

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie de la Construction  
Département de Génie Civil



# Mémoire de Master recherche

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure

## Thème

Caractérisation expérimentale des mortiers à  
base de poudre de marbre



Dirigé par :  
**Mme CHAHOUR KAHINA**

Etudié par :  
**Melle KEDDAM LYDIA**

Promotion: **2016/2017**

# **Introduction générale**

# **Etude bibliographique**

**Etude expérimentale**

# **Annexes et références**

# **Conclusion générale**



# REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont au premier lieu au bon Dieu, le tout puissant, qui m'a donné la force, la patience et le courage pour atteindre ce stade dans les études.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à ma promotrice Mme CHAHOUR pour ses orientations et conseils précieux tout le long de ce travail.

Mes remerciements s'adressent aussi au corps enseignants qui ont contribué à ma formation et à tous les personnels du département de Génie civil, et aux membres du jury qui me feront l'honneur de juger mon travail.

Qu'il me soit permis de remercier toute ma famille spécialement ma mère pour leur appui et attention sans faille et leur amour inconditionnel qui m'accompagnent depuis toujours ; qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Que toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce modeste travail, retrouve ici l'expression de mes plus profonds sentiments.



# DEDICACE

À...

La mémoire de ma très chère  
grand-mère que son âme repose en  
paix.

Mes très chers et adorables parents,  
ma source de réussite et  
d'encouragement.

Mon très cher frère : Chabane.

Mes chères sœurs : Karima, Nora, Nadia,  
Adidi et Zaina.

Mes beaux frères : Saïd, Samir et Hakim

Mes amis(es) : Ilham, Samira, Célia,  
Souhila, Sarah, Salem, Mohamed, Hakim,  
Fatah, Lotfi, Lyes, Chafaa, Hafid, Fouad et  
Cherif.

Au petits anges : Arezki, Massil, Maya et  
Rayan

A tout les bons cœurs.

*LYDIA KEDDAM*

## SOMMAIRE

- Introduction générale.....	1
<b>I. GENERALITE SUR LES MORTIERS</b>	
<b>I.1.Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. classification des mortiers .....</b>	<b>5</b>
I.2.1.en fonction de leur masse volumique .....	5
I.2.2.d'après la nature du liant .....	5
I.2.3. suivant leur emploi .....	6
<b>I.3. propriétés de mortiers .....</b>	<b>6</b>
I.3.1. la fluidité .....	6
I.3.2. la maniabilité.....	6
I.3.3. le pouvoir de tenir l'eau .....	6
I.3.4. La résistance mécanique d'un mortier .....	7
<b>I.4.composition d'un mortier .....</b>	<b>7</b>
I.4.1. ciment .....	8
I.4.1.1. la fabrication du ciment .....	8
I.4.1.2. constitutions principaux.....	9
I.4.1.3.constituants secondaires .....	11
I.4.1.4. additifs .....	12
I.4.1.5.classifications des ciments courants.....	12
I.4.2.sable .....	14
I.4.2.1.. Les caractéristiques de sable .....	17
I.4.3.l'eau .....	18
I.4.3. adjuvants .....	19
I.4.4.1. les type d'adjuvants .....	19
<b>I.5.composition des bétons .....</b>	<b>21</b>
I.5.1. définitions.....	21
I.5.2. les constituants du béton .....	22
I.5.3.granulats .....	22
I.5.4. différents types de béton .....	23
I.5.5.critères en fonction de la destination des bétons.....	24
<b>I.6.Les déchets et les matériaux innovants.....</b>	<b>21</b>
I.6.1. Définition des déchets.....	24
<b>I.7.Conclusion.....</b>	<b>21</b>
<b>II. LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES MORTIERS</b>	
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>II.2. Essai mécaniques.....</b>	<b>26</b>
II.2.1.Compression.....	26
II.2.1.1. Définition.....	26
II.2.1.2. Compression uniaxiale.....	27

II.2.1.3. Compression triaxiale.....	28
II.2.1.4. Compression triaxiale asymétrique.....	29
II.2.2. Traction.....	30
II.2.2.1. Traction directe.....	30
II.2.2.2. Traction diamétrale ou par fendage.....	30
II.2.3. Flexion trois points.....	31
<b>II.3. Durabilité .....</b>	<b>33</b>
II.3.1. Notions sur la durabilité.....	34
<b>II.4. Perméabilité.....</b>	<b>34</b>
<b>II.5. Porosité.....</b>	<b>35</b>
<b>II.6. Résistance en milieu agressif.....</b>	<b>..</b>
II.6.1. La dissolution et l'érosion.....	36
II.6.2. Les gonflements et les éclatements.....	36
II.6.3. Action des sulfates.....	37
II.6.4. Action des acides.....	37
II.6.5. Action des bases.....	38
II.6.6. Action de l'eau de mer.....	38
II.6.7. Action des sels.....	38
<b>II.7. Les mécanismes d'attaques.....</b>	<b>38</b>
<b>II.8. Conclusion .....</b>	<b>39</b>
<b>III. La substitution de sable</b>	
<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>III.2. Les ajouts cimentaires.....</b>	<b>40</b>
III.2.1. Rôle des ajouts cimentaires.....	41
<b>III.3. Définition des ajouts minéraux.....</b>	<b>41</b>
III.3.1. Avantages des ajouts minéraux.....	42
III.3.1.1. Avantages techniques.....	42
III.3.1.2. Avantages économiques.....	42
III.3.1.3. Avantages écologiques.....	42
III.3.2. Classification des ajouts minéraux.....	43
III.3.3. Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux.....	43
<b>III.4. Le recyclage.....</b>	<b>43</b>
III.4.1. Les matériaux recyclés.....	42
III.4.2. Les principaux matériaux recyclés dans la construction.....	42
III.4.2.1. Le bois.....	44
III.4.2.2. La brique.....	45
III.4.2.3. Gravats.....	45
III.4.2.4. Verre.....	46
III.4.2.5. Les matériaux d'intérieur.....	47
III.4.2.6. Les matériaux d'isolation.....	47
III.4.2.7. L'acier.....	48
<b>III.5. La poudre de marbre .....</b>	<b>49</b>

