



## *Résumé*

Le travail que j'ai effectué consiste à valoriser et recycler un déchet de la production du marbre dans la fabrication du béton. On a opté pour l'introduction de la pouzzolane comme ajout dans le béton afin d'améliorer ces caractéristiques, sachant que la poudre du marbre est un ajout inerte on a voulu faire une comparaison avec l'ajout de la pouzzolane naturelle et il faut noter que la pouzzolane est très abondante dans la région ouest de l'Algérie.

Le recyclage et la valorisation du déchet est devenu une préoccupation majeure des gouvernements vu l'impact économique et environnementale qu'il présente. Dans ce travail on a opté pour la substitution partielle du ciment par la poudre du marbre et la pouzzolane naturel. Pour cela on a confectionné six gâchées, une première gâchée témoin sans aucun ajout, et cinq gâchées de mortier avec différents pourcentage de substitution du ciment par la poudre du marbre et de la pouzzolane naturelle.

Une caractérisation des résistances mécaniques à la flexion et à la compression a été effectuée à l'âge de 7, 28, 60 et 90 jours.

Pour étudier la partie durabilité de ces mortiers on a mesuré la carbonatation accélérée. L'effet de l'ajout de la poudre du marbre et de la pouzzolane sur le retrait du mortier a été abordé aussi.

Les résultats obtenus sur la résistance mécanique à la flexion et à la compression ont démontré l'efficacité de l'ajout de la poudre du marbre dans le mortier.

**Mots clés :** mortier, pouzzolane, poudre de marbre, retrait, carbonatation accélérée.

# *Abstract*

The work I have done consists of recovering and recycling a waste from the production of marble in the manufacture of concrete. We opted for the introduction of pozzolana as an addition in the concrete in order to improve these characteristics, knowing that the marble powder is an inert addition we wanted to make a comparison with the addition of natural pozzolana and it should be noted that pozzolana is very abundant in the western region of Algeria.

Recycling and recovery of waste has become a major concern of governments in view of the economic and environmental impact it presents. In this work we opted for the partial substitution of cement by marble powder and natural pozzolana. For this, six batches were made, a first control batch without any addition, and five batch of mortar with different percentage of substitution of the cement by the powder of the marble and the natural pozzolan.

A characterization of the mechanical flexural and compressive strengths was performed at the ages of 7, 28, 60 and 90 days.

To study the durability part of these mortars, the accelerated carbonation was measured. The effect of adding marble powder and pozzolana on shrinking was also discussed.

The results obtained on the mechanical resistance to bending and compression demonstrated the effectiveness of adding marble powder to the mortar.

**Key words:** mortar, pozzolana, marble powder, shrinkage, accelerated carbonation.

## الملخص

يتكون العمل الذي قمت به من استعادة وإعادة تدوير النفايات من إنتاج الرخام في صناعة الخرسانة. اخترنا إدخال البوزولان كإضافة في الخرسانة من أجل تحسين هذه الخصائص، مع العلم أن مسحوق الرخام هو إضافة خاملة أردنا إجراء مقارنة مع إضافة البوزولان الطبيعي وتجدر الإشارة إلى أن البوزولانا موجود بكثرة في المنطقة الغربية من الجزائر.

أصبحت إعادة تدوير النفايات واستعادتها مصدر قلق كبير للحكومات في ضوء الآثار الاقتصادية والبيئية التي تحدثها. في هذا العمل، اخترنا الاستبدال الجزئي للأسمنت بمسحوق الرخام والبوزولان الطبيعي. لهذا الغرض، تم عمل ست خلطات، خلطة تحكم أولى بدون أي إضافة ، وخمس خلطات من الملاط بنسب مختلفة من استبدال الأسمنت بمسحوق الرخام والبوزولان الطبيعي.

تم إجراء توصيف لمقاومة الانثناء والضغط الميكانيكية في أعمار 7 و 28 و 60 و 90 يومًا.

لدراسة جزء الاستدامة من هذه الملاط، تم قياس الكربنة المتسارعة. كما تمت مناقشة تأثير إضافة مسحوق الرخام والبوزولان على النقل.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها على المقاومة الميكانيكية للانحناء والضغط فعالية إضافة مسحوق الرخام إلى الملاط.

**الكلمات المفتاحية:** الملاط، البوزولان، مسحوق الرخام، الانكماش، الكربنة المتسارعة

# Sommaire

1. Introduction.....	15
2. Généralités sur le béton et ces composants.....	15
2.1. Le ciment.....	15
2.1.1. Historique du ciment :.....	16
2.2. L'eau.....	16
2.3. Les agrégats.....	17
2.4. Les ajouts.....	18
2.4.1. Les fillers calcaires.....	18
2.4.2. Les fumées de silice.....	19
2.4.3. La pouzzolane :.....	20
2.4.4. Le Marbre.....	21
2.4.5. Poudre du marbre.....	22
2.4.6. Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments :.....	23
2.5. LES ADJUVANTS.....	24
3. Retrait et gonflement.....	24
3.1. Le Retrait :.....	24
3.2. Les Particularités du retrait du béton.....	25
3.3. Types de retrait dans le béton.....	25
3.3.1. Le retrait de séchage.....	25
3.3.2. Le retrait plastique.....	25
3.3.3. Le retrait endogène.....	26
3.3.4. Le retrait thermique.....	27
3.3.5. Conséquences du retrait.....	27
3.3.6. Les Bonnes pratiques pour limiter ou contrôler le retrait.....	28
3.3.7. Précautions pour limiter le retrait plastique avant prise du béton.....	28
3.3.8. Solutions pour limiter la fissuration due au retrait après prise (retrait de séchage et retrait endogène).....	28
3.3.9. Précautions pour limiter le retrait thermique.....	29
3.3.10. Mesure de retrait.....	29
4. Les indicateurs de durabilité généraux.....	30
5. La carbonatation du béton.....	30
5.1. Processus de Carbonatation.....	31

6. Conclusion :	33
1. Introduction.....	35
2. Caractéristiques des matériaux.....	35
2.1. Ciment .....	35
Le ciment utilisé CEMCII/A 42.5 de Beni-Saf. ....	35
2.1.1. Composition chimique et minéralogique du ciment.....	35
2.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques du ciment.....	36
2.1.2.1. Masse volumique absolue selon la norme NF P 18-558.....	36
2.1.2.2. Surface spécifique (la méthode de Blaine fcm <sup>2</sup> /g) .....	37
2.1.2.3. ESSAI DE CONSISTANCE (EN 196-3) .....	40
2.2.1.3 Essai de prise : .....	41
2.2. Les granulats.....	43
2.2.1. Sable de mer .....	43
2.2.2. Caractéristiques physiques du sable de mer .....	44
2.2.3. Sable concassé.....	50
2.2.4. Module de finesse Norme NF P18 304 : .....	51
2.3. Eau .....	52
2.3.1. Eau de gâchage .....	52
2.3.2. Résultats d'analyse de l'eau .....	52
2.4. Poudre du marbre.....	53
2.4.1. Les caractéristiques physiques de La poudre marbre.....	54
2.5. Pouzzolane.....	54
2.5.1. Les caractéristiques physiques de la poudre Pouzzolane .....	56
2.6. Formulation des mortiers .....	56
2.7. Préparation des éprouvettes .....	57
2.7.1. Démoulage et conservation des éprouvettes .....	58
2.7.2. Âge des éprouvettes pour les essais sur les mortiers.....	58
2.7.3. Essais à l'état frais des mortiers .....	58
2.7.4. Maniabilité : .....	59
2.7.5. L'air occlus : .....	59
2.7.6. Essais de flexion:.....	60
2.7.7. Essais de compression : .....	61
2.8. Essai de carbonatation accéléré .....	62
2.8.1. Principe de l'essai.....	62
2.8.2. Conduite de l'essai : .....	62

2.8.3.	Suivie de la progression de carbonatation .....	63
2.9.	Mesure du retrait sur éprouvette de mortier normal .....	64
2.9.1.	Objectif de l'essai .....	64
2.9.2.	Principe de l'essai .....	64
2.9.3.	Conduite de l'essai .....	65
2.10.	Conclusion. ....	66
1.	Introduction .....	69
2.	Interprétations des résultats .....	69
2.1.	Essais à l'état frais de mortier .....	69
2.1.1.	Maniabilité .....	69
2.1.2.	AIR OCCLUS : .....	70
2.2.	Essai sur mortier durci .....	71
2.2.1.	Résultats des essais de la résistance à la flexion .....	71
2.2.2.	Résultats des essais de la résistance à la compression .....	76
2.3.	Essai de carbonatation .....	81
2.3.1.	Essai de résistance à la flexion .....	81
2.3.2.	Essai de carbonatation accélérée .....	82
2.4.	Le retrait .....	85
2.5.	Conclusion : .....	91

## 1.

## LISTE DE FIGURE

Figure 1.1. poudre du marbre.....	26
Figure 1.2 exemple de fissuration à un retrait plastique sur une dalle béton.....	30
Figure 1.3I. Application de produit de cure sur béton.....	32
Figure 1.4. retractomètre .....	33
Figure 1.5 Eclatement du béton d'enrobage dû à la carbonatation .....	34
Figure 1.6. Mécanismes de carbonatation de Ca(OH).....	36.
Figure 2.1. Flasque de Chatelier .....	41
Figure 2.2.Densimètre manuel.....	43
Figure 2.3 appareil Vicat manuel .....	45.
Figure 2.4. Appareil de Vicat .....	46
Figure 2.5. Colonne de tamis.....	50
Figure 2.6.Courbe granulométrique du sable fin .....	51
Figure 2.7. Essai d'équivalent de sable.....	52
Figure 2.8.Poudre de marbre.....	57
Figure 2.9.Poudre de pouzzolane.....	58
Figure 2.10. Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de pouzzolane.....	59
Figure 2.11.Eprouvette prismatique (4*4*16).....	61
Figure 2.12 .Malaxeur électrique.....	61.
Figure 2.13.Principe de fonctionnement du maniabilimètre .....	63
Figure 2.14.Appareil de mesure de teneur en air occlus Essai sur mortier durci .....	64.
Figure 2.15.Appareil de l'essai de flexion.....	64
Figure 2.16.principe de l'essai de la flexion d'une eprouvette (4*4*16)cm <sup>3</sup> .....	65.
Figure 2.17.Dispositif de compression pour mortier.....	65
Figure 2.18. Dispositif pour la carbonatation accélérée.....	66
Figure 2.19. Test à la phénolphthaléine et mesure du front de carbonatation.....	67
Figure 2.20. Lecture sur retractomètre de retrait.....	69

Figure 3.1. Maniabilités des mortiers.....	74
Figure 3.2. Air Occlus.....	75.
Figure 3.3. Résistance à la flexion à l'âge 7jours.....	77.
Figure 3.4.Résistance à la flexion à l'âge 28 jours.....	79
Figure 3.5.Résistance à la flexion à l'âge 60 jours.....	79
Figure 3.6.Résistance à la flexion à l'âge 90 jours.....	80
Figure 3.7.Résistance à la flexion à différents âges.....	81.
Figure 3.8.Résistance à la Compression à l'âge 7 jours.....	82
Figure 3.9.Résistance à la Compression à l'âge 28 jours.....	83
Figure 3.10.Résistance à la Compression à l'âge 60 jours.....	84
Figure 3.11.Résistance à la Compression à l'âge 90 jours.....	85
Figure 3.12.Résistance à la Compression à différents âges.....	86
Figure 3.13.Résistance à la Flexion à l'âge 90 jours.....	89
Figure 3.14. Profondeur de la carbonatation accélérée.....	90
Figure 3.15.Front de carbonatation .....	91
Figure 3.16.Résultats des essais de retrait sur mortier G1.....	92.
Figure 3.17.Résultats des essais de retrait sur mortier G2.....	93
Figure 3.18.Résultats des essais de retrait sur mortier G3.....	94
Figure 3.19.Résultats des essais de retrait sur mortier G4.....	94
Figure 3.20.Résultats des essais de retrait sur mortier G5.....	95
Figure 3.21.Résultats des essais de retrait sur mortier G6.....	95

## Liste Des Tableaux

Tableau 2.1 : Composition chimique du ciment.....	40
Tableau2.2 Composition minéralogie du ciment de béni_SAF.....	40
Tableau2.3 :résultat de la surface spécifique.....	43
Tableau2.4 les caractéristiques physiques du ciment.....	47.
Tableau 2.5. Composition chimique de sable de mer(LTPO).....	47.
Tableau 2.6. Masse volumique apparent.....	48
Tableau 2.7. Résultat d'analyse granulométrique de. sable de mer.....	50
Tableau 2.8. Valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité.....	51
Tableau 2.9. Analyse chimique du sable de carrière (LTPO).....	53
Tableau 2.10. Résultat d'analyse granulométrique de sable de carrière.....	54
Tableau 2.11. Caractéristiques physique de sable de mer.....	54
Tableau 2.12. Caractéristique physique de sable de carrière.....	56
Tableau 2.13. Analyse chimique de l'eau.....	56
Tableau 2.14. Composition chimique de la poudre de marbre.....	57
Tableau 2.15. Caractéristiques physiques de la poudre de marbre.....	57
Tableau 2.16. Analyse chimique de la poudre de pouzzolane (LTPO).....	58
Tableau 2.17. Caractéristiques physiques de poudre de pouzzolane.....	58
Tableau 2.18. Formulation des mortiers étudiés.....	60
Tableau 2.19. Classe de consistance selon la durée d'écoulement.....	60
Tableau 3.1. Résultats de l'essai de maniabilité.....	63
Tableau 3.2. Résultats de l'essai l'air occlus.....	72
Tableau 3.3. Résistance à la flexion à l'âge de 7 jours.....	74
Tableau 3.4. Résistance à la flexion à l'âge de 28 jours.....	74.
Tableau 3.5. Résistance à la flexion à l'âge de 60jours.....	77

Tableau 3.6.Résistance à la flexion à l'âge de 90 jours.....	78
Tableau 3.7.Résistance à la compression à l'âge de 7jours.....	80
Tableau 3.8.Résistance à la compression à l'âge de 28 jours.....	81
Tableau 3.9.Résistance à la compression à l'âge de 60 jours.....	82
Tableau 3.10.Résistance à la compression à l'âge de 90 jours.....	83
Tableau 3.11.Résistance à la flexion à l'âge de 90 jours (Carbonatation Accélérée).....	85
Tableau 3.12. Profondeur de la carbonatation accélérée à l'âge de 90jours.....	86
Tableau3.13 Valeurs du retrait éprouvette G1 .....	88
Tableau3.14. Valeurs du retrait éprouvette G2.....	89
Tableau3.15 Valeurs du retrait éprouvette G3.....	90
Tableau3.16 Valeurs du retrait éprouvette G4.....	91
Tableau3.17. Valeurs du retrait éprouvette G5.....	92
Tableau3.18. Valeurs du retrait éprouvette G6.....	94

# **Introduction Générale**

### Introduction générale :

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction depuis sa découverte, mais l'utilisation intensif de ce matériau est devenu une menace pour l'environnement ; vue l'impact de son fabrication surtout l'utilisation du ciment qui émit une quantité énorme du CO<sub>2</sub>, sachant que 20% du CO<sub>2</sub> émis dans l'atmosphère est issue de la l'industrie cimentaire. Toutefois, pour réduire le coût de production des bétons, le liant est souvent un composé binaire voire ternaire : ciment portland mélangé avec fillers calcaires, laitier, pouzzolane naturelle, fumée de silice, cendres volantes...etc. D'où la recherche du nouveau matériau qui nous permettre de réduire la quantité du ciment utilisé dans le béton.[1]

L'utilisation des ajouts est devenue une solution primordiale pour la fabrication du béton. Ces ajouts son généralement issue de différents production que ce soit d'origine naturel ou industriel.

L'utilisation de résidus industriels et la diminution de la demande en ressources naturelles (comme le calcaire et le minerai de fer) sont autant d'autres avantages bien réels. Il importe également de noter que le béton à base d'ajouts cimentaires présente généralement une durée de vie plus longue que le béton « traditionnel » [2].l'utilisation des déchets industriels est devenue un axe de recherche important vue son impact sur l'économie et l'environnement d'mou le choix de notre projet de recherche qui est l'étude de l'ajout de la poudre de marbre sur le différents caractéristique du mortier .

Mon travail sera organisé en trois chapitres, le premier est une généralité sur les bétons ou on va décrire les constituant du béton, les différents ajouts utilisé, on abordera dans le même chapitre le phénomène du retrait ces causes et ces conséquences et on finira par une présentation des indicateurs de la durabilité et en particulier la carbonatation.

Le second chapitre est une présentation des différents matériaux utilisés et les méthodes d'essais ainsi que les formulations proposées.

Le troisième chapitre représente les résultats obtenus lors de cette campagne expérimentale enfin on termine avec une conclusion générale.

# **Chapitre 1 : Généralités**

## 1. Introduction

L'incorporation des ajouts issus d'origine naturel ou industriel est maintenant une technique importante en améliorant non seulement les propriétés à l'état frais, mais aussi les caractéristiques mécaniques du béton.

Dans ce chapitre nous allons présenter un état de l'art sur les différences constituant du mortier à savoir les ciments, les additions ainsi que les adjuvants et faire une reconnaissance sur les travaux antécédents dans le domaine de l'interaction du ciment et des additions

## 2. Généralités sur le béton et ces composants

### 2.1. Le ciment

Il représente la partie liante dans le béton, en réagissant avec l'eau, il crée une pâte enrobant les granulats, cette pâte contribue dans la résistance finale du béton. Lors de leur fabrication, les ciments sont broyés et homogénéisés de manière à former un premier mélange appelé « cru ». Diverses étapes de chauffage permettent alors d'obtenir les constituants du ciment : silicates di calciques ( $C_2S$ ) et tricalciques ( $C_3S$ ) aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) et alumino-ferritetetracalcique ( $C_4AF$ ) est ensuite incorporé du gypse, indispensable à la bonne régulation de la prise. Le matériau ainsi obtenu est appelé ciment portland.

