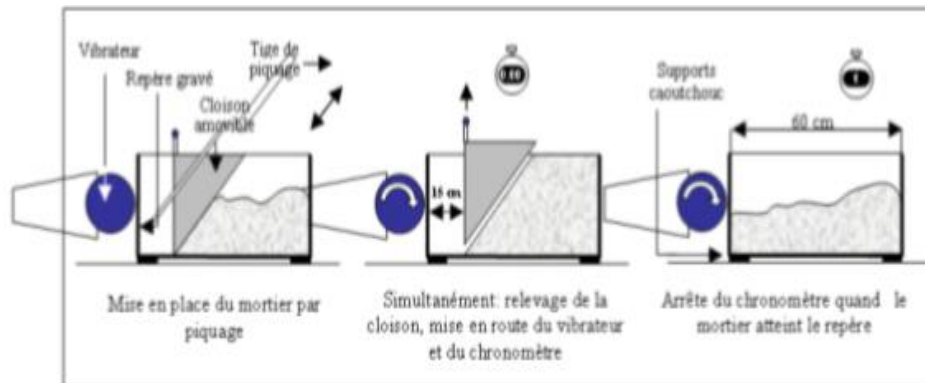


Fig.I-5 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre. [1]

I.3.5.1.3. Le cône :

I.3.5.2. La résistance :

La résistance a été longtemps considéré comme la qualité essentielle pour ne pas dire la seule, à rechercher pour un béton ; mais nous avons suffisamment insisté sur la qualité d'ouvrabilité et son importance primordiale pour pouvoir dire que la résistance est une qualité également importante ; ouvrabilité et résistance sont d'ailleurs à étudier de pair car sont étroitement dépendant l'une de l'autre et d'autant plus duelles varient en sens inverse en fonction de certains facteurs essentiels de la composition du béton. [1]

I.3.5.3. Caractéristique mécanique des mortiers :

La résistance mécanique de mortier après durcissement dépend du rapport eau/ciment.

Cette résistance mécanique est caractérisée par sa classe de résistance à la rupture par compression et traction par flexion. [2]

I.3.5.3.1. Résistances mécaniques :

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16cm conservés dans l'eau à 20°C. Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression. Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours). [2]

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C

- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours.

- **Résistance à la compression :**

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme prismatique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées. [2]

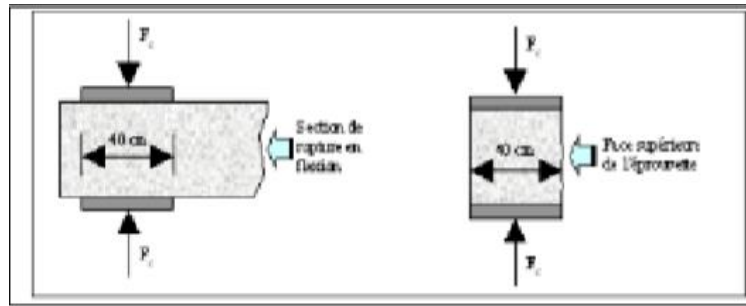


Fig.I-6 : Dispositif de rupture en compression. [2]

- **Résistance à la flexion :**

L'essai de flexion permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture. [2]

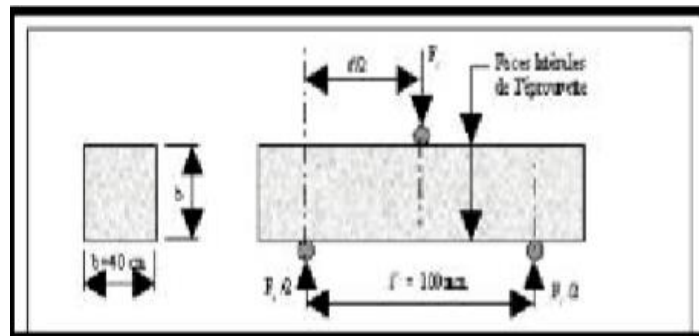


Fig.I-7 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion. [2]

- **Résistance à la traction :**

La résistance à la traction à 28 jours est désignée par f_{c28} , plusieurs essais peuvent être réalisés. [2]

a) En traction directe :

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques aux précédents mais l'essai est assez délicat à réaliser car il est nécessaire, après sciage des extrémités, le collage des têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite. [1]

b) En traction par fendage :

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. [1]

c) En traction par flexion :

C'est l'essai le plus couramment utilisé. La résistance est mesurée par flexion 3 ou 4 points sur des éprouvettes prismatiques de côté a et de longueur $4a$. [1]

I.3.5.4 Retrait et gonflement.

I.3.5.4.1. Le Retrait :

Les retraits se mesurent sur des prismes $4 \times 4 \times 16$ cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours. Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

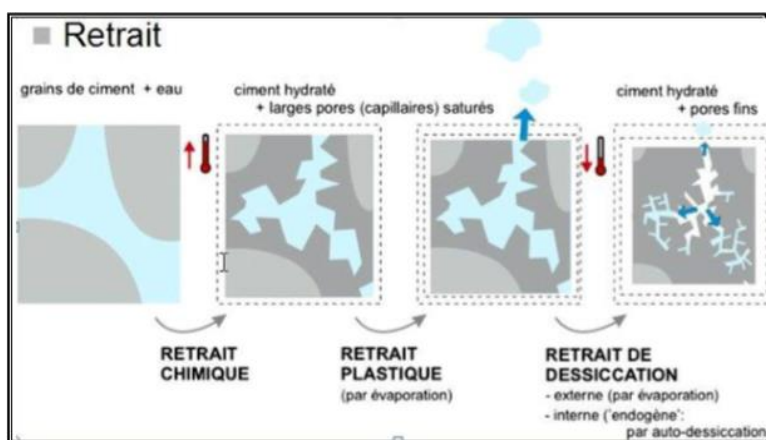


Fig.I-8 : phénomène de retrait. [2]

I.3.5.4.2. Le gonflement :

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4x4x16cm conservées dans l'eau à 20°C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chate lier inférieure sur pâte pure à 10mm). [2]

I.3.6. Masse volumique apparente :

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparente en état naturel (y compris les vides et les capillaires). Elle est exprimée en (g/m^3 ; kg/m^3 ; t/m^3). [1]

I.3.7. Masse volumique absolue :

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolue de matière pleine (volume de matière seule sans tenir en compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/m^3 ; kg/m^3 ; t/m^3). [1]

I.3.8. Porosité et compacité :

I.3.8.1. La porosité :

La porosité est le rapport du volume vide sur le volume total. [2]

$$P = \text{volume de vide} / \text{volume totale} \dots\dots\dots \text{éq.I-1}$$

I.3.8.2. La compacité :

La compacité est le rapport du volume des pleines sur le volume total. [2]

1.3.9. Fluage :

Le fluage dépasse celui des bétons ordinaires. On peut évaluer approximativement les déformations dues au fluage par la formule suivante :

$$\varepsilon = \delta b / E_{ij} + K_{fl}(t) \dots\dots\dots \text{éq.I-2}$$

δb : la contrainte appliqué.

E_{ij} : la valeur du module d'élasticité instantanée.

$K_{fl}(t)$: une fonction du temps variant entre 0 et 1 quand le temps varie de 0 à l'infinie à partir de la date d'application de la contrainte.

k_{fl} : un coefficient qui peut être pris égal à 1 si la charge est appliqué à un béton âgé d'au moins 28 jours. [2]

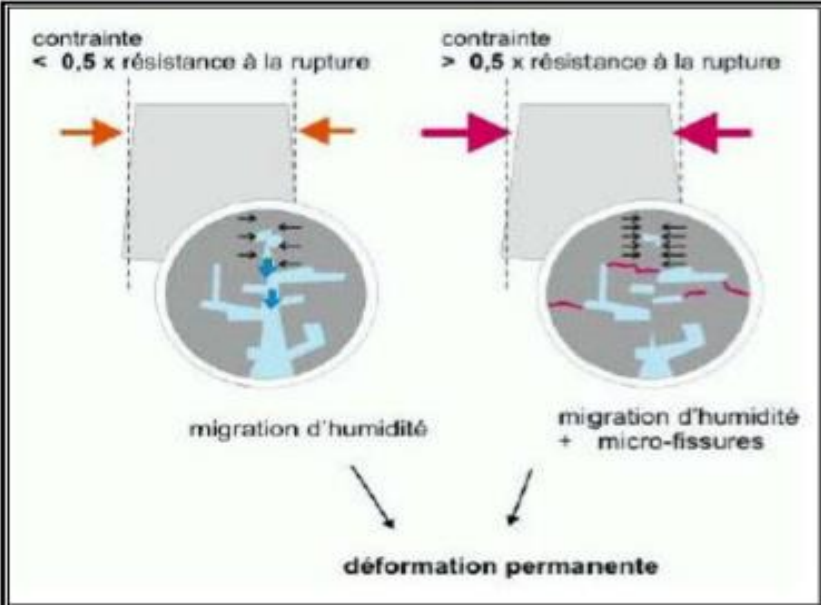


Fig.I-9 : phénomène de fluage. [2]

I.3.10. Module d'élasticité :

La valeur du module tangent à l'origine peut être évaluée par la formule ci-après :

$$E_{ij} = 1750 \sqrt{\rho_s^3} \cdot \delta'_{ij} ; \dots \dots \dots \text{éq.I-3}$$

ρ_s : est la masse volumique en l/m^3 ;

δ'_{ij} : la résistance caractéristique en (MP) ;

Compte-tenu de leur plus grande déformabilité, les bétons légers ont un module d'élasticité inférieure (de 1/3 à 1/2) à celui d'un béton normal. [2]

1.4. Conclusion :

La synthèse, tirée de la bibliographique :

- ✚ Les mortiers et leurs caractéristiques.
- ✚ La pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliorent la résistance à la compression à long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique.
- ✚ Effet de la pouzzolane aux mortiers à l'état frais et à l'état durci.

Chapitre II
Durabilité du béton

II.1. Introduction :

La durabilité est le pouvoir de conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le mortier doit résister aux mécanismes de dégradation auxquels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques. La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du mortier, les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles. Il convient de noter avant toutes choses que la détérioration du mortier est rarement attribuable à une seule cause : le mortier peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apprêteront.

Pour obtenir un ouvrage durable ; il faut :

1. Utiliser un matériau durable.
2. Concevoir la structure en fonction des facteurs environnementaux.
3. Exercer un bon contrôle de la qualité des matériaux et des techniques de construction.

II.2. Indicateurs de durabilité généraux :

Les indicateurs de durabilité généraux, c'est-à-dire, les paramètres qui apparaissent fondamentaux, aussi bien vis-à-vis de la prévention de la corrosion des armatures que de l'alcali-réaction, sont les suivants :

- La carbonatation.
- Porosité accessible à l'eau,
- Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure,
- Perméabilité aux gaz,
- Perméabilité à l'eau liquide, [9]

II.2.1. La carbonatation :

II.2.1.1. Définition :

La carbonatation est la cause des différentes modifications dans la structure du matériau. Elle provient de la pénétration du dioxyde de carbone (CO_2) dans le béton, qui se dissout dans l'eau et réagit avec l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sous forme de silicates de calcium ou

de portlandien) pour former du carbonate de calcium (CaCO_3). Ce phénomène est appelé la Carbonatation, il en résulte la diminution du pH de la solution interstitielle.

Lorsque la carbonatation atteint les armatures, elles sont dé passivées puisque la couche de Passivation est stable juste dans un milieu basique, donc on aura de la corrosion.

La carbonatation n'altère pas forcément les propriétés mécaniques du béton, elle les améliore Dans certains cas. Elle met uniquement les armatures en danger. La vitesse de la carbonatation Dépend de la teneur en humidité du béton, et aussi de la perméabilité au gaz du béton pour que Le CO_2 pénètre au sein du réseau poreux. [7]

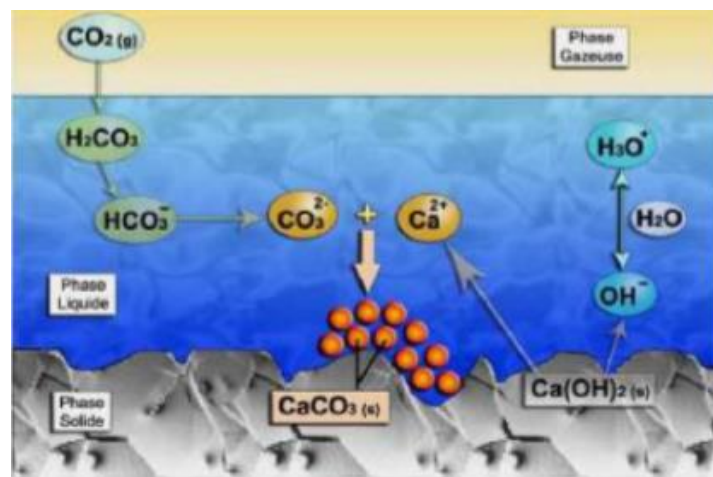


Fig.II.1 : Mécanisme de carbonatation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [10]

II.2.1.2. La profondeur de carbonatation:

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.



Fig.II-2 : mesure de la profondeur de la carbonatation. [10]

II.2.1.3. Conséquence :

Les armatures métalliques incorporées au béton à une distance inférieure à 25 mm de la surface se trouveront, dans les conditions habituelles de construction, soumises à la corrosion.

Lors de sa formation, la rouille foisonne et fait éclater l'épiderme du béton déplaçant du même coup le front de carbonatation. [11]

II.2.2. La porosité :

II.2.2.1. Définition :

Le béton est constitué par des espaces vides qui ont la faculté de contenir un ou plusieurs fluides interstitiels tels que de l'air, de l'eau ou des hydrocarbures liquides ou gazeux, et de les laisser circuler : le béton est alors dit poreux et perméable.

Un milieu poreux peut être considéré comme étant la superposition d'une matrice solide et de vides. Ces vides, appelés plus communément (pores), peuvent être ou non connectés entre eux. Lorsque leur répartition dans l'espace forme un réseau complexe et connecté, à travers

lequel un transfert de masse est possible depuis l'extérieur du volume poreux considéré, on parle de porosité (ouverte). Ces pores sont en principe, tous qui sont en communication avec l'atmosphère, soit directement, soit de proche en proche. Par contre, les pores qui sont isolés

ou les autres réseaux présents ne communiquant pas avec l'extérieur, constituent ce que l'on nomme (fermée).

Une très faible porosité forme une bonne résistance contre tous les agents agressifs, en outre le béton est un matériau poreux avec une autre notion il inclut des pores (vides). Ces vides sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton.

Le paramètre le plus connu est certainement la porosité P qui est définie comme étant le rapport entre le volume des vides V_v et le volume total V_t .

$$P = \frac{V_v}{V_t} \quad \text{Avec : } V_t = V_v + V_s \dots\dots\dots \text{éq.II-1}$$

II.2.2.2. La porosité accessible à l'eau :

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de durabilité au sens du document publié par l'AFGC en 2004 [AFGC 2004]. Parmi les méthodes disponibles, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique selon le mode opératoire AFPCAFREM est une mesure simple et praticable sur une large variété de matériaux.

On peut déterminer aussi la densité sèche à partir de cette technique.

II.2.2.3. Propriétés des pores :

En général, il est préférable que le réseau de pores capillaires soit constitué de pores les plus petits possibles car le degré d'interconnexion y est plus faible.

- Les pores interconnectés qui forment un espace continu dans le milieu poreux et participent au transport de la matière dans le matériau.
- Les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur. [12]

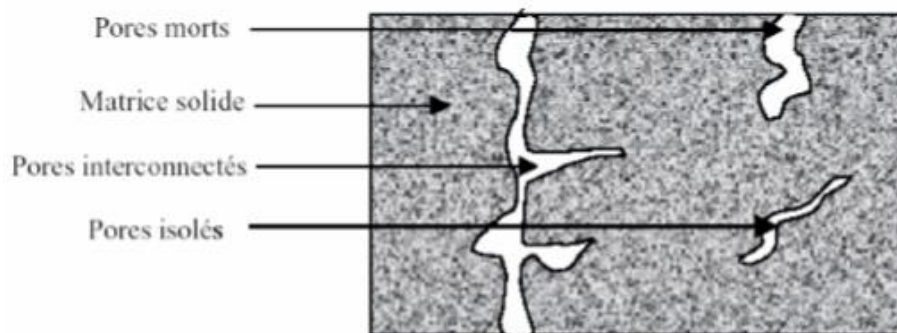


Fig.II-3: représentation schématique d'un solide poreux. [13]

II.2.3. Coefficient de diffusion des ions chlorures.

II.2.3.1. Définition :

La diffusion est un mécanisme de transport de substance dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe des différences de concentration

entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée.

La migration désigne le transport des ions sous l'influence d'un champ électrique. Il s'agit aussi d'une généralisation du transport par diffusion.

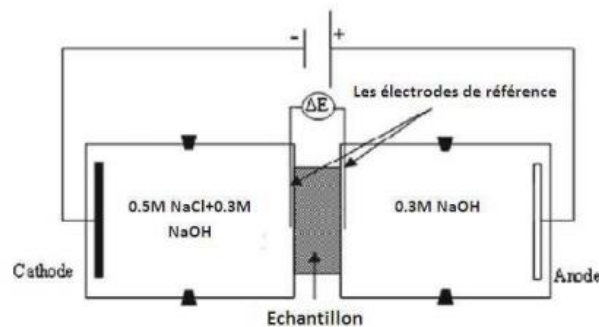


Fig.II-4 : Schéma illustrant le dispositif pour l'essai de migration sous champ électrique. [13]

II.2.4. Perméabilité :

II.2.4.1. Définition :

Dans de nombreux cas ce n'est pas uniquement l'étanchéité des éléments qui contrôle la durabilité des structures mais aussi la perméabilité du matériau béton. Plusieurs études et relevés sur le terrain montrent que les causes principales de la mauvaise performance du béton sont plus ou moins liées à la facilité avec laquelle un fluide ou un ion pénètre du béton. Cela implique que la perméabilité du béton est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. La perméabilité d'un matériau se définit comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide (eau ou gaz par exemple) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle s'exprime au moyen de la relation de DARCY qui est valide en régime d'écoulement laminaire.

$$Q = -K \cdot (A/u \cdot dp / dz) \dots\dots\dots \text{éq.II-2}$$

Avec :

Q = débit volumique du fluide (m^3/s), de viscosité dynamique μ (Pa.s).

K = perméabilité du milieu (m^2).

A = aire apparente du matériau (m^2).

dp/dz = gradient de pression.