III.5.1.Définition.....	49
III.5.2.Le recyclage des déchets de marbre.....	50
<b>III.6.Conclusion.....</b>	<b>49</b>
<b>IV. Matériaux et formulations</b>	
<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>51</b>
<b>IV.2. Normes.....</b>	<b>51</b>
IV.2.1.Préparation des matériaux.....	51
IV.2.2.Normes utilisées à l'état durci.....	31
<b>IV.3. Matériaux utilisés.....</b>	<b>51</b>
IV.3.1.Sable.....	51
IV.3.2.Ciment.....	52
IV.3.3.Eau de gâchage .....	53
IV.3.4.Les additions minérales.....	53
IV.3.5.Superplastifiant.....	55
<b>IV.4. La caractérisation des mortiers.....</b>	<b>57</b>
IV.4.1 Essais sur granulats.....	57
IV.4.2.Echantillonnage et prélèvement .....	57
IV.4.3.Module de finesse.....	59
IV.4.4.Equivalent de sable.....	60
IV.4.5.Masse volumique absolue.....	61
IV.4.6.Masse volumique apparente.....	61
<b>IV.5. Formulation des mortiers.....</b>	<b>62</b>
IV.5.1.Composition d'un mortier témoin.....	62
IV.5.2.Composition des mortiers avec différents dosages de la poudre de marbre.....	64
<b>IV.6. Conclusion.....</b>	<b>65</b>
<b>V. Résultats et interprétation</b>	
<b>V.1. Introduction.....</b>	<b>66</b>
<b>V.2. Confection des mortiers.....</b>	<b>66</b>
V.2.1.Préparation de la gâchée.....	66
V.2.2.Conservation des éprouvettes.....	68
<b>V.3. Essais expérimentaux.....</b>	<b>69</b>
V.3.1.Essai sur mortier frais.....	69
V.3.1.1. Essai d'affaissement.....	69
V.3.1.1. Essai d'étalement.....	71
V.3.2.Les essais à l'état durci.....	72
V.3.2.1. Essai de compression .....	72
V.3.2.2. Essai de traction par flexion.....	73
V.3.2.3. Essai de poinçonnement.....	74
V.3.2.4. Essai de l'ultrason.....	75
V.3.2.5. Essai de l'attaque chimique.....	76

<b>V.4. Résultats de caractérisation des mortiers à l'état durci et discussion</b>	<b>77</b>
V.4.1. Essai de flexion.....	77
V.4.2. Essai de compression .....	80
V.4.3. Essai de poinçonnement.....	83
V.4.4. Essai de l'ultrason.....	86
V.4.5. Essai de durabilité.....	86
<b>V.5. Conclusion.....</b>	<b>88</b>
<b>V.6. Conclusion générale.....</b>	<b>89</b>

## Liste des figures

Figure I.1 : Pâte d'un mortier ordinaire.....	4
Figure I.2 : Mortier de ciment.....	5
Figure I.3 : Mortier de chaux.....	5
Figure I.4 : Mortier de plâtre .....	5
Figure I.5 : Mortier mixte.....	5
Figure I.6 : Mortier acoustique, mortier de finissage, mortier de maçonnerie.....	6
Figure I.7 : Composition d'un mortier.....	7
Figure I.8 : Poudre de ciment courant .....	8
Figure I.9 : Fabrication de ciment .....	9
Figure I.10: Microphotographie d'un clinker .....	10
Figure I.11 : Sable de carrière et sable de rivière .....	16
Figure I.12 : Composition d'un béton ordinaire.....	21
Figure I.13 : Gravier de rivière.....	23
Figure I.14 : Gravier concassés.....	23
Figure II.1 : Le diagramme $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$ de béton en compression.....	27
Figure II.2 : Test de compression uniaxiale.....	28
Figure II.3 : Boucles d'hystérésis sous charge cyclique en compression.....	28
Figure II.4 : comportement triaxial du béton à faible confinement.....	29
Figure II.5 : comportement en traction directe.....	30
Figure II.6 : comportement en traction par fendage.....	30
Figure II.7 : différents essais de traction d'un béton.....	31
Figure II.8 : Essai de traction par flexion 3points, relation entre la charge P et la flèche V, les phases de comportement.....	32
Figure II.9 : comportement en traction par flexion sous charge cylindrique.....	33
Figure II.10 : Représentation schématique d'un solide poreux.....	34