La préparation du clinker consiste à cuire un mélange de calcaire (80%) et de d'argile (20%) dans un four porté à une température d'environ 1450°C. Ce clinker sorti du four est essentiellement constitué de silicates et d'aluminates de calcium. Son broyage et son mélange avec le gypse donne le ciment Portland pur dont la composition minéralogique est constituée essentiellement de [3] :

- Silicate tricalcique  $Ca_3SiO_3$  (noté  $C_3S$ ) : 60-65 %
- Silicate bicalcique  $Ca_2SiO_4$  (noté  $C_2S$ ) : 20-25 %
- Aluminate tricalcique  $Ca_3Al_2O_4$  (noté  $C_3A$ ) : 8-12%
- Alumino-ferriteté tricalcique  $Ca_2AlFeO_5$  (noté  $C_4AF$ ) : 8-10%
- Gypse : 3-8 %

### 2.1.1. Historique du ciment :

Le terme « ciment » est issu du latin **coementum** qui signifie mortier, liant des maçonneries. Ce sens étymologique a donc été à peu près conservé ; Le ciment est un « **liant hydraulique** ». Par « liant », il est sous-entendu une matière susceptible d'en agglomérer d'autres. Le qualificatif «hydraulique» précise, d'une part, que ce liant durcit à froid par gâchage à l'eau, sans addition d'un autre corps réactif

Et, d'autre part, qu'il durcit, non seulement dans l'air, mais également dans l'eau. Car ce Durcissement est dû aux réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de Chaux

### 2.2. L'eau

L'eau est une des composantes les plus importantes du béton. Elle permet d'une part, lors du gâchage, d'accroître la fluidité et la maniabilité facilitant une mise en place plus aisée du matériau et d'autre part de favoriser, lors de la prise, la liaison entre les éléments solides présents dans le matériau. Elle est aussi connue pour favoriser l'apparition des pores dans la structure, ce qui a pour conséquence d'atténuer la durabilité et les résistances mécaniques du béton. Elle se présente sous des formes différentes suivant sa localisation et le type de lien qu'elle entretient avec les éléments solides du béton. Elle fait l'objet de nombreuses classifications, certaines basées sur des considérations structurales, et d'autres sur des considérations énergétiques. La classification retenue la présente selon l'ordre des liaisons croissantes.

L'eau a essentiellement deux fonctions : une fonction physique, qui confère au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et le moulage), et une fonction chimique en tant que liant de la poudre de ciment. Elle sert aussi à mouiller les agrégats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment. L'eau peut aussi présenter des caractéristiques négatives : celle qui reste en excès dans les pores est responsable de certains phénomènes comme par exemple le retrait de dessiccation ou encore l'éclatement du béton en cas de gel. En général toutes les eaux potables peuvent être utilisées pour la production du béton ; l'eau de mer, même si elle est agressive vis-à-vis du ciment durci, peut être utilisée pour la fabrication d'un béton non armé. Par contre des agents en suspension (particules d'argile, micro-organismes, ...etc.) ou des agents en solution dans l'eau provenant des agents en suspension, se révèlent fortement agressifs et interfère avec le durcissement du béton. En

particulier, les substances organiques s'avèrent très agressives et d'agradantes vis-à-vis la pâte de ciment

### 2.3. Les agrégats

Les granulats constituent le squelette en principe inerte du béton. Le terme inerte signifie que l'agrégat n'a aucune interaction avec le ciment et est inaltérable par l'eau et l'air. Comme on le verra, cette classification n'est pas acceptable, d'où le terme plus générique d'agrégats.

L'influence des agrégats est très forte sur le béton en termes de performances mécaniques : en général, les agrégats présentent de bonnes caractéristiques mécaniques, meilleures de celles de la pâte de ciment qui est donc le maillon faible du béton du point de vue de la résistance mécanique. Pour obtenir un béton avec de bonnes caractéristiques, le choix de l'agrégat s'avère alors très important. Il n'est pas suffisant de choisir un agrégat de bonne qualité, mais il faut aussi une granulométrie.

Appropriée, la distribution de taille des agrégats doit conduire à une réduction du volume des vides et à une optimisation de la compacité du béton. On introduit à ce propos la courbe de Fuller et Thompson (2007) [ 4 ]qui permet de trouver la plage idéale pour les agrégats :

$$p = \left( \frac{D_x}{D_{max}} \right)^{0.5} \times 100 \quad \text{eq 1.1}$$

Avec :

$p$  est le pourcentage d'agrégats qui passe à travers un tamis de diamètre plus petit que  $D_x$ .  
 $D_{max}$  est le diamètre maximal du mélange d'agrégats.

En plus de la granulométrie, on peut classer les différents types d'agrégats selon leur origine (Naturel ou artificiel), leur forme (plus ou moins arrondie), leur rugosité et bien entendu leur dimension. Comme pour l'eau, la présence de substances organiques ou argileuses sur la surface des agrégats s'avère importante : dans ce cas on peut avoir des effets nocifs sur la réaction d'hydratation et à l'interface pâte-granat i.e. on peut avoir une mauvaise adhésion de l'agrégat à la pâte de ciment.

En ce qui concerne les propriétés thermiques de l'agrégat, il faut remarquer qu'ils n'ont pas tous un bon comportement à haute température. En général on cherche des agrégats avec un

faible coefficient d'expansion thermique. Dans le cas contraire, on peut générer des contraintes et donc des fissurations. De plus, les agrégats ont la capacité d'absorber de la chaleur, spécialement lorsque les agrégats en question sont sujets à des transformations endothermiques à haute température : par exemple, les agrégats d'origine calcaire absorbent, entre 700°C et 900°C, 1420 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de magnésium et 1800 kJ/kg pour la décomposition du carbonate de calcium. Les agrégats peuvent donc interagir avec le processus de chauffage en ralentissant l'élévation de température dans le béton.

## 2.4. Les ajouts

Les ajouts sont des matériaux minéraux finement divisés pouvant être partiellement substitués au ciment pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. Ils peuvent être choisis pour les propriétés hydrauliques ou pouzzolaniques qu'ils développeront ensuite lors des processus d'hydratation. Les additions sont variées : le laitier granulé de haut fourneau, les cendres volantes (siliceuses ou calciques), les fumées de silice, les calcaires, les pouzzolanes naturelles... etc.

L'action des additions concerne aussi bien l'état frais que l'état durci du béton. En premier lieu, à l'état frais, la présence des additions modifie la structure du squelette granulaire du matériau et les frictions entre les composants de la suspension solide dans la phase liquide. En second lieu, au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment et peuvent modifier la structuration des produits hydratés. En troisième lieu, certaines additions ont la capacité de réagir chimiquement en milieu cimentaire pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant additionnel à celui résultant de l'hydratation du ciment. De plus, ces aspects de l'action des additions peuvent intervenir de manière simultanée rendant particulièrement difficile l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires.

### 2.4.1. Les fillers calcaires

Les normes définissent les fillers calcaires comme des produits secs finement divisés, obtenus par broyage, et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires. Les fillers calcaires cumulent trois propriétés intéressantes : une certaine activité hydraulique, des éléments de faible dimension qui permettent un remplissage granulaire efficace et un faible coût d'après Guemmadi et al[5].

Le calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) appartient aux roches carbonatées riches en  $\text{CaO}$ . Il est contenu dans la calcite, l'aragonite ou la marne. Le calcaire constitue une matière première pour la fabrication du ciment. Des études ont montré certains avantages de l'utilisation du calcaire. Les deux principales caractéristiques du calcaire normalisé sont :

- Une teneur en carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) supérieure ou égale à 75 % en masse.
- Un indice d'activité supérieur à 0.71.

#### 2.4.2. Les fumées de silice

##### **Caractéristiques de la fumée de silice :**

Les fumées de silice sont formées de particules sphériques très fines ( $D_{50} \approx 0,1 \mu\text{m}$ ) ayant une très haute teneur en silice amorphe. Elles proviennent de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours à arc électrique utilisés pour la production de silicium et d'alliages de ferrosilicium. Elles doivent contenir au minimum 85% (en masse) de silicate amorphe pour qu'elles entrent dans la fabrication du ciment. Les grains ont la forme de sphères quasi-parfaites, la granulométrie s'étend du  $1/1000 \mu\text{m}$  jusqu'à quelques microns, avec une taille moyenne de  $0.2 \mu\text{m}$ . Selon Andersson., un taux d'incorporation de fumée de silice supérieur à 25 % permet la consommation totale de la portlandite par réaction pouzzolanique. Nous pouvons remarquer que le taux de substitution du ciment par de la fumée de silice dans les ciments commerciaux reste faible (10%), limite imposée par la norme EN 197-1 de manière à conserver un caractère suffisamment basique au béton permettant de garantir la passivité des armatures.

Influence de la fumée de silice sur les propriétés d'un matériau cimentaire :

Le remplacement d'une fraction du ciment Portland par de la fumée de silice modifie les propriétés du matériau obtenu. Certains effets sont bénéfiques. Citons par exemple :

- Accroissement des résistances mécaniques;
- La diminution de la quantité de portlandite ; l'ajout de fumée de silice au liant permet, grâce à une dilution du clinker, d'obtenir des teneurs en portlandite plus faibles que celles d'un CEM I.
- La réduction du ressuage, l'affinement de la structure poreuse et la réduction de la perméabilité.
- La diminution des coefficients de diffusion.
- La diminution du pH et des alcalins de la solution interstitielle.

Néanmoins, l'ajout de la fumée de silice peut également être source de difficultés :

- Allongement du temps de malaxage afin d'assurer une dispersion homogène de la fumée de silice ;
- Accroissement de la demande en eau d'où l'obligation d'utiliser un super-plastifiant.
- Accroissement du retrait endogène.
- Perte d'ouvrabilité, accroissement de l'échauffement en cours d'hydratation, augmentation des retraits endogène et thermique.

### 2.4.3. 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.

#### Pouzzolanes naturelles :

Le nom commun de pouzzolane vient de la ville portuaire de Pouzzoles près du Vésuveville de Naples en Italie, où historiquement on attribue la première exploitation « industrielle » des cendres volcaniques en tant que matériaux hydrauliques en présence de chaux. La découverte de ce type de matériau aux propriétés remarquables dans d'autres reliefs européens comme en Allemagne dans la région d'Eifel ou encore en France dans le Massif Central a permis d'étendre l'utilisation de ce nom propre à l'ensemble des pyroclastes ayant la capacité de faire prise en présence de chaux.

Les constructions utilisant des mortiers à base de pouzzolane et chaux datant de l'époque antique et encore en état de nos jours démontrent les propriétés pérennes de ce type de matériau en génie civil :

- Réservoir d'eau de la ville de Caminos (-700 à 600 avant JC),
- Panthéon à Rome (mortier de pouzzolane/chaux pour les murs épais de 7 m, et grand dôme coulé avec du béton pouzzolanique) (2ème siècle après JC),
- Le pont du Gard (Ier siècle après JC).

Les pouzzolanes ont été pendant des siècles un matériau privilégié pour la construction notamment pour les édifices servant à l'alimentation en eau des villes.

Cette période de « gloire » a cessé lors de l'invention du ciment portland au XIX<sup>ème</sup> siècle, produit aux qualités incomparables en termes de temps de prise et de durcissement.

Toutefois, les mélanges pouzzolane/ciment présentent de telles qualités techniques mais aussi économiques que les ciments pouzzolaniques sont de nos jours produits industriellement et que l'introduction de pouzzolane dans les ciments fait l'objet des normes NF EN 197-1 et ASTM-C-618 ainsi que la norme algérienne NA 442 (2003).

#### **2.4.4. Le Marbre**

##### **Définition**

Le marbre a été vastement utilisé depuis l'antiquité comme matériau pour la sculpture et pour l'architecture. Le bas indice de réfraction de la calcite, principale composant, permet à la lumière de "pénétrer" dans la superficie de la pierre avant d'être réfléchi, et confère à ce matériau (et surtout aux marbres blancs) une luminosité spéciale.

Les marbres (au sens moderne du terme) sont des calcaires durs, sédimentaires et de très faible porosité ; qu'ils sont tous d'âge Dévonien supérieur ou Carbonifère inférieur, qui ont subi postérieurement à leur dépôt, une cristallisation complète sous l'influence de phénomènes physico-chimiques appelés métamorphisme où interviennent la pression, la température et l'action de vapeurs venues des parties profondes du globe. Le marbre est géologiquement défini comme un calcaire recristallisé, composé principalement de grains de calcite cristalline, de dolomite ou des deux, et présentant une texture cristalline visible. L'utilisation de longue date du terme marbre par les carriers et les marbriers a conduit, sur le plan commercial, à qualifier de marbre toutes les roches cristallines susceptibles d'être polies et composées principalement de l'un ou de plusieurs des minerais suivants : calcite, dolomite ou serpentine.

##### **Utilisation :**

Du fait de sa résistance, de sa durabilité, de son aptitude au façonnage, de son adaptabilité architecturale et de son aspect esthétique, le marbre constitue depuis les temps historiques un important matériau de construction. L'industrie du marbre comprend deux branches principales : le marbre taillé et le marbre concassé et broyé. Le terme marbre taillé s'applique aux marbres exploités pour obtenir des blocs ou des plaques répondant à des spécifications de dimensions et de forme. Les fragments de marbre concassés et broyés vont des gros blocs aux granulés fins ; on les utilise, par exemple, comme agrégats, ballasts, éclats pour toiture, charges, pigments, matériau pour le chaulage, etc.

### 2.4.5. Poudre du marbre

La poudre de marbre résulte du broyage des chutes et blocs de marbre en granulométrie fine est une charge minérale riche en calcaire ou carbonate de calcium dur très blanc, pouvant émettre quelques scintillement.

La poudre de marbre utiliser est un déchet de marbreries, avec ces qualités de dureté et de blancheur conviennent bien pour les enduits, les stucs et les peinture.

Le marbre est utilisé depuis les hères comme étant un revêtement du mur, ainsi des décors sous plafonds exemple rosas, gorges, etc. . il fait partie des revêtements de lux, par son utilisation le marbre à des chutes énormes, pour cela l'idée est venue de l'exploité en le rend fin grâce à un broyage, dans son utilisation est vaste exemple dans la peinture, esthétique, produit alimentaire pour bovins et bétails, et dans les mortier en bâtiment pour faire des enduits intérieur comme extérieur stuc.



**Figure1.1.** poudre du marbre

#### 2.4.6. Effet de la poudre de marbre sur les qualités des ciments :

Agissant principalement grâce à une granulométrie appropriée par leur propriété physique sur certaines qualités du ciment :

- Accroissement de maniabilité
- Diminution de perméabilité.
- Diminution de capillarité.
- Réduction des fissures.
- Augmente la cohésion.
- Accélérer l'hydratation du ciment

Effet de la poudre de marbre sur les propriétés physiques La poudre de marbre incorporée dans un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie de volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet de filler de la poudre de marbre [6].

Effet sur la porosité Les fillers de la poudre de marbre auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du  $\text{CaCO}_3$  (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de  $\text{CaCO}_3$  et de  $\text{C}_3\text{S}$  anhydre) est légèrement plus importante. Cependant cette relation dépend également du degré d'hydratation des matériaux. La densité d'une pâte de  $\text{C}_3\text{S}$  incorporant du carbonate de calcium est par contre plus faible dans le cas de l'utilisation de  $\text{CaCO}_3$ . À un certain degré d'hydratation, une pâte de  $\text{C}_3\text{S}$  ne contenant pas de  $\text{CaCO}_3$  à une porosité totale plus faible. Cependant durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15% de  $\text{CaCO}_3$  peut posséder une porosité plus faible, due des degrés différents d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans  $\text{CaCO}_3$ .

Réactivité indirecte de la poudre de marbre L'addition de  $\text{CaCO}_3$  augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique. Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue. Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le déchlorure de calcium mais sans toutefois diminuer la période d'induction. L'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en  $\text{CaCO}_3$ . Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation. Cela pourrait provenir du fait que des particules de  $\text{CaCO}_3$  seraient incorporées

dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de  $\text{CaCO}_3$  incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25%. Réactivité directe de la poudre de marbre Longuet, et al ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le  $\text{C}_3\text{A}$  comme évaluation de la réactivité hydraulique de la poudre de marbre donné. En effet, il a été démontré que le  $\text{CaCO}_3$  peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons X a permis de détecter la présence de carbo-aluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange. La formation de carbo-aluminates de calcium hydraté est vue comme analogue à celle de l'étringite. Il y a composition entre  $\text{SO}_4$  et  $\text{CO}_3$  pour réagir avec les aluminates de calcium. La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec hydraté de formule  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ . La forme  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 27\text{H}_2\text{O}$  aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec  $\text{CaCO}_3$ . [7]

## 2.5. LES ADJUVANTS

On appelle adjuvant tout ingrédient, autre que le ciment portland, l'eau et les granulats, que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage.

D'après la norme NF P18 103, un adjuvant est un produit dont l'incorporation à faible dose (inférieur à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du malaxage ou avant la mise en œuvre, provoque les modifications recherchées de tel ou tel de leurs propriétés à l'état frais ou durci GEORGES DREUX et al [8]

Les adjuvants fournissent au formateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication au temps froid ou au temps chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés du béton durci, voir même lui conférer des propriétés nouvelles A.C.I.F Fall

## 3. Retrait et gonflement

### 3.1. Le Retrait :

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles (contraction) de la pâte de ciment, mettant en jeu des phénomènes hydriques, thermiques, ou mécaniques, à diverses échéances (avant, pendant ou après la prise du béton) et qui peuvent provoquer l'apparition de fissures.

### 3.2. Les Particularités du retrait du béton

Le retrait du béton correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise du béton. Lorsqu'elles ne sont pas maîtrisées par un ferrailage approprié et par des joints, ces variations dimensionnelles engendrent l'apparition de fissures. Les fissures dues au retrait ne doivent pas être confondues avec les fissures liées à la fonctionnalité des ouvrages (dues à l'application d'efforts trop importants par exemple). Celles-ci étant maîtrisées par les règles de calcul du béton armé.

### 3.3. Types de retrait dans le béton

#### 3.3.1. Le retrait de séchage

(Encore appelé retrait de dessiccation) : c'est le plus connu. Il se développe dans le béton au cours de son durcissement, pendant les premiers mois. Il est plus important en surface que dans la masse du béton. C'est un retrait du béton durci causé par l'évaporation de l'eau contenue dans la porosité du béton, à partir des surfaces libres soumise à l'air ambiant ayant un degré d'humidité inférieur à celui du béton. Ce processus de séchage génère une diminution de volume du béton. La perte d'eau est progressive et décroissante au cours du temps. Les facteurs qui influencent l'amplitude de la perte d'eau, et donc le retrait de séchage, sont la porosité du béton, le degré hygrométrique de l'air ambiant, et le rapport surface exposée à l'air, volume de l'élément. D'un point de vue pratique, ce n'est pas tant le retrait de séchage qui est important, mais plutôt la fissuration qu'il peut provoquer. Le mécanisme de fissuration est le suivant : le retrait de séchage commence toujours à se développer au niveau de la surface du béton exposée à l'air sec. Les forces de tension, qui apparaissent alors près de la surface, sont équilibrées par des forces de compression intérieures au béton. Des fissures s'ouvrent dès lors que les efforts de tensions dépassent la résistance à la tension du béton. Ces efforts de tension étant libérés chaque fois que la partie extérieure du béton se fissure.