La perméabilité K est une caractéristique intrinsèque du matériau dans la mesure où certaines conditions sont satisfaites. Elle s'exprime en m^2 . L'écoulement doit se faire dans des conditions données (température et caractéristiques constantes du matériau en fonction du temps) et il ne doit pas y avoir d'interactions physiques et chimiques entre le fluide et le matériau ce qui est rarement vrai dans le cas du béton. La perméabilité K peut être utilisée pour estimer l'aptitude du matériau à se laisser traverser par un fluide. Plus la valeur de K est élevée, plus le matériau est perméable et, inversement, plus la valeur de K est faible, plus le matériau est imperméable. Dans le cas du béton, on peut mesurer expérimentalement la valeur K en utilisant des appareils spécialement conçus à cet effet. En pratique, des méthodes différentes sont utilisées pour mesurer la perméabilité à l'eau et au gaz du béton. [13]

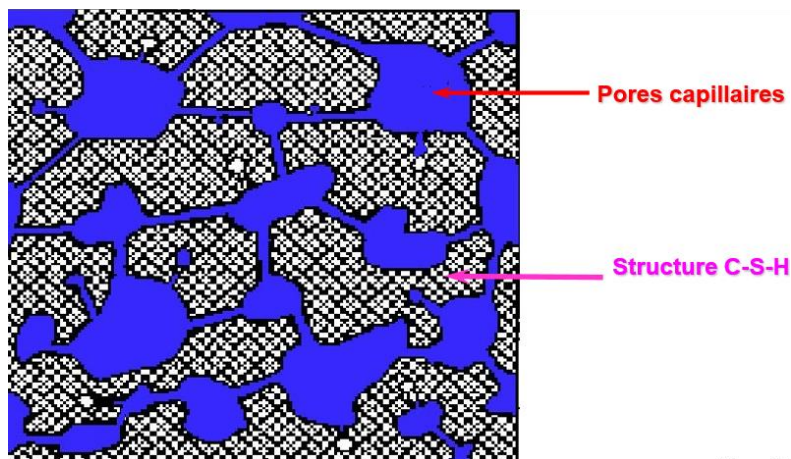


Fig.II-5 : Perméabilité élevée (interconnexions des pores capillaires). [14]

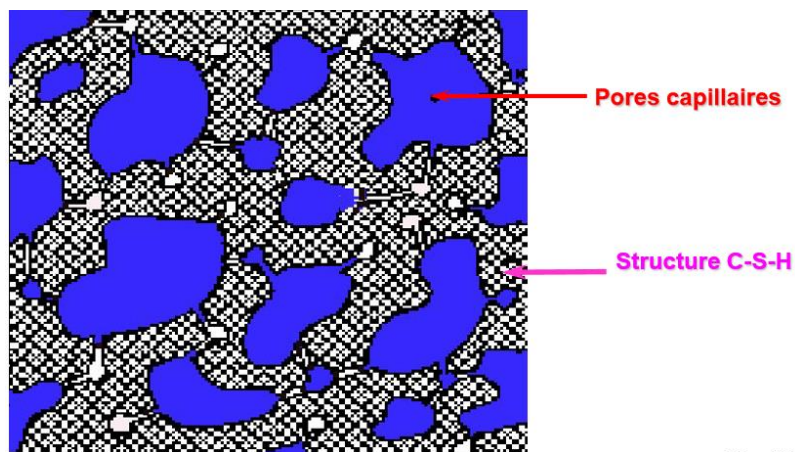


Fig.II-6 : Faible Perméabilité (pores capillaires segmentés et partiellement connectés). [14]

II.2.4.2. Perméabilité aux gaz :

Lawrence mesure la perméabilité au gaz de trois béton formules à partir d'un ciment portland ordinaires d'un ciment contenant des cendres volantes et d'un ciment contenant des laitiers, en prenant soin de les comparer pour de mêmes valeurs de résistance mécanique développée, généralement, les additions minérales augmentent la compacité de la matrice cimentaire, ce qui à pour conséquence une augmentation de la résistance mécanique et une diminution de la perméabilité au gaz.

La perméabilité au gaz ne dépend pas seulement du volume totale de pores mais de leur connectivité.

La perméabilité intrinsèque K (m^2) peut être reliée à la taille des pores et plus précisément au diamètre critique de (m) obtenu par la dérivée de la courbe de distribution porosimétrique cumulée du matériau considéré, selon la théorie de Katz et Thomson.

$$K=Cd^2c/F \dots\dots\dots \text{éq.II-3}$$

Avec :

- C : constante égale à $1/226$
- F : σ/σ^o ou σ ($\Omega^{-1}.m^{-1}$) représente la conductivité électrique du matériau poreux saturé par un électrolyte de conductivité électrique σ .

La perméabilité varie donc comme le carré du diamètre du pore critique. [2]

II.2.4.3. Perméabilité au l'eau :

La perméabilité à l'eau est très sensible à la microstructure puisque sa valeur peut varier jusqu' à quatre ordres de grandeur entre le jeune âge et une cure prolongée.

La perméabilité à l'eau de matériaux cimentaires est diminuée de plus d'un ordre de grandeur par la simple pose d'additions minérales car elles développent une matrice de porosité plus fine comportant des chemins de percolation plus discontinus et tortueux. [2]

II.2.4.4. Pour diminuer la perméabilité d'un matériau poreux :

- Diminuer la porosité totale.
- Diminuer la connectivité.
- Diminuer la taille des pores.

- Augmenter la tortuosité. [14]

II.4. Conclusion :

Les besoins des hommes évoluent eux aussi avec le temps. Des bâtiments ou des équipements construits il y a seulement quelques dizaines d'années peuvent ne plus être adaptés aux besoins actuels et aujourd'hui démolis. Mais certains ponts construits il y a plusieurs siècles sont encore très empruntés. En fonction de l'évolution prévue des besoins, est donc définie pour chaque ouvrage une durée de vie ou « durabilité » souhaitée (50 ou 100 ans par exemple), pendant laquelle le bâtiment, stade ou pont en question devra non seulement être stable, mais en plus offrir un confort d'utilisation constant, moyennant un entretien régulier. Le niveau de risque doit donc être maîtrisé et les matériaux conçus en conséquence, en fonction des sollicitations mécaniques et environnementales.

La durabilité d'un béton n'est pas une de ses caractéristiques, mais plutôt sa réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi, la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement.

Chapitre III

La carbonatation des bétons

III.1. Introduction :

Dès le début de l'emploi du « béton moderne » au siècle passé, on a été confronté à des problèmes de durabilité: dégradation par certaines eaux naturelles, eau de mer, sels, gel. Cependant, à l'exception de cas particuliers bien connus, on a longtemps pensé que le béton était un matériau pratiquement indestructible. Ce n'est que récemment, vingt à trente ans, qu'on s'est préoccupé des problèmes de durabilité. Des examens soigneux de ponts et d'autres structures qui devaient être démolis et remplacés par de nouvelles constructions, ont montré assez clairement que, à cause de la corrosion, la durée de vie d'une structure était considérablement plus courte que celle prévue initialement. De plus, les structures en béton sont devenues de plus en plus minces et sont souvent exposées à des conditions climatiques sévères (structures en mer) et aux environnements pollués des zones industrielles. La durabilité du béton armé ou non, dans des conditions climatiques normales et extrêmes, est donc devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré.

La carbonatation du béton est une réaction qui est pratiquement sans conséquence pour le béton lui-même. Par contre, quand il contient des armatures il n'en est plus de même. L'acier, qui est protégé dans le béton non carbonaté, peut subir la corrosion lorsque le béton se carbonate. De nombreux facteurs jouent un rôle dans ce cas qualité du béton, couverture des armatures, présence de chlorures, humidité, température, pollution.

Dans cet article, nous décrivons le processus de carbonatation du béton de corrosion de l'acier d'armature et de l'influence de la carbonatation sur corrosion. De plus, les précautions à prendre et les méthodes de réparation seront également décrites.

III.2. Définition de phénomène de carbonatation :

Le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'air pénètre sous forme gazeuse dans le béton par le réseau poreux ou fissural. En présence d'eau (qui existe au moins da petits), il provoque une réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée, dite de carbonatation. Cette réaction transforme les produits d'hydratation, notamment la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et les C-S-H en carbonates de calcium CaCO_3 engendre la réduction du pH de la solution interstitielle du matériau d'une valeur avoisinant 13 à environ 9. Non protégées par le milieu initialement très basique, les armatures s'exposent à la corrosion qui provoque des dès Cette carbonatation a pour conséquence une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement.

Chapitre III : La carbonatation des bétons

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

- Elle est bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives.
- Elle est néfaste en réduisant la protection chimique des armatures. [15]



Fig.III-1 : Exemple de corrosion par carbonatation. [15]

III.2.1. Carbonatation des bétons :

La carbonatation des bétons est ainsi un phénomène incontournable participant au cycle du calcium à la surface de notre planète. La véritable question, dans ce cadre, n'est alors pas de savoir si un matériau cimentaire va ou non se carbonater, mais sur quelle échelle de temps il va le faire et quelles en seront les conséquences. Il est alors possible de distinguer deux échelles de temps fondamentales. La première échelle de temps concerne la durée de vie du matériau cimentaire dans l'ouvrage construit ou le bâtiment en service. Cette échelle de temps est de l'ordre d'une centaine d'années. Pendant cette durée, le matériau se carbonate sous l'effet, en général, du CO_2 atmosphérique.

Les conséquences de cette carbonatation, comme nous allons le voir plus loin, sont variées et leurs prédictions sont complexes.

Dans cette phase, les ingénieurs sont particulièrement attentifs aux modifications chimiques liées à la carbonatation de la composition de l'eau située dans la porosité du matériau. Si ces

Chapitre III : La carbonatation des bétons

modifications dépassent certaines limites, une corrosion des armatures dans le cas d'un béton armé ou un développement de microorganismes dans le cas d'un enduit de façade peuvent être favorisés. [16]

III.3. Le dioxyde de carbone :

Le dioxyde de carbone est produit par différents processus : la combustion du charbon et des hydrocarbures, la fermentation des liquides et la respiration des êtres vivants. On le trouve en faible proportion dans l'atmosphère, il est assimilé par les plantes qui, à leur tour, produisent de l'oxygène par photosynthèse (**Fig.III-2**).

Le CO_2 gazeux a une odeur légèrement irritante, il est incolore et plus lourd que l'air. Il gèle à $-78,5^\circ\text{C}$ pour former de la neige carbonique. En solution aqueuse, il forme de l'acide carbonique, qui est trop instable pour pouvoir être isolé facilement. [15]

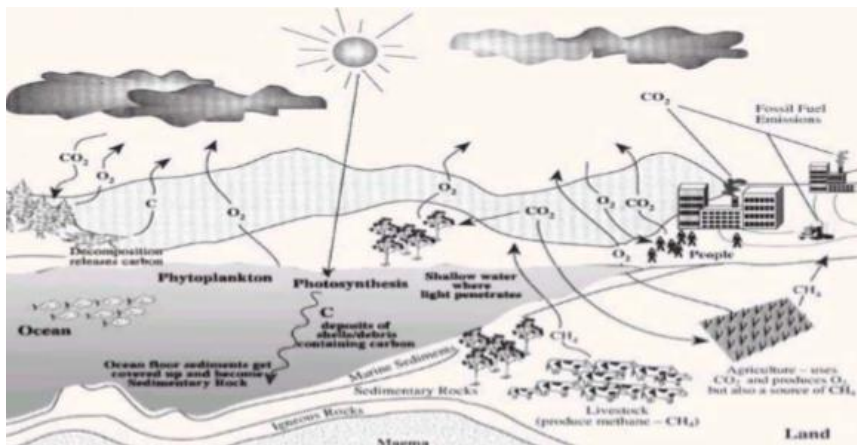


Fig.III-2 : Provenance e de CO_2 . [15]

III.4. Données physico-chimiques pour le gaz carbonique.

Le diamètre moléculaire du CO_2 gazeux est de 0,426 nm, son libre parcours moyen sous une pression de 10^5 Pa et à 0°C est de 63 nm.

Le coefficient de diffusion du dioxyde de carbone dans l'air et sous une pression de 10^5 Pa est de $1,39 \cdot 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 0°C et de $1,60 \cdot 10^{-5} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ à 20°C .

Sa viscosité dynamique dans les mêmes conditions est respectivement égale à 1,39 et à 1,48 Pa.s. [16]

III.5. Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère :

La concentration du CO₂ dans l'atmosphère est un facteur principal qui agit sur la vitesse de carbonatation du béton. Elle favorise la carbonatation et par suite la corrosion des armatures dans le béton.

En milieu rural, la fraction volumique en CO₂ est d'environ 0,03%. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 1% ; dans les grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1% [Thiery, 2005 ; Chang et al., 2004]. La paroi des tunnels routiers est un exemple de béton soumis à une concentration élevée de CO₂. [15]

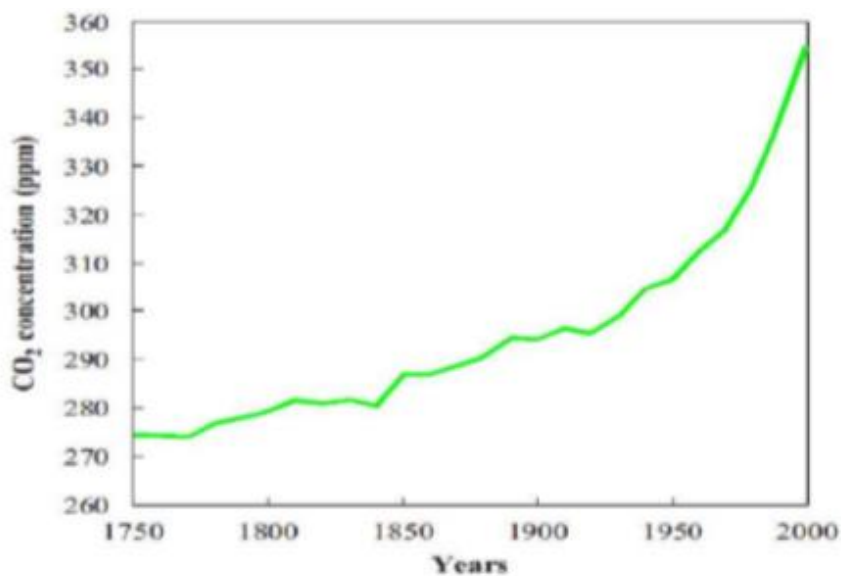


Fig.III-3 : Augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère à l'échelle mondiale. [14]

III.6. Le gaz carbonique en phase aqueuse.

III.6.1. Diffusion du CO₂ dans le béton et sa dissolution dans la solution interstitielle.

Sous l'effet d'un gradient de concentration, le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le réseau poral du béton et se dissout dans la solution interstitielle. Selon le pH de la solution interstitielle, le CO₂ en solution peut prendre différentes formes [Pascal, 1968 ; Valsaraj, 199]:

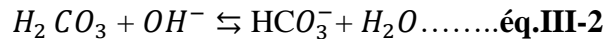
1. Il se forme de l'acide carbonique si pH < 4



Dans l'eau, à pH élevé, l'acide carbonique H₂CO₃ se comporte comme un diacide faible instable dont la dissociation a lieu en deux phases désignées par les réactions suivantes.

Chapitre III : La carbonatation des bétons

2. Il se forme de l'ion bicarbonate si $6 < \text{pH} < 10,5$.



3. Il se forme de l'ion carbonate si $\text{pH} > 10,5$



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

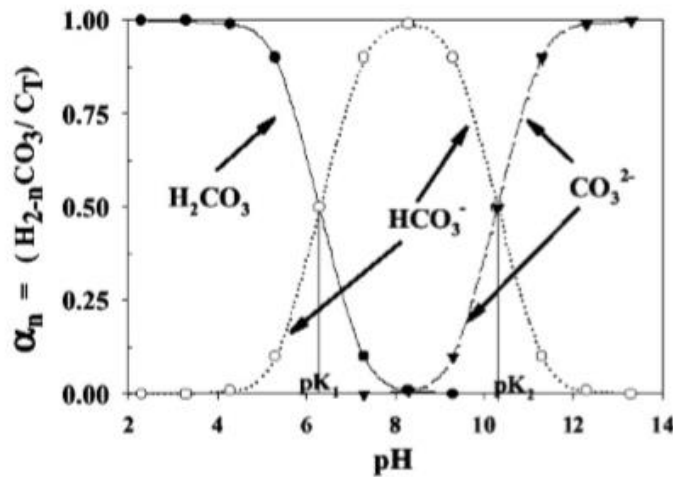


Fig.III.4 : Forme possible de CO_2 dissous en fonction du pH de la solution. [16]

III.6.2.Effet de la température sur la dissolution du dioxyde de carbone :

La solubilité du gaz carbonique dans l'eau sous la pression atmosphérique ($\text{pCO}_2=10^5$) décroît rapidement avec la température et peut s'exprimer selon Chaussadent suivant la relation empirique (avec T en degré Kelvin)

$$S (\text{mol.l}^{-1}) = 5,283.10^{-6} e^{\left(\frac{2608,2}{T}\right)} \dots \dots \text{éq.III-4}$$

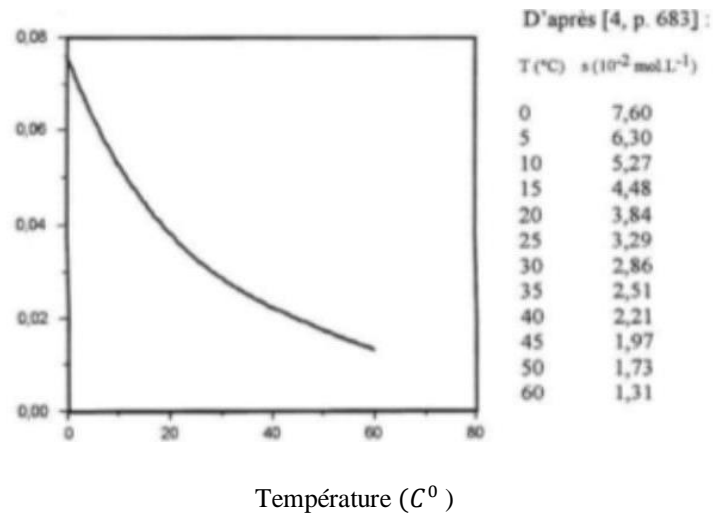


Fig.III-5 : Solubilité du CO₂ dans l'eau en fonction de la température et sous la pression atmosphérique ($P_{CO_2} = 10^5$ Pa). [16]

La solubilité du gaz carbonique étant l'étape initiale du processus global de carbonatation du béton, la vitesse de carbonatation sera donc plus importante en hiver qu'en été. [14]

III.7. Durabilité des bétons :

Phénomène de carbonatation du béton La norme NF X 50-501 [NF X 50-501, 1982] définit la durabilité comme l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction dans des conditions données d'utilisation et de maintenance, jusqu'à ce qu'un état-limite soit atteint.

Selon la norme NF EN 206-1, la durée de vie d'un béton est la période durant laquelle son comportement dans la structure demeurera à un niveau compatible avec les exigences de performance de la structure si celle-ci est correctement entretenue.

Les qualités du béton en compression, alliées à la bonne résistance des armatures à la traction, ont fait du béton armé un matériau de prédilection. Mais au cours de son utilisation, celui-ci connaît plus ou moins rapidement des altérations. Le point faible du béton armé en environnement agressif est son armature dont la corrosion constitue un danger potentiel pour la conservation et la stabilité des ouvrages. L'armature enrobée de béton bénéficie naturellement d'une haute protection contre la corrosion. En effet, le caractère fortement basique de ce milieu ($pH \approx 12$ à 13) est à l'origine de la formation d'un film protecteur enveloppant l'armature : la couche passivante. Cependant certains agents agressifs peuvent traverser le béton d'enrobage et dépassiver l'armature. La carbonatation du béton par le

Chapitre III : La carbonatation des bétons

dioxyde de carbone atmosphérique CO_2 est l'une des principales causes de ce phénomène. [16]

III.8. Mécanismes de la carbonatation du béton :

La carbonatation des bétons est la réaction de neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté, essentiellement la Portlandite et les CSH, par le dioxyde de carbone naturellement présent dans l'air à raison d'environ 0,035 % en volume.

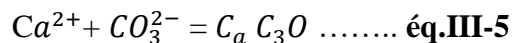
Le processus de carbonatation peut traverser le béton d'enrobage et dépassiver l'armature succinctement décrit comme suit : le dioxyde de carbone atmosphérique diffuse dans le béton sous forme gazeuse, se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec les hydrates de la pâte de ciment, notamment la Portlandite, pour former des carbonates de calcium $CaCO_3$ qui existent à l'état solide sous trois formes cristallines différentes : la calcite, l'aragonite et la vaterite. Cette réaction s'accompagne d'une diminution du pH de la solution interstitielle à une valeur inférieure à 9, dépassant ainsi les aciers dans le cas du béton armé ou précontraint et favorisant, par conséquent, leur corrosion. [16]

III.9. Carbonatation des constituants du béton :

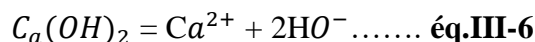
La carbonatation est un processus physico-chimique complexe qui met en jeu des réactants et réactifs à l'état gazeux (CO_2 , H_2O), dissous (CO_2 , OH^- , etc...) et solides (les composés anhydres et hydratés du béton).