Figure II.11 : Courbe de distribution de la porosité pour des pates de ciment à divers E / C .....	35
Figure II.12 : comportement du béton en compression simple Chen 1982.....	37
Figure III.1: Différents agents cimentaires.....	41
Figure III.2 : Bois avant et après le recyclage.....	44
Figure III.3 : Déchets de brique en terre cuite à recycler.....	45
Figure III.4: Gravats à recycler.....	45
Figure III.5 : Les étapes de recyclage de bouteilles en verre.....	46
Figure III.6 : Moquettes écologiques obtenues par recyclage du papier.....	47
Figure III.7: Ouate de cellulose (meilleur isolant thermique) obtenue par recyclage.....	48
Figure III.8 : Fonderie d'acier.....	48
Figure III.9 : Quelques variétés du marbre.....	49
Figure III.10: Quelques grains et poudre de marbre des deux carrières Tlemcen et Skikda.....	50
Figure IV.1 : Sable de rivière (0/3).....	52
Figure IV.2 : Ciment (CEM42.5).....	52
Figure IV.3 : Poudre de marbre(0/3).....	54
Figure IV.4 : Les tamis utilisés dans l'analyse granulométrique.....	57
Figure IV.5 : La courbe de l'analyse granulométrique.....	58
Figure IV.6 : La courbe de l'analyse granulométrique du sable et de la poudre de marbre de classe (0/3).....	59
Figure IV.7 : Equivalent de sable.....	60
Figure IV.8 : La masse volumique absolue.....	61
Figure IV.9 : La masse volumique apparente.....	62
Figure V.1 : Moules utilisés.....	67
Figure V.2 : Préparation des pesées.....	67
Figure V.3 : Les étapes du malaxage.....	68

Figure V.4 : Le démoulage et le marquage des éprouvettes.....	68
Figure V.5 : La conservation des éprouvettes dans l'eau.....	68
Figure V.6 : Cône d'Abrams.....	69
Figure V.7 : L'essai d'affaissement au cône d'Abrams et son schématisation.....	70
Figure V.8 : Histogramme d'affaissement des mortiers .....	71
Figure V.9 : Essai d'étalement .....	71
Figure V.10 : Histogramme d'étalement des mortiers.....	72
Figure V.11 : Presse hydraulique Ibertest.....	73
Figure V.12 : Une éprouvette avant, pendant et après la compression.....	73
Figure V.13 : Eprouvette cubiques après l'écrasement.....	73
Figure V.14 : Eprouvette avant, pendant et après l'essai flexion trois points.....	74
Figure V.15 : Eprouvette prismatique après l'essai.....	74
Figure V.16 : Une éprouvette soumise à l'essai de poinçonnement.....	74
Figure V.17 : Dalles après l'essai poinçonnement à 14, 28 et 56 jours.....	75
Figure V.18 : Disposition et remplacement des transducteurs sur l'éprouvette durci.....	76
Figure V.19 : L'acide utilisé dans l'essai de durabilité.....	76
Figure V.20 : La préparation de la solution acide.....	77
Figure V.21 : Courbe de résistance à la flexion trois points obtenue à 14 jours.....	77
Figure V.22 : Courbe de résistance à la flexion trois points obtenue à 28 jours .....	78
Figure V.23 : Courbe de résistance à la flexion trois points obtenue à 56 jours.....	78
Figure V.24 : Force max en flexion des différents mortiers à différents âges.....	79
Figure V.25 : Courbe de résistance à la compression des mortiers à 14 jours.....	80
Figure V.26 : Courbe de résistance à la compression des mortiers à 28 jours .....	80
Figure V.27 : Courbe de résistance à la compression des mortiers à 56 jours .....	81
Figure V.28 : Résistance à la compression des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours.....	82
Figure V.29 : Courbe de résistance en poinçonnement des mortiers obtenue à 14 jours.....	83

Figure V.30 : Courbe de résistance en poinçonnement des mortiers obtenue à 28 jours .....	83
Figure V.31 : Courbe de résistance en poinçonnement des mortiers obtenue à 56 jours .....	84
Figure V.32 : Force max en poinçonnement des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours.....	85
Figure V.33 : Courbes de vitesse d'onde obtenues des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours.....	86
Figure V.34 : Dégradation d'éprouvettes dans le milieu acide.....	86
Figure V.35 : Eprouvettes dégradées aux 7 <sup>ème</sup> et 14 <sup>ème</sup> jours.....	87
Figure V.36 : La perte de masse des mortiers en fonction du temps.....	87



## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les différents types de ciment courants.....	13
Tableau I.2 : Classification des ciments selon la résistance.....	14
Tableau I.3 : Classification des sables en fonction de leur composition granulométrique...	15
Tableau I.4 : Différence entre un mortier et un béton .....	22
Tableau III.1: Utilisation d'ajouts dans les cimentaires Algériennes.....	40
Tableau IV.1 : Caractéristiques physiques du ciment CEM 42.5R.....	52
Tableau IV.2 : Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X.....	53
Tableau IV.3 : Composition minéralogique du ciment par fluorescence X.....	53
Tableau IV.4 : Résistance à la compression et à la flexion du ciment.....	53
Tableau IV.5 : Caractéristiques pétrographiques de la poudre utilisée.....	54
Tableau IV.6 : Composition minéralogiques de la poudre utilisée.....	54
Tableau IV.7 : Caractéristiques physico-mécaniques de la poudre utilisée.....	54
Tableau IV.8 : Caractéristiques chimiques de la poudre utilisée.....	55
Tableau IV.9 : Caractéristiques physiques de la poudre utilisée.....	55
Tableau IV.10 : Analyse granulométrique par le tamisage du sable.....	58
Tableau IV.11 : Analyse granulométrique par le tamisage de la poudre de marbre.....	58
Tableau IV.12 : Module de finesse du sable.....	59
Tableau IV.13 : Composition d'un mortier pour 1m <sup>3</sup> .....	62
Tableau IV.14: Composition de mortiers prismatiques avec différents dosages de la poudre de marbre.....	64
Tableau IV.15: Composition de mortiers cubiques avec différents dosages de la poudre de marbre .....	65
Tableau IV.16 : Composition de mortiers dalles avec différents dosages de la poudre de marbre .....	65