#### 3.3.2. Le retrait plastique

il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage du béton par évaporation, alors qu'il est encore à l'état plastique et donc déformable. Ce retrait particulier de séchage a lieu pendant un temps limité, avant et pendant la prise. La contraction apparaît une fois que le béton a été mis en place, et que la surface libre est soumise au séchage. Le retrait plastique est piloté par la vitesse de séchage. L'ordre de grandeur du retrait plastique des bétons est de 1mm/m dans des conditions courantes et peut atteindre plusieurs mm/m lorsque les conditions sont

défavorables.

Les facteurs favorisant le retrait plastique sont :

- Une température extérieure élevée.
- Un air sec.
- Du vent (ou des courants d'air en intérieur).
- Un excès d'eau dans le béton.
- Un temps de prise long (ciment lent ou béton trop retardé).
- Un ouvrage présentant une grande surface libre par rapport au volume de béton (ex : dalle de faible épaisseur).

Un retrait plastique important peut mener à des fissurations apparaissant au jeune âge sur la surface de béton (fissures dites de retrait plastique). Les fissures se présentent sous la forme d'un maillage (faiénçage).



**Figure 1.2** exemple de fissuration à un retrait plastique sur une dalle béton.

### 3.3.3. Le retrait endogène

(encore appelé retrait d'autodessiccation, ou retrait chimique d'hydratation du ciment) : il se produit dans le béton en cours de durcissement par suite du développement des réactions chimiques entre le ciment et l'eau. Ces réactions sont appelées **réactions** d'hydratation car en présence d'eau, les constituants du ciment donnent naissance à de nouveaux constituants hydratés qui apparaissent sous forme de micro-cristaux ayant l'aspect d'aiguilles dont le développement et l'enchevêtrement provoquent la **prise** et le durcissement progressif du

ciment. La consommation d'eau résultant de l'hydratation du ciment conduit à une contraction du béton. Ce retrait est un phénomène normal, inévitable, inhérent à la nature même du ciment. Il est irréversible et continue d'augmenter pendant plusieurs mois tant que l'hydratation du ciment se prolonge. Son intensité est proportionnelle au dosage en ciment. Il varie entre 300 et 800  $\mu\text{m}/\text{m}$  selon la formulation. Lorsqu'il est empêché, ce retrait peut provoquer des fissures.

#### **3.3.4. Le retrait thermique**

il est lié au retour à température ambiante du béton après sa prise. Les réactions chimiques d'hydratation du ciment, qui sont très intenses au moment de la prise du ciment, sont toujours accompagnées d'un important dégagement de chaleur (réaction chimique exothermique). Après la prise, l'intensité des réactions d'hydratation décroît si bien que la température du béton diminue progressivement pour revenir à une température ambiante. Ce retour à température ambiante est accompagné d'une contraction thermique qui génère des déformations empêchées au sein de l'élément en béton. Ces déformations empêchées peuvent conduire à l'apparition de fissures.

Ce type de retrait ne concerne que les pièces massives, d'épaisseur supérieure à 60cm (exemple : éléments d'ouvrage d'art).

Ces 4 types de retrait peuvent se cumuler à l'échelle d'un même béton (on parle ainsi du retrait total comme la somme des différents retraits). Le retrait d'auto dessiccation et le retrait thermique intéressent la masse du béton, alors que les deux autres types de retrait concernent la surface libre de l'ouvrage en béton.

#### **3.3.5. Conséquences du retrait**

La conséquence essentielle du retrait est l'apparition de phénomènes de fissuration, pouvant diminuer la durabilité de l'ouvrage en béton et/ou limiter leur capacité à reprendre des efforts, notamment lorsque la fissuration se manifeste dans la masse. Cette fissuration peut également conduire à limiter l'adhérence voire provoquer le décollement des éventuels revêtements rapportés en surface du béton.

### 3.3.6. Les Bonnes pratiques pour limiter ou contrôler le retrait

Rassurez-vous, avec de bonnes pratiques, le retrait reste tout à fait contrôlable et des solutions existent pour le limiter.

### 3.3.7. Précautions pour limiter le retrait plastique avant prise du béton

- Pulvériser un produit de cure dès la fin du coulage (à l'aide d'un pulvérisateur adapté), ou au fur et à mesure du coulage pour les grandes surfaces ou les temps de mise en œuvre longs.
- Humidifier les coffrages et le support avant coulage.
- Faire un béton sans excès d'eau.
- Diminuer le temps de prise par temps froids (ciment plus nerveux, ajout d'un adjuvant accélérateur).
- Talocher la surface juste avant la prise pour refermer les fissures.
- Utiliser un béton comportant des micro fibres polypropylène (celles-ci visent à limiter la fissuration par retrait plastique).



**Figure 1.3.** Application de produit de cure sur béton

### 3.3.8. Solutions pour limiter la fissuration due au retrait après prise (retrait de séchage et retrait endogène)

- Faire un béton compact sans excès d'eau.

- Assurer une cure de la surface du béton pendant les premiers jours (à l'aide d'un produit de cure pulvérisé en surface, ou bien par mise en place d'un polyane ou encore par aspersion régulière d'eau).
- Prévoir des joints de retrait sur 1/3 de l'épaisseur, à intervalles réguliers.
- Armer le béton à l'aide d'un treillis soudé.
- Désolidariser le béton de son support (par mise en place d'un polyane ou d'un lit de sable).

### 3.3.9. Précautions pour limiter le retrait thermique

- Limiter la chaleur dégagée en utilisant un ciment à faible chaleur d'hydratation.
- Eviter les très forts dosages en ciment.
- Ne pas utiliser des matériaux trop chauds (ciment pas trop chaud – refroidir les granulats l'été).
- Mettre des fibres dans le béton.
- Ne pas décoffrer trop vite.
- Utiliser des coffrages isolants.

### 3.3.10. Mesure de retrait

Le retrait du béton est mesuré conformément à la **norme NF P 18-427**. L'essai consiste à mesurer la variation de la longueur entre deux faces opposées d'éprouvettes prismatiques de béton durci équipées de plots. Les éprouvettes prismatiques sont de dimensions 7x7x28cm ou 10x10x40cm.

La mesure se fait à l'aide d'un appareil spécifique muni d'un comparateur (réfractomètre). Pendant toute la durée de l'essai, les éprouvettes sont conservées en laboratoire en conditions régulières (généralement à une température de 20 +/-2°C et une humidité relative de 50 +/-5%).



**Figure 1.4. retractomètre**

#### **4. Les indicateurs de durabilité généraux**

Les indicateurs de durabilité généraux permettent d'évaluer la durabilité de tout type de bétons. Cinq indicateurs de durabilité généraux sont identifiés dans le guide AFGC (AFGC, 2004) :

- Perméabilité aux gaz,
- Perméabilité à l'eau liquide,
- Porosité accessible à l'eau,
- Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorure,
- Teneur en portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

#### **5. La carbonatation du béton**

La carbonatation résulte de la pénétration du gaz carbonique dans le réseau poral et les fissures du béton. Elle affecte la durabilité des structures en béton non pas tant parce qu'elle endommage ce dernier, mais en favorisant la corrosion des armatures. Elle a donc un impact néfaste majeur sur toute structure en béton armé Figure 3.20. Cet impact est cependant variable en fonction des conditions d'environnement de la construction et des propriétés du matériau [9]



**Figure 1.5** Eclatement du béton d'enrobage dû à la carbonatation [10] .

La carbonatation est un phénomène naturel de dissolution du dioxyde de carbone de l'air dans la solution interstitielle des bétons suivi d'une réaction acide-base avec les composés basiques, tels que la portlandite, pour former des carbonates de calcium. Il en résulte une diminution du PH et une corrosion des armatures. La carbonatation est une source de dégradation des ouvrages en béton armé et nuit à leur durabilité. Dans l'atmosphère, la carbonatation est très lente et pour mieux évaluer ses conséquences à long terme, des essais accélérés sont réalisés en laboratoire.

### 5.1. Processus de Carbonatation

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) est un gaz naturellement présent dans l'air à raison d'environ 0,035%. Cette concentration volumique peut atteindre 1% en milieu urbain, notamment dans les tunnels sujets aux rejets du trafic intense [11]. Au contact des matériaux cimentaires, le  $\text{CO}_2$  atmosphérique pénètre dans le réseau poral et neutralise les bases présentes dans le ciment hydraté, principalement la Portlandite et les C-S-H. Cette réaction chimique est appelée : carbonatation. Lors de ce phénomène, le  $\text{CO}_2$  gazeux diffuse de l'atmosphère ambiante vers la porosité du matériau cimentaire. Il se dissout ensuite dans la solution interstitielle, réagit avec les hydrates et forme ainsi des carbonates de calcium «  $\text{CaCO}_3$  » (calcite, aragonite ou vaterite). La carbonatation induit une baisse du PH de la solution interstitielle d'une valeur proche de 13,5 à une valeur proche de 9. Cela provoque la dépassivation des aciers du béton armé ou précontraint et augmente par conséquent le risque de corrosion. La dégradation provient, selon certains auteurs, essentiellement de la réaction avec la Portlandite [12] selon l'équation bilan suivante :

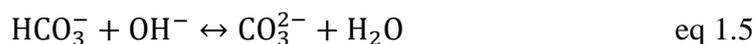
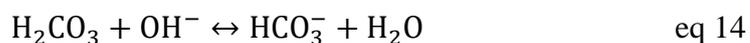


Mais cette réaction globale de carbonatation de la matrice cimentaire peut être décomposée en plusieurs séquences :

- Séquence 1 : passage du gaz carbonique de l'état gazeux à l'état liquide



- Séquence 2 : réactions acido-basiques impliquant les ions carbonates et l'eau



- Séquence 3 : dissolution de la portlandite



- Séquence 4 : précipitation du carbonate de calcium



Deux étapes majeures vis-à-vis de la cinétique des réactions ont été mises en évidence :

- la dissociation des dihydrogénocarbonates  $\text{H}_2\text{CO}_3$
- la dissolution de la Portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Les mécanismes du processus de carbonatation de la Portlandite sont illustrés par Thiery [12] (Figure 1.6).

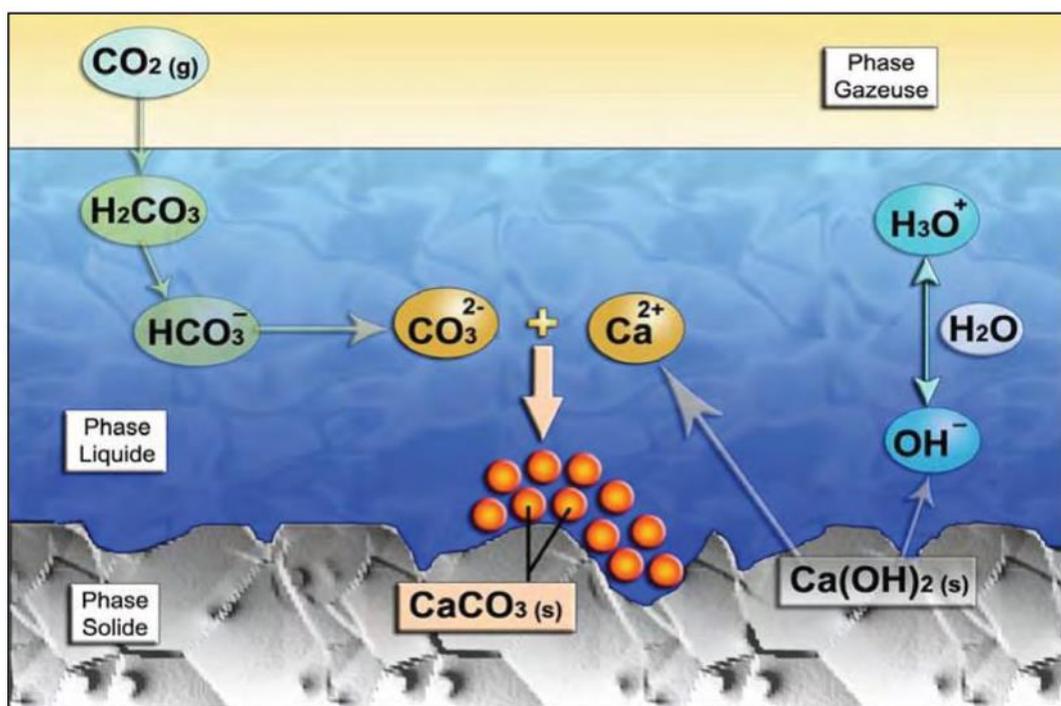


Figure 1.6. Mécanismes de carbonation de  $\text{Ca(OH)}_2$  [12].

## 6. Conclusion :

Les recherches qui sont présentées lors de cette étude bibliographique, notamment sur le plan expérimental, nous montrent que le procédé de fabrication du ciment portland nécessite une énergie importante et dégage du  $\text{CO}_2$  et de la poussière causant la pollution de l'environnement, d'où le recours à l'utilisation des ajouts cimentaires comme remède à ces problèmes ce qui permet de :

- Diminuer la quantité de clinker utilisé d'où un gain d'énergie.
- Préserver l'environnement.
- Améliorer les propriétés du ciment

# **CHAPITRE 2 Matériaux Utilisés et Méthodes d'Essais**

## 1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la caractérisation des matériaux et les méthodes d'essais utilisés. Une série d'essais physiques et mécaniques au laboratoire était l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux : masses volumiques absolue et apparente, analyse granulométrique, équivalent de sable et foisonnement.

Le propos de ce document est de présenter les techniques expérimentales utilisées dans le laboratoire, et aussi donner les différents principes et les modes opératoires propres à chacune des techniques abordées, sans entrer dans trop de détails.

Plus les essais de carbonatation naturelle et accélérée et la mesure de la profondeur et la résistance de notre mortier.

Ces essais étaient effectués dans le laboratoire de génie civil du centre universitaire D'Ain t'émouchent, et laboratoire travaux publics ouest Ain t'émouchent.

## 2. Caractéristiques des matériaux

### 2.1. Ciment

#### **Le ciment utilisé CEMCII/A 42.5 de Beni-Saf.**

##### **2.1.1. 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. 1 et Tab. 2. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans le Laboratoire des Travaux Publics d'Oran (LTPO).

**Tableau 2.1** : composition chimique du ciment

Oxides	%
CaO	63.82.
SiO <sub>2</sub>	21.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.76
SO <sub>3</sub>	2.20
K <sub>2</sub> O	0.4
MgO	2.19
PF	2.47
Insolubles	4.6

**Tableau2.2** composition minéralogie du ciment de béni\_SAF

Bogue composition (%)			
C3S	C2S	C3A	C4AF
59	18	8.5	12

### 2.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques du ciment

#### 2.1.2.1. Masse volumique absolue selon la norme NF P 18-558.

##### Objectif de l'essai :

Il s'agit de déterminer la masse volumique absolue (ou poids spécifique) de ciments utilisés dans notre étude. La technique expérimentale utilisée est celle de l'appareil appelé "le Densimètre de Le Chate lier".

##### Conduite de l'essai :

- Peser 64 g de ciment.
- Introduire le benzène (liquide non réactif avec le ciment) jusqu'à la graduation inférieure trait marqué 0 soit  $v_0$ .

- Placer le densimètre dans un bain thermostatique à température constante ( $20\pm 2^\circ\text{C}$ ).
- Attendre 20 minutes et corrigé le niveau si nécessaire après stabilisation de la température.
- Introduire la poudre de ciment dans le densimètre.
- Agité doucement en faisant tourner le densimètre pour chasser l'air entraîné par la poudre.
- Remettre le densimètre dans le bain thermostatique.
- Après stabilisation du niveau lire le volume après introduction du ciment dans le densimètre soit  $v_1$ .



**Figure 2.1.** Flasque de Chatelier .

#### **2.1.2.2. Surface spécifique (la méthode de Blaine $\text{fcm}^2/\text{g}$ )**

##### **Objective de l'essai :**

Déterminer la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. Elle est exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ , conformément à la norme **EN-196-6**.

##### **Principe de l'essai :**

Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses

étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface massique est proportionnelle à  $t$ . La masse volumique du ciment étant connue.

#### Equipement nécessaire utilisé :

- Une salle maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  et à une humidité relative de 65%.
- Un appareil appelé « perméabilisateur de Blaine » dont la description complète est donnée par la norme EN 196-6.
- une balance précise à 0.001g près.
- Un chronomètre précis à 0.2 s près.
- Des rondelles de papier filtre adaptées au diamètre de la cellule.
- Un thermomètre précis à 0.1 °C.)

#### Conduite de l'essai :

- Peser une quantité de ciment pour obtenir un lit de ciment de porosité  $e = 0.500$ .
- Mettre la poudre de ciment dans la cellule puis compacter à l'aide du piston.
- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre.
- Obturer le dessus du cylindre avec bouchon adéquat.
- Ouvrir le robinet d'arrêt en amenant le niveau du liquide à la première ligne.
- Fermer le robinet d'arrêt et enlever le bouchon du cylindre.
- Démarrer le chronomètre dès que le liquide atteint la deuxième ligne.
- Arrêter le chronomètre dès que le liquide atteint le troisième repère.
- Relever le temps à 0.2s près et la température à 1°C près.

Calculer la surface spécifique du ciment par la formule.

$$SSp = (K \sqrt{n}^3) \sqrt{t_0} / (m_{vabs} (1 - n) (\sqrt{0.1\eta})) \text{ en } g/cm^2$$

**Avec :**

**K** : Constante d'étalonnage de l'appareil ( $K = 30.817$ ).

**N** : porosité (en général : 0.50).

**$\eta$**  : viscosité dynamique de l'air à la température de l'essai.

**$m_{vabs}$**  : Masse volumique absolue du ciment.

**m** : est la masse à introduire dans la cellule de l'appareil Blaine.

$$m = m_{vabs} \times \vartheta \times (1 - n)$$

$$m = 3.10 \times 1.63 \times (1 - n) \quad m = 2.5265$$

Le résultat de la surface spécifique soit illustré dans le tableau ci-dessous

**Tableau 2.3** : résultat de la surface spécifique.

T(s)	150.60	138.63
$\Sigma T(s)$	144.9s	
Ssp	6265.0005	



**Figure 2.2.** Densimètre manuel.

**2.1.2.3. ESSAI DE CONSISTANCE (EN 196-3)****Objectif de l'essai :**

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'objectif est de définir une telle consistance dite « CONSISTANCE NORMALISEE ».

**Principe d'essai:**

La consistance est évaluée ici en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide. La consistance évaluée de cette manière sera appelée «CONSISTANCE VICAT».