III.9.1. Carbonatation de la portlandite :

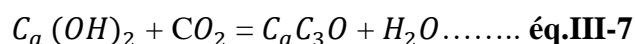
Parallèlement à la réaction (3) où les ions hydroxyle (OH^-) sont consommés, les ions carbonate (CO_3^{2-}) réagissent avec les ions calcium (Ca^{2+}), naturellement présents du fait de la dissolution partielle de la Portlandite (équilibre chimique), selon la réaction :



Ceci crée un déséquilibre chimique qui favorise la dissolution de la portlandite :



Le mécanisme de carbonatation de la portlandite est souvent simplifié en écrivant :

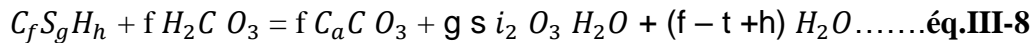


Chapitre III : La carbonatation des bétons

III.9.2. Carbonatation des autres hydrates des bétons :

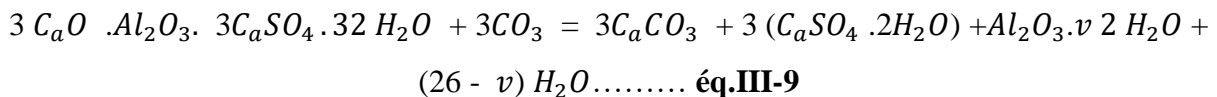
La Portlandite est l'hydrate qui se carbonate le plus rapidement. Toutefois, les autres produits d'hydratation réagissent aussi en présence de CO₂.

Les silicates de calcium hydratés (CSH) se carbonatent selon la réaction suivante :



Avec $C = C_a O$; $S = S_i O_2$; $H = H_2 O$.

La carbonatation du monosulfoaluminate de calcium (AFm) produit du gypse. La décomposition par carbonatation du trisulfoaluminate de calcium (AFt) forme de la calcite, du gypse et un gel d'alumine suivant la réaction :



De par leur faible présence dans les bétons, la carbonatation de ces hydrates est souvent négligée. [16]

III.10. 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.

III.10.1. Paramètres intrinsèques aux bétons :

➤ **Rapport eau/ciment (E/C) :**

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

De nombreuses recherches ont été réalisées pour étudier l'influence du rapport E/C sur la vitesse de carbonatation. La profondeur de carbonatation double lorsque le rapport E/C passe de 0,5 à 0,8 (Chaussadent, 1997). D'autres travaux ont montré que la carbonatation est souvent fortement réduite pour un rapport E/C inférieur à 0,4. Une réduction de la profondeur de carbonatation de l'ordre de 50% a été observée lors d'une réduction de ce rapport de 0,6 à 0,4 (Green et coll, 2007). D'autres études ont montré que pour un même ciment, la carbonatation augmente dans la plupart des cas avec le rapport E/C (Ounoughi et coll, 2000).

Chapitre III : La carbonatation des bétons

Des chercheurs (Ahmad, 2003 ; Metalssi, 2006 ; Roziere, 2007) ont montré que la profondeur de carbonatation augmente avec le rapport E/C et croît linéairement avec \sqrt{t} (Fig.III-7)

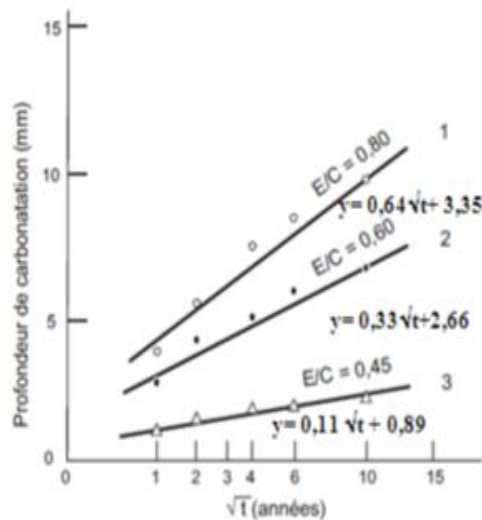


Fig.III-6: Evolution de la profondeur de carbonatation en fonction de la racine carrée du temps (Ollivier et Vichot, 2008). [16]

➤ Dosage en ciment :

Un dosage en ciment élevé diminue la profondeur de carbonatation [Vénuat et Alexandre, 1968 ; Parrott, 1987 ; Duval, 1992] car il réduit la porosité du béton, améliore sa compacité et augmente la quantité de produits carbonatables.

➤ Effet de pouzzolanes sur la carbonatation du ciment :

La présence d'ajouts dans le ciment (les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, les fumées de silice) affecte évidemment la carbonatation de matériau cimentaire en raison de sa faible portlandite (CH). Cet effet peut cependant être compensé par la réduction de la diffusivité du dioxyde de carbone (CO_2) due à une microstructure plus dense avec une fine porosité (Thierry M, 2005). En comparaison avec le ciment Portland ordinaire, le ciment contenant de la pouzzolane a moins de la portlandite (CH) et plus de silicates de calcium hydratés (C-S-H), car la portlandite (CH) est consommée dans l'activité pouzzolanique. Donc, la quantité des ions du calcium (Ca^{2+}) de la portlandite (CH) représente dans la pâte de ciment pouzzolanique est moins que celle constatée pour les autres ciments durcis au cours de la carbonatation. Ce qui donne des avantages aux ions carbonates CO_3^{2-} de pénétrer à une profondeur plus grande. Après la portlandite (CH) est consommée, les ions carbonates (CO_3^{2-}) s'associe ensuite aux ions calcium (Ca^{2+}) des silicates de calcium hydratés (C-S-H). En outre, les silicates de calcium hydratés (C-S-H) contiennent également plus d'aluminium et de

Chapitre III : La carbonatation des bétons

magnésium en raison de l'utilisation de la pouzzolane. Par conséquent, le processus de carbonatation et la structure de la pâte carbonatée de ciment à la pouzzolane sont différents par rapport à ceux de la pâte de ciment Portland ordinaire. [16]

➤ **Résistance à la compression :**

La profondeur de carbonatation diminue lorsque la résistance en compression à 28 jours s'accroît [Smolczyk, 1976 ; Tsukayama et al., 1980 ; Wierig, 1984 ; Nischer, 1986 ; Parrott, 1987]. Cependant, deux bétons de même résistance mécanique peuvent avoir deux rapports E/C distincts et donc deux comportements différents vis-à-vis de la carbonatation. [16]

➤ **Perméabilité au gaz :**

La profondeur de carbonatation diminue avec la diminution de la perméabilité [Lawrence, 1984 ; Gräf et Grube, 1986 ; Schölink et Hilsdorf, 1989].

➤ **Degré de saturation des pores en eau liquide :**

Si le béton est totalement saturé en eau liquide, la diffusion du CO₂ 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 CO₂ dans l'air et dans l'eau sont respectivement de l'ordre de 10⁻⁵ m²/s et 10⁻⁹ m²/s. En revanche, si le degré de saturation est trop faible, la dissolution du CO₂ est fortement limitée et la cinétique de carbonatation des hydrates est alors ralentie. [18]

III.10.2. Paramètres extrinsèques aux bétons :

➤ **Influence des conditions de cure :**

La cure joue un rôle indirect dans la carbonatation. Par conséquent, la profondeur de carbonatation évolue en fonction de la racine carrée du temps de cure. En effet, plus la cure est longue et plus la quantité d'hydrates susceptibles d'être carbonatés est importante (Fattuhi N.I., 1988) (Burden D., 1999). Une cure humide permet une meilleure hydratation du matériau cimentaire et favorise aussi la réduction de la porosité et la diminution du coefficient de diffusion du dioxyde de carbone (CO₂). Par conséquent, à temps de cure égal, les échantillons curés sous eau présentent des profondeurs carbonatées moins importantes que ceux curés à l'air libre (Fattuhi N.I., 1988). Cette sensibilité au mode de cure est amplifiée avec l'ajout d'additifs en substitution au ciment.

D'après Omikrine Metalssia (2012), sur la **Fig.III-8**, la cinétique de carbonatation est plus lente quand la durée de la cure est plus longue. Ceci peut être expliqué par le fait que pendant la cure, le processus d'hydratation réduit la porosité du matériau. Une densité plus élevée

Chapitre III : La carbonatation des bétons

signifie une limitation de l'accès du dioxyde de carbone (CO_2) à la microstructure. Ainsi, l'auteur remarque que l'augmentation de la durée de la cure conduit à une légère diminution du retrait final. [18]

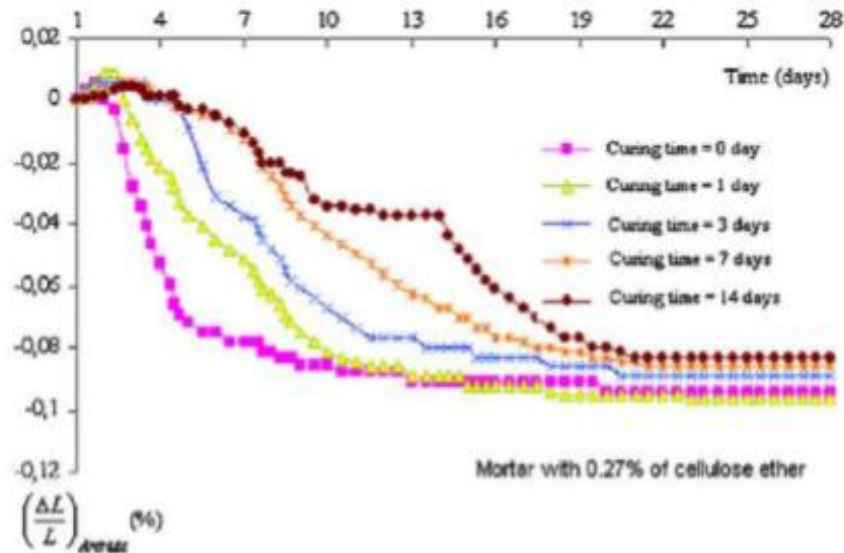


Fig.III-7 : Variations des retrait du mortier avec 27% des éthers de cellulose en fonction du temps pour les différentes durées de la cure (Othmane Omikrine Metalssia, 2012). [17]

➤ Humidité relative :

La vitesse de carbonatation est considérablement influencée par l'humidité relative du milieu environnant [Verbeck, 1958 ; Wierig, 1984 ; Bakker, 1988 ; De Ceukelaire et Van Nieuwenburg, 1993 ; Van Balen et Van Gemert, 1994 ; Saetta et al., 1995 ; Roy et al.,

38 1999]. Pour que la carbonatation soit maximale, l'humidité relative doit être suffisamment faible pour qu'une phase gazeuse connectée permette la diffusion du CO_2 gazeux et suffisamment élevée pour que la réaction de carbonatation proprement dite puisse avoir lieu en phase aqueuse [AFGC, 2004]. 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 [Houst, 1992].

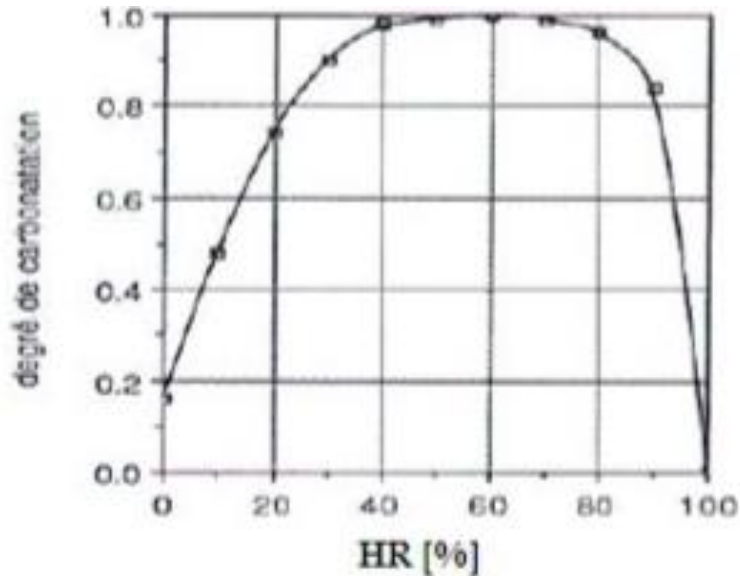


Fig.III.8: Degré de carbonatation en fonction de l'humidité relative à 25° pour béton durci (Vénuat (1978b)) (Metalssi, 2006). [18]

➤ **Concentration en CO₂ :**

De manière générale, il est bien connu que l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone (CO₂) accroît la possibilité de détection des cinétiques de carbonatation.

En étudiant la carbonatation des pâtes de ciment de rapport E/C=0.6 à différents taux de dioxyde de carbone (CO₂) (0.03%, 5%, 100%) et à différentes humidités relatives (50% à 80%), Anstice D.J (2005) met en évidence une augmentation du degré de carbonatation pour des concentrations élevées en dioxyde de carbone (CO₂). Ils observent que la masse volumique ainsi que la chute de porosité totale des échantillons carbonatés augmentent avec la concentration en dioxyde de carbone (CO₂). Si le rapport E/C est très élevé (plus de 0.8), il en résulte une quantité excessive d'eau libre dans le mortier, qui augmente la porosité. Au contraire, pour un rapport E/C faible (moins de 0.3), la porosité diminue. Ainsi, un taux de dioxyde de carbone (CO₂) élevé va engendrer une diminution de la porosité par la formation des carbonates de calcium (CaCO₃), pouvant aboutir à un colmatage du réseau poreux. Ceci aura pour conséquence de freiner la carbonatation.

Les récents travaux de Hyvert (2009) ont permis de mieux comprendre l'effet du taux de dioxyde de carbone (CO₂) sur le processus de carbonatation. Les essais de caractérisation (ATD/ATG, DRX, porosimétrie mercure) menés par l'auteur sur les divers mortiers carbonatés à différentes concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) (0,03%, 10%, 25%, 50%) et à différentes échéances de temps (28 jours, 90 jours, 157 jours, 211 jours, 296 jours)

Chapitre III : La carbonatation des bétons

montrent que l'augmentation du taux du dioxyde de carbone (CO_2) accélère la carbonatation. [16]

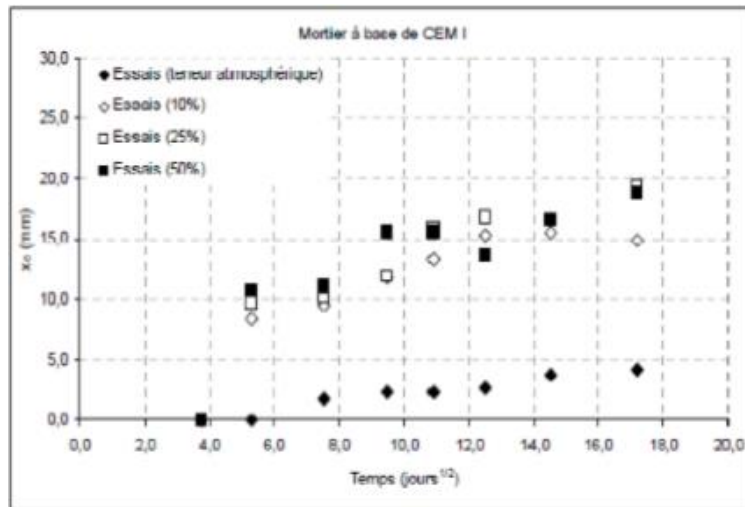


Fig.III-9 : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM I 52.5N et pour les différentes teneurs de dioxyde de carbone (CO_2) (Hyvert N, 2009). [18]

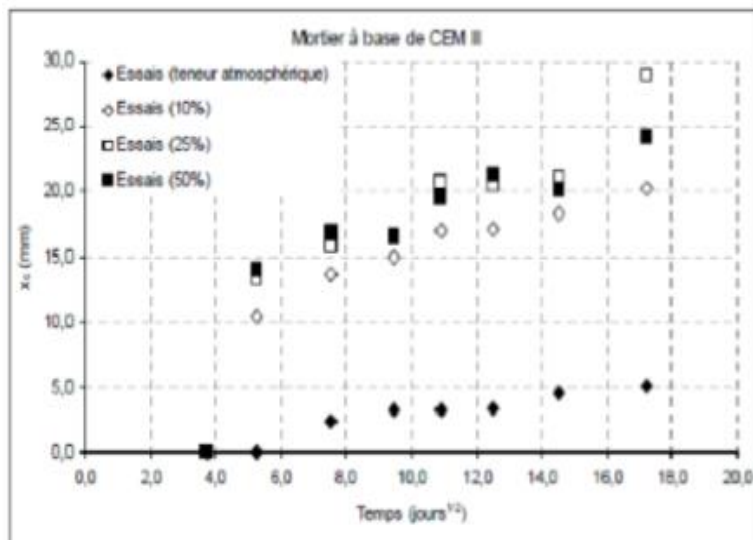


Fig.III-10 : Evolution dans le temps de l'épaisseur carbonatée mesurée pour le mortier à base de CEM III/A 42.5N et pour les différentes teneurs de dioxyde de carbone (CO_2) (Hyvert N, 2009). [18]

La **Fig.III-9** et la **Fig.III-10**, illustrent l'évolution de l'épaisseur carbonatée des matériaux en fonction de la racine carrée du temps pour les différentes teneurs en dioxyde de carbone (CO_2). Ainsi, l'auteur constate que, pour la teneur atmosphérique de dioxyde de carbone

Chapitre III : La carbonatation des bétons

(CO_2), l'évolution du gain de masse des éprouvettes aux échéances de mesures : 28 jours, 90 jours, 157 jours et 296 jours, est peu importante. Ceci est confirmé par un gain faible en masse des éprouvettes. A l'inverse, l'épaisseur carbonatée est beaucoup plus importante pour les trois teneurs en dioxyde de carbone (CO_2) 10%, 25%, 30%, ce qui se traduit par un gain de masse des éprouvettes plus significatif. [17]

➤ Température :

Chaussadent (1997) émet l'hypothèse qu'une augmentation de la température diminue la vitesse de carbonatation des bétons. Pour ceci, il s'appuie sur la solubilité du dioxyde de carbone dans l'eau et sur des expérimentations réalisées par Dheilley et Tudo selon lesquelles la portlandite se dégrade plus rapidement lorsque la température diminue (Figure 3.10).

Au contraire, de nombreux auteurs (Smith et Evans , Rahman et Glasser, Neville) constatent qu'une élévation de la température accélère le processus de carbonatation. L'échauffement produit favoriserait le séchage des pores, donc faciliterait l'accès du dioxyde de carbone gazeux dans la matrice cimentaire. Thiery trouve que l'effet de la température sur la vitesse de carbonatation est assez incertain, donc il ne tient pas compte de ce paramètre dans sa modélisation. [14]

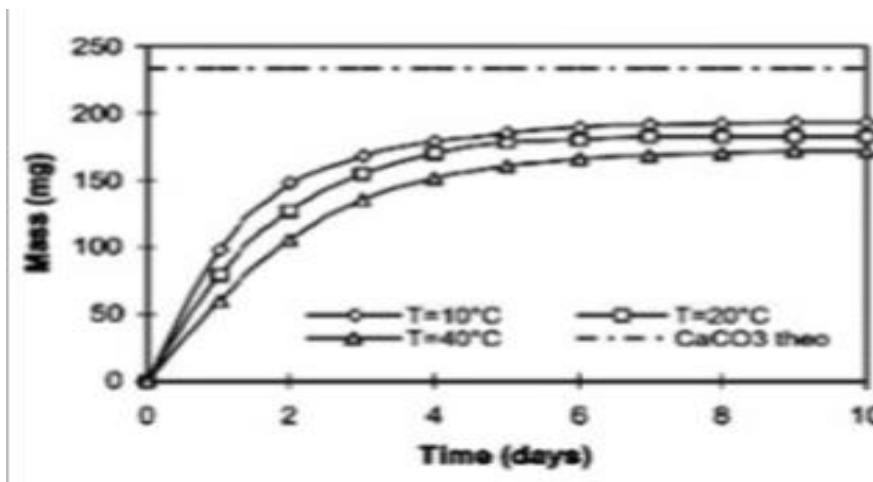


Fig.III-11 : Formation de la calcite lors d'une carbonatation accélérée de la portlandite ($CO_2=50\%$), en fonction de la température. [17]

III.11. Principales conséquences de la carbonatation :

III.11.1. Diminution du pH et amorçage de la corrosion :

La principale conséquence de la carbonatation est évidemment la baisse du pH due à la dissolution de la Portlandite dans la solution interstitielle. Cette diminution de pH détruit la

Chapitre III : La carbonatation des bétons

couche passivante et amorce ainsi la corrosion des armatures du béton armé ou précontraint lorsque le pH chute à une valeur d'environ 9 à leur profondeur d'enrobage. Le modèle conceptuel de corrosion par carbonatation (ou pénétration des chlorures) des aciers dans le béton armé **Fig.III.13**, montre que les processus liés à la corrosion se développent selon deux périodes [Tuutti, 1982 ; Baroghel-Bouny, 2005]. Dans le cas de la carbonatation, il est possible de résumer :

- Période d'incubation, elle correspond à la phase où le CO_2 transite dans le béton et où des processus physico-chimiques à l'origine de la corrosion des armatures peuvent avoir lieu à l'échelle microscopique, mais où aucune dégradation n'est encore visible à l'échelle macroscopique d'observation. Elle peut donc être définie comme le temps requis pour que les aciers soient dépassivés par la carbonatation ;
- Période de propagation, la phase où la corrosion s'amorce et des dégradations se développent.