Tableau V.1 : Les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques.....	66
Tableau V.2 : Consistance du béton.....	70
Tableau V.3 : Affaissement des mortiers.....	70
Tableau V.4 : Etalement des mortiers.....	72
Tableau V.5 : Récapitulatif des résultats d'essais de flexion effectués sur différents mortiers.....	79
Tableau V.6 : Récapitulatif des résultats d'essais de compression effectués sur différents mortiers.....	82
Tableau V.7 : Récapitulatif des résultats d'essais de poinçonnement effectués sur différents mortiers.....	84
Tableau V.8 : Le module de Young des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours.....	85
Tableau V.9 : Masses d'éprouvettes sous l'attaque chimique à différents âges .....	87

## Introduction générale :

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessitent d'établir de nouvelles lois et d'adapter de nouveaux concepts. La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace face aux contraintes d'ordres économiques et écologiques de ces dernières années. Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle. Le recyclage et la valorisation des déchets sont aujourd'hui considérés comme une solution d'avenir, afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement. Le recyclage a deux conséquences écologiques bénéfiques: la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles.

On estime que seulement 30% des matériaux utilisés dans la construction sont actuellement recyclés, alors que la pratique dans certains pays européens, démontre que 90% sont réutilisables. En France, la loi du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets et la protection de l'environnement interdit à partir de l'an 2002 la mise dans les anciennes décharges des déchets tels que les matériaux de démolition [1]. Le Danemark dispose d'une loi spécifique depuis 1990 concernant l'utilisation des granulats recyclés. En 2007, l'Europe a élaboré une législation pour encadrer la gestion des déchets [2]. L'Algérie compte un déficit important en matériaux de construction et en particulier le ciment. Face à la gravité des problèmes environnementaux dû à la surexploitation des ressources, le gouvernement algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970 million de dinars, pour atteindre les objectifs inscrits dans le Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) [3].

D'autre part, l'incorporation des additions minérales est maintenant une technique importante en améliorant les propriétés du béton ou du mortier telle que la fluidité, la résistance, la durabilité, etc. ces additions minérales affectent de manière significative la rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais, qui est directement relié avec le développement de la résistance, la durabilité des matériaux durcis. Néanmoins, pour profiter pleinement de ces avantages et ainsi choisir la meilleure solution permettant d'optimiser la formulation, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces nouveaux composants (additions minérales et adjuvants) et leurs actions sur les propriétés des bétons et mortiers.

## **Objectif de l'étude :**

Le but principal de ce travail est de mettre en évidence la possibilité d'utiliser les déchets de marbre comme addition dans le mortier. Cette étude consiste à caractériser le matériau utilisé pour la confection des mortiers et atteindre l'objectif principal suivant :

L'étude de l'effet de l'incorporation de la poudre de marbre issue des déchets de marbreries avec différents dosages sur les propriétés mécaniques et aussi de l'évaluer expérimentalement sur les propriétés physicochimique c.à.d. La durabilité des éprouvettes de mortiers ; -Confectionnés au niveau du laboratoire de béton du département de Génie Civil.

Les éprouvettes confectionnées ont des dimensions suivantes :

- Des cubes de  $5*5*5$  (cm<sup>3</sup>)
- Des prismes de  $4*4*16$  (cm<sup>3</sup>)
- Des dalles de  $3*36*36$  (cm<sup>3</sup>)

En utilisant les essais de l'ultrason ; la compression ; la flexion et le poinçonnement de ces éprouvettes de mortiers à différents âges (14 ; 28 et 56 jours) puis les comparer aux résultats de résistances trouvées pour des éprouvettes d'un mortier témoin (sans ajout de la poudre de marbre) avec les mêmes essais et les mêmes conditions.

## **Organisation du travail :**

Le contenu du mémoire après une introduction générale englobe une partie bibliographique, une partie expérimentale avec une interprétation des résultats obtenus et enfin, une conclusion générale.

La partie bibliographique est divisée en 3 sous-chapitres ;

- Le premier sous-chapitre, porte sur des généralités sur les mortiers et leur composition ainsi que celles du béton.
- Le deuxième sous-chapitre, nous nous sommes intéressé à donner des rappels sur les essais effectués dans ce travail et le comportement mécanique des mortiers suivant ces essais.
- Le troisième sous-chapitre, porte sur la présentation des ajouts minéraux, les ajouts cimentaires et les matériaux recyclés).

La partie expérimentale est divisée en 2 sous-chapitres ;

- Le premier sous chapitre porte les matériaux et formulations.
- Le deuxième sous chapitre porte l'expérimentation et résultats.

Elle traite l'ensemble des matériaux utilisés dans l'élaboration des différents mortiers, la confection des éprouvettes, les résultats obtenus des essais mécaniques, de la durabilité, leurs interprétations et une comparaison des résultats avec le mortier témoin.