**Équipement nécessaire :**

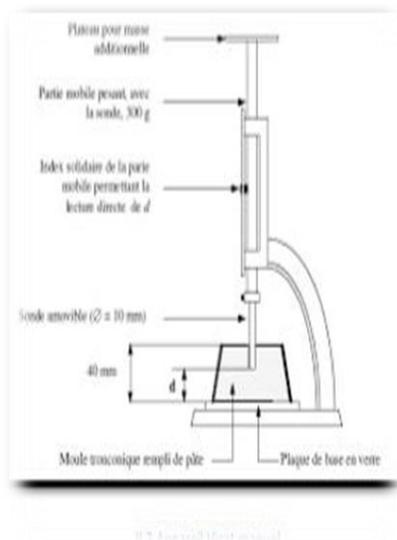
- Un malaxeur. b
- Un appareil de VICAT (voir schéma).
- Une balance permettant de peser à 1 g près.
- Une Chronomètre précis à 1 s près.

**Conduite de l'essai :**

Préparer 500 g de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,25 (rapport de départ).

Verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,

Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance **d** séparant l'extrémité de la sonde et de la plaque de bas.



**Figure 2.3** appareil Vicat manuel .

### 2.2.1.3 Essai de prise :

#### Objectif de l'essai :

Déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes pures des ciments étudiés  
Conformément à la norme EN 196 3.

#### Principe de l'essai :

Le début de prise correspond au moment où l'on constate une augmentation  
Relativement brusque de la viscosité de la pâte de consistance normalisée avec échauffement.  
L'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipée d'une aiguille de Vicat. Quand la partie mobile  
est libérée l'aiguille s'arrête à une distance  $d$  du fond du moule telle que  $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ .  
La fin de prise correspond au moment où la pâte est devenue un bloc rigide, le moment  
Où l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte que de 0,5 mm.

#### Mode opératoire :

L'essai de prise se réalise selon les étapes suivantes :

- préparer 0.5 kg de ciment, une pâte pure de rapport E/C=0,26, verser l'eau dans la cuve du malaxeur contenant le ciment,
- mettre le malaxeur en marche (voir le tableau qui suit pour la marche à suivre) et déclencher le chronomètre
- la pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.
- la sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- la pâte sera à consistance normale si  $d = 6 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  :
  - ✓ Si  $d > 7 \text{ mm}$  : il n'y a pas assez d'eau,
  - ✓ Si  $d < 5 \text{ mm}$  : il y a trop d'eau.
  - ✓ Si  $d < 5 \text{ mm}$  : il y a trop d'eau.

*Dans les 2 cas, il faut jeter la pâte, nettoyer et sécher le matériel et recommencer*

*Avec une nouvelle W.*



**Figure 2.4.** Appareil de Vicat .

Les caractéristiques physiques du ciment utilisé sont regroupées dans les tableaux ci-dessous

**Tableau 2.4** les caractéristiques physiques du ciment

Caractéristique	ciment
masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3,06
masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.35
surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	6265.0005
Consistance	0,33
Début de prise (heure)	12h30min
Fin de prise (heure)	14h41min11s

## 2.2. Les granulats

### 2.2.1. Sable de mer

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

**Tableau 2.5.** Composition chimique de sable de mer(LTPO)

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

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.

### 2.2.2. Caractéristiques physiques du sable de mer

#### a- Masse volumique apparente P18-554 :

Cet essai est régi par la norme **NF P18-554**, elle est définie comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

$$\rho_{app} = \frac{m}{v} \quad \text{eq2.1}$$

#### Matériel utilisé :

- Récipient jaugé d'un volume de 1L.
- Entonnoir.
- Balance mécanique.
- Sable dont on veut déterminer la masse volumique.
- Règle à araser.

#### Mode opératoire

On procédera comme suit :

- On pèse le récipient vide.
- On remplit le récipient avec le sable à ras bord. On s'aidera de l'entonnoir pour verser le sable sans déborder.
- Avec la règle à araser, on arase de sorte à remplir exactement le récipient de 1L.
- ON Pèse l'ensemble, récipient +Sable.

L'application numérique et le résultat de la masse volumique apparente soit illustrée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2.6.** Masse volumique apparent

Sable de mer	Poids de récipient vide (g)	Poids (récipient +sol) (g)	Poids du sol (g)	masse volumique apparente (g/m3)
valeur	1396.23	2842.58	1446.35	1.44635

**b- Masse volumique absolue : Norme NF P18-301**

Cet essai est régi par la norme NF P18-301, elle est définie comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \quad \text{eq 2.2}$$

**Matériel utilisé :**

- Une éprouvette graduée.
- Une poignée environ de sable que l'on veut déterminer la masse volumique.
- De l'eau.
- Une balance électronique pour peser.

**Mode opératoire :**

On prend l'éprouvette graduée et on la remplit d'eau. On prend 200ml. Soit ce volume, le volume initial.

- On pèsera le tout : éprouvette+eau. Soit ce poids **M1**
- Ensuite, on prend une poignée de sable et on le met dans l'éprouvette.
- On pèsera le tout : éprouvette+eau+sable. Soit ce poids **M2**.

Le niveau de l'eau dans l'éprouvette augmente car on a ajouté le sable, on note **V** final ce volume.

**c- Analyse granulométrique Norme (NF P94-056)****But de l'essai :**

Analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique a trois buts :

- Déterminer les dimensions et les proportions de grains constituant les échantillons .
- tracer la courbe granulométrique.

- En déduire le Module de finesse ( $Mf$ ) de sable.

### Le principe de l'essai :

L'essai consiste à fonctionner au moyen d'une série de tamis et passoires emboîtés les uns sur les autres reposant sur un fond de tamis un matériau en plusieurs classes de tailles décroissantes. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtiens par vibration de la colonne de tamis.

### Matériel utilise :

- Série de tamis de maillage métallique carré compris entre ( $d$ ) et ( $D$ ), avec un fond et une couverte. Les tamis sont de dimension [0.08mm ; 0.16mm ; 0.315mm ; 0.63mm ; 1.25mm ; 2.5mm ; 5mm]
- balance de précision à  $\pm 0,1\%$ .
- étuve ventilé.



**Figure 2.5.** Colonne de tamis.

Les résultats de L'essai d'analyse granulométrique sont représentés dans le tableau ci-dessous

Tableau 2.8. Résultat d'analyse granulométrique de sable de mer

Masse de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
1000	5	19.6	19.6	1.96	98.04
	2.5	32.6	52.2	5.22	94.78
	1.25	31.6	83.8	8.38	91.62
	0.63	29.8	113.6	11.36	88.64
	0.315	464.8	578.4	57.84	42.16
	0.16	403.2	981.6	98.16	1.84
	0.08	14.4	996	99.6	0.4
	Fond	3.7	999.8	99.98	0.02

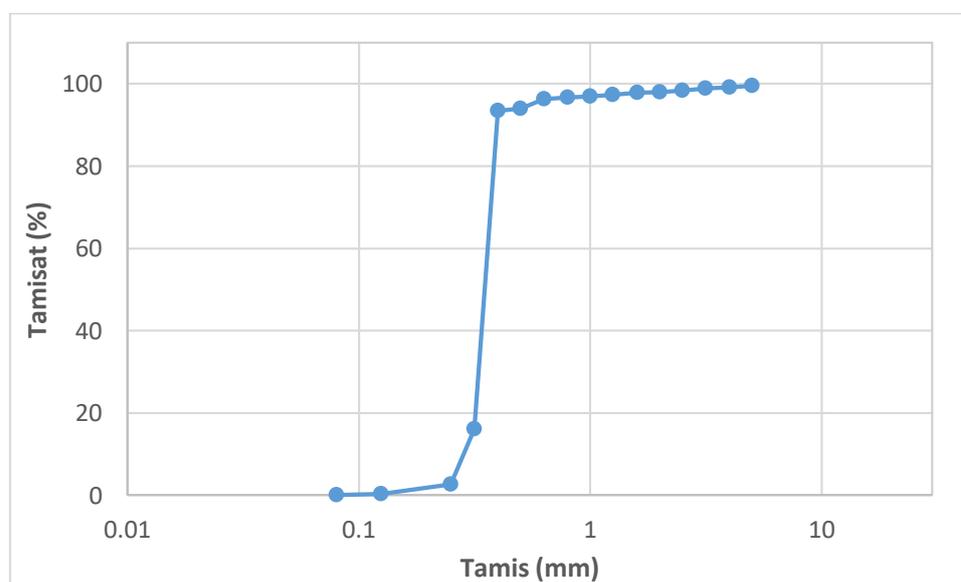


Figure 2.6. Courbe granulométrique du sable de mer .

**d- Equivalent de sable Norme NF P 18 -598**

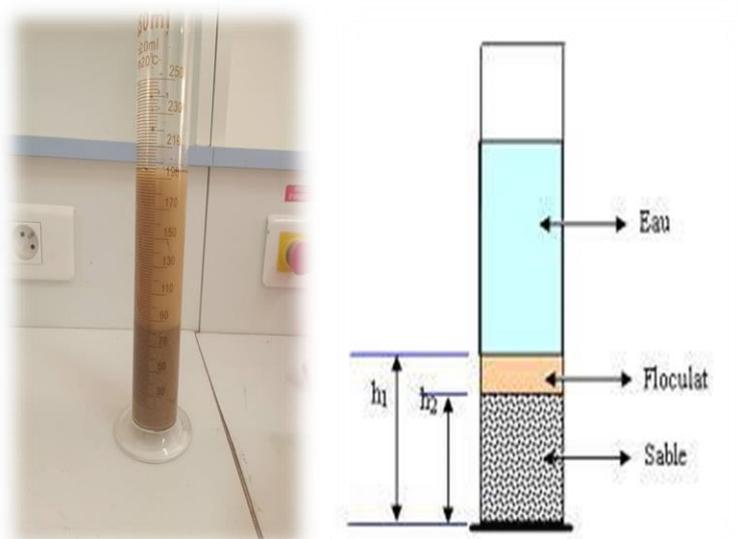
L'essai d'équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière nuisible et d'éléments fins argileux contenus dans le matériau, ainsi de mesurer le taux de propreté des sables. NF-P18-597

**Cette dernière peut être réalisée par deux types de mesure :**

- Mesure avec une règle de mesure (ESV).
- Mesure avec un piston (ESP).
- $ESV = (h_2/h_1)100\%$
- $ESP = (h'_2/h_1)100\%$
- hauteur  $h_1$  : sable propre + éléments fins.
- hauteur  $h_2$  : sable propre seulement (a vue).
- hauteur  $h'_2$  : sable propre seulement (au piston).

**Préparation de l'échantillon :**

Il faut tamiser au tamis de **2mm**, éliminer le refus, et recueillir tout le tamisât



**Figure 2.7.** Essai d'équivalent de sable

Les valeurs d'équivalent de sable qui indique la nature et la qualité de sable utilisé son illustrée dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.9.** Valeurs d'équivalent de sable indiquent la nature et la qualité.

E.S à visuel	E.S au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 65%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité ou vérification plus précise de la nature des fines par un essai au bleu de Méthylène.
65% < ES < 75%	60% < ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton.
75% < ES < 85%	70% < ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
ES > 85%	70% < ES < 80%	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau. Les résultats obtenus sont établis sur le tableau

### 2.2.3. Sable concassé

C'est un sable de nature calcaire concassé obtenu de la carrière de Targa (Ain T'émouchent).

#### a- Composition chimique du Sable concassé

Compositions chimiques de sable concassé son illustrée dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 2.10.** Analyse chimique du sable de carrière (LTPO)

Composition chimique.	SiO <sub>2</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Teneur en %	15.07	24.90	0.61	0.15	0	79.43	34.95

#### b- Analyse granulométrique de sable de carrière selon la norme NF P 18 560

Les résultats d'analyse granulométrique de sable de carrière son illustrée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2.11.** Résultat d'analyse granulométrique de sable de carrière.

Masse de l'échantillon (g)	Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)
1000	5	0	0	0	100
	2.5	175.8	175.8	17.58	82.42
	1.25	274.1	449.9	44.99	55.01
	0.63	189.5	639.4	63.94	36.06
	0.315	118.5	757.9	75.79	24.21
	0.16	69.5	827.4	82.74	17.26
	0.08	99.4	929.8	92.98	7.02
	Fond	73.2	1000	100	0

#### 2.2.4. Module de finesse Norme NF P18 304 :

##### Définition :

C'est le centième de la somme des refus (exprimés en pourcentages de poids aux tamis de : (0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80) mm

##### Le but :

modules de finesse les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion, s'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse ( $M_f$ )

##### Méthode de calcul :

$$M_f = (\sum R_c) / 100 = \frac{(\sum \text{des refus cummulés} (\%) (0.16; 0.315; 0.63; 1.25; 5m))}{100}$$

##### Lorsque $M_f$ est comprise entre:

- **1.8 et 2.2:** le sable est à majorité de grains fins.
- **2.2 et 2.8:** on est en présence d'un sable préférentiel.
- **2.8 et 3.3 :** le sable est un peu grossier. Il donnera des bétons résistants mais moins maniables.

##### Résultat :

Pour les sables utilisés dans notre étude on a trouvé les valeurs suivantes : Sable de mer :  $M_f = 1,82$ .

Sable de carrière :  $M_f = 3,14$

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

Les caractéristiques physiques de sable de mer utilisé sont illustrées dans le tableau ci-dessous

**Tableau 2.12.** Caractéristiques physique de sable de mer

<b>Masse volumique apparente lâche (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.446
<b>Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1. 13
<b>Equivalent de sable visuel (%)</b>	Sable très propre
<b>Equivalent de sable à piston (%)</b>	Sable très propre

Les caractéristiques physiques de sable de carrière utilisé son illustré ci-dessous.

**Tableau 2.13.** Caractéristique physique de sable de carrière

<b>Masse volumique apparente lâche (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.762
<b>Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.12
<b>Equivalent de sable visuel (%)</b>	Sable très propre
<b>Equivalent de sable à piston (%)</b>	Sable très propre

## 2.3. Eau

### 2.3.1. Eau de gâchage

C'est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier. Elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du mortier.

L'eau utilisée pour le gâchage du mortier est l'eau issue du robinet de laboratoire du département de génie civil de centre universitaire d'Ain-Temouchent.

L'analyse chimique a été effectuée au LTPO et les résultats obtenus sont reportés dans le tableau ci- dessous.

### 2.3.2. Résultats d'analyse de l'eau

Résultat d'analyse chimique de l'eau de gâchage utilisée.

**Tableau 2.14.** Analyse chimique de l'eau.

Ca <sup>++</sup>	cl <sup>-</sup>	So <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Hco <sub>3</sub>	PH	Résidu sec
-	355	28.8	85.42	8.8	740

#### 2.4. Poudre du marbre

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

**Figure 2.8.** Poudre de marbre.

Compositions chimiques de sable concassé son illustrée dans le tableau ci-dessous

**Tableau 2.15.** Composition chimique de la poudre de marbre

Composition chimique	CaO	Si	AhO <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZnO	SrO	ZrO <sub>2</sub>
Teneurs (%)	39	1.2	0.382	0.17	2.5	0.10	0.00	0.02	0.00	0.00

### 2.4.1. Les caractéristiques physiques de La poudre marbre

Les caractéristiques physiques de la poudre marbre utilisée sont illustrées dans le tableau ci-dessous

**Tableau 2.16.** Caractéristiques physiques de la poudre de marbre

Caractéristiques	La poudre marbre
Masse volumique apparente (g/m <sup>3</sup> )	1.1406
Masse volumique absolu (g/m <sup>3</sup> )	2.57
Surface spécifique de Blaine SSB (cm <sup>3</sup> /g)	9303.18

### 2.5. Pouzzolane

La pouzzolane utilisée est une pouzzolane naturelle de couleur rouge qui provient de la carrière de Béni-Safi 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 séchée à l'étuve, puis broyée dans une grande machine.

Ensuite, nous avons tamisé la poudre de pouzzolane dans un tamis de 80µm.

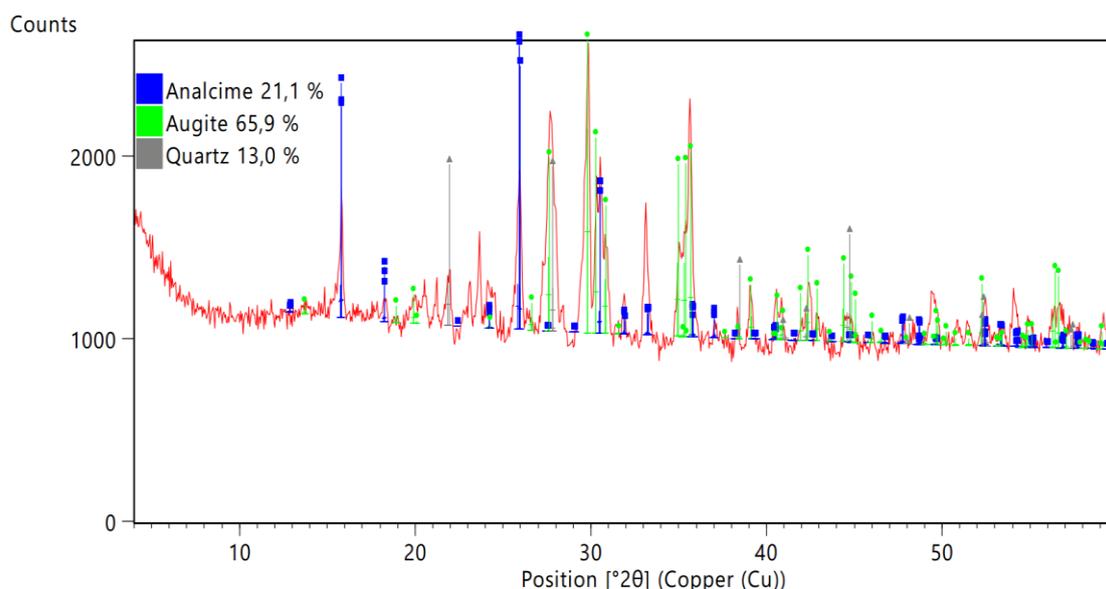


**Figure 2.9.** Poudre de pouzzolane.

Compositions chimiques de sable concassé son illustrée dans le tableau ci-dessous

**Tableau 2.17.** Analyse chimique de la poudre de pouzzolane (LTPO)

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

**Figure 2.10.** Spectre de diffraction des rayons X de la poudre de pouzzolane.

La diffraction des rayons X (XRD) avec une taille de pas de  $0,020^\circ$  dans la plage entre  $4$  et  $60^\circ$ . La figure 2.10 représente les phases identifiées dans le diffractogramme en utilisant le logiciel Highscore Plus de Panalytical. Trois phases ont été identifiées dans l'échantillon de pouzzolane : Analcime ( $\text{Si}_{32.16}\text{Al}_{15.84}\text{Na}_{16.08}\text{O}_{112.00}$ ), Augite ( $\text{Ca}_{4.00}\text{Mg}_{2.96}\text{Fe}_{1.00}\text{Si}_{8.00}\text{O}_{24.00}$ ) et Quartz ( $\text{Si}_6\text{O}_6$ ). La méthode de Rietveld est maintenant appliquée dans les laboratoires pour l'analyse quantitative des matières premières, des clinkers de ciment Portland, des ciments Portland (OPC) et de tous les types de ciments mélangés. Pour le clinker, la méthode de Rietveld (1969) est la seule option pour déterminer le contenu de la phase. En utilisant la méthode Rietveld de l'échantillon de pouzzolane, le contenu des phases est : Analcime (21.1%), Augite (65.9%) et Quartz (13%).