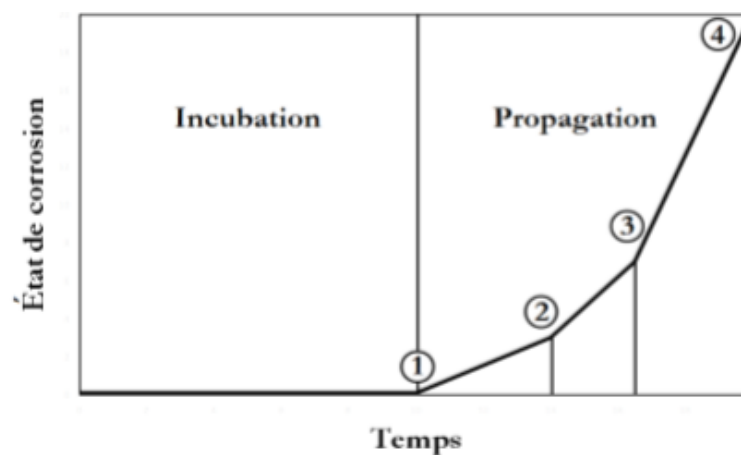


Fig.III-12: Diagramme de Tuutti modifié : (1) dépassivation des armatures, (2) apparition des fissures, (3) éclatement du béton en parement et (4) ruine [Baroghel- Bouny, 2005].

[18]

III.11.2. Modification 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 [Vénuat, 1978], se traduit par une notable réduction de porosité modifiant ainsi la distribution des tailles de pores [Pihlajavaara, 1968 ; Vénuat, 1978 ; Houst et al., 1983 ;

Chapitre III : La carbonatation des bétons

Hilsdorf et al., 1984 ; Bier, 1986 ; Ngala et Page, 1997 ; Miragliotta et al., 1999 ; Thiery, 2005 ; Delmi et al., 2005 ; Metalssi, 2006 ; Metalssi et AïtMokhtar, 2009]. [18]

III.11.3. 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. Powers [Powers, 1962] émet l'hypothèse selon laquelle ce retrait est dû à la dissolution des cristaux de Portlandite alors que ceux-ci sont soumis à des contraintes de compression, ce qui provoque une contraction dimensionnelle.

Hunt et Tomes [Hunt et Tomes, 1962] indiquent que c'est la diminution de la quantité d'eau chimiquement liée, faisant partie des CSH, qui provoque un retrait du matériau. Selon Swenson et Sereda [Swenson et Sereda, 1967], le retrait de carbonatation ne serait pas uniquement dû à la carbonatation de la Portlandite, mais s'expliquerait également par la déshydratation et par la polymérisation du gel de silice formé après carbonatation des CSH.

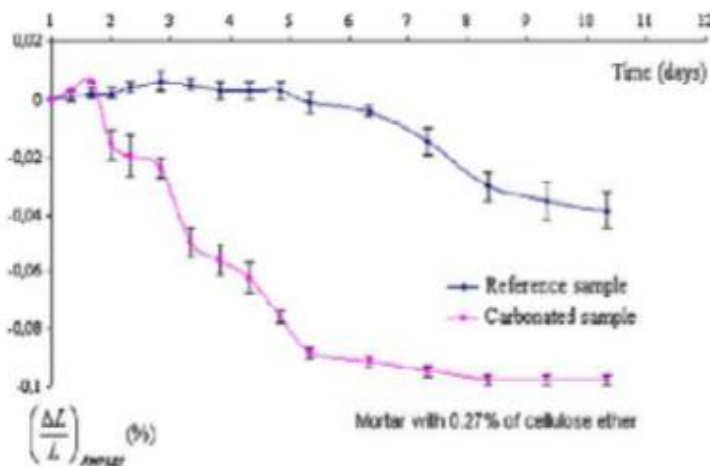


Fig.III-13 : variations des retraits du mortier carbonaté par rapport au mortier sain (Othman Omikrine Metalssia, 2012). [17]

III.11.4. Modification des propriétés mécaniques :

Les microcristaux de carbonate de calcium qui se forment à partir de la carbonatation des hydrates colmatent en partie les pores du béton et augmentent ses résistances mécaniques. En effet, il est bien connu que le CaCO_3 qui se forme par carbonatation de la Portlandite est un excellent liant. C'est lui qui d'ailleurs assure l'essentiel de la résistance mécanique des mortiers de chaux [Houst, 1989]. La résistance à la compression et à la flexion de bétons au ciment CEM I conservés dans une atmosphère de CO_2 peut augmenter au maximum jusqu'à 30 % par rapport aux mêmes bétons conservés en atmosphère exempte de CO_2 [Lea, 1970].

Chapitre III : La carbonatation des bétons

La résistance à la compression et à la flexion de mortiers modifiés polymères augmente d'environ 48 % après 5 jours de carbonatation accélérée [Metalssi, 2006]. La résistance à la traction est également augmentée par la carbonatation, notamment dans le cas de mortiers médiocres et relativement poreux. Cette augmentation est marquée par un accroissement du module d'Young [Meyers, 1949]. En revanche, la résistance mécanique après carbonatation diminue lorsque la teneur en clinker des ciments est inférieure à 40 % [Houst, 1992]. [17]

III.11.5. 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 [Daimon et al., 1971] ni la perméabilité à l'eau liquide [Meyer, 1968].

III.11.6. 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 [Pihlajavaara, 1968 ; Swenson et Sereda, 1968], peut participer à la composition de la solution interstitielle et contribuer au transport d'agents agressifs [Thiery, 2005]. Elle peut aussi augmenter le degré de saturation et ralentir ainsi la progression de la carbonatation. [18]

II.12. Profondeur de carbonatation :

La modélisation de la carbonatation a, pour objectif final, la prédiction de la durée de vie d'un ouvrage en béton armé. La profondeur de la carbonatation est donc nécessairement de déterminer pour prédire la corrosion des armatures d'acier. Il est fondamental de disposer du coefficient de diffusion de dioxyde de carbone (CO_2) par rapport de la porosité et du teneur en eau dans le béton carbonaté et non carbonaté. Il est connu que la profondeur de carbonatation avec le temps dépend non seulement par la concentration de dioxyde de carbone (CO_2), mais aussi par la diffusion du dioxyde de carbone (CO_2). Depuis les années 1970, de nombreux modèles empiriques de carbonatation ont été développés en se fondant sur les profondeurs de carbonatation H mesurées par projection de phénolphthaléine sur des éprouvettes de laboratoire carbonatées sous conditions accélérées ou sur les carottes d'ouvrages. [18]

III.13. Méthodes de caractérisation expérimentale de la carbonatation :

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

Chapitre III : La carbonatation des bétons

III.13.1. Carbonatation Naturelle.

Essai de carbonatation naturelle La carbonatation naturelle des éprouvettes est évidemment la méthode la plus proche de la réalité. Cependant, elle est longue et il est difficile de maintenir pendant une telle durée des conditions d'ambiance constantes. Pour évaluer la carbonatation naturelle de nos bétons et de nos pâtes de ciment, nous avons conservé les échantillons dans une salle de laboratoire climatisée à une température avoisinant les 20 °C, une humidité relative autour de 60 % et une teneur en CO₂ de 0,03 %. [15]

III.13.2. Carbonatation accélérée :

Une station de carbonatation, à teneur en dioxyde de carbone et humidité contrôlées, permet la carbonatation accélérée de matériaux à base de ciment. La chute de pH entraînée par la carbonatation peut être détectée par un indicateur pH-métrique (phénolphtaléine). La quantité de dioxyde de carbone fixée par la matrice cimentaire au cours de la carbonatation peut être suivie par gammadensimétrie via le gain de masse volumique induit. Ce dernier essai non destructif permet un suivi de la carbonatation des bétons en temps (cinétique) et en espace [16]

II.13.3. Détection de pulvérisation à la phénolphtaléine :

Pour évaluer la profondeur de carbonatation, que ce soit en laboratoire ou sur ouvrage, un indicateur coloré est généralement utilisé : la phénolphtaléine. Le test à l'indicateur coloré consiste à pulvériser une solution de phénolphtaléine (1 % dans l'éthanol) à l'aide d'un pulvérisateur sur une fracture fraîche réalisée orthogonalement à la surface soumise à la carbonatation par essai de fendage brésilien **Fig.III-8**. Après quelques minutes, pour chaque face, la profondeur de carbonatation est mesurée selon le mode opératoire, à l'aide d'un décimètre.

Les mesures correspondent aux distances en cm entre la surface externe du béton et le front de coloration. Elles sont effectuées sur le front de coloration en dehors des coins ; dans notre cas, nous avons pris 10 points équidistants de un centimètre et seuls les huit points centraux sont retenus. Nous retenons comme résultat la moyenne arithmétique des épaisseurs mesurées.

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

Chapitre III : La carbonatation des bétons

portlandite) et baisse rapidement jusqu'à 8 une fois carbonatée. C'est donc l'absence de portlandite qui est supposée démontrer que le béton est carbonaté.

Deux échantillons sont prévus pour chaque échéance et la valeur de la profondeur de carbonatation (p_c) est la moyenne des valeurs entre les deux échantillons. [16]



Fig.III-14 : Réalisation de l'essai de fendage brésilien. [16]



Fig.III-15 : Test à la phénolphthaléine et mesure du front de carbonatation. [16]

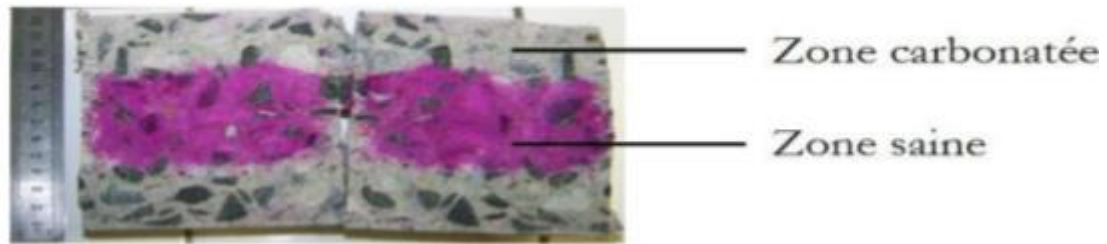


Fig.III-16 : Mesure de la profondeur de carbonatation détectée par la phénolphtaléine. [16]

L'avantage de cette technique est qu'elle révèle une ligne d'équi-pH (pH autour de 9) correspondant à la valeur limite de pH en dessous de laquelle il y a risque de corrosion. En revanche, elle présente un inconvénient majeur qui consiste en le fait que la corrosion des armatures peut démarrer à un pH supérieur à 9. En effet, sachant que la dépassivation des armatures peut se produire pour un pH égal à 11,4, il est probable que la zone où il y a risque de corrosion soit plus profonde dans le matériau que le front relevé par la phénolphtaléine (pH = 9 à ± 1 unité pH près). [16]

III.14. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essayé de comprendre le phénomène de carbonatation et surtout comment ce phénomène agit.

Dans ce chapitre, nous avons compris que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée et La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du CO₂.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton, donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz dans le béton. La diminution du rapport E/C permet donc d'accroître la résistance du béton à la carbonatation. Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du CO₂ en améliorant les propriétés de surface du béton.

La cinétique de carbonatation croît en fonction de la concentration en dioxyde de carbone.

Elle diminue lorsque les performances mécaniques du béton augmentent et est fortement influencée par l'humidité relative du milieu environnant.

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

Chapitre IV

Matériaux utilisé et méthode expérimentales

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre, notre objectif est de présenter les matériaux utilisés et les formulations étudiées.

Dans cette première partie nous exposons la partie expérimentale concernant la caractérisation des matériaux utilisés dans la fabrication des différents mélanges de mortier.

Nous présentons aussi la méthode de composition qui nous permettra d'établir les différentes formulations des mortiers.

Nous avons effectué une série d'essais physiques, et mécaniques sur les matériaux étudiés et sur les mortiers élaborés à partir de ces derniers. Ces essais étaient effectués dans le laboratoire de génie civil du centre universitaire D'Ain témouchent..

IV.2. Matériaux utilisés :

IV.2.1. Sable :

IV.2.1.1. Sable de mer :

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



Fig.IV-1 : Sable de mer.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Tab.VI-1 : Analyse chimique du sable de mer [LTPO]

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

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

IV.2.1.2. Sable concassé :

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



Figure.IV-2 : Sable de carrière (0-4 mm).

Tab.IV-2 : Analyse chimique du sable de carrière. (LTPO)

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

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

IV.2.2. Ciment :

IV.2.2.1 Composition chimique et minéralogique du ciment :

Le ciment, utilisé dans la confection de nos éprouvettes des mortiers ordinaires, provient de la cimenterie de Beni-Saf appartenant à la wilaya d'Ain-Temouchent. Ce ciment composé (cpj CEMCII/A 42.7) est le plus utilisé dans le domaine de la construction dans toute la région Nord-Ouest Algérien. Les compositions chimiques et minéralogiques (composition de Bogue) de ce ciment sont présentées dans le **Tab. II-1** et **Tab. II-2**. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans le Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO)

Tab.IV-3. Analyse chimique du ciment [LTPO].

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

Tab.IV-4 : Composition minéralogique du ciment de Béni-Saf.

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

IV.2.3. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est une eau potable du robinet.

IV.2.4. L'adjuvant :



Fig.IV-3: Adjuvant SUPERIOR 9WG.

L'adjuvant utilisé est le **SUPERIOR 9 WG** est un adjuvant super plastifiant à base de poly-carboxylates de nouvelle génération, qui permet de réaliser des bétons fluides avec des rapports E/C très réduits.

Il est compatible tous les types de ciment.

Tab.IV.5: Propriétés chimique et physique.

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

IV.2.4.1. Caractéristiques :

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

- Un faible rapport E/C.
- Un long maintien d'ouvrabilité.
- Des performances mécaniques élevées à court et long terme.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

- Une diminution du retrait.
- Une imperméabilité.
- Un meilleur parement.
- Une durabilité.

IV.2.4.2. Domaines d'application :

- Béton à hautes performance.
- Béton pour fondations profondes
- Béton pompé transporté sur de longues distances.

IV.2.5. la pouzzolane :

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

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

La détermination des caractéristiques physiques et chimiques des pouzzolanes naturelles et artificielles a été réalisée en collaboration avec le laboratoire national des travaux publics d'ouest (LTPO). [5]



Fig.IV-4. Pouzzolane.

Tab.IV-6 : composition chimique de la pouzzolane naturelle [ENSET-LTPO].

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

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

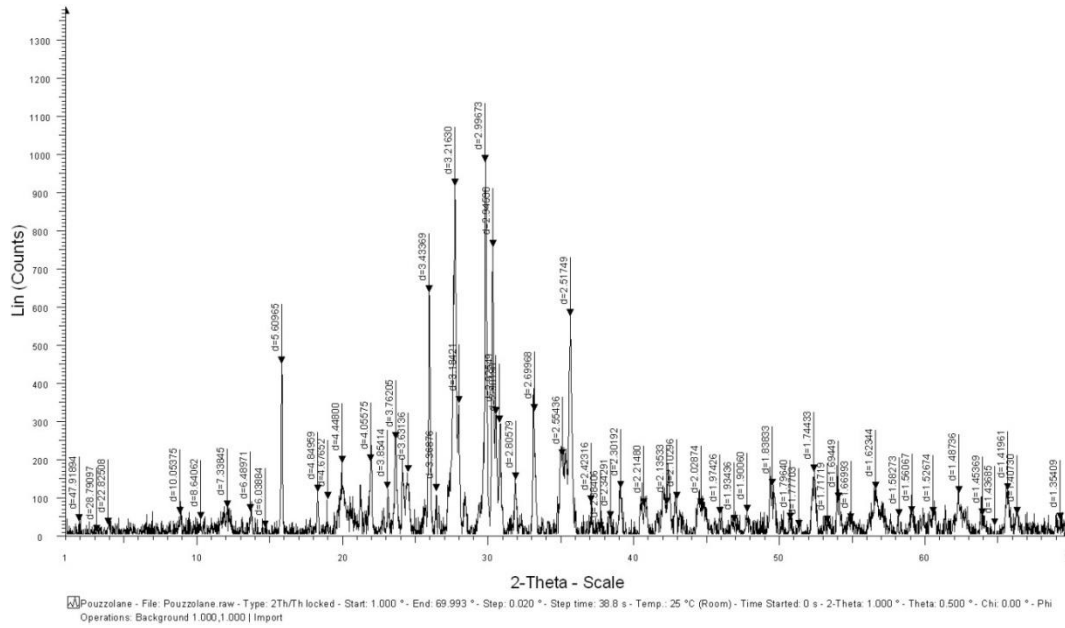


Fig.IV-5. Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de la pouzzolane. [7]

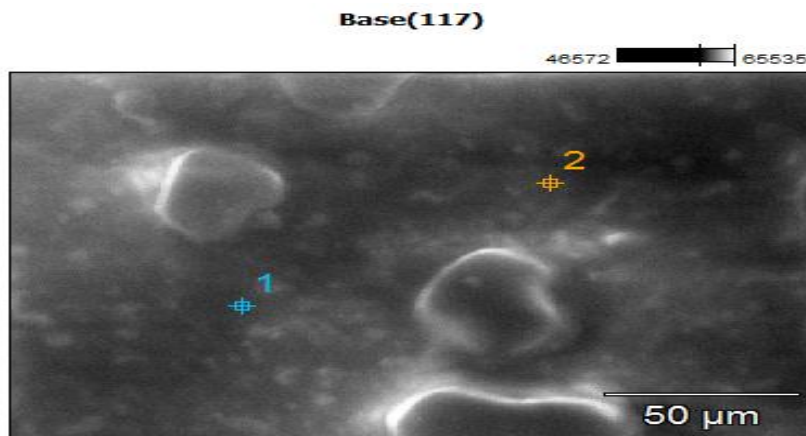


Fig.IV-6. Les pores de la pouzzolane. [7]

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

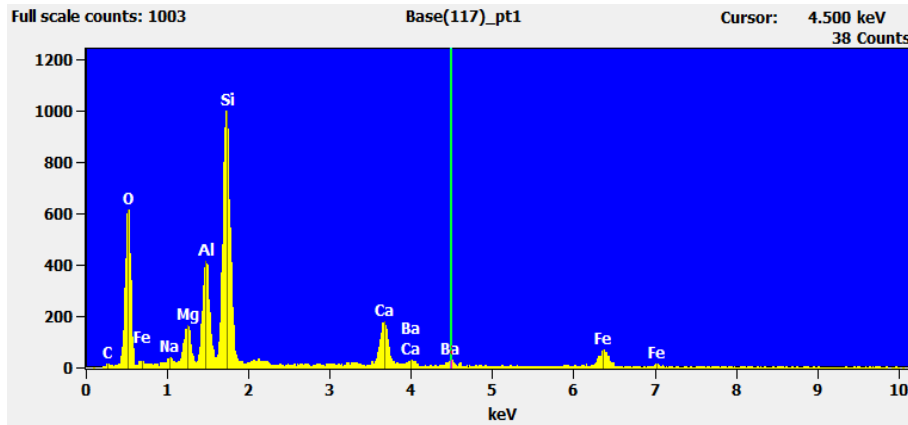


Fig.IV-7 : graphe de l'analyse par EDS. [7]

- **EDS :**

Tab. IV-7.L l'analyse par EDS. [7]

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

L'analyse par MEB (microscope à balayage électronique) nous donne une idée sur la microstructure de la pouzzolane et pour le graphe EDS il nous montre les mêmes résultats obtenues par l'analyse DRX on retrouve les mêmes éléments tel la silice qui donne à la pouzzolane sa pozzolanicité sachant que la norme indique qu'un matériau doit avoir une proportion min 25% de Si et Al.[7]

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Tab.IV-8 : La masse volumique apparente de la pouzzolane.