### I.1 Introduction :

Les mortiers sont des mélanges, durcis ou non, de sable, de liant(s) et d'eau, avec ou sans adjuvants et additifs. Ils peuvent être très différents les uns des autres suivant la nature et le pourcentage des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure. [4]

On distingue, en générale, trois types de mortiers:

- Les mortiers pour utilisation générale.
- Les mortiers pour fines couches.
- Les mortiers allégés.

Les mortiers sont utilisés dans la plupart des travaux de scellement ou de coffrage ; leur fabrication est facile mais elle nécessite néanmoins un certain savoir-faire et demande de bien respecter les bons dosages qui peuvent varier en fonction des besoins. Leur rôle est d'attacher les briques les unes aux autres et de répartir les charges.

Les mortiers bien composés ont une compacité maximale (c'est-à-dire un minimum de vide). Ils doivent être compacts ; ils seront alors composés d'un volume de ciment pour deux à trois volumes de sable, et enfin d'un tiers d'eau.

Un mortier n'est autre chose qu'un béton à grains fins ; il est donc soumis aux mêmes lois que les bétons. [4]

Les professionnels du bâtiment qui utilisent le mortier sont le maçon, le couvreur, le carreleur et le tailleur de pierre. Jadis, la fonction était dévolue au mortelier.



**Figure I-1: pâte d'un mortier ordinaire**

## I.2 Classification des mortiers :

### I.2.1 En fonction de leur masse volumique, à l'état sec les mortiers sont divisés en : [4]

- **Mortiers lourds** à masse volumique de  $1500 \text{ Kg/m}^3$  et plus ; pour la préparation de ces mortiers on utilise des sables lourds quartzeux et autres ;
- **Mortiers légers** à masse volumique inférieure à  $1500 \text{ Kg/m}^3$  dont les agrégats sont des sables poreux et légers de pierre ponce, de tuf, laitiers, céramistes et autres fins agrégats légers.

### I.2.2 D'après la nature du liant, on distingue :

- **Mortiers de ciments**, préparés au portland ou ses variétés.
- **Mortiers de chaux**, où une chaux aérienne ou hydraulique est employée en qualité de liant
- **Mortiers de plâtre** préparé à base de liants gypseux, à savoir les plâtres et les liants d'anhydrite
- **Mortiers mixtes** obtenus en utilisant les liants de ciment à la chaux et ciment à l'argile

Le choix du type de liant est fait suivant la destination du mortier, les exigences requises, les conditions de températures et d'humidité pendant le durcissement et les conditions d'exploitation du bâtiment.



Figure I-2: mortier de ciment



Figure I-3: mortier de chaux



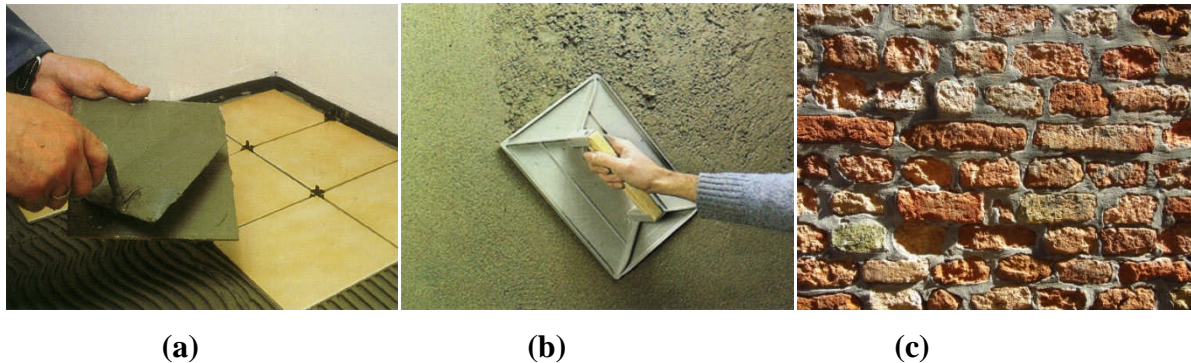
Figure I-4: mortier de plâtre



Figure I-5: mortier mixte

**I.2.3 Suivant leur emploi :** les mortiers se subdivisent en :

- **Mortiers de maçonnerie**, pour la pose des murs en pierres ou en gros éléments.
- **Mortiers de finissage**, pour les enduits, pour la confection des éléments d'architecture, pour porter les couches décoratives sur les blocs et panneaux de murs.
- **Mortiers spéciaux** possédant quelques propriétés très accusées ou propriétés particulières (acoustique, de tamponnage, de protection contre les rayons X, etc.) ; ils ne sont que rarement employés.



**Figure I-6 : (a) mortier acoustique, (b) mortier de finissage, (c) mortier de maçonnerie**

### I.3 Propriétés de mortiers :

Les propriétés principales d'une pâte d'un mortier sont : [4]

**I.3.1 La fluidité :** une pâte de mortier peut avoir, suivant les composants des consistances différents, depuis sèche jusqu'à fluide. Les mortiers de maçonnerie, de travaux de finissage des bâtiments et autres se font suffisamment fluides. On exprime la fluidité d'une pâte d'un mortier par la profondeur d'enfoncement dans la pâte d'un cône métallique pesant 300g et ayant un angle au sommet de 30°.