### 2.5.1. Les caractéristiques physiques de la poudre Pouzzolane

Les caractéristiques physiques de la poudre Marbre utilisée sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 2.18.** Caractéristiques physiques de poudre de pouzzolane

Caractéristique	La poudre Pouzzolane
Masse volumique apparente (g/m <sup>3</sup> )	1.38
Masse volumique absolu (g/m <sup>3</sup> )	2.38
Surface spécifique de Blaine SSB (cm <sup>3</sup> /g)	10580.60

### 2.6. Formulation des mortiers

Cette étude est réalisée sur six types de mortiers de forme prismatique de dimensions 4×4×16 cm<sup>3</sup>. La différence entre chaque type de mortier est le type d'ajout (pouzzolane ou marbre) est le rapport E/C. Le Tableau 18 donne la composition des éprouvettes fabriquée en mortier.

**Tableau 2.19.** Formulation des mortiers étudiés.

	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable de mer (Kg/m <sup>3</sup> )	Sable de carrier (Kg/m <sup>3</sup> )	Pouzzolane (Kg/m <sup>3</sup> )	Marbre (Kg/m <sup>3</sup> )	Eau (Kg/m <sup>3</sup> )	Adjuvant
<b>G1</b>	450	675	675	0	0	225	0
<b>G2</b>	400	675	675	25	25	225	2%
<b>G3</b>	400	675	675	50	0	225	2%
<b>G4</b>	400	675	675	0	50	225	1%
<b>G5</b>	380	675	675	20	50	225	1%
<b>G6</b>	380	675	675	50	20	225	1%

### 2.7. Préparation des éprouvettes

Les différents mortiers testés dans ce travail de recherche sont élaborées conformément aux compositions données dans le tableau. La confection de tous les mortiers a été effectuée dans une température ambiante de laboratoire ( $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ ).

Le mode de préparation des gâchées a été uniformisé pour tous les types de mortiers

Préparés. En effet, après avoir pesé les quantités du sable (combiné) et du ciment, les composants sont introduits dans le malaxeur dans l'ordre suivant : (eau + ciment) et on commence le malaxage de ces deux constituants pendant 30 secondes avec une vitesse lente. Ensuite, et sans l'interruption de malaxage, le sable est introduit régulièrement (automatiquement) pendant les 30 secondes suivantes. Une fois le sable est introduit, on donne une vitesse rapide au malaxage pendant 30 secondes. Le malaxage est interrompu par la suite pour racler les parois pendant 15 secondes afin d'homogénéiser le mortier. Ce temps d'arrêt de malaxage est au total de 1 minute et 30 secondes. Ensuite, on reprend le malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Pour la confection de nos mortiers, nous avons utilisé des moules métalliques normalisé permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée ( $4 \times 4$ )  $\text{cm}^2$  et d'une longueur de 16 cm.

Pour le remplissage de moule (en trois couches), ce moule métallique doit être fixé à la table à choc permettant d'appliquer 60 chocs au moule, en le faisant chuter d'une hauteur constante à chaque fois pendant 60 secondes.

La fréquence de la table à choc est donc d'une chute par seconde. Une fois les moules sont bien remplis à l'aide de la table à choc et le mortier est bien arasé, nous les avons recouvert avec de papier film. La conservation de ces moules a été effectuée à une température d'environ  $20^\circ\text{C}$  et le démoulage a été effectué après 24 h de conservation. Une fois les éprouvettes sont démoulées, nous les avons conservés dans de l'eau à une température de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .



**Figure 2.11.** Eprouvette prismatique (4\*4\*16)



**Figure 2.12 .**Malaxeur électrique.

### 2.7.1. 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.

### 2.7.2. 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 :

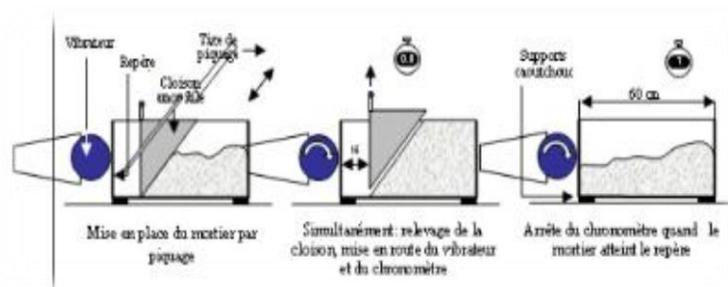
- 7 jours.
- 28 jours.
- 60 jours.
- 90 jours.

### 2.7.3. 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 :

**2.7.4. 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 sont très utiles pour apprécier l'influence des fillers calcaires ainsi que le rapport E/L sur la fluidité d'un mortier. Le schéma ci- dessous présente le principe de l'essai de maniabilité du mortier à l'aide de perméabiliserai LCL.



**Figure 2.13.** Principe de fonctionnement du maniabilimètre

**Tableau 2.20.** Classe de consistance selon la durée d'écoulement

Classe de consistance	Durée
<b>Ferme</b>	$T > 40$
<b>Plastique</b>	$20 < T < 30$
<b>Très plastique</b>	$10 < T < 20$
<b>Fluide</b>	$T < 10$

**2.7.5. 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.



**Figure 2.14.** Appareil de mesure de teneur en air occlus Essai sur mortier durci .

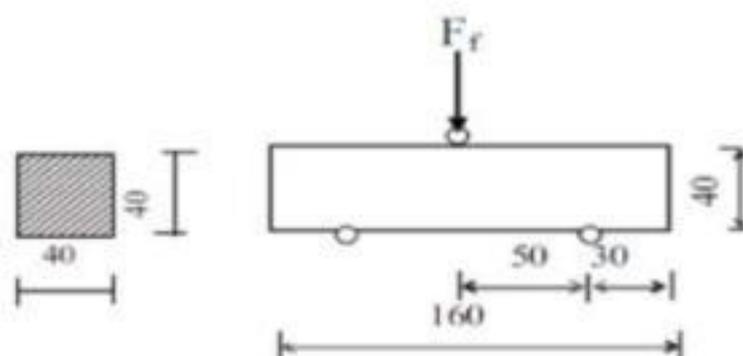
### 2.7.6. Essais de flexion:

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 indiquant le principe de cet essai est donné ci- dessous :



**Figure 2.15.** Appareil de l'essai de flexion



**Figure 2.16.** principe de l'essai de la flexion d'une éprouvette  $(4*4*16)\text{cm}^3$

### 2.7.7. 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  $\pm 0.5$  mm près et longitudinalement, de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm (L'application de la charge de compression doit être avec une vitesse constante jusqu'à la rupture).



**Figure 2.17.** Dispositif de compression pour mortier

## **2.8. Essai de carbonatation accéléré**

### **2.8.1. Principe de l'essai**

L'essai consiste à introduire du gaz carbonique (1% à 50%) dans une enceinte (20°C) à humidité relative (HR=65%) dans laquelle sont placés les échantillons de béton ou de mortiers. A certaines échéances, les échantillons sont retirés de l'enceinte et la profondeur de carbonatation est mesurée à l'aide de phénolphtaléine comme indicateur qui permet de visualiser le changement de pH ( $8 \leq \text{pH} \leq 10$ ) résultant de la carbonatation du béton ou du mortier.

### **2.8.2. Conduite de l'essai :**

-Les échantillons sont ensuite introduits dans l'enceinte de carbonatation accéléré (Figure 2.18). L'alimentation en CO<sub>2</sub> est assurée à partir d'une bouteille de CO<sub>2</sub> sous pression dont le débit est réglé à partir d'un manomètre, évitant les surpressions dans l'enceinte pour que le transfert du gaz CO<sub>2</sub> dans les corps d'épreuve se fasse avant tout par diffusion.

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



Figure 2.18. Dispositif pour la carbonatation accélérée.

### 2.8.3. Suivre de la progression de carbonatation

A chaque échéance (7 jour et 90 jours), les corps d'épreuve sont retirés de l'enceinte et les épaisseurs de béton carbonaté sont mesurées après les pesés. Un morceau de béton ou de mortier (épaisseur  $2 \pm 1$  cm) est prélevé sur chaque éprouvette. Les mesures de l'épaisseur de béton carbonaté sont réalisées après humidification des surfaces et pulvérisation d'une solution de phénolphtaléines.



Figure 2.19. Test à la phénolphtaléine et mesure du front de carbonatation.

## **2.9. Mesure du retrait sur éprouvette de mortier normal**

### **2.9.1. Objectif de l'essai**

L'essai consiste à suivre l'évolution des changements dimensionnels d'une éprouvette de mortier normal conservé à l'air pour le retrait et à l'eau pour le gonflement.

Donc le retrait est une réduction de longueur d'un échantillon provoqué par la dessiccation, le gonflement est une augmentation de longueur d'un échantillon provoqué par l'immersion dans l'eau. Trois prismes (4x4x16 cm<sup>3</sup>) sont préparés pour chaque essai de retrait et de gonflement

### **2.9.2. Principe de l'essai**

Après le démoulage de l'éprouvette de dimension (4x4x16) cm<sup>3</sup>, on procède immédiatement à la mesure de sa longueur.

### **Équipement nécessaire utilisé :**

Il est décrit dans la Norme NF P15-433.

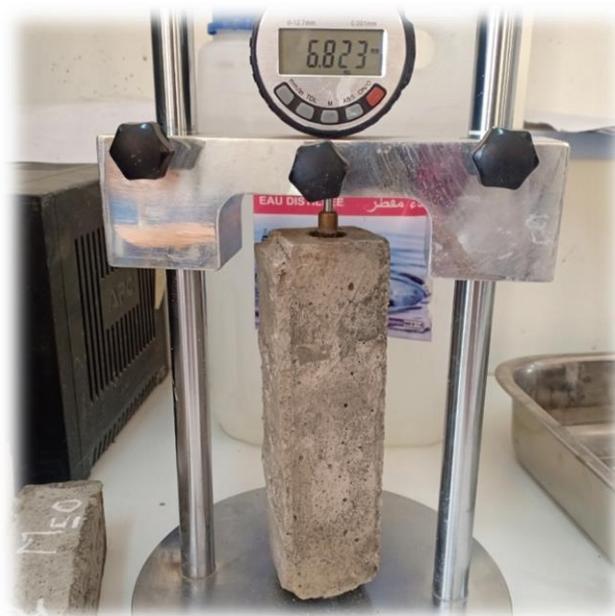
Une salle maintenue à une température de  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  Un malaxeur normalisé.

Des moules équipés de plots de retrait en laiton.

Les plots sont vissés au centre de chaque face carré du moule au moment de la mise en place du mortier, puis désolidarisés du moule avant le démoulage.

Un dilatomètre équipé d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 5 µm.

Une tige de 160mm de longueur en invar (insensible aux variations de température pendant la manipulation) pour permettre de régler le zéro du dilatomètre.



**Figure 2.20.** Lecture sur retractomètre de retrait.

### 2.9.3. Conduite de l'essai

Régler le comparateur à zéro juste au moment du démoulage de l'éprouvette sur la tige en invar de 160mm de longueur, soit  $L_0$  la mesure de l'éprouvette.

La moyenne des déformations est calculée à partir des trois mesures. Ces dernières sont déterminées de la même façon que la perte en masse, en tenant compte de la longueur initiale de l'éprouvette

$$\varepsilon_{\text{retrait libre}} = 10^6 \times \frac{(\varepsilon_{\text{ini}} - \varepsilon(t))}{\varepsilon_{\text{ini}} + l_{\text{ini}}} \quad \text{eq 2.1}$$

Avec :

- $\varepsilon_{\text{retrait libre}}$  le retrait libre de dessiccation de l'éprouvette [um/m]
- $\varepsilon_{\text{ini}}$  la valeur initiale lue sur le capteur pour la première mesure
- $\varepsilon(t)$  la valeur mesurée à l' instant t
- $l_{\text{ini}}$  la longueur initiale de l'éprouvette égale a 160 mm

**2.10. Conclusion.**

Nous avons présenté dans ce chapitre, les différents matériaux employés (ciment, sable, pouzzolane, marbre, adjuvants), ainsi que leurs caractéristiques physiques et chimiques. Ensuite, nous avons présenté et calculé les matériaux de construction qui entre dans l'étude de notre mortier. Pour le matériel utilisé, les différents essais, les équipements de conservation du mortier. Enfin, nous avons décrit la procédure expérimentale adoptée pour les essais de carbonatation et les techniques de suivi de la progression de la carbonatation ont été sommairement présentées



# **Chapitre 3 : Résultats d'Essais et Interprétation**

## 1. Introduction

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

Une analyse et des discussions des résultats seront présentées, 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 mécanique tels que la résistance à la compression du matériau durci.

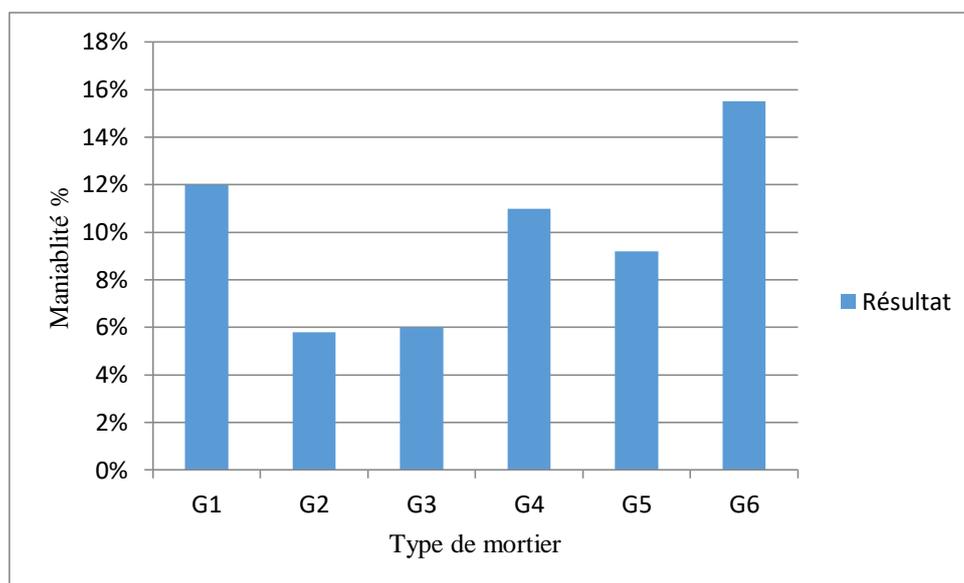
## 2. Interprétations des résultats

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

#### 2.1.1. Maniabilité

**Tableau 3.1.** Résultats de l'essai de maniabilité

Gâchée	Résultats	Classe de consistance
<b>G1</b>	10.39s	Très plastique
<b>G2</b>	2.40s	Très fluide
<b>G3</b>	2.62s	Très fluide
<b>G4</b>	3.07s	Très fluide
<b>G5</b>	2.98s	Très fluide
<b>G6</b>	3.25s	Très fluide



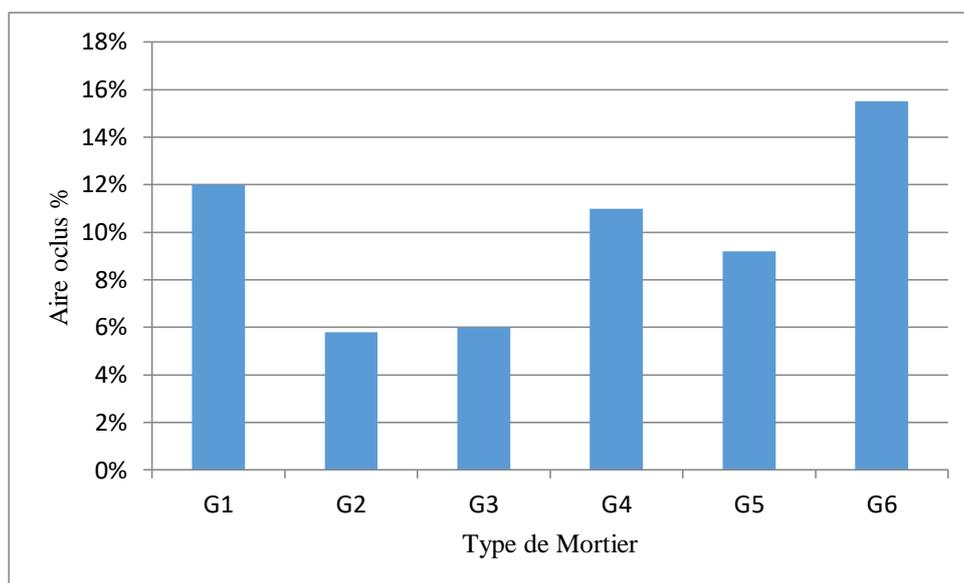
**Figure 3.1.** Maniabilités des mortiers

On constate que pour la majorité des mélange on a un mortier fluide a l'exception du mortier G1 (mortier témoin) il est très plastique avec un temps d'écoulement de 10.39s.