Pouzzolane	1^{er} pesé	2^{ème} pesé	3^{ème} pesé	moyenne
Poids du cylindre vide (g)	1393.62	1396.62	1393.62	1393.62
Poids du cylindre rempli de pouzzolane (g)	2772.4	2772.6	2772.8	2772.6000
Masse de la pouzzolane (g)	1378.78	1378.98	1379.18	1378.98
Masse volumique (g/cm ³)	1.3788	1.37898	1.37918	1.38

Tab.IV-9 : La masse volumique absolue de la pouzzolane.

Pouzzolane pour une masse M=300g	1^{er} pesé	2^{ème} pesé	3^{ème} pesé	moyenne
Volume V2 cm ³ eau seulement	500	500	500	500
Volume V2 cm ³ eau + pouzzolane M	625	630	624	626.33
Masse volumique absolue	2.40	2.31	2.42	2.38

IV.2.6. La poudre marbre blanche :

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

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales



Fig.IV-8 : Poudre de marbre.

Tab.IV-10. Composition chimique de la poudre de marbre. [6]

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

Une analyse à la diffraction des rayons X de la poudre de marbre après séchage, broyage et tamisage (passant à 80 μ m) est présentée sur la figure.

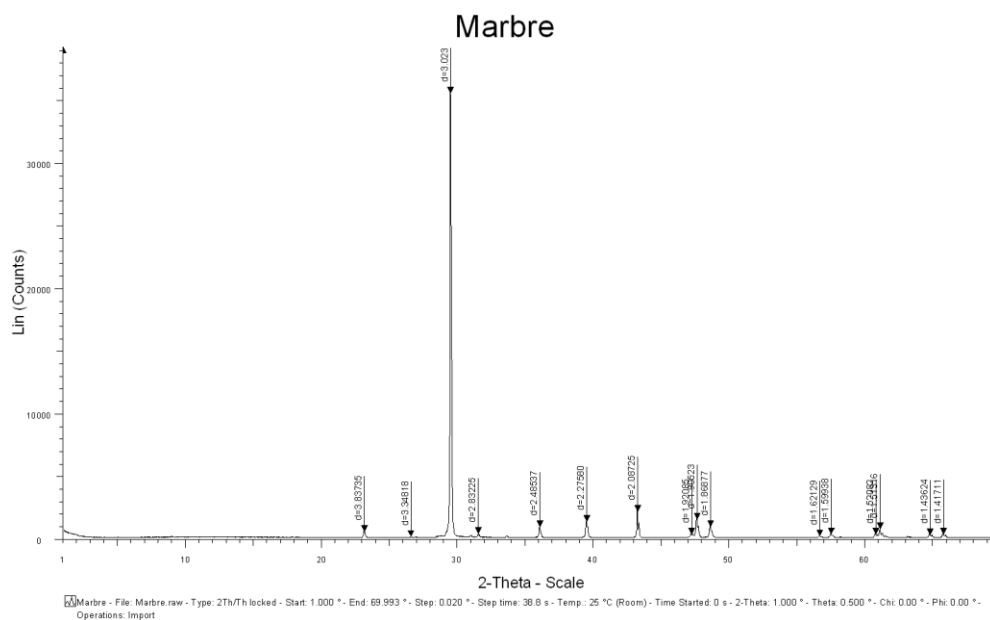


Fig.IV-9 : Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de marbre.

Tab.IV-11 : la masse volumique apparente de la poudre de marbre.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Poudre du marbre	1 ^{er} pesé	2 ^{ème} pesé	3 ^{ème} pesé	moyenne
Poids du cylindre vide (g)	1397.81	1397.81	1397.81	1397.81
Poids du cylindre rempli de marbre (g)	2538.72	2538.72	2538.72	2538.430
Masse de la marbre (g)	1140.91	1140.41	1140.54	1140.62
Masse volumique (g/cm ³)	1.14091	1.14041	1.14054	1.1406

Tab.IV-12 : La masse volumique absolue de la poudre de marbre.

Marbre pour une masse M=300g	1 ^{er} pesé	2 ^{ème} pesé	3 ^{ème} pesé	moyenne
Volume V2 cm ³ eau seulement	500	500	500	500
Volume V2 cm ³ eau + marbre M	620	615	615	616.67
Masse volumique absolue	2.50	2.61	2.61	2.57

IV.3. Méthodes d'essais :

Afin de caractériser les différents matériaux utilisés on a entamé plusieurs essais au niveau du laboratoire de matériaux de génie civil Ain Témouchent.

IV.3.1. Masse volumique apparent des granulats et ciments :



Fig.IV-10 : Entonnoir et récipient de mesure.

La formule de calcul :

$$M_{app} = \frac{m_1 + m_2 + m_3}{3} \times \frac{1}{V} \dots\dots\dots \text{éq.IV-1}$$

Tab.IV-13 : Résultats de l'essai de la masse volumique apparente.

Matériaux	Sable de mer	Sable de carrier	Ciment
Masse volumique apparente (g / cm ³).	1.32	0.98	1.5

IV.3.2. Masse volumique absolue :



Fig.IV-11 : Essai de la masse volumique absolue.

La formule de calcul :

$$\rho = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots \text{éq.IV-2}$$

Tab.IV-14 : Résultats de l'essai de la masse volumique absolue.

Matériaux	Sable de mer	Sable de carrière
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.43	2.64

IV.3.3. Equivalent de sable :



Fig.IV-12 : Essai de l'équivalent de sable.

La formule de calcul :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \dots\dots\dots \text{éq.IV-3}$$

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Tab.IV-15 : Résultat de l'essai de l'équivalent de sable.

Matériaux	Sable de mer
Equivalent de sable	92.5

IV.3.4. Foisonnement :

La formule de calcul :

$$f = \frac{Mv_{appo}}{Mv_{appw} \times (1 + w_m) - 1} \dots\dots\dots \text{éq.IV-4}$$

Tab.IV-16 : résultat de l'essai de foisonnement.

Matériaux	Sable de mer
Foisonnement	3.71

IV.3.5. analyse granulométrique du sable :



Fig.IV-13: Essai d'analyse granulométrique.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

IV.3.5.1. Analyse granulométrique du sable de carrière :

Tab.IV-17 : Résultats d'analyse granulométrique du sable de carrière.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisat (%)	Module de finess
6.3	0	0	100	3.9
5	0	0	100	
2.5	7.07	0.70	99.3	
1.25	18.76	1.87	98.13	
0.63	97.91	9.79	90.21	
0.315	910.1	91.01	8.99	
0.16	937.4	93.76	6.24	
0.08	987.36	98.73	1.27	
Fond	996.60	99.60	0.4	

mf = 3.9 > 3.55 (sable est très grossier).

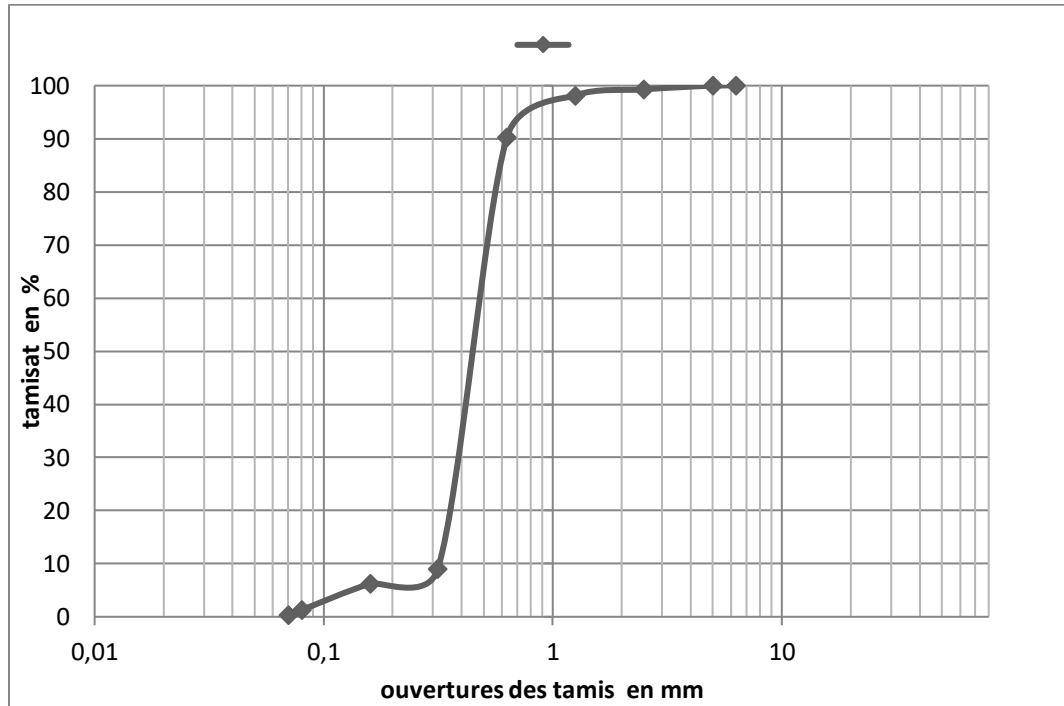


Fig.V-14 : Courbe granulométrique du sable de carrière.

IV.3.5.2. Analyse granulométrique du sable de mer.

Tab.IV-18 : Résultats d'analyse granulométrique du sable de mer.

Tamis (mm)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât %	Module de finesse
2	0.5	0.05	99.95	3.2
1	18.5	1.85	98.15	
0.5	77.4	7.74	92.26	
0.25	271.8	27.18	72.82	
0.125	971.4	97.14	2.86	
0.08	983.9	98.39	1.61	
0.063	986.2	98.62	1.38	
Fond	988.6	98.86	1.14	

Mf = 3.2 (sable grossier).

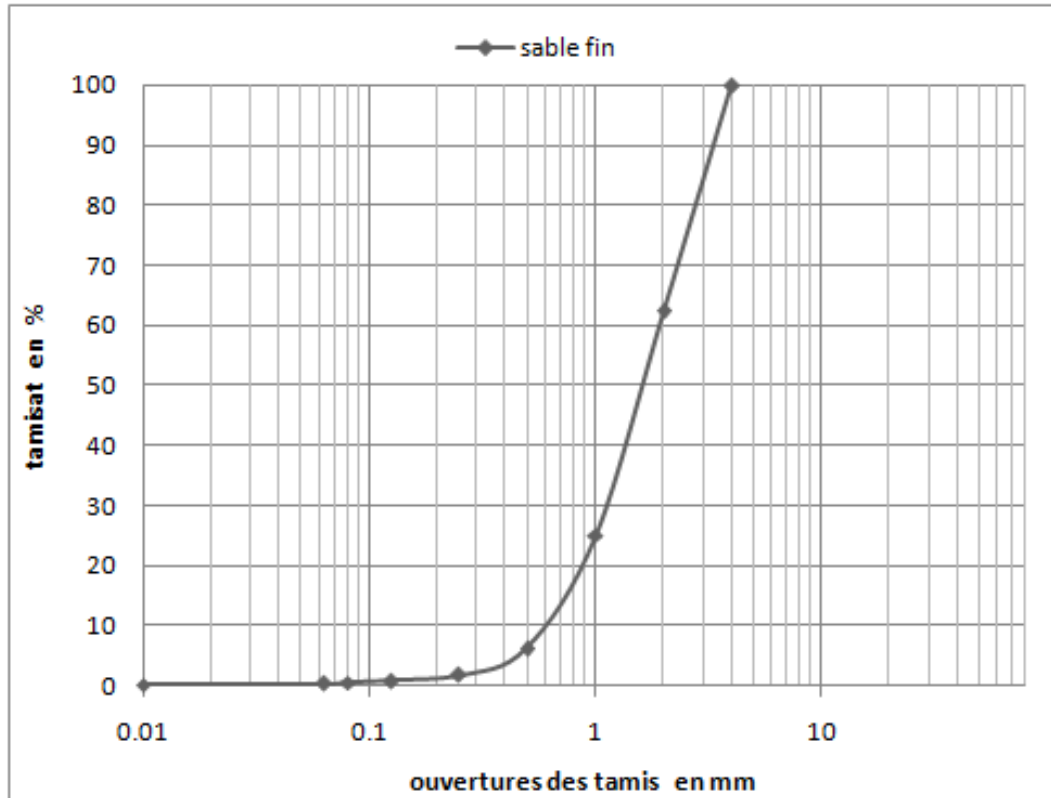


Fig.V-15 : Courbe granulométrique du sable de mer.

D'après l'analyse granulométrique du sable de carrières et sable de mer. Utilisé montre que la granulométrie est très serrée. Ce sable ne s'inscrit pas dans le fuseau Granulaire. Nous avons fait la correction des deux sables on trouve :

Le sable est corrigé : 50% sable de mer et 50% sable de carrière.

IV.4. Mortiers étudiés :

IV.4.1. La composition de mortiers :

Les méthodes de formulation des mortiers courants sont basées sur l'optimisation du squelette granulaire en fonction de la granularité des principaux composants (sable et ciment) afin d'obtenir une compacité maximale du mélange pour une ouvrabilité fixée.

Afin d'avoir des bons résultats de la résistance mécanique du mortier on a opté pour chaque combinaison, une moyenne de trois mesures présent sur trois éprouvettes a l'âge de 7, 28, 60 et 90 jours.

IV.4.2. Mortiers prismatiques :

Cette étude est réalisée sur cinq types de mortiers de forme prismatique de dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm³. La différence entre chaque type de mortier est le type de ajout

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

(pouzzolane ou marbre) est le rapport E/C. Le **tab.IV-19** donne la composition des éprouvettes fabriquée en mortier.

Tab.IV-19 : Différent type de dosage des mortiers étudiés.

	Sable de carrière (g)	Sable de mère (g)	Ciment CPJ2 42,5(g)	Pouzzolane (g)	Marbre (g)	Eau (ml)	Adjuvant
Gâché G1	687,5	687,5	350	0	0	175	0
Gâché G2	687,5	687,5	350	12,50%	0	168	4%
Gâché G3	687,5	687,5	350	0	12,50%	168	4%
Gâché G4	687,5	687,5	350	6,25%	6,25%	168	4%
Gâché G5	687,5	687,5	350	12,50%	0	171,5	2%

IV.4.3 Procédure de gâchage :

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

- ✓ Préparer une série du moule des dimensions $4 \times 4 \times 16$ cm **Fig.IV-16** convenables, avec la quantité du mortier. Le moulage des éprouvettes de fait immédiatement après la préparation du mortier :
- ✓ Huiler les moules et vérifier leurs serrages ;
- ✓ Placer les moules sur une table vibrante ;
- ✓ Préparation de mortier **Tab.IV-20** ;

Tab.IV-20 : Préparation des mortiers.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment		Introduction de sable		Raclage de la cuve		
Durée des opérations			30s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
Etats du malaxeur	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

IV.4.5. Préparation des éprouvettes :

➤ **Moulage des éprouvettes :**

Après la préparation de mélange du mortier .il faut que les éprouvettes soit moulée immédiatement afin de fixe le moule à la table a chocs **Fig.IV-15** conformément à la norme (P 18 196-1) les procédures de malaxage comme suit :

- Introduire le mélange d mortier en deux couches avec une cuillère convenable dans chaque compartiment.
- Etaler la couche uniformément en utilisant la plus grande spatule.
- Ensuite, serrer la première couche de mortier par 60 chocs.
- Introduire la seconde couche de mortier et de serre à nouveaux par 60 chocs.
- Retirer avec précaution le moule de la table à chocs et ôter la hausse.
- A l'aide d'une règle métallique on enlever immédiatement l'excès de mortier.
- Lisser la surface des éprouvettes en utilisant la même règle.
- Enlever le résidu du mortier restant sr le périmètre du moule, par suite de l'arusement.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

- Étiqueter ou marquer les moules pour identifier les éprouvettes et leur position relative sur la table à chocs.



Fig.IV-16 : Appareil à choc.



Fig.IV-17 : Moule des éprouvettes.

➤ Démoulage et conservation des éprouvettes.

Le démoulage est effectué après 24 heures. Ensuite, les éprouvettes sont curées de la manière suivante :

Immerger sans retard les éprouvettes marquées, de manière convenable, soit horizontalement, soit verticalement, dans l'eau et dans des récipients adéquats



Fig.V-18 : Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20 ± 2 °C.

IV.4.6. Âge des éprouvettes pour les essais sur les mortiers :

Compter l'âge des éprouvettes à partir du moment du malaxage du ciment et de l'eau, jusqu'au début de l'essai.

Effectuer les essais de résistance à différents âges dans les limites suivantes :

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

IV.4.7. Essais à l'état frais des mortiers :

Les premiers essais sur mortiers frais que nous présentons, sont des essais classiques qui s'effectuent traditionnellement sur des mortiers. Aucune modification n'a été effectuée pour les appliquer aux mortiers. Les essais réalisés sur mortier sont :

IV.4.7.1. Maniabilité :

La maniabilité des mortiers est mesurée au maniabilimètre LCL à mortier, conformément à la norme NF P 18-437. Cette grandeur est caractérisée par la mesure d'écoulement qui est autant plus grand que la consistance du mortier est épaisse comme l'atteste les résultats de maniabilité, aucun mortier n'a posé de difficulté de mise en place lors de la confection. C'est une mesure très utile pour apprécier l'influence des fillers calcaires ainsi que le rapport E/L sur la fluidité d'un mortier. Le schéma ci-

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

dessous présente le principe de l'essai de maniabilité du mortier à l'aide de perméabilimètre LCL. [7]

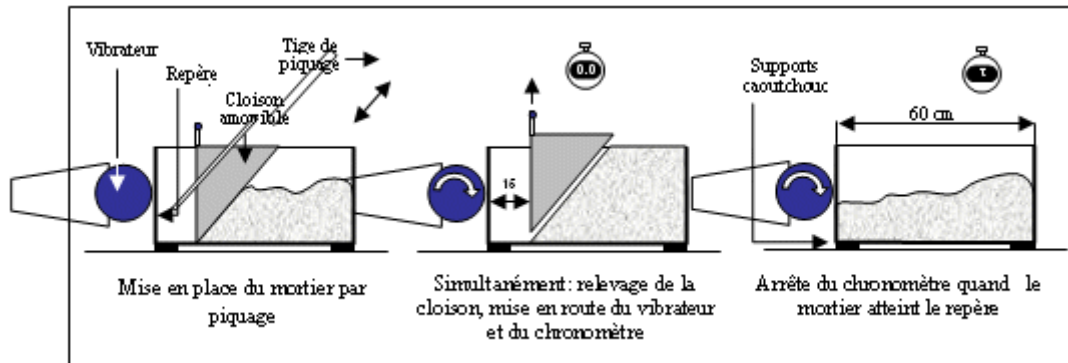


Fig.IV-19 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre. [7]

IV.4.7.2. L'air occlus.

Nous avons mesuré la quantité d'air occlus dans le mortier à l'aide d'un aéromètre. L'air occlus est dû au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le mortier après la mise en œuvre (remplissage des moules, vibration). Celui-ci dépend du mélange de granulats, de l'ouvrabilité du mortier et enfin de l'énergie de serrage développée lors de la mise en œuvre (l'énergie de vibration). Pour chaque mortier, avec différents dosages en filler calcaire et différents rapport E/L, nous avons mesuré le pourcentage d'air occlus. [7]



Fig.IV-20 : Appareil de mesure de la teneur en air occlus.

IV.4.8. Les essais mécaniques sur les mortiers :

IV.4.8.1. Essais de flexion:

Pour la détermination de la résistance à la flexion, nous avons utilisé la méthode de la charge concentrée à mi-portée au moyen du dispositif de flexion normalisé (flexion à trois points). Il s'agit dans cet essai d'appliquer une charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et de l'augmenter avec une vitesse constante jusqu'à rupture. Un schéma indiquant le principe de cet essai est donné ci-dessous : [3]

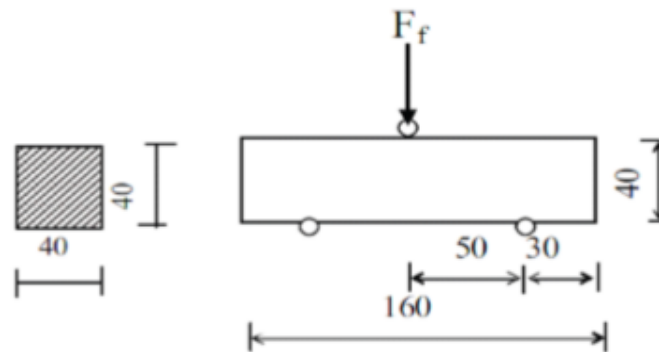


Fig.V-21 : Principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette (4 x 4 x 16) cm. [3]



Fig.V-22 : Appareil de l'essai de la flexion.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

IV.4.8.2. Essais de compression :

Cet essai consiste à centrer chaque demi-prisme (obtenu suite à l'essai de la flexion) latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement, de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm (**Fig.IV-22**). L'application de la charge de compression doit être avec une vitesse constante jusqu'à la rupture. [3]



Fig.V-23 : Appareil de l'essai de la compression.