**I.3.2 La maniabilité :** elle est déterminée par la fluidité c'est-à-dire : le pouvoir de se poser sur une surface, avec une dépense minimale d'énergie, sous forme d'une couche de densité uniforme fortement adhérent à la surface de base. Une composition préparée à un ciment portland seul contient peu de pâte de ciment ; une telle composition est sèche et peu maniable. Dans ce cas on se sert des adjuvants plastifiants minéraux ou organiques superficiellement actifs.

**I.3.3 Le pouvoir de retenir l'eau :** cette caractéristique est caractérisée par la propriété de la pâte de ne pas se stratifier pendant le transport et de conserver assez d'eau dans la couche fine sur une base poreuse. Une pâte de mortier à l'hydrophile basse se stratifie au court de transport et lorsqu'on la pose sur une surface poreuse (brique d'argile, béton, bois), elle lui restitue rapidement l'eau. La dessiccation du mortier peut être si importante qu'il n'y aura

plus suffisamment d'eau pour le durcissement du mortier qui ne pourra pas atteindre la résistance requise. Le pouvoir de retenir de l'eau peut être augmenté par l'introduction des plastifiants minéraux et organiques.

**I.3.4 La résistance mécanique d'un mortier** ; après durcissement, la résistance mécanique du mortier dépend de l'activité du liant et du rapport ciment-eau. La formule empirique suivante proposée par le professeur N. Popov [4] exprime la résistance des mortiers à ciments portland :

$$R_m = 0.25 R_c (C/E - 0.4)$$

$R_c$  : l'activité du ciment en Pa.

$C/E$  : le rapport ciment-eau.

Cette formule est valable pour les mortiers posés sur une base compacte ; si la base est poreuse, elle aspire l'eau du mortier en le rendant compact ; la résistance croit de 1.5 fois à peu près.

La résistance mécanique des mortiers dépend aussi de la consommation du ciment et de la qualité de sable.

#### I.4 Composition d'un mortier :

Les mortiers sont en fait des micro- bétons et leurs principes de compositions sont les mêmes. [5]

Ils sont composés de ciment, de sable, d'eau et d'adjuvants. On peut les schématiser par la figure ci-contre :

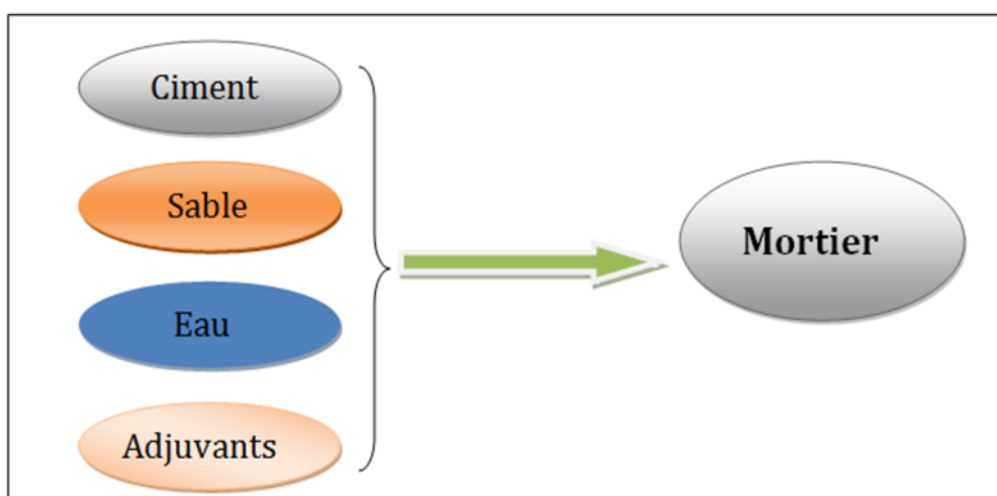


Figure I-7: composition d'un mortier

### I.4.1 Ciment :

Le ciment est une poudre minérale fine, principal composant de bétons et de mortiers, auxquels il confère un certain nombre de propriétés, et notamment leurs résistances. Il s'agit d'un matériau de construction de haute qualité, économique, utilisé dans les projets de construction du monde entier.



**Figure I-8: poudre de ciment courant**

C'est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui, mélangée avec de l'eau, forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps [6].

Cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. Il est obtenu par broyage et cuisson à 1450°C, d'un mélange de calcaire et d'argile.