### 2.1.2. AIR OCCLUS :

**Tableau 3.2.** Résultats de l'essai l'air occlus.

Gâchée	Résultats
<b>G1</b>	12%
<b>G2</b>	5,8%
<b>G3</b>	6%
<b>G4</b>	11%
<b>G4</b>	9.2%
<b>G6</b>	15.5%



**Figure 3.2.** Air Occlus

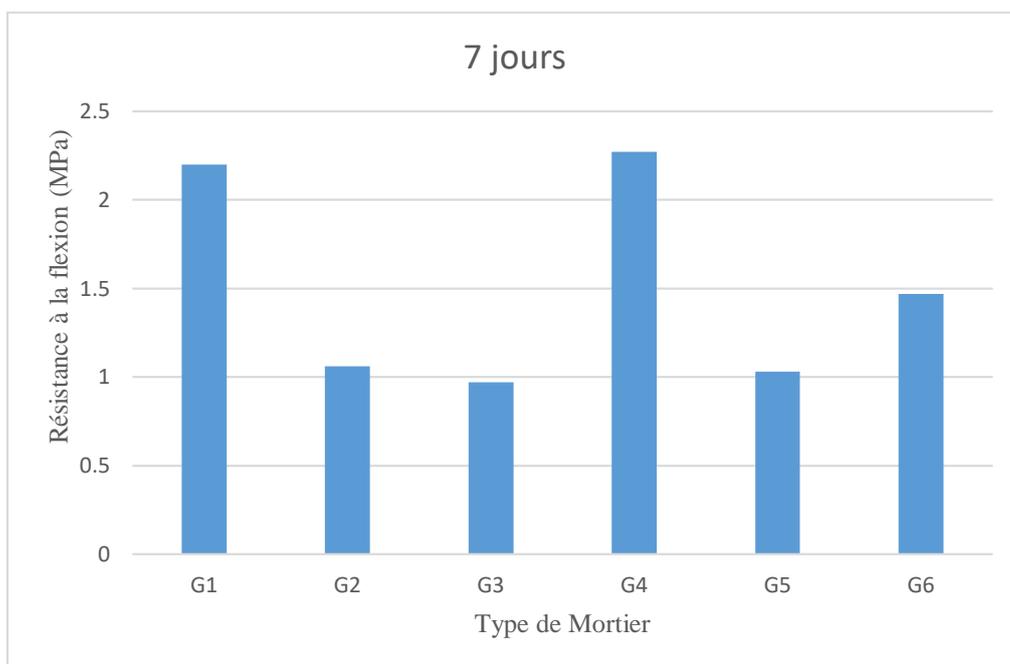
Sur la figure 3.1 on remarque que la gâchée G6 (20Kg du marbre 50Kg de pouzzolane naturelle) présente le plus grand pourcentage d'air occlus. Les gâchées G2 et G3 présentent presque le même pourcentage d'air occlus.

## 2.2. Essai sur mortier durci

### 2.2.1. Résultats des essais de la résistance à la flexion

**Tableau 3.3.** Résistance à la flexion à l'âge de 7 jours.

Mortier	Flexion (MPa)
<b>G1</b>	2.2
<b>G2</b>	1.06
<b>G3</b>	0.97
<b>G4</b>	2.27
<b>G5</b>	1.03
<b>G6</b>	1.47

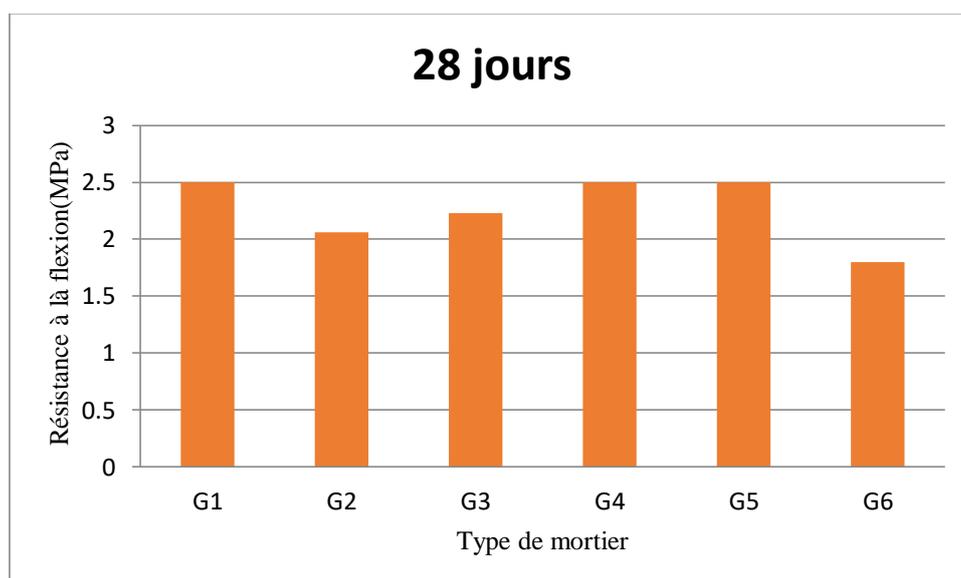


**Figure 3.3.** Résistance à la flexion à l'âge 7 jours.

On remarque sur la figure 3.3 que la résistance à la flexion pour les gâchées 1 et 4 sont supérieures aux d'autres gâchées. Sachant que la gâchée G1 représente le mortier de référence c'est un mortier sans ajout, mais si on remarque les autres gâchées on peut voir que la gâchée G4 (50% de la poudre de marbre) a une résistance à la flexion proche du mortier de référence. Il faut noter qu'à l'âge de 7 jours les mortiers avec ajout de pouzzolane ne représentent pas des résistances importantes car la pouzzolane ne réagit qu'à long terme.

**Tableau 3.4.** Résistance à la flexion à l'âge de 28 jours.

<b>Mortier</b>	<b>Flexion (MPa)</b>
<b>G1</b>	2.5
<b>G2</b>	2.06
<b>G3</b>	2.23
<b>G4</b>	2.5
<b>G5</b>	2.5
<b>G6</b>	1.8

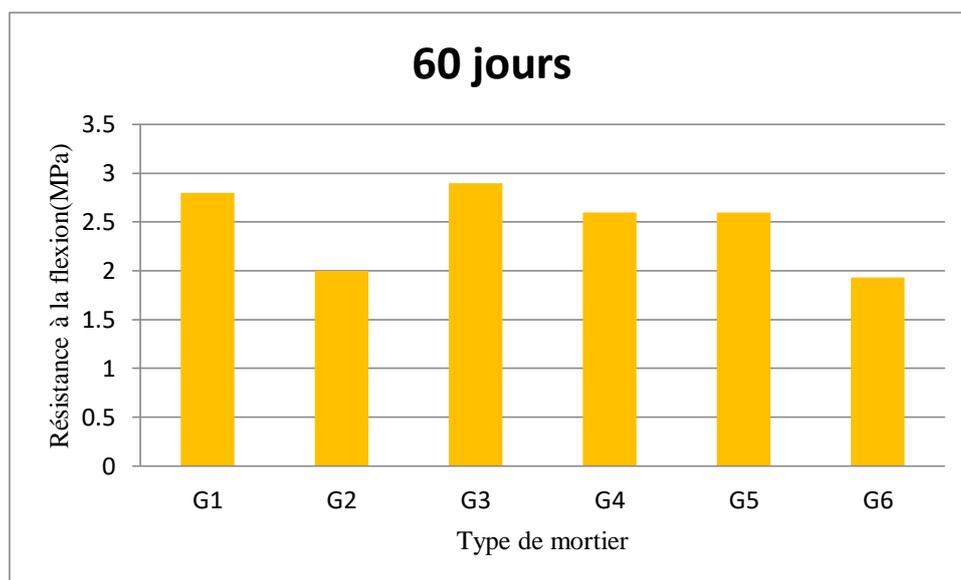
**Figure 3.4.** Résistance à la flexion à l'âge 28 jours

Sur la figure 3.4 on remarque que la résistance à la flexion est presque similaire pour les mortiers G1, G4 et G5, on constate aussi une augmentation de la résistance par

rapport à l'âge de 7 jours pour tous les mortiers cela aux phénomènes de création des puits d'hydratation du mortier tels que les gels de silice responsable de la résistance du mortier.

**Tableau 3.5.** Résistance à la flexion à l'âge de 60 jours.

Mortier	Flexion (MPa)
G1	2.8
G2	2
G3	2.9
G4	2.6
G5	2.6
G6	1.93



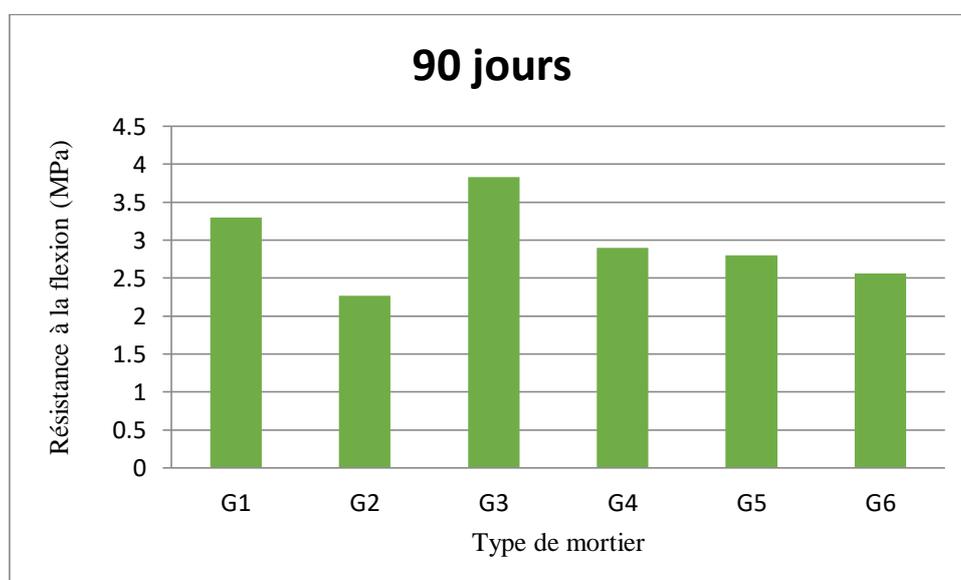
**Figure 3.5.** Résistance à la flexion à l'âge 60 jours

Au cours de l'âge on peut voir sur la figure 3.5 une évolution de la résistance à la flexion pour les différents mortiers. On a toujours le mortier témoin qui représente la plus grande résistance qui est expliqué par la quantité du ciment utilisé. On remarque aussi

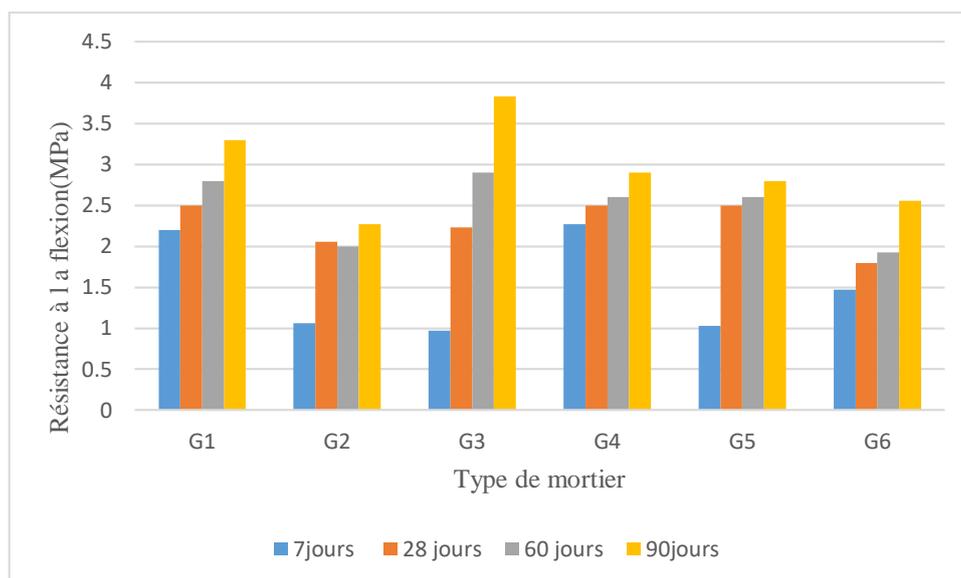
que pour la gâchée G3 (P50%) on a une résistance supérieur à celle du mortier témoin cela est dû à la réactivité de la pouzzolane naturelle qui commence à agir long terme c'est-à-dire au-delà de 60jours.

**Tableau 3.6.** Résistance à la flexion à l'âge de 90 jours.

<b>Mortier</b>	<b>Flexion (MPa)</b>
<b>G1</b>	3.3
<b>G2</b>	2.27
<b>G3</b>	3.83
<b>G4</b>	2.9
<b>G5</b>	2.8
<b>G6</b>	2.56



**Figure 3.6.** Résistance à la flexion à l'âge 90 jours



**Figure 3.7.** Résistance à la flexion à différents âges

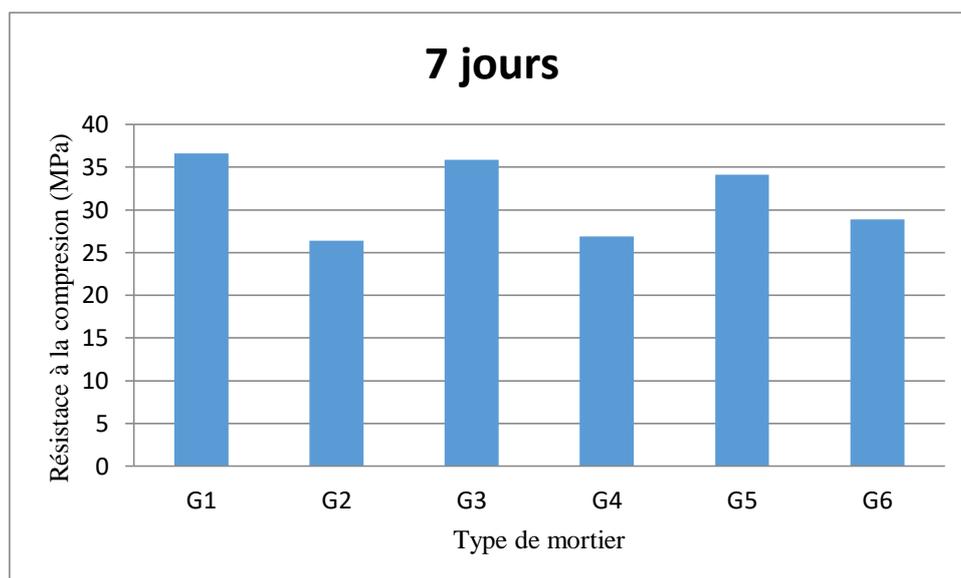
On remarque sur la figure 3.6 et la figure 3.7 qu'on a une évolution de la résistance en flexion en fonction de l'âge pour les différents types de mortiers.

On constate aussi que les mortiers G3 , G4 et G5 présentent des bonne résistances à la flexion qui se rapproche à celle du mortier de référence et si on compare avec le mortier G3 on constate qu'on a un résistance supérieure à celle du mortier témoin cela est expliqué par la réactivité de l'action de la pouzzolane qui peut être observé à long terme.

**2.2.2. Résultats des essais de la résistance à la compression**

**Tableau 3.6.** Résistance à la compression à l'âge de 7jours

Mortier	Compression (MPa)
<b>G1</b>	36.63
<b>G2</b>	26.42
<b>G3</b>	35.89
<b>G4</b>	26.92
<b>G5</b>	34.15
<b>G6</b>	28.9

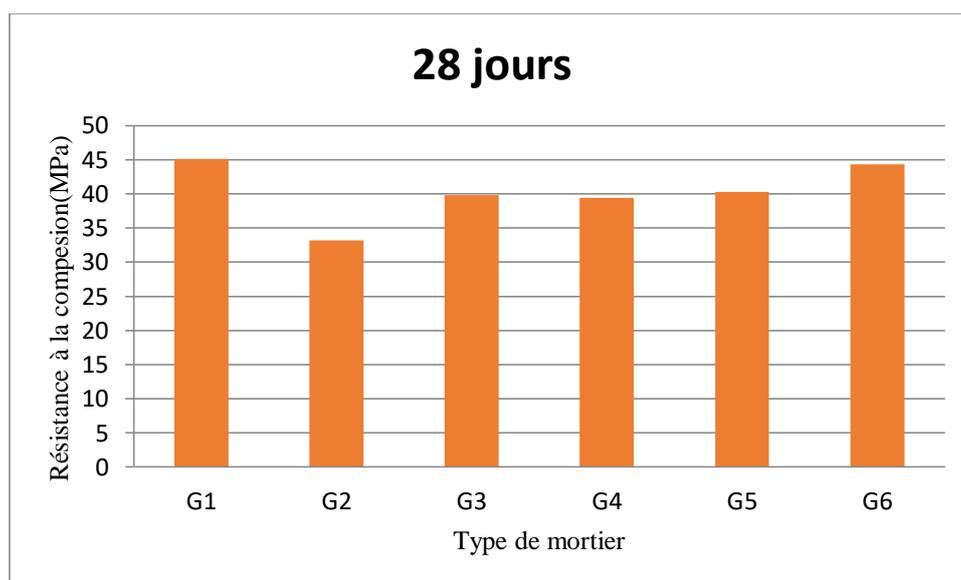


**Figure 3.8.** Résistance à la Compression à l'âge 7 jours

La figure 3.8 représente les résultats de la résistance en compression obtenue à l'âge de 7 jours pour les différents types de mortier. On constate que la résistance à la compression pour le mortier témoin est supérieur par rapport aux autres mortiers. Cela est expliqué par la quantité de ciment utilisé dans le mortier témoin qui est de 450kg/ m<sup>3</sup> comparant aux autres mortiers on réduits la quantité du ciment et on a ajouté soit de la pouzzolane qui ne réagit pas à court terme soit de la poudre du marbre qui est un ajout inerte.

**Tableau 3.7.** Résistance à la compression à l'âge de 28 jours

Mortier	Compression (MPa)
<b>G1</b>	45.13
<b>G2</b>	33.17
<b>G3</b>	39.78
<b>G4</b>	39.45
<b>G5</b>	40.3
<b>G6</b>	44.32

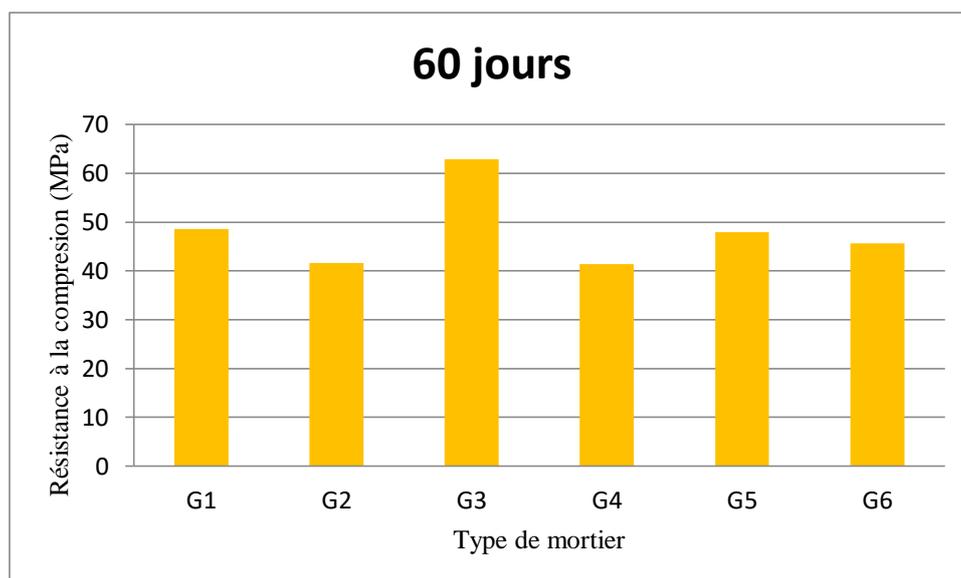


**Figure 3.9.** Résistance à la Compression à l'âge 28 jours

Sur la figure 3.9 on remarque une évolution de la résistance pour les différents mortiers une augmentation de la résistance par rapport à l'âge de 7 jours pour tous les mortiers et aussi on remarque que la résistance à la compression est presque similaire pour les mortiers G3, G4 et G5, et les mortiers G1, G6 presque similaire.