IV.4.9. Essai de carbonatation accélérée en laboratoire :



Fig.V-24 : Enceinte de la carbonatation accélérée.

Chapitre IV : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

➤ Principe de l'essai :

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

A certaines échéances (généralement 7, 28, 60 et 90 jours), les échantillons sont retirés de l'enceinte et la profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide de phénolphthaléine comme indicateur qui permet de visualiser le changement de pH ($8 \leq \text{pH} \leq 10$) résultant de la carbonatation du béton ou du mortier. [14]

➤ Conduite de l'essai :

- Les échantillons sont ensuite introduits dans l'enceinte de carbonatation accélérée. L'alimentation en CO₂ est assurée à partir d'une bouteille de CO₂ sous pression dont le débit est réglé à partir d'un manomètre, évitant les surpressions dans l'enceinte pour que le transfert du gaz CO₂ dans les corps d'épreuve se fasse avant tout par diffusion.
- Retirés les échantillons et mesuré la profondeur de carbonatation avec la phénolphthaléine. [14]

IV.4.9.1. Suivi de la progression de la carbonatation :

IV.4.9.1.1. Mesure de la profondeur de carbonatation :

A chaque échéance (7, 28, 60 et 90 jours), les corps d'épreuve sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté sont mesurées après les pesés. Un morceau de béton ou de mortier (épaisseur 2 ± 1 cm) est prélevé sur chaque éprouvette.

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

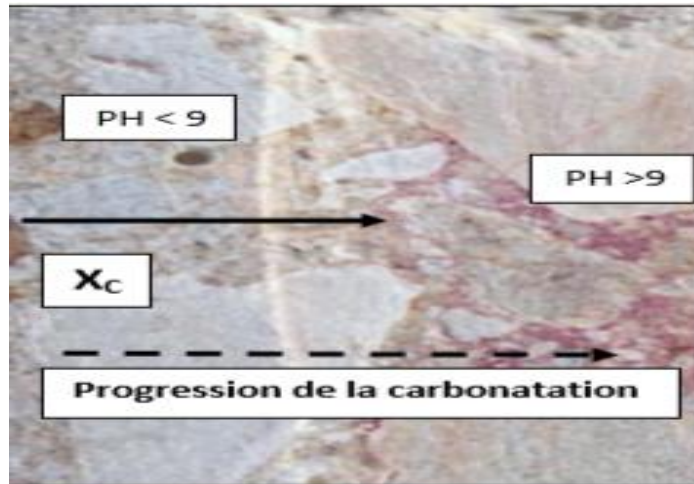


Fig.IV-25 : Front de carbonatation détecté par projection de phénolphtaléine sur une éprouvette de béton ordinaire.[19]

❖ **Matériels utilisés :**

- Enceinte de carbonatation.
- Solution de phénolphtaléine.
- Une bouteille de CO_2 .

IV.5. Conclusion :

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

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

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

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

Chapitre V

Résultats des essais et interprétations

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

V.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous abordons les différents essais effectués sur les matériaux utilisés pour la formulation du mortier avec la pouzzalane ou la poudre de marbre, ainsi que les essais réalisés sur le mortier confectionné pour évaluer ses propriétés à l'état durci (résistance à la flexion et résistance à la compression ainsi que la carbonatation accéléré).

Une analyse et des discussions des résultats sera présentée, nous allons comparer entre le mortier témoin et les autres types de mortier. La profondeur de carbonatation mesurée sur des éprouvettes du mortier de différent âge sera présentée aussi. Par ailleurs, des corrélations sont effectuées dans ce chapitre entre les résultats des propriétés physiques à l'état frais et durci (air occlus et la carbonatation), et les résultats des propriétés mécaniques tels que la résistance à la compression du matériau durci.

V.2. Interprétations des résultats :

V.2.1. Essai sur mortier frais.

Tab.V-1 : résultats des essais sur le mortier frais.

Essai	Type de mortier	Résultat
La consistance de mortier	Mortier témoin	8.41s
Mesure de l'air occlus	Mortier témoin	8.8 %

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

V2.2. Le rapport E/C ET E/L :

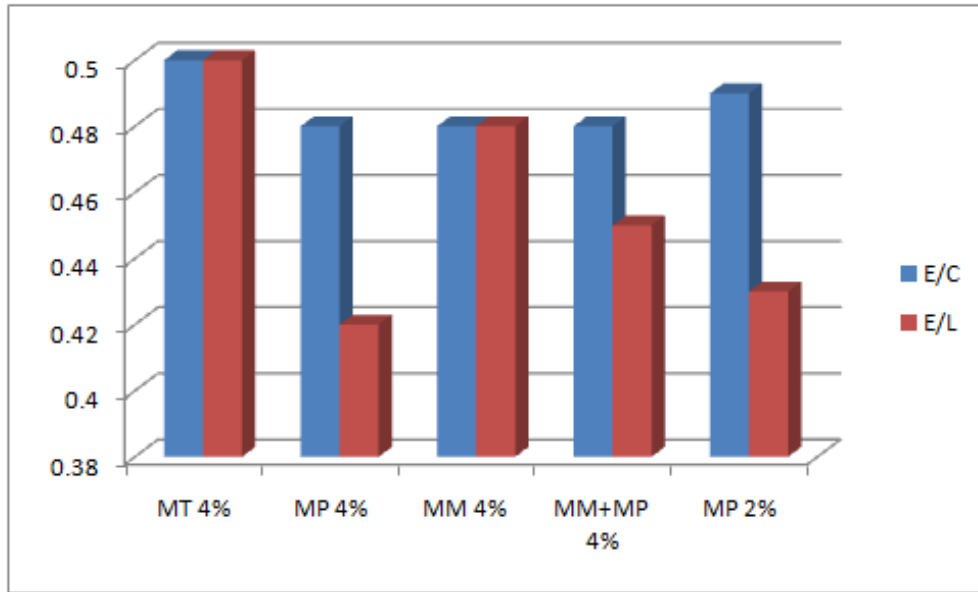


Fig.V-1 : Rapport E/C et E/L des mortiers.

On a observé que l'utilisation des adjuvants a réduit la quantité d'eau et augmenté la résistance du mortier.

V.2.3. Essai sur mortier durci.

V.2.3.1. Résultats des essais de la résistance à la flexion :

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

V.2.3.1.1. La résistance a la flexion :

Tab.V-2. La résistance à la flexion.

Type de mortier	Résistance à la flexion (Mpa)			
	7 jours	28 jours	60 jours	90 jours
Mortier témoin 4%	7	7.75	8.12	9.87
Mortier pouzzolanique 4%	9.30	9.91	10.37	11.07
Mortier marbré 4%	8.80	9	9.69	10.12
Mortier pouzzolane +marbre 4%	10.58	11.25	11.89	12
Mortier pouzzolanique 2%	8.20	8.73	9.62	10

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

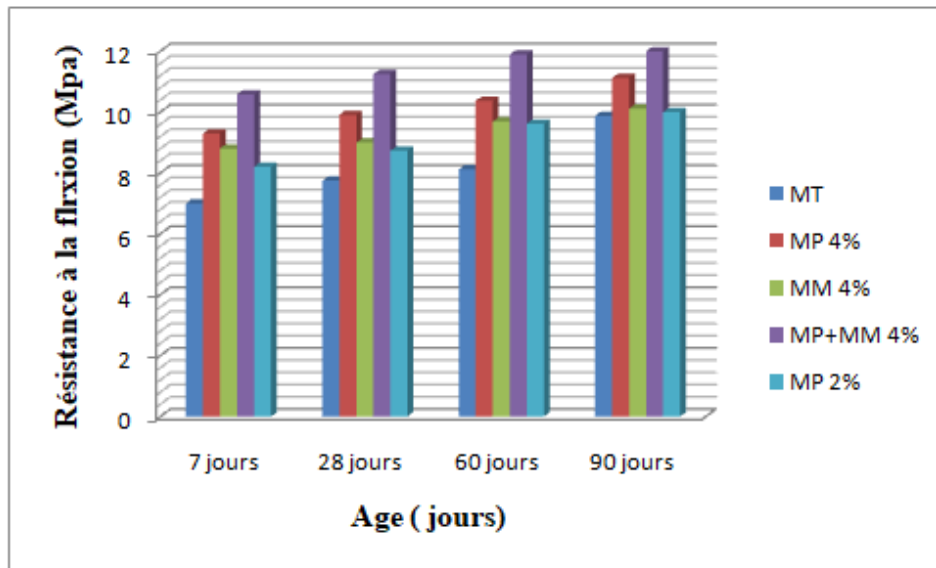


Fig.V-2 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers.

V.2.3.1.2 Résultats des essais de la résistance à la flexion pour la carbonatation naturelle.

Tab.V-3. La résistance à la flexion (carbonatation naturelle).

Type de mortier	Résistance à la flexion (Mpa)			
	7 jours	28 jours	60 jours	90 jours
Mortier témoin 4%	6.25	7.90	8.20	9.57
Mortier pouzzolanique 4%	9	10.10	10.75	11.40
Mortier marbré 4%	7.60	8.80	9.25	9.58

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

Mortier pouzzolane +marbre 4%	9.62	10.70	11	11.70
Mortier pouzzolanique 2%	7.88	8.95	9.30	9.60

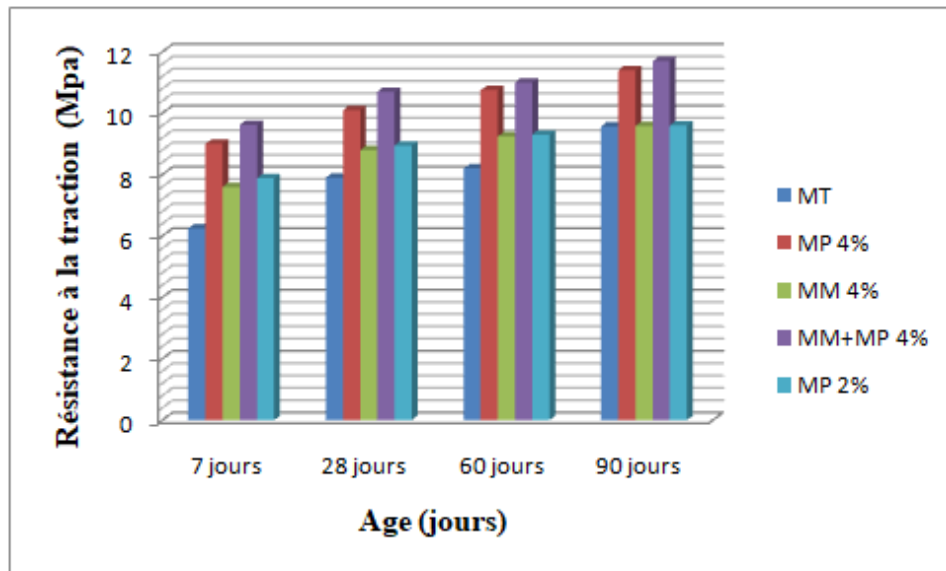


Fig.V-4 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à la carbonatation naturelle.

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

V.2.3.1.3. Résultats des essais de la résistance à la flexion pour la carbonatation accélérée.

Tab.V-4. La résistance à la flexion (carbonatation accélérée).

Type de mortier	Résistance à flexion (Mpa)			
	7 jours	28 jours	60 jours	90 jours
Mortier témoin	3	3.88	4.87	6.22
Mortier pouzzolanique 4%	5.81	5.22	8.12	8.24
Mortier marbré 4%	3.93	4.37	5.06	7.73
Mortier pouzzolane +marbre 4%	5.81	6.33	8.12	9.73
Mortier pouzzolanique 2%	4	4.63	6.56	7.88

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

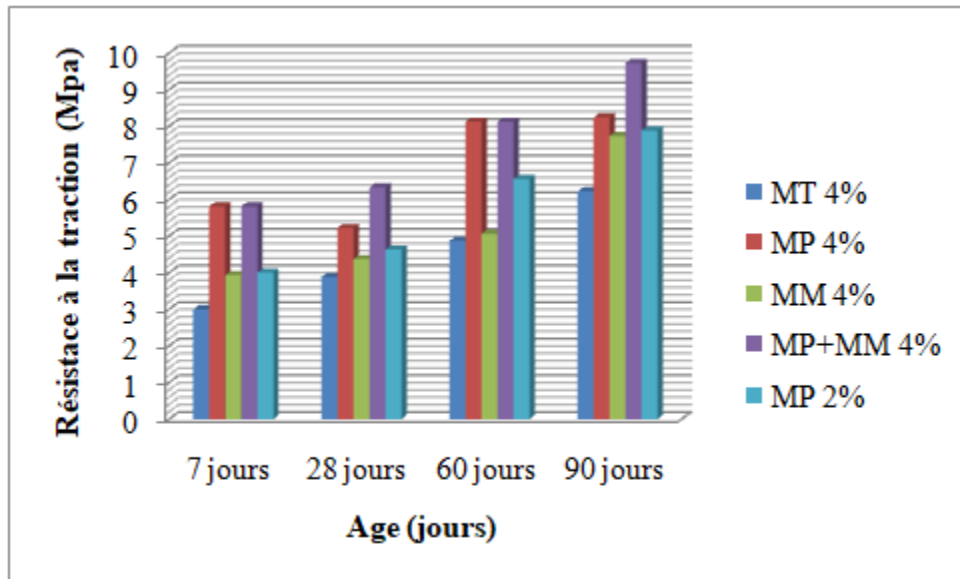


Fig.V-5 : Evolution de la résistance à la flexion des mortiers à la carbonatation accélérée.

D'après les résultats illustrés sur les **Fig(V-2, V-3,V-4)**, on a observé que la résistance à la flexion augmente en fonction de l'âge des éprouvettes à (7, 28, 60 et 90 jours) et pour tous les mortiers testés (avec différents ajouts et différents essais soit la carbonatation naturelle soit la carbonatation accélérée).

Alors on n'a conclu que l'utilisation des ajouts comme poudre fine et les adjuvants a donné des résultats bénéfiques par rapport au mortier témoin (sans ajout et sans adjuvant : MT 4%) même à jeune âge et permet aussi d'améliorer la rhéologie des mortiers à l'état frais. Les meilleures performances sont obtenues par les MM+MP 4%, MP 4% et MM 4%. D'autre part les trois graphes présentent que la résistance à la flexion des éprouvettes qui été exposés à la carbonatation accélérée est diminué par rapport les quels elles ont été exposés à la carbonatation naturelle (l'air libre).

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

V.2.3.2. Résultats des essais de la résistance à la compression.

V.2.3.2.1. Résultats d'essai de la résistance à la compression des éprouvettes :

Tab.V-5. La résistance à la compression.

Type de mortier	Résistance à la compression (Mpa)			
	7 jours	28 jours	60 jours	90 jours
Mortier témoin	35.33	39.10	40.99	41.10
Mortier pouzzolanique 4%	42.54	43.52	45.44	47.59
Mortier marbré 4%	41.98	42.74	43.87	45.57
Mortier pouzzolane +marbre 4%	44.20	45.14	45.98	46.78
Mortier pouzzolanique 2%	37.62	39.98	41.12	43.45

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

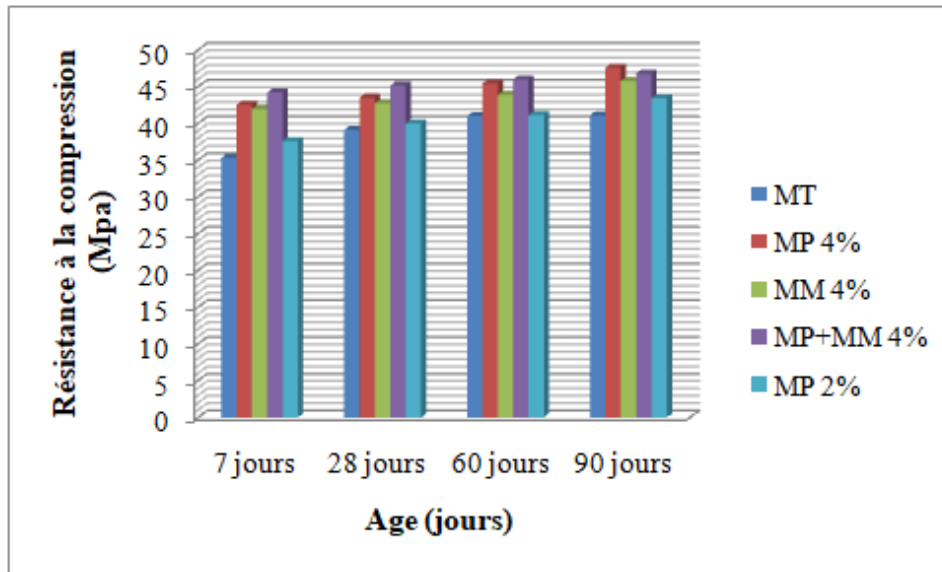


Fig.V-5 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers

V.2.3.2.2. Résultats des essais de la résistance à la compression pour la carbonatation naturelle.

Tab.V-6. La résistance à la compression pour la carbonatation naturelle.

Type de mortier	Résistance à la compression (Mpa)			
	7 jours	28 jours	60 jours	90 jours
Mortier témoin 4%	34.42	36.20	37.90	39.66
Mortier pouzzolanique 4%	37.22	39.09	40.48	43.98
Mortier marbré 4%	35.37	37.09	38.68	40.42

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

Mortier pouzzolane +marbre 4%	40.43	42.29	44.10	45.45
Mortier pouzzolanique 2%	35.12	36.43	38.12	39.90

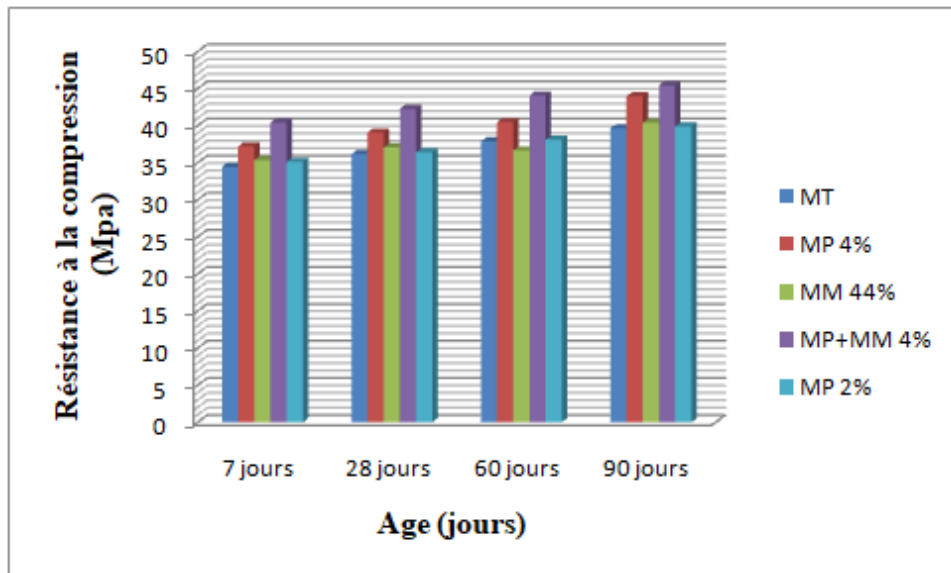


Fig.V-6 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers à la carbonatation naturelle.

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

V.2.3.2.3. Résultats des essais de la résistance à la compression pour la carbonatation accélérée.

Tab.V-7. La résistance à la compression pour la carbonatation accélérée.