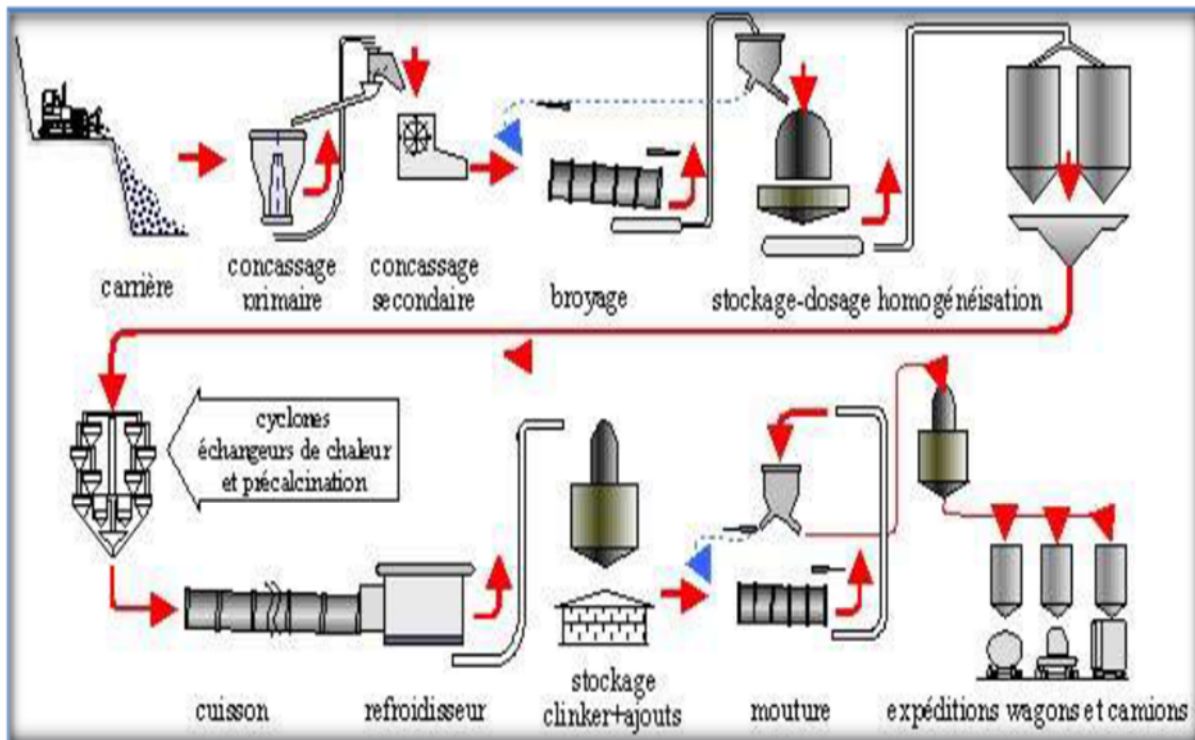
#### I.4.1.1 La fabrication du ciment :

La fabrication de ciment s'effectue en différentes étapes, à savoir :

- L'extraction : l'argile et le calcaire sont extraits de carrières rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. Puis il est interposé après échantillonnage.
- L'homogénéisation : procédé consistant à créer un mélange homogène des composants.
- Le séchage : méthode préconisée pour favoriser la réaction chimique lors de la cuisson.
- La cuisson : les composants sont chauffés à 1400° C afin d'obtenir un produit présenté sous forme de granules grises.
- Le refroidissement : opération qui consiste à refroidir les particules au travers de grilles à l'aide d'un puissant ventilateur.

- Le broyage : étape indispensable destinée à faciliter le mélange avec l'eau ( des ajouts d'éléments minéraux sont dissous afin de faciliter la prise du ciment).

Ces étapes sont illustrés dans la figure ci- contre : (la Figure I-9)



**Figure I-9: Fabrication du ciment**

Il existe différentes catégories de ciments, selon la composition chimique des matières premières, les ajouts éventuels de constituants complémentaires au moment du broyage et la finesse du produit. Chaque catégorie de ciment correspond à des applications spécifiques telle que la construction résidentielle, la construction d'ouvrage d'art, les travaux souterrains ou encore la réalisation de bétons soumis à des milieux agressifs.

Les ciments courants ont pour constituants principaux : le clinker ( auquel il peut être ajouté suivant leur type): du laitier du haut fourneau, des cendres volantes, de la pouzzolane naturelle... encore des constituants secondaire qui sont réellement l'un des constituants cités précédemment s'ils sont en proportion  $\leq 5\%$  exception faite du clinker, aussi soit des fillers (F) leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse  $3\%$  ; dans le but de modifier certains de leur propriétés et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certains ouvrages, soit en raison des conditions d'environnement, soit pour des raisons de performances mécaniques [6].

### I.4.1.2 Constituants principaux

Le ciment courant a pour constituant le clinker, auquel il peut être ajouté suivant leur type : du calcaire, du laitier de haut fourneau, des cendres volantes, des fines calcaires, de la pouzzolane naturelle, des schistes calcinés, des fumés de silice, dans le but de modifier de leur certaines propriété et de proposer une gamme de produits capables de résoudre les différents problèmes qui se posent lors de la réalisation de certain ouvrages, soit en raison des conditions environnementales soit pour des raison de performances mécaniques.

#### a) Clinker portland :

Obtenu par la cuisson des matières premières constituées principalement de calcaire, d'argile et autres de correction, est un matériau hydraulique se présentant sous forme de petits nodules très dures composés essentiellement des quatre phases cristallines suivantes :

-silicate tricalcique :  $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) qui libère une quantité de chaleur donnant au ciment une résistance rapide et élevée (résistance aux premiers âges).

-silicate bicalcique :  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et à long terme.

-aluminat tricalcique :  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale d'où l'obtention de résistance initiale élevée (contribue essentiellement à la prise de la pate de ciment).

-alumino-ferrite tétracalcique :  $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ), qui forme une solution solide de  $\text{C}_2\text{A}$  et  $\text{C}_2\text{F}$  En dehors de ces quatre principales phases, le clinker comporte également :

-la chaux libre dont le pourcentage  $\leq 2\%$  pour ne pas risquer de provoquer une expansion en présence d'eau.

-de l'oxyde de magnésium  $\text{MgO}$  qui peut être à l'origine d'une réaction avec l'eau.