**Tableau 3.7.** Résistance à la compression à l'âge de 60 jours

Mortier	Compression (MPa)
<b>G1</b>	48.56
<b>G2</b>	41.63
<b>G3</b>	62.92
<b>G4</b>	41.4
<b>G5</b>	47.96
<b>G6</b>	45.6

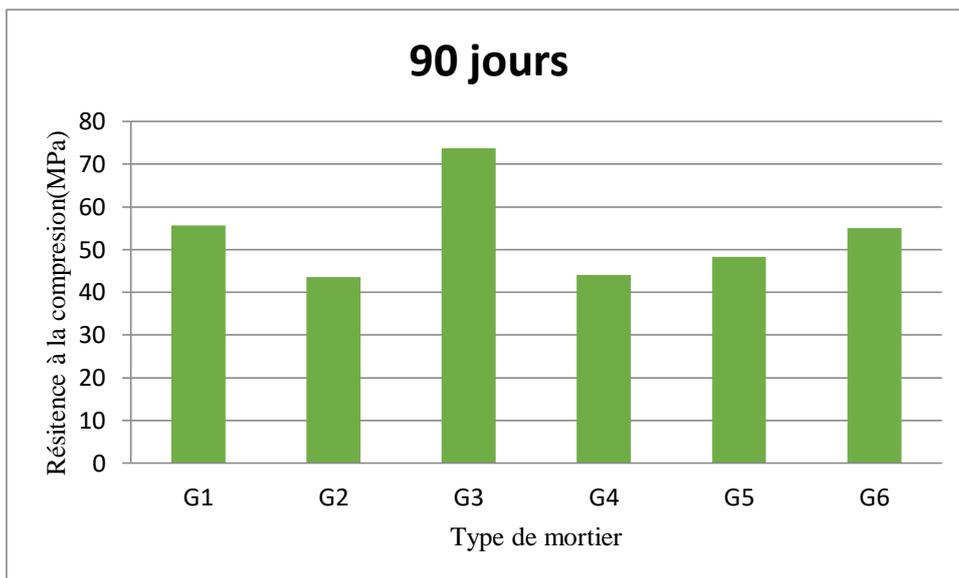


**Figure 3.10.** Résistance à la Compression à l'âge 60 jours

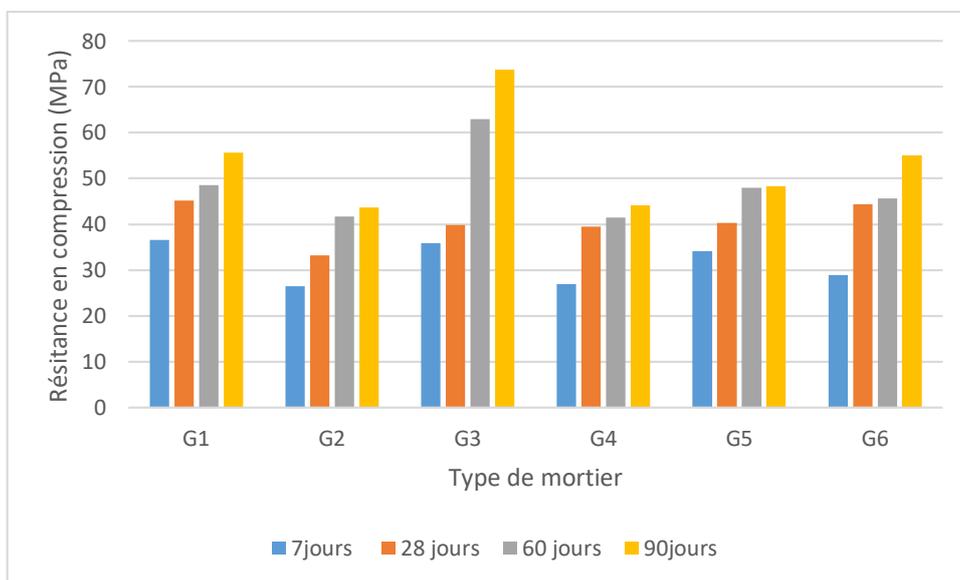
Au cours de l'âge on peut voir sur la figure 3.10 une évolution de la résistance à la compression pour les différents mortiers. Toujours on remarque aussi que pour la gâchée G3 (P50%) on a une résistance supérieur à celle du mortier cela est dû à la réactivité de la pouzzolane naturelle qui commence à agir à long terme c'est-à-dire au-delà de 60 jours.

**Tableau 3.8.** Résistance à la compression à l'âge de 90 jours

Mortier	Compression (MPa)
<b>G1</b>	55.65
<b>G2</b>	43.61
<b>G3</b>	73.7
<b>G4</b>	44.1
<b>G5</b>	48.3
<b>G6</b>	55.07



**Figure 3.11.** Résistance à la Compression à l'âge 90 jours



**Figure 3.12.** Résistance à la Compression à différents âges

On remarque sur la figure 3.11 et la figure 3.12 qu'on a une évolution de la résistance en compression en fonction de l'âge pour les différents types de mortiers.

On constate aussi que les mortiers G3, G4 et G5 présentent des bonnes résistances à la compression qui se rapproche à celle du mortier de référence et si on compare avec le mortier G3 on constate qu'on a une résistance supérieure à celle du mortier témoin cela est expliqué par

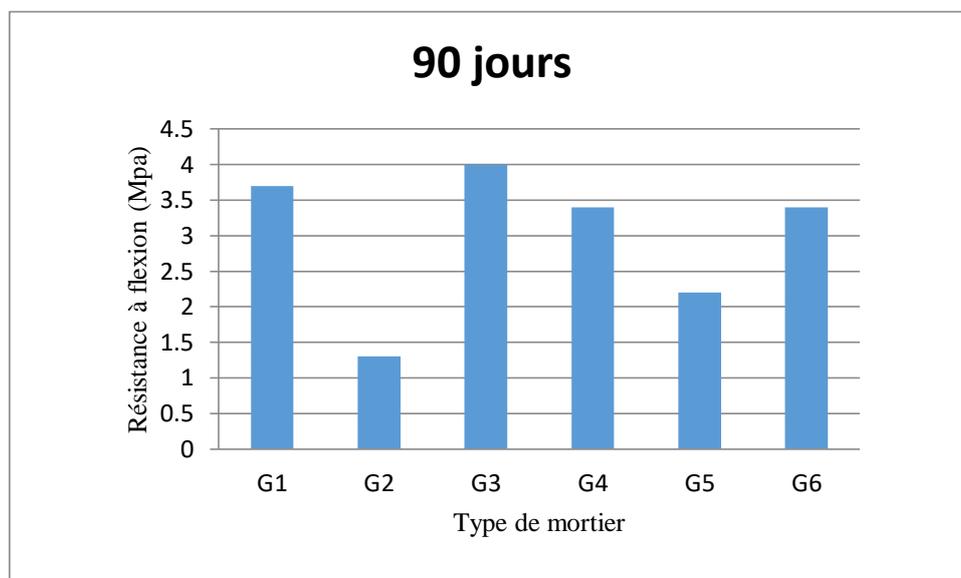
la réactivité de l'action de la pouzzolane qui peut être observé à long terme. Les résultats montrent une diminution de la résistance avec l'augmentation du taux de substitution. Cette diminution est due à l'effet de dilution puisque le ciment est remplacé par la poudre de marbre qui présente une faible réactivité pouzzolanique à court terme.

### 2.3. Essai de carbonatation

#### 2.3.1. Essai de résistance à la flexion

**Tableau 3.9.** Résistance à la flexion à l'âge de 90 jours (Carbonatation Accélérée).

<b>Mortier</b>	<b>Flexion (MPa)</b>
<b>G1</b>	3.7
<b>G2</b>	1.3
<b>G3</b>	4
<b>G4</b>	3.4
<b>G5</b>	2.2
<b>G6</b>	3.4



**Figure 3.13.** Résistance à la Flexion à l'âge 90 jours  
(carbonatation accélérée)

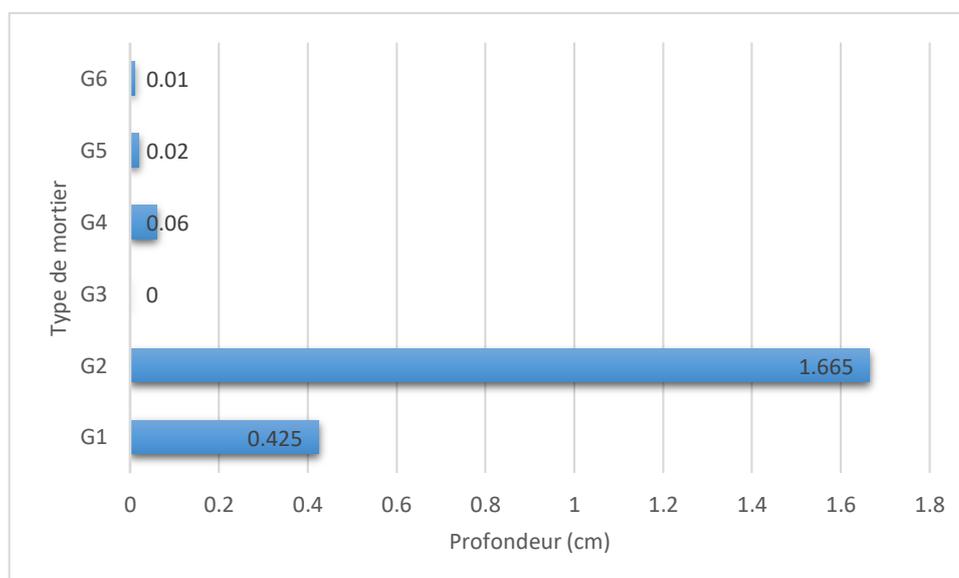
### 2.3.2. Essai de carbonatation accélérée

La profondeur carbonatée d'un béton est généralement révélée par l'utilisation d'un indicateur coloré, de la phénolphthaléine, qui pulvérisé à la surface d'un échantillon de béton fraîchement fendu devient violet lorsque le pH est supérieur à 9 et incolore lorsque le pH est inférieur à 9 (voir Figure 3.15).

Le front de carbonatation peut ainsi suivi et la cinétique de carbonatation peut être déduite. Généralement, puisque le phénomène est régi par la diffusion, la cinétique de carbonatation peut s'exprimer par une relation proportionnelle à la racine carrée du temps tant qu'un cœur sain non carbonaté subsiste.

**Tableau 3.10.** Profondeur de la carbonatation accélérée à l'âge de 90 jours

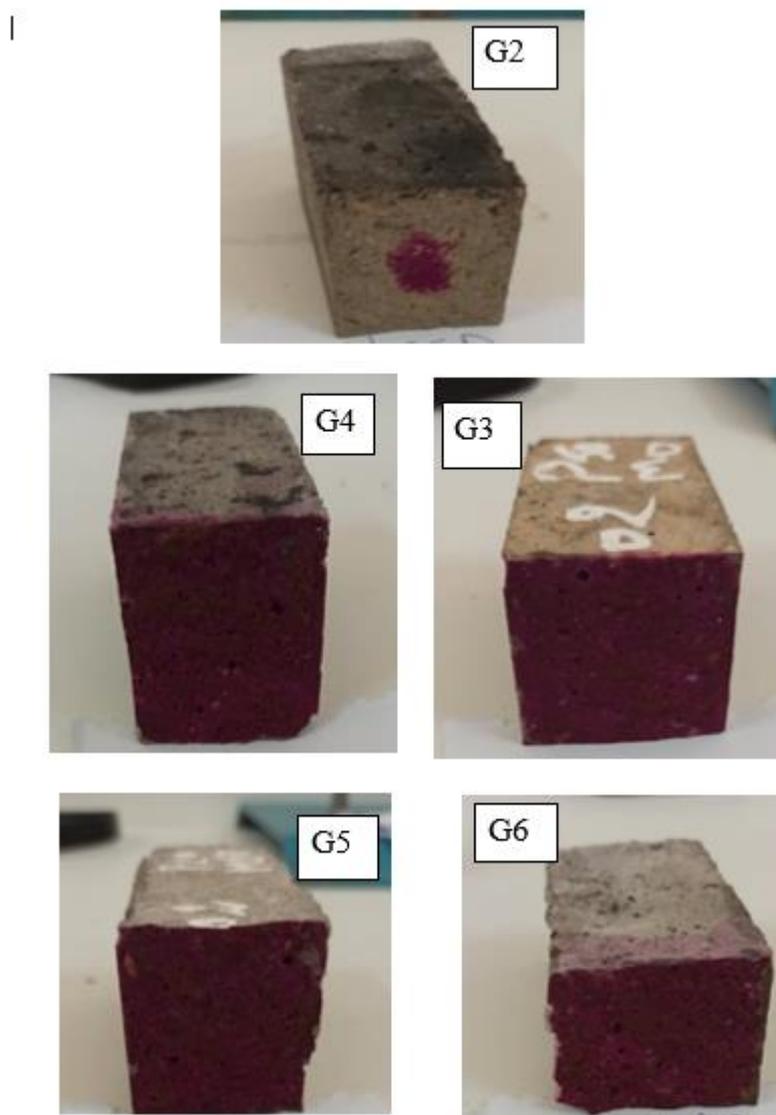
Mortier	La profondeur (cm)
G1	0.425
G2	1.665
G3	0.05
G4	0.06
G5	0.02
G6	0.01

**Figure 3.14.** Profondeur de la carbonatation accélérée

Sur le figure 3.14 on remarque la profondeur de la carbonatation pour la gâchée G3 est presque nulle, comparant avec les gâchées G1 et G2 qui présente des profondeurs importantes de la carbonatation ; cela peut être expliqué par le fait la microstructure des autres gâchées est plus organisé donc on a moins de porosité (moins de pores) qui laisse pénétrer le gaz carbonique responsable de la carbonatation.

De nombreux facteurs peuvent affecter le taux et la cinétique de carbonatation. Des facteurs liés au matériau lui-même tel que sa porosité, son humidité relative, sa teneur en portlandite et

des facteurs externes liés principalement à la température, à l'humidité relative et à la concentration en CO<sub>2</sub>. Par ailleurs la présence de fissures permet la pénétration du CO<sub>2</sub> à l'intérieur des fissures.



**Figure 3.15.** Front de carbonatation

On remarque sur les figures Figure 3.14 et Figure 3.15 les résultats de l'essai de carbonatation sur les différentes éprouvettes. On remarque qu'il y a une relation entre la carbonation et la résistance du béton. Si on prend par exemple la gâchée G3 qui présente les meilleures résistances mécaniques on voit sur la Figure 3.13 que l'éprouvette n'est pas carbonatée donc ce mortier a une bonne résistance vis-à-vis de la carbonation de même pour l'éprouvette G4 et G6

tandis que pour l'éprouvette du mortier G2 on remarque qu'on a une faible résistance par rapport aux autres gâchée et si on regarde la figure de la carbonatation on voit que l'éprouvette est carbonatée.

### 2.4. Le retrait

Les lectures de retrait des éprouvettes du mortier sont présentées sur les tableaux en annexe. Le tableau 3.11 représente les valeurs de retrait calculé à partir de l'équation eq 2.1.

Tableau3.11. Valeurs du retrait éprouvette G1

Age	$\epsilon(t)$
26	0,24238017
28	-6,871477913
29	-6,792704357
32	-11,27067806
42	-4,926377022
48	-4,683996849
69	-4,926377022
74	-4,453735684

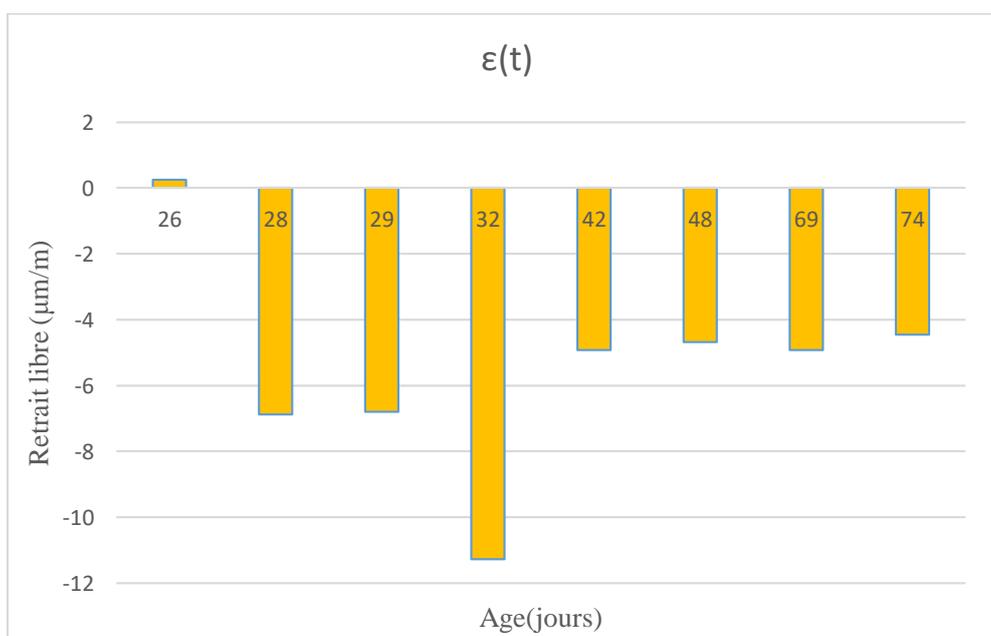


Figure 3.16. Résultats des essais de retrait sur mortier G1

Tableau3.12. Valeurs du retrait éprouvette G2

Age	$\epsilon(t)$
21	0,17474195
23	-8,18274393
24	-6,72455245
27	-7,71877391
37	-4,627649
43	-5,14584928
64	-8,96606993
69	-11,7438644