Type de mortier	Résistance à la compression (Mpa)			
	7 jours	28 jours	60 jours	90 jours
Mortier témoin 4%	27.89	30.75	32.92	35.69
Mortier pouzzolanique 4%	30.84	33.99	37.31	39.12
Mortier marbré 4%	29.84	32.66	35.12	37.46
Mortier pouzzolane +marbre 4%	32.78	34.05	36.25	38.69
Mortier pouzzolanique 2%	28.42	30.52	33.90	35.65

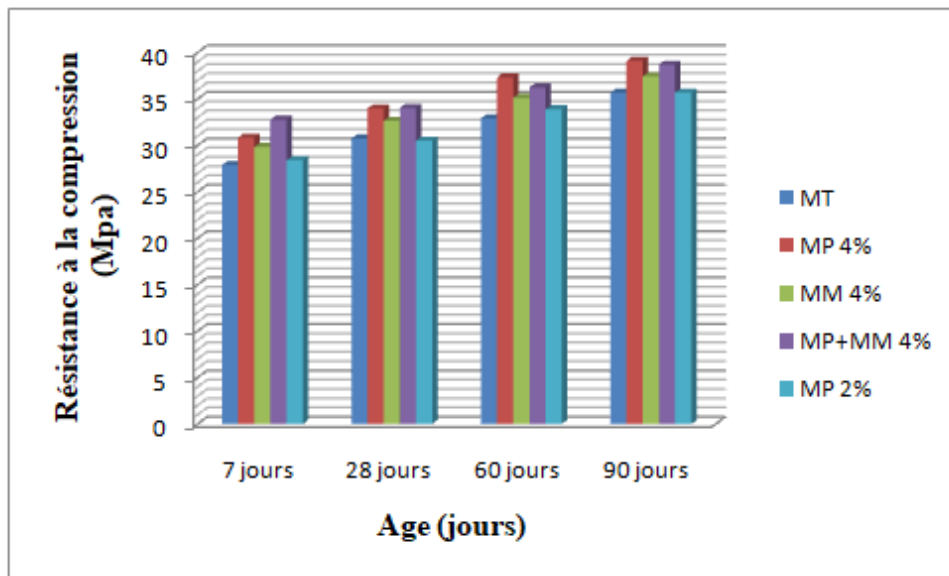


Fig.V-7 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers à la carbonatation accélérée.

Les Figs. V-5, V-6, V-7 montrent que la résistance en compression augmente en fonction de l'âge du matériau (à 7, 28, 60 et 90 jours). Ces résultats nous ont permis de constater que la présence de la pouzzolane (MP 4% et MP 2%) avec l'adjuvant a fait augmenter la résistance à la compression par rapport au mortier témoin MT.

L'ajout de la pouzzolane et de la poudre de marbre engendre des modifications significatives sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci. L'ajout de la poudre de marbre et la pouzzolane avec l'adjuvant (MP+MM 4%) a donné une amélioration de la résistance à la compression par rapport aux autres mortiers.

On remarque aussi que la résistance à la compression des mortiers à la carbonatation naturelle (l'air libre) est plus élevée que celle de la carbonatation accélérée.

V.2.3.3. Relation entre les résistances à la flexion et à la compression du matériau :

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

Nous pouvons constater, à partir de ces résultats obtenus (Fig.V-2 jusqu'à la Fig.V-7) que la résistance à la compression augmente avec la résistance à la traction par flexion au cours du temps en fonction de l'âge du matériau pour tous types de mortiers étudiés.

Chapitre V : Résultats des essais et interprétations

Nous pouvons constater, à partir de ces résultats obtenus (**Fig.V-2 jusqu'à la Fig.V-7**) que la résistance à la compression augmente avec la résistance à la traction par flexion au cours du temps en fonction de l'âge du matériau pour tous types de mortiers étudiés.

V.2.3.4. Résultats d'essai de carbonatation.

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

V.2.3.4.1. Epreuve après conservation dans l'eau.



Fig.V-8 : MT à 7 jours.



Fig.V-9 : MP 4% à 28 jours.



Fig.V-10 : MP 2% à 60 jours.



Fig.V-11 : MM 4% à 90 jours.

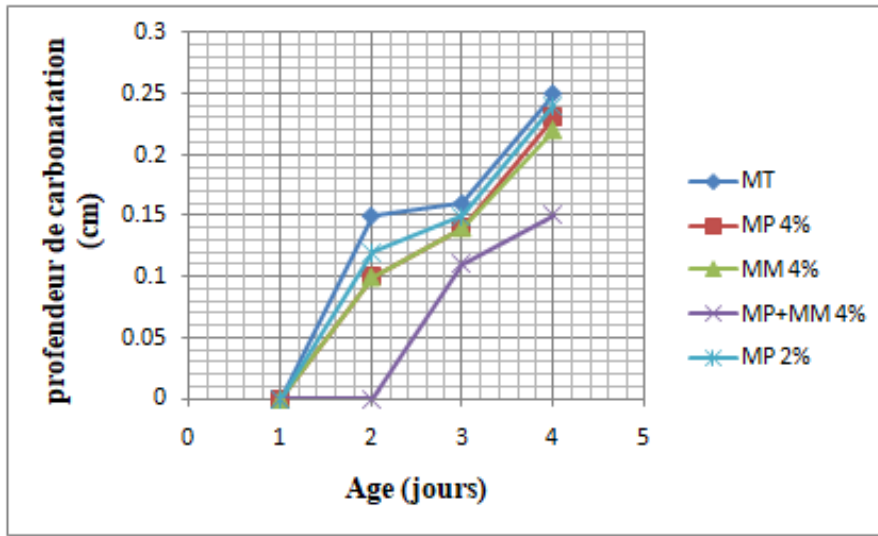


Fig.V-12 : Profondeur de carbonatation mesurée par projection de phénophtaléine pour les mortiers.

V.2.3.4.2. Essai de carbonatation naturelle :

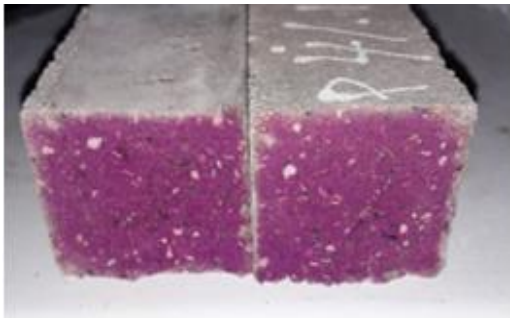


Fig.V-13 : MP+MM 4% à 7 jours.



Fig.V-14 : MP 2% à 28 jours.



Fig.V-15 : MP 4% à 60 jours.



Fig.V-16 : MT à 90 jours.

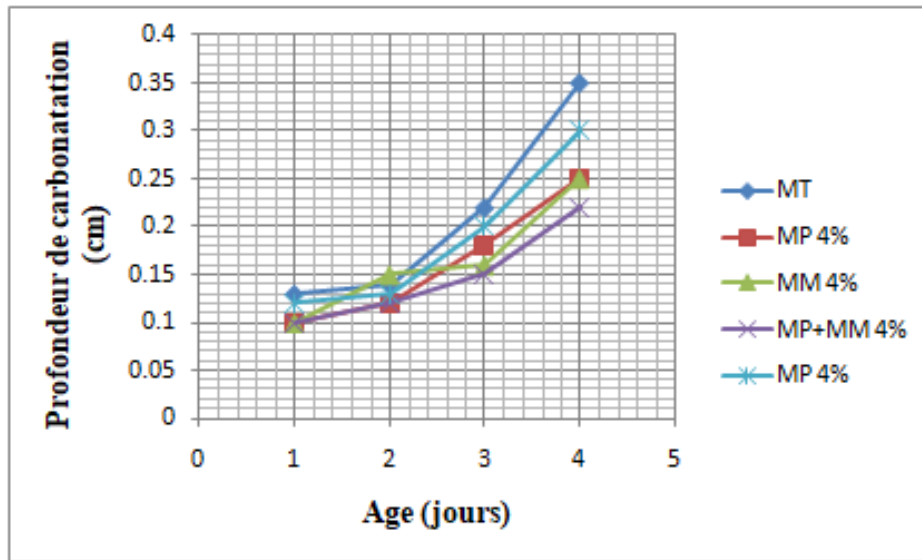


Fig.V-17 : Profondeur de carbonatation naturelle mesurée par projection de phénophtaléine pour les mortiers.

V.2.3.4.3. Essai de carbonatation accélérée :



Fig.V-18 : MP 2% à 7 jours.



Fig.V-19 : MP+MM 4% à 28 jours.



Fig.V-19 : MP 4% à 60 jours



Fig.V-20 : MT à 90 jours.

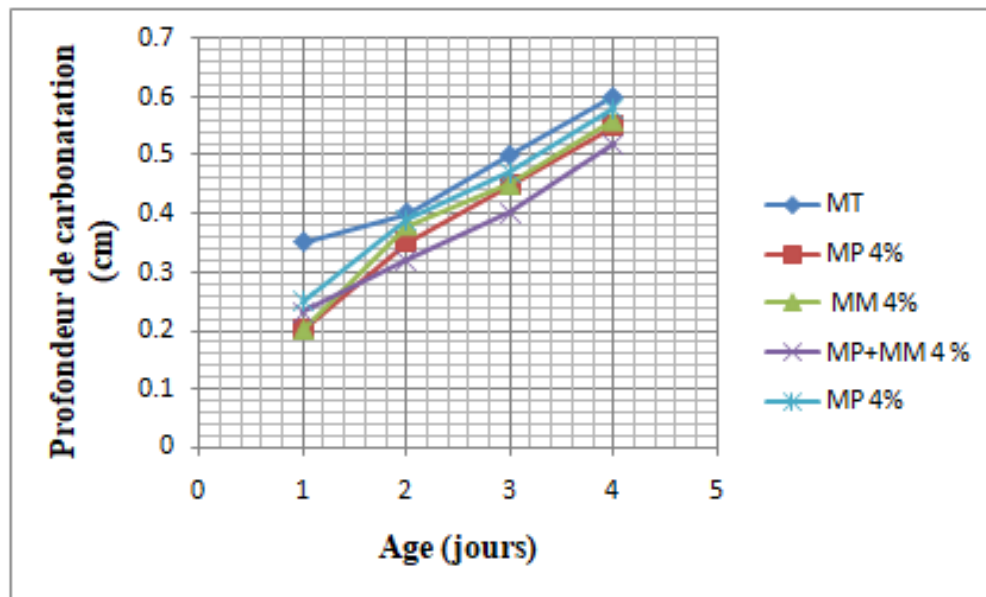


Fig.V-22 : Profondeur de carbonatation accélérée mesurée par projection de phénophtaléine pour les mortiers.

Les **Fig (V-12 , V-17, et V-22)** nous montre l'évolution de la cinétique de carbonatation en fonction du temps d'exposition au CO_2 .

Nous avons observé dans les trois graphes que la profondeur de la carbonatation augmente en fonction des jours.

Nous avons remarqué aussi dans la **Fig.V-12**, quelques traces de la carbonatation dans tous les types de mortier.

Au contraire nous avons constaté que la progression de la profondeur de la carbonatation pour tous les types de mortier étudié exposé à la carbonatation accélérée **Fig.V-22**, est plus élevée que la carbonatation naturelle (l'air libre) **Fig.V-17**. Et la profondeur de la carbonatation pour le mortier témoin est plus élevée dans les différents essais par rapport aux autres types de mortier.

D'après les résultats obtenus nous n'avons conclu que la vitesse de progression de la carbonatation prend beaucoup de temps pour apparaître. Et cela peut prendre des années. Nous observons que plus la résistance augmente plus la profondeur de carbonatation est faible.

V.3. Conclusion :

L'objectif de ce chapitre d'une part est de comparer Cinq types de mortier à base de pouzzolane ou la poudre de marbre, en variant le taux d'ajout de la pouzzolane et de la poudre de marbre et celle de l'adjuvant avec un mortier témoin sans ajout a été réalisée. Les résultats de cette étude nous ont permis de constater que la présence de la pouzzolane avec adjuvant a augmenté la résistance à la compression du mortier. Nous avons constaté aussi que de la poudre de marbre avec adjuvant a fait grimper la résistance à la compression. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la combinaison des deux ajouts : la pouzzolane et la poudre de marbre.

D'autre part nous avons comparé l'effet de carbonatation naturelle et accélérée sur ces mortiers, nous permis de retirer les résultats suivant :

- La propagation de la profondeur de carbonatation accélérée est plus élevée que la carbonatation naturelle.
- La propagation de la profondeur de carbonatation est augmentée en fonction du temps.
- plus la résistance augmente plus la profondeur de carbonatation est faible.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

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

La campagne expérimentale consiste à réaliser un essai capable de caractériser le phénomène de la carbonatation. L'objectif était avant tout de mieux comprendre l'impact du dioxyde de carbone (CO₂) sur les mécanismes de retrait de la carbonatation. Les essais ont été réalisés sur les éprouvettes en mortier (4x4x16 cm³). A partir de cette étude expérimentale, nous avons pu tirer les conclusions suivantes:

- la présence de la pouzzolane avec adjuvant a augmenté la résistance à la compression du mortier.
- Nous avons constaté aussi que de la poudre de marbre avec adjuvant a fait grimper la résistance à la compression. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir de la combinaison des deux ajouts : la pouzzolane et la poudre de marbre.
- La pouzzolane est un matériau naturel et la poudre de marbre est un déchet de la production des éléments en marbre ; leur valorisation peut être bénéfique dans le cadre économique et environnemental.
- L'ajout de ces deux matériaux donne des avantages et améliore les caractéristiques mécaniques des mortiers.
- Nous avons compris que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée et La porosité totale du béton par l'ajout des éléments comme la pouzzolane et la poudre de marbre.
- La cinétique de carbonatation croît en fonction de la concentration en dioxyde de carbone.
- plus la résistance augmente plus la profondeur de carbonatation est faible.
- La carbonatation accélérée plus élevée que la carbonatation naturelle.

Conclusion générale

- nous constatons que le mortier se carbonate 2,4 fois plus en carbonatation accélérée qu'en de carbonatation naturelle. Les résultats montrent que la carbonatation accélérée plus rapide que la carbonatation naturelle.
- Les résultats confirment que le rapport E/C, qui est un paramètre de formulation du mortier, joue un rôle majeur sur la vitesse de carbonatation : plus E/C est élevé, plus la cinétique de carbonatation est élevée.

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

Références bibliographiques :

- [1].SAMAI Soumia, « Formulation d'un mortier avec ajout de pouzzolane naturelle soumis à températures élevées», mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, année 2015/2016.
- [2].BEN MOSTEFA Fatime ,BOUHAFS Kheira, «Etude de la Durabilité des mortiers à base de pouzzolane», mémoire master, Centre universitaire d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib, année 2016/2017.
- [3].Mezaouri Sarra ,Drai Kaouter, « Valorisation de la poudre de verre dans des mortiers à base des matériaux locaux»,mémoire master, Centre université d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib, année 2017/2018.
- [4].<https://fr.scribd.com/doc/116019644/these-fin-2012>.
- [5].ARAB azedinne,RAFAI Hichem, «Elaboration et étude des caractéristiques physico-mécaniques des Bétons fibrés à ultra hautes performances avec ajouts de pouzzolane naturelle et de fumées de silice», mémoire masrter, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES, année 2016/2017
- [6].AOUIDIDI Lwiza, «Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane», mémoire master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, année 2015/2016.
- [7].BoudraaAhlem,Hadj-Safi Wahiba, «Etude de la diffusion des ions chlore des mortiers à base de la poudre de marbre et pouzzolane», mémoire master, Centre université d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib, année 2017/2018.
- [8].Seddiki Imane, Seddik Fatima Zohra, «Etude des propriétés mécaniques des mortiers additionnés de fillers calcaires : Comparaison entre des résultats des essais destructifs et non destructifs», mémoire master, Centre université d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib, année 2017/2018.
- [9].«"Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Indicateurs de durabilité"».
- [10].BELARIBI Omar«Durabilité des bétons autoplaçants à base de VASE ET DE pouzzolane», thèse doctorat, Université de Mostaganem, année 2014/2015.

[11].BEN AMMAR Benkhadda, «TRAITEMENT NATUREL DES MORTIERS ET BETONS DESTINES AUX STRUCTURES EN BETON PREFABRIQUE», mémoire de magister, Université Mohammed Kheider - Biskra-, année 2006.

[12].CHERIF Nabila, BEKHTI Narimen «Etude de la durabilité des bétons sous l'effet de la température cas de la porosité et la carbonatation», , Centre universitaire d'Ain témouchent Belhadj Bouchaib, année 2016/2017.

[13].BOUKERROUCHE Nedjouda, «DURABILITÉ DES BÉTONS», mémoire magister, Université Mentouri Constantine, année 2009.

[14] <https://wiki.epfl.ch/coursmatériauxgc/documents/beton%207%20durab%20pt2.pdf>

[15].DAKHMOCHE CHABIL Fatima-Zohra, «CARBONATATION DE BETONS ADJUVANTES A BASE DE RESSOURCES LOCALES ALGERIENNES», thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, année 2009.

[16]. OUAREKH .Boubaker «Recherche bibliographique sur l'effet de la carbonatation sur la durabilité des bétons», mémoire master, Université Mohamed Khider de Biskra, année 2017/2018.

[17]. DINH Thi Thanh Xuan, « Etude expérimentale et numérique de l'approche physico-chimique pour le matériau hétérogène: Application au matériau cimentaire soumis au dioxyde de carbone (CO₂)», thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne, année 2012.

[18].YOUNSI Akli, «Carbonatation de bétons à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales», thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE, année 2011.

[19].BENYAHIA Nabil , BENKHENNOUCHE Nasreddine,«Etude de l'influence des fillers calcaires, rapport (Eau/Ciment) et taux d'adjuvant sur la résistance mécanique d'un mortier à base d'un sable de concassage», mémoire , Université Abderrahmane Mira-Bejaia, année 2015/2016.

[20].LEKDIM Fatime, «ETUDE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS ARMÉS CONFECTIONNÉS À PARTIR DES SABLES DE CONCASSAGE», mémoire magister, Université de Béjaïa,année 2010/2011.

Annexe A



FICHE DE MANIPULATION

FOISONNEMENT DU SABLE ET TENEUR EN EAU

➤ Foisonnement du sable :

❖ Principe :

L'essai consiste à mesurer la variation de la masse volumique apparente d'un échantillon de sable en fonction de l'accroissement progressif de sa teneur en eau.

Les résultats sont portés sur un graphique en vue de tracer la courbe de foisonnement du sable testé.

❖ Matériel utilisé :

Le même matériel utilisé pour la mesure de la masse volumique apparente d'un agrégat.

❖ Mode opératoire :

Peser 2 kg de sable sec ($w = 0\%$) et mesurer sa masse volumique apparente (moyenne de 3 essais). Ajouter 1% d'eau soit 20 g à l'échantillon sec (2000 g) et bien mélanger.

Mesurer la nouvelle masse volumique apparente, refaire l'opération pour les valeurs de teneur en eau suivantes : 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 10%.

➤ Teneur en eau :

❖ Définition :

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec.

On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$W = \frac{E}{P_s} = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

E = Poids d'eau dans le matériau.

P_s = Poids du matériau sec.

P_h = Poids matériau humide

Si W est exprimé en % :

$$W\% = 100 \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

❖ Principe.

Trois procédés peuvent être utilisés pour la mesure de la teneur en eau in situ et/ou au laboratoire.

1. Flambage à l'alcool à brûler :

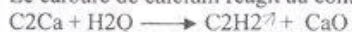
C'est le procédé couramment désigné sous le nom de "la poêle à frire".

- Peser l'échantillon humide, soit M_h ,
- Le placer dans un récipient métallique plat, et l'arroser d'alcool à brûler (1/2 l pour 2kg de sable),
- Allumer et agiter avec une tige métallique. Quand l'alcool est éteint, laisser refroidir,
- Répéter l'opération jusqu'à ce que le matériau soit sec, le peser soit M_s . Déterminer la W .



2. Emploi du carbure de calcium :

Le carbure de calcium réagit au contact de l'eau pour donner de l'acétylène :



Pour ce faire, on utilise le "Speedy".

- Placer une quantité déterminée du matériau humide à tester dans l'appareil,
- Mettre du carbure de calcium dans le couvercle de l'appareil.

Fermer en évitant que l'échantillon humide ne se mette au contact du carbure avant que le speedy ne soit fermé hermétiquement,

- Retourner l'appareil et l'agiter pour que l'échantillon mouillé et carbure se mélangent dans le récipient étanche. Il se dégage de l'acétylène en quantité d'autant plus grande qu'il y a d'eau dans le matériau humide; la pression créée dans le récipient croît alors avec la teneur en eau,
- Un manomètre commandé par la pression interne est gradué directement en %, donne ainsi par simple lecture la W.