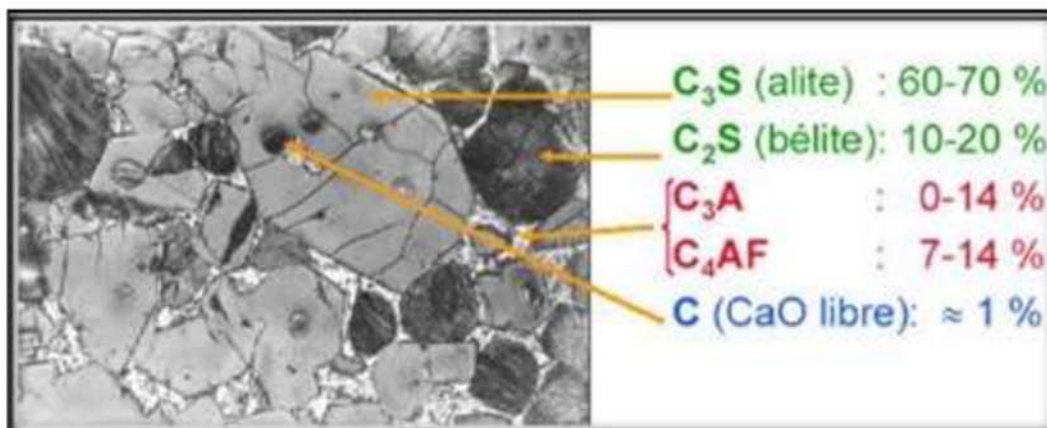


Figure I-10: Microphotographie d'un clinker

**b) Laitier de haut fourneau :**

Sous produit de fabrication de fonte brusquement refroidi avec aspiration d'eau, est un matériau hydraulique dont la composition chimique est : l'oxyde de calcium (40 à 50%), la silice (25 à 35%), l'alumine (12 à 30%) et la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. Le laitier retient moins bien l'eau de gâchage que le Portland et craint donc davantage la dessiccation.

**c) Cendres volantes :**

Sont des produits pulvérulents de grande finesse qui proviennent de dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. Elles peuvent être :

- siliceuses, constituées de silice réactive (40 à 55%) et d'aluminium (20 à 30%).
- calciques avec une proportion de chaux réactive supérieure à 5%.

**d) Pouzzolanes naturelles :**

Sont des produits d'origine des roches volcaniques ou sédimentaires. Elles sont composées de silice réactive (dans des proportions  $> 25\%$ ), d'alumine et d'oxyde de fer.

**e) Schistes calcinés :**

Ces produits, obtenus à des températures de l'ordre de  $800^{\circ}\text{C}$ , présente, outre leurs propriétés pouzzolaniques, des propriétés hydraulique lorsque qu'ils sont finement broyés.

**f) Fumée de silice :**

Constituées de particules environ 100 fois plus petites que les grains de ciment avec un diamètre moyen de l'ordre de  $1/10$  de micron, présentent des propriétés pouzzolaniques en raison de leur forte teneur en silice amorphe. En outre, en raison de leur finesse, elles complètent la granulométrie du ciment. Ces deux effets entraînent à la fois une forte augmentation de la compacité et une amélioration des résistances mécaniques du fait de la réaction pouzzolanique des fumées de silice.

**I.4.1.3 Constituants secondaires**

Ils peuvent être :

- Soit des constituants définis précédemment s'ils sont en proportion  $\leq 5\%$  (exception faite du clinker).

- Soit des fillers, leur nature exacte et leur proportion devant d'ailleurs être précisées par le fabricant dès que cette proportion dépasse 3%.

Lorsque le constituant secondaire est un filler, il s'agit de poudres minérales très fines, généralement inertes mais pouvant parfois présenter des propriétés légèrement hydrauliques ou pouzzolaniques. Ces poudres peuvent améliorer la maniabilité du ciment, ce qui conduit à une augmentation de la maniabilité du béton.

- **Sulfate de calcium :**

Peut être de gypse, de l'anhydrite ou l'hémidydrate, doit être ajouté en faible quantité 3 à 5% maximum. Son rôle est de réguler la prise du ciment.

#### **I.4.1.4 Additifs**

Ne doivent pas présenter aucune action nocive sur les propriétés des ciments mais ils peuvent, suivant les cas, modifier certaines de leurs caractéristiques.

- Agent de mouture, fréquemment employés, ce sont des sels organiques solubles à des doses extrêmement faibles. Ils agissent comme déflaquants empêchant la réagglomération des grains en cours de broyage.
- De sels solubles, tels certains adjuvants pour mortiers, béton ou coulis qui, agissent sur une caractéristique bien précise mais dont la présence dans le ciment doit être obligatoirement indiquée pour éviter d'éventuelle incompatibilité avec d'autres produits.

#### **I.4.1.5 Classification des ciments courants : [7]**

On distingue 4 principales catégories de ciments qui sont :

- Le ciment portland artificiel (C.P.A) qui contient au moins 97% de clinker, le reste est du filler.
- Le ciment portland composé (C.P.J) qui contient au moins 65% de clinker, le reste est l'un ou plusieurs des constituants définis précédemment.
- Le ciment de haut fourneau (C.H.F) qui contient entre 60 et 75% de laitier le reste de constituants est du clinker ou du filler dans la limite de 3% de l'ensemble des constituants.
- Le ciment de laitier au clinker (C.L.K) qui contient au moins 80% de laitier, le reste est du clinker ou du filler dans la limite de 3% également.

Le tableau (I.2) ci –dessous donne la liste des différents types des ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d’eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu’ils comportent. [6]

désignations	Types de ciments	Teneur en clinker	