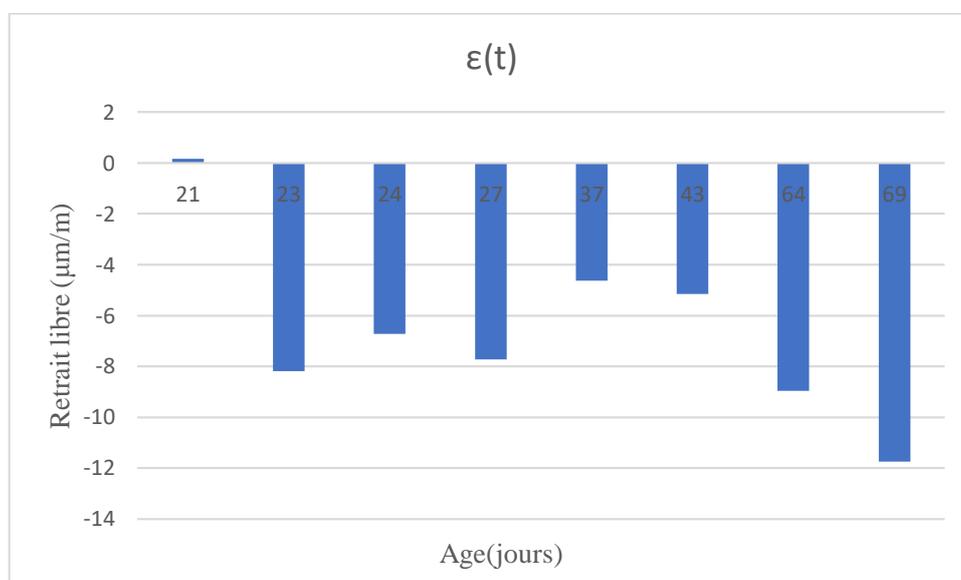


Figure 3.17. Résultats des essais de retrait sur mortier G2

Tableau3.13. Valeurs du retrait éprouvette G3

Age	$\epsilon(t)$
12	2,03730102
14	-4,98930862
15	1,41363744
18	-6,52173913
28	-2,42337847
34	-2,96388691
55	-6,61677358
70	-12,2475647

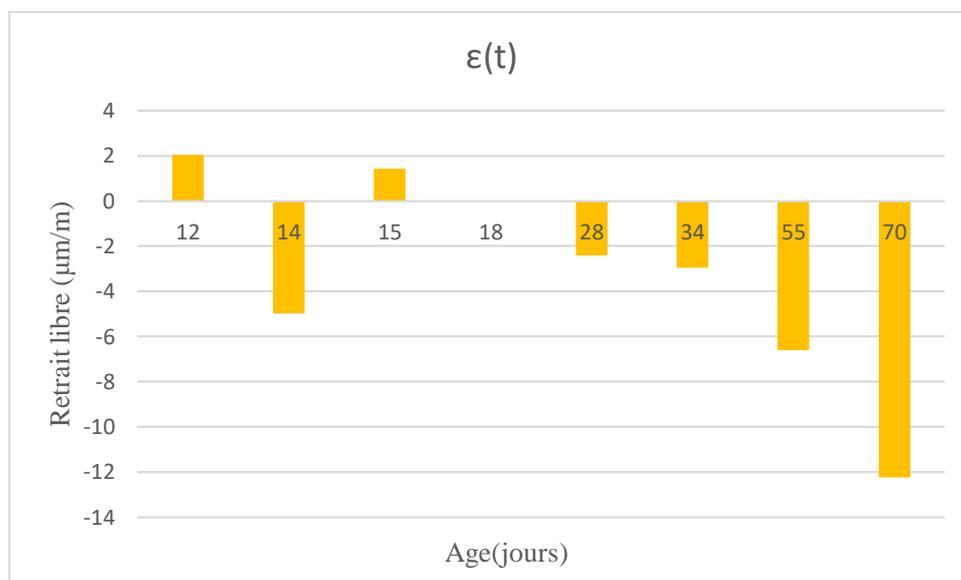


Figure 3.18. Résultats des essais de retrait sur mortier G3

Tableau3.14. Valeurs du retrait éprouvette G4

Age	$\epsilon(t)$
8	5,081767
10	-2,15066575
11	-1,64427631
14	-6,14816359
24	0,56000715
30	-1,20341962
51	-3,46132078
56	-8,88862411

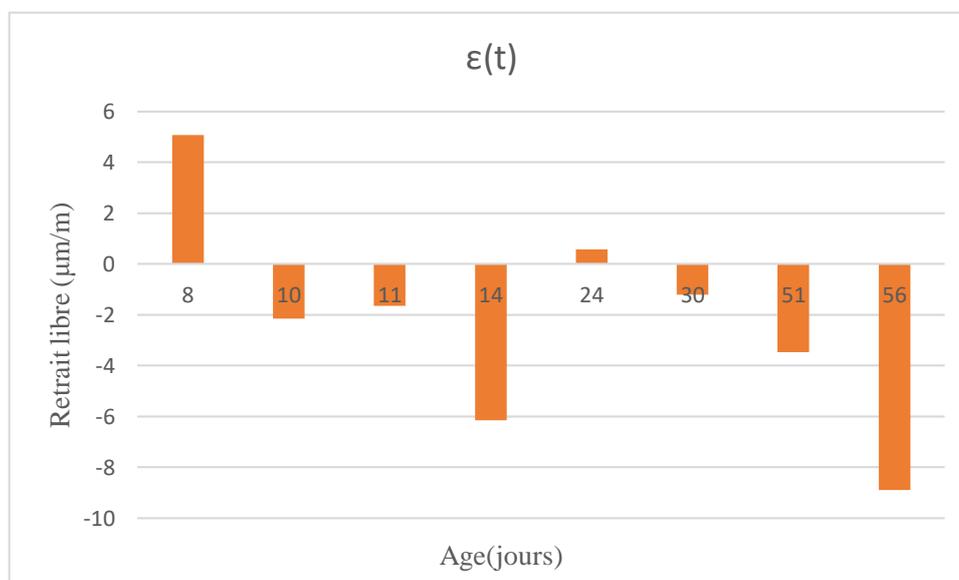


Figure 3.19. Résultats des essais de retrait sur mortier G4

Tableau3.15. Valeurs du retrait éprouvette G5

Age	$\epsilon(t)$
7	5,34313203
9	-1,59761423
10	-1,33134519
13	-3,87569378
23	0,81655838
29	0,47336718
50	-1,42601863
55	-8,76912699

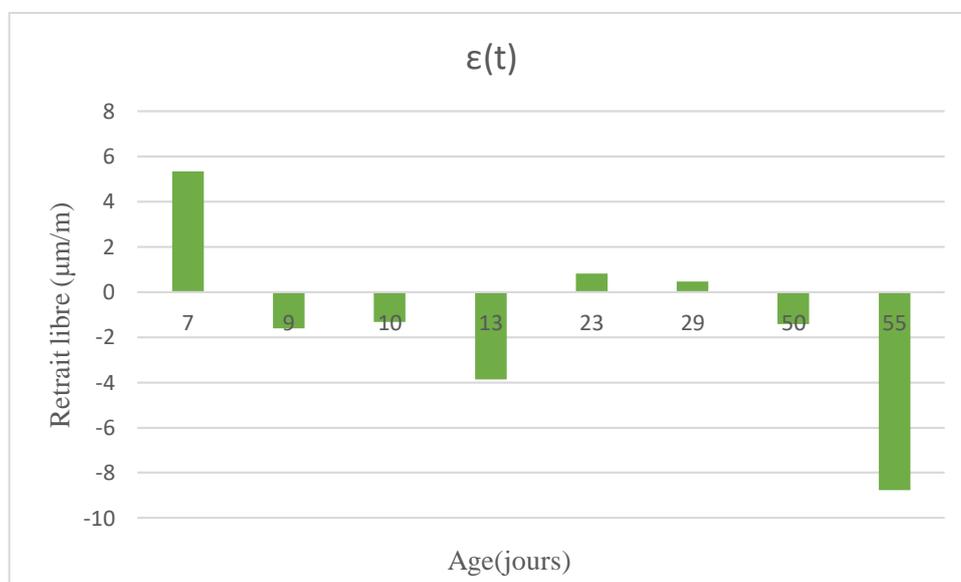


Figure 3.20. Résultats des essais de retrait sur mortier G5

Tableau3.16. Valeurs du retrait éprouvette G6

Age	$\epsilon(t)$
6	9,45060861
8	2,18321022
9	-6,60944463
12	-6,60944463
22	4,48604839
28	2,75742441
49	1,30992613
54	-5,50288602

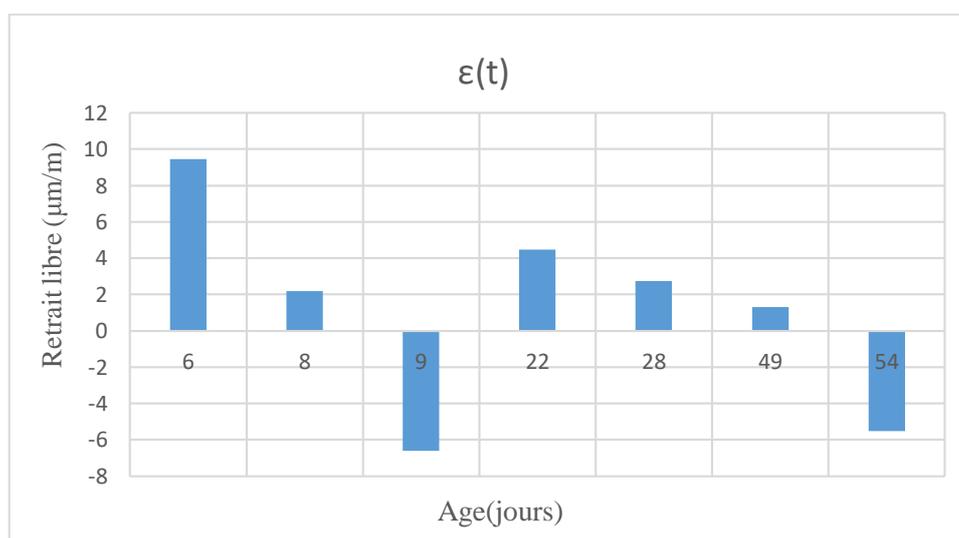


Figure 3.21. Résultats des essais de retrait sur mortier G6

les figures précédentes présentent les résultats obtenues de l'essai du retrait, on remarque sur les différentes figures qu'il y a des valeurs négatives qui représentent le retrait et des valeurs positives qui représentent un gonflement.

On remarque que pour tous les types de mortier on a une évolution du retrait en fonction de l'âge, puis pour les mortiers G1 et G2 on remarque qu'au-delà de 60 jours on a une stabilité par

rapport aux autres mortiers, on voit que pour les mortiers G3 et G5 affiches les plus grandes valeurs d'un retrait, pour mieux comprendre ce phénomène des essais sur la microstructure comme le DRX et le MEB .

### **2.5. Conclusion :**

L'objectif de ce chapitre d'une part est de comparer six types de mortier à base de la pouzzolane et de la poudre du marbre, en variant le taux d'ajout de la pouzzolane et de la poudre du marbre et celle de l'adjuvant avec un mortier témoin sans ajout. 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 du 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.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale :

Dans le cadre de ce travail .on s'est intéressée à l'influence de la substitution du ciment par de la poudre du marbre et de la pouzzolane naturelle dans la fabrication du mortier. En se focalisant sur les caractéristiques mécaniques et l'effet de ces matériaux sur le retrait et la carbonatation du mortier.

Pour cela des essais expérimentaux ont été effectués.

La poudre du marbre a été caractérisée par sa dimension, sa masse volumique apparente et absolue, ses caractéristiques chimiques et physiques ainsi que sa nature minéralogique. Le comportement des mélanges à l'état frais (masse volumique, maniabilité) et à l'état durci (Performances mécaniques) à différentes échéances pour différents taux de substitution est analysé autrement dit l'influence de cette addition a été étudiée et discutée à partir de nombreux essais sur différents mortiers.

Les résultats obtenus à travers cette étude nous ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes

Nous constatons que :

La substitution du ciment par la pouzzolane et la poudre du marbre améliore la résistance à la flexion à long terme vue que la pouzzolane agit à long terme.

Les résistances mécaniques en compression obtenues de mortiers confectionnés avec de la poudre de marbre avec différents dosage sont nettement favorisées par l'introduction de l'addition.

On a pu avoir des résistances acceptable pour des dosages allant jusqu'à 50% de la poudre du marbre.

L'utilisation de la combinaison des deux additions à donner des bons résultats

L'introduction de la poudre du marbre dans un mortier améliore sa compacité et son homogénéité à long terme,

Ces essais nous ont permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la littérature.

Comme perspectives on peut citer les points suivants :

Une étude des caractéristiques intrinsèques est à envisagé afin de comprendre le comportement de la microstructure des mortiers.

La caractérisation vis-à-vis les attaques chimiques est indispensable car c'est la cause principale qui influence la durabilité des mortiers

A côté de son influence dans le domaine de génie civil, la poudre de marbre contribue aussi au développement durable du pays, son utilisation est bénéfique pour l'environnement , elle contribue à la réduction de déchets rejetés dans la nature.

# Annexe

## Tableaux de lecture

<b>Retrait : 21/02/2021</b>			
<b>Mortier</b>	<b>AGE (jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	25	5,03	5.329
<b>G2</b>	20	5,959	9,003
<b>G3</b>	11	8,36	8.991
<b>G4</b>	7	7,855	8,653
<b>G5</b>	6	9,002	8,91
<b>G6</b>	5	7,185	8,957

**Tableau 1:**Tableau de lecture

<b>Retrait : 22/02/2021</b>			
<b>MORTIER</b>	<b>AGE( jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
G1	26	4,99	5,363
G2	21	5,93	6,945
G3	12	8,017	9.002
G4	8	7,002	6,579
G5	7	8,099	8,369
G6	6	5,605	8,369

Tableau 2:Tableau de lecture

<b>Retrait: 24/02/2021</b>			
	<b>AGE( jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	28	6,164	6,458
<b>G2</b>	23	7,317	7,319
<b>G3</b>	14	9,2	8.13
<b>G4</b>	10	8,216	6,238
<b>G5</b>	9	9,272	8,939
<b>G6</b>	8	6,82	7,81

Tableau 3:Tableau de lecture

<b>Retrait: 25/02/2021</b>			
	<b>AGE( jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	29	6,151	8,293
<b>G2</b>	24	7,075	7,28
<b>G3</b>	15	7,647	9.199
<b>G4</b>	11	8,131	6,186
<b>G5</b>	10	9,227	8,934
<b>G6</b>	9	8,29	7,809

**Tableau 4:**Tableau de lecture

<b>Retrait: 28/02/2021</b>			
	<b>AGE( jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	32	6,89	7,871
<b>G2</b>	27	7,24	7,642
<b>G3</b>	18	9,458	9.230
<b>G4</b>	14	8,887	7,048
<b>G5</b>	13	9,657	8,478
<b>G6</b>	12	8,29	7,358

**Tableau 5:**Tableau de lecture

<b>Retrait 10/03/2021</b>			
	<b>AGE( jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	42	5,843	6,723
<b>G2</b>	37	6,727	7,082
<b>G3</b>	28	8,768	8.003
<b>G4</b>	24	7,761	7,214
<b>G5</b>	23	8,864	8,57
<b>G6</b>	22	6,435	5,36

**Tableau 6:**Tableau de lecture

<b>Retrait: 16/03/2021</b>			
	<b>AGE (jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	48	5,803	6,047
<b>G2</b>	43	6,813	6,883
<b>G3</b>	34	8,859	7,979
<b>G4</b>	30	8,057	7,153
<b>G5</b>	29	8,922	8,557
<b>G6</b>	28	6,724	5,097

**Tableau 7:**Tableau de lecture

<b>Retrait: 06/04/2021</b>			
	<b>AGE( jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	69	5,843	7,612
<b>G2</b>	64	7,447	8,08
<b>G3</b>	55	9,474	7,998
<b>G4</b>	51	8,436	6,387
<b>G5</b>	50	9,243	9,424
<b>G6</b>	49	6,966	6,183

**Tableau 8:** Tableau de lecture

<b>Retrait: 11/04/2021</b>			
	<b>AGE (jours)</b>	<b>L'aire</b>	<b>L'eau</b>
<b>G1</b>	74	5,765	6,071
<b>G2</b>	69	7,908	6,965
<b>G3</b>	70	10,422	9.79 0
<b>G4</b>	56	9,347	5,886
<b>G5</b>	55	10,484	9.123
<b>G6</b>	54	8,105	7,497

# Référence Bibliographique

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] Boucetta T.A. (2014). Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances, Thèse de doctorat de l'Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.
- [2] Chaid, R. Jauberthie R. et Boukhaled A. Effet de l'ajout calcaire sur la durabilité des bétons, Libanaise Science journal, Vol. 11, No 1, 91-103.
- [3] Dreux G. et Festa J., Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition, Eyrolles, 1998.
- [4] Fuller, W. B. et Thomson, S. E. (1907) The Laws of Proportioning Concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers
- [5] Guemmadi.Z, G. Escadeillas, B. Toumi, H. Houari et P. Clastres., «Influence des fillers calcaires sur les performances mécaniques des pâtes de ciments». 1er congrès international sur la technologie et la durabilité du béton CITEDUB 1, mai 2004
- [6] Chaid Rabah, Haddadou Naïma, Hamza Sabria, Mesbah Habib. VALORISATION DE LA POUDRE DE MARBRE COMME ADDITIF DANS LA FORMULATION DE BETONS AUTOPLAÇANTS. Environnement, Ingénierie & Développement, 2021, 1, pp.11-19. fhal-03148703110 p.
- [7] Zeinab Sayed AbdelHady Ali (Zeinab Sayed Ali), Développement De Béton Autoplaçant (Bap) Et De Béton Semi-Autoplaçant (Bsap) À Teneur En Pâte Optimale, Mémoire de maîtrise en sciences appliquées Spécialité : génie civil, Sherbrooke (Québec) Canada Novembre 2020.
- [8] Chaid Rabah, Haddadou Naïma, Hamza Sabria, Mesbah Habib. VALORISATION DE LA POUDRE DE MARBRE COMME ADDITIF DANS LA FORMULATION DE BETONS AUTOPLAÇANTS. Environnement, Ingénierie & Développement, 2021, 1, pp.11-19. fhal-03148703
- [9] Allahyari, I. (2016). Approche performantielle des bétons : Vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité, thèse de doctorat, Université Toulouse III, Paul Sabatier, France
- [10] Chabil F. Carbonatation de bétons adjuvantés à base de ressources locales algériennes, Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans, 2009.
- [11] Younsi.A, Carbonatation de béton à forts taux de substitution du ciment par des additions minérales. Thèse de Doctorat d'Université de la Rochelle, 2011
- [12] Thiery. M, G. Villain, et Gammadensimetry: A method to determine drying and carbonation profiles in concrete, NDT & E International, 39 (4), 2006, 328-337.

**Sites web**

**[La composition du béton - GuideBeton.com](#)**

<http://www.guidebeton.com/>

**[Composition du béton : les constituants du béton | Infociments](#)**

<https://www.infociments.fr>

**[Tout savoir sur la composition du béton: Composants et ...](#)**

<https://www.artisanbeton.fr/>

**[Constituants du béton – Tout sur le béton](#)**

<https://www.toutsurlebeton.fr/>