3. Séchage à l'étuve :

- Placer une quantité déterminée du matériau humide à tester dans une boîte à pétri numérotée préalablement et tarée,
- Peser l'ensemble et l'introduire dans une étuve pendant 24 heures sous une température de 105°Celsius,
- Après dessiccation, on pèse l'ensemble une seconde fois,
- déduire les masses humide et sèche de l'échantillon et calculer la W.



Annexe B

TP 2

LEFFEBVRE Olivier
MORTIER Claude

DOCUMENT ELEVE

LABORATOIRE

MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE
(NF P)

MODE OPERATOIRE

But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la **masse volumique absolue** d'un corps (sable, gravier, ...). c'est à dire la masse en t (tonne), de ce corps pour 1 m3 de volume, mais uniquement la masse des différents grains constituant le granulat, c'est à dire que l'on ne tient absolument pas compte des vides qui peuvent-être situés entre les grains. Cette masse volumique absolue est appelée ρ_s (rau).

Définition :

La **masse volumique absolue** est donc la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m3, en kg/dm3 ou en g/cm3. (rappel 1 t/m3 = 1 g/cm3). Cette masse volumique n'intègre que les grains de l'agrégat, donc sans les vides compris entre ces grains.
La masse volumique absolue a la même valeur que la densité d'un même matériau, la seule différence étant que la densité n'a pas d'unité.

Principe de l'essai :

En partant d'un masse d'agrégat et en le plongeant dans un volume d'eau, on obtiendra la masse volumique absolue de ce dernier par la division de cette masse par la différence des volumes.

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ en t/m}^3$$

Avec : ρ_s = masse volumique absolue

M = masse du matériau étudié (en t, kg, g)

V1 = volume dans l'éprouvette avant introduction de la masse d'agrégat

V2 = volume dans l'éprouvette après introduction de la masse d'agrégat

Matériels utilisés :

Le matériel est très limité, et se compose de :
- une éprouvette graduée (environ 500 cm3)

une balance

Conduite de l'essai :

Il faudra procéder comme suit :

0. Remplir une éprouvette avec un volume d'eau V_1 et en noter sa valeur
- 0'. Peser un échantillon sec de granulats (environ 300 g)
- 0''. Introduire l'échantillon dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer les bulles d'air
1. Repérer la valeur du nouveau volume et la noter
2. Effectuer les calculs

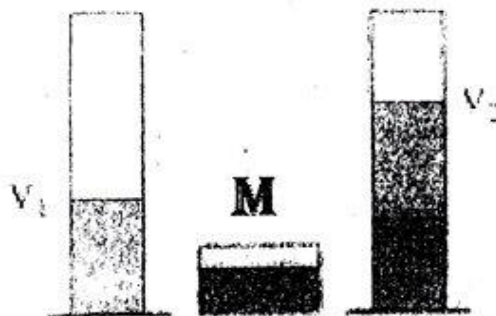


Tableau type :

V_1	M	V_2	\square s

- Avec :
- ρ_s - masse volumique absolue
 - M - masse du matériau étudié (en t, kg, g)
 - V_1 - volume dans l'éprouvette avant introduction de la masse d'agrégat
 - V_2 - volume dans l'éprouvette après introduction de la masse d'agrégat

méthode de pycnométrie :

le pycnomètre est une sorte de fiole jaugée de 200 cm³. Il permet de mesurer des volumes avec une grande précision

je remplis le pycnomètre jusqu'au trait de jauge : je mesure la masse M_1 de l'ensemble. Je mesure la même M_2 d'une certaine quantité de granulats (environ 50g) j'introduis cette masse M_2 dans le pycnomètre vide d'eau. Je complète avec de l'eau jusqu'au trait de jauge en agitant avec une baguette de verre pour supprimer les bulles d'air. Je mesure M_3 de l'ensemble. On déduit la masse volumique absolue ρ_{bo} la

Annexe C

TP 1

DOCUMENT ELEVE

LABORATOIRE

MASSE VOLUMIQUE APPARENTE
(NF P)

MODE OPERATOIRE

But de l'essai :

Cet essai permet de déterminer la **masse volumique apparente** d'un corps (sable, ciment, gravier, ...). C'est à dire la masse en t (tonne), de ce corps pour 1 m³ de volume.
Cette masse volumique apparente est appelée ρ (rau).

Définition :

La **masse volumique apparente** est donc la masse du matériau par unité de volume, exprimée en t/m³, en kg/dm³, ou en g/cm³. (rappel 1 t/m³ = 1 g/cm³). Cette masse volumique intègre les grains de l'agrégat ainsi que les vides compris entre ces grains.
De ce fait, il ne faut pas la confondre avec la **masse volumique absolue**, qui elle ne tient compte que de la masse des grains constitués le matériau sans les vides pouvant exister entre les grains.

Principe de l'essai :

Il suffit de remplir un récipient, dont on connaît le volume, en prenant de grande précautions pour éviter tous phénomènes parasites que pourrait provoquer le tassement, en effet un tassement trop important ou trop faible donnerait un résultat erroné. Pour limiter ce risque d'erreurs, l'essai se fera sur plusieurs pesées, avec lesquels on fera une moyenne. On pèse ensuite l'échantillon, en ayant pris soin de déduire la masse du récipient. Enfin, la masse de l'échantillon est divisé par le volume du récipient. Le résultat final nous donne donc la valeur de la masse volumique apparente du matériau.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{en t / m}^3$$

Avec : ρ = masse volumique apparente
M = masse du matériau étudié (en t, kg, g)
V = volume du récipient (en m³, dm³, cm³)

Matériels utilisés :

70

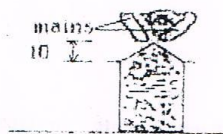
Le matériel est très limité, et se compose de :

- un récipient (bois ou métal) de forme cubique ou prismatique
- une balance
- une règle pour arasement du récipient

☒ Conduite de l'essai :

Il faudra procéder comme suit :

- ① Prendre un récipient et en calculer son volume
- ② Peser ce récipient et noter sa masse
- ③ Prendre le matériau dans les mains formant un entonnoir
- ④ Placer les deux mains à environ 10 cm au dessus du récipient et laisser le sable s'écouler ni trop vite, ni trop lentement




- ⑤ Laisser couler le matériau toujours au centre du récipient, Jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône (talus naturel)
- ⑥ Agrafer à la règle avec précaution la partie du matériau dépassant des bords supérieurs du récipient
- ⑦ Peser l'ensemble et noter le résultat
- ⑧ Recommencer l'opération 5 fois
- ⑨ Tous les résultats obtenus, diviser les masses par le volume et faire la moyenne des 5 résultats

☒ Tableau type :

Pesées	M ₀	M ₁	M ₂	V	ρ
1					
2					
3					
4					
5					

MOYENNE :


- Avec :
- M₀ : masse du récipient
 - M₁ : masse de l'échantillon et du récipient
 - M₂ : masse de l'échantillon seul (M₂ = M₁ - M₀)
 - V : volume du récipient
 - ρ : masse volumique apparente (ρ = M / V)



Institut des Sciences et de la Technologie

Centre universitaire d'Annouchent

FICHE DE MANIPULATION



Département de génie civil

Mesure de la consistance des mortiers

Objectif :

C'est une mesure qui est utile pour apprécier l'efficacité d'un adjuvant plastifiant, ou superplastifiant, sur la fluidité d'un mortier ou sur la réduction d'eau qu'il permet de réaliser à consistance égale. Il convient donc de définir un mode opératoire susceptible d'apprécier cette consistance ; c'est l'objet des essais définis par les normes NF P 18 - 452 et NF P 15 - 437.

description de l'appareil:

- **maniabimetre a mortier**

1 La cuve.

Elle se compose :

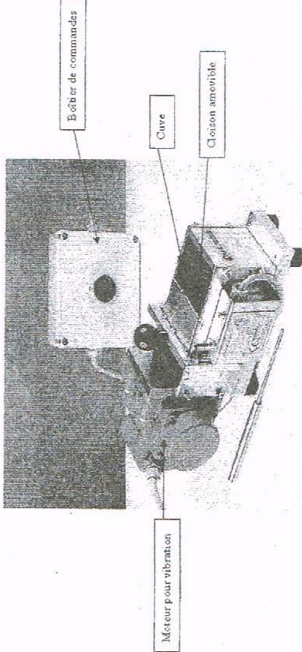
- **D'un bac rectangulaire** (60 cm x 30 cm x 30cm) monté sur patins de caoutchouc et séparé en 2 parties distinctes par une cloison amovible. Cette cloison coulisse verticalement dans des glissières fixées sur la face externe de la cuve.
- **D'un vibreur** constitué par un moteur électrique, fixé à l'extérieur du bac. Il entraîne un axe sur lequel sont fixées des masses excentrées assurant une vibration de l'ensemble lors de leur rotation.

2 Le boîtier de commande.

Le boîtier de commande comporte un bouton ON, OFF, assurant la commande à distance de la mise sous tension de l'appareil et de son extinction.

3 La tige de piquage.

Elle sert lors du remplissage de la cuve.



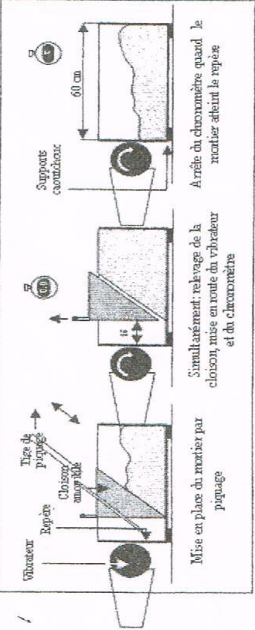


Fig.2: Principe de fonctionnement du maniabimètre B

Fiche des travaux pratiques de construction pour l'année 2013/2014

Page 1

- Chronomètre
- Malaxeur pour mortier

➢ **Principe de l'essai**

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

➢ **Conduite de l'essai**

▪ **Préparation de mortier (EN 196-1)**

La composition du mortier à tester est le suivant :

- sable normalisé = 1350 g 65 g.
- ciment = 450 g 6 2 g.
- eau de gâchage = 225 g 6 1 g (le rapport de E/C est donc 0,50).

on mélange la composition d'un mortier pendant 4 minutes conformément aux prescriptions de la norme :

Opérations	Introduction de l'eau	Introduction de ciment	Introduction du sable	Raclage de la cuve	
Durée des opérations	30 s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s
État du malaxeur	Arrête	Vitesse lente	Vitesse rapide	Arrête	Vitesse rapide

Tableau.1: *Opération pour déterminer le mortier normal*

▪ **Remplissage de la cuve**

Le remplissage doit se faire au maximum 2 min 30s après la fin du malaxage.

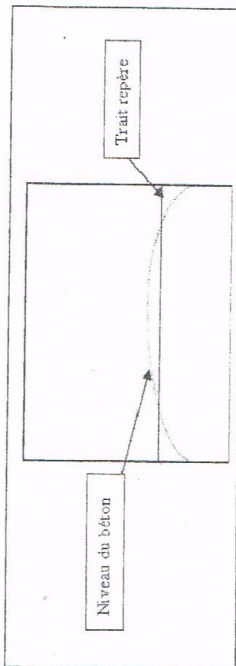
- Remplir de mortier le grand compartiment du maniabilimètre en quatre couches à peu près égales.
- Pour chaque couche, piquer le mortier de **6 coups** avec la tige de piquage, celle-ci étant **tenue parallèlement à la paroi inclinée** de la cloison amovible.

- A la fin, araser.

▪ **Mesures**

Lorsque le maniabilimètre est rempli, l'essai peut commencer :

- Mettre le bouton du boîtier de commande sur ON : le micro-contact de la cloison amovible est armé.
 - Pour commencer l'essai, soulever la trappe et déclencher un chronomètre. Le fait d'ôter la trappe commande automatiquement la mise en route du moteur.
 - Arrêter le chronomètre lorsque le niveau du mortier atteint le trait repère supérieur de la cuve.
- Il arrive souvent que le niveau du mortier ne soit pas parallèle au trait repère et se présente comme l'indique le schéma. Il faut alors arrêter le chronomètre lorsque le niveau de ressuage recouvre les 2/3 du trait repère.



- Lorsque l'essai est terminé, mettre le bouton du boîtier sur OFF pour arrêter le moteur.



FICHE DE MANIPULATION

Mesure de l'air occlus dans le mortier

> **Objectif :**

Afin de faciliter la mise en place du ciment et pour augmenter sa durée de vie, il a été démontré que les caractéristiques mécaniques du ciment étaient optimales lorsqu'il contenait 3 à 4 % d'air en volume. D'autres tests ont montré qu'il était primordial que la répartition de l'air occlus soit la plus uniforme possible. Les aéro-mètres permettent de suivre l'effet des adjuvants sur la quantité d'air introduite dans le ciment lors du processus de fabrication. Leur fonctionnement repose sur la loi de Boyle-Mariotte relative à la compressibilité des gaz.

> **description de l'appareil:**

Une cuve (1) d'un volume de 1 l est rendue hermétiquement close lors de l'essai grâce à un couvercle (2) étanche comportant 2 attaches rapides (3). Le couvercle comprend une chambre de pression (9) en liaison avec une pompe à air (4). Celle-ci permet d'appliquer la pression de travail au fluide utilisé lors de l'essai. Des valves (6 et 5) permettent d'ajuster la pression à la pression de travail (soupape noire) ou d'effectuer le test (soupape verte). 2 vannes (7), vissées sur le couvercle, permettent de remplir d'eau ou de chasser l'air de la cuve. La cuve communique avec le manomètre (8) via la chambre de pression.

Le manomètre, la pompe à main et les commandes des soupapes sont protégés de la poussière et de l'humidité.

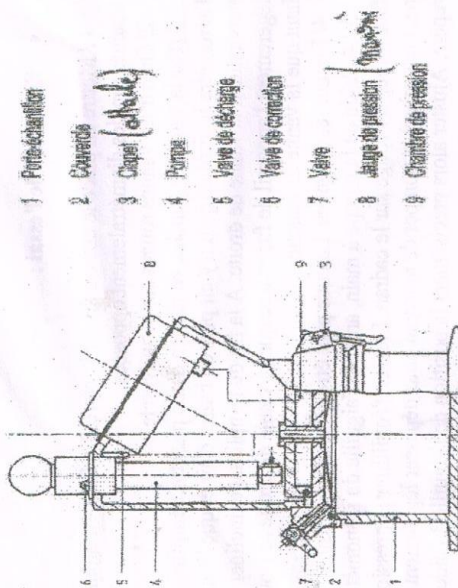


Schéma de l'appareil de mesure de la teneur en air

➤ mode opératoire.

• **Mise en place du mortier dans la cuve :**

- 1 / Introduire dans la cuve, en 2 couches, le mortier après la fin du malaxage.
- 2 / Appliquer 10 coups de tige de compactage à chaque couche, répartis uniformément sur la surface du mortier.
- 3 / Araser le mortier au niveau du bord supérieur de la cuve à l'aide d'une règle métallique à faces biseautées, avec un mouvement de sciage, et essuyer le bord du récipient avec une éponge.

• **Exécution de l'essai :**

- 1 / Mettre en place le couvercle sur la cuve. Le fixer en bloquant les attaches rapides diamétralement opposées.
- 2 / Ouvrir les vannes rouges sur le couvercle.
- 3 / Par la vanne de gauche, au moyen d'une pissette, remplir l'aéromètre jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de bulles d'air et que l'eau parvienne à la vanne de droite. A la fin du remplissage, incliner légèrement l'appareil de façon à ce que la vanne de droite se trouve plus haut que la vanne de gauche.
- 4 / Fermer les 2 vannes. La cuve peut être mise sous pression.
- 5 / A l'aide de la pompe à main, amener l'aiguille du manomètre en face du repère rouge sur le cadran. Laisser s'équilibrer la pression (qui peut retomber) et pomper de nouveau pour dépasser légèrement le repère. Ajuster alors précisément la position de l'aiguille à l'aide du bouton poussoir noir (6).

6 / Tapoter légèrement le manomètre et l'aéromètre pour sassurer que la pression ne change pas.

7 / Appuyer sur le bouton poussoir vert quelques secondes jusqu'à ce que les pressions entre cuve et chambre de pression s'équilibrent.

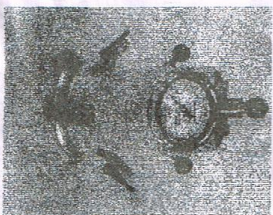
8 / Le manomètre indique alors directement en pourcentage le volume d'air occlus dans le mortier. **Noter la valeur de la teneur en air à 0,5 % près.**

9 / A la fin de la mesure, appuyer simultanément sur les touches **noire** et **verte** pour faire chuter la pression.

10 / Ouvrir les vannes et rajuster le niveau de l'eau.

11 / Répéter la mesure.

12 / Le même essai doit être recommencé sur un autre échantillon de la même gâchée. Le pourcentage d'air retenu est la moyenne arithmétique des lectures effectuées.



Résumé :

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel qui concerne tous les bétons et les mortiers. Une de ses principales conséquences est de favoriser la corrosion des armatures en les dépassivant. Ce phénomène mérite donc d'être examiné afin de mieux comprendre les pathologies souvent rencontrés dans les ouvrages en béton réduisant ainsi leur durabilité.

Ce travail vise à étudier le comportement mécanique et chimique du mortier à base soit de pouzzolane, soit de la poudre de marbre, en fonction de carbonatation naturelle et accéléré (enceinte de carbonatation) et la compréhension des mécaniques de carbonatation du mortier et donc apporter un éclairage nouveau sur les paramètres utiles et propose quelques dispositions pour s'en prémunir.

En premier nous avons comparé l'évolution des résistances résiduelles, en compression et en flexion de quatre formulations de mortiers avec des ajouts différents. Il s'agit d'une formulation de mortiers avec ajout de pouzzolane, ajout de la poudre de marbre et d'autre formulation avec les deux ajouts et la formulation d'un mortier sans ajout (témoin).

En deuxième pour examiner le mortier à la carbonatation, nous avons étudiés la carbonatation naturelle et accélérée qui est un indicateur très importante de la durabilité, et comparer le comportement mécanique du mortier pour chaque essai.

A la fin nous avons mesuré la profondeur de la carbonatation par projection de phénolphtaléine sur des éprouvettes des mortiers carbonatés sous conditions accélérées ou non accélérées.

Mots-clés : carbonatation, mortier, durabilité, phénolphtaléine, pouzzolane, poudre de marbre.

ملخص

الكربنة هي ظاهرة الشيوخوخة الطبيعية فيما يتعلق بكل من الخرسانة والملاط . واحدة من عواقبه الرئيسية هي تعزيز تآكل حديد التسليح. لذلك تستحق هذه الظاهرة فحصها لفهم أفضل للتدهور الذي يصادف في كثير من الأحيان في الهياكل الخرسانية وبالتالي تقليل المتانة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة السلوك الميكانيكي والكيميائي للملاط المضاف إليه إما مادة البوزولان أو مسحوق الرخام ، وفقا للكربنة الطبيعية و المتسارعة (غرفة الكربنة) وفهم آليات كربنة الملاط وبالتالي إلقاء ضوء جديد على المعايير المفيدة وإقتراح بعض الأحكام للحماية منها.

أولاً قمنا بمقارنة تطور المقامات اللحظية، الانحناء مع الشدة، على أربعة عينات من الملاط مع إضافات مختلفة. الدراسة تخص تركيبة من الملاط المضاف لها مادة البوزولان، أو مادة مسحوق الرخام مع تركيبة أخرى مضاف لها من المادتين و تركيبة من الملاط بدون إضافة (شاهد).

ثانياً لاختبار كربنة الملاط، قمنا بدراسة الكربنة الطبيعية و المتسارعة الذي هو مؤشر مهم جداً للاستدامة ومقارنة السلوك الميكانيكي للملاط لكل اختبار.

في النهاية قمنا بقياس عمق الكربنة عن طريق رش الفينولفتالين على عينات من الملاط المكربنة تحت ظروف متسارعة أو غير متسارعة.

كلمات البحث: الكربنة ، الملاط ، الاستدامة ، الفينولفتالين ، البوزولان ، مسحوق الرخام.

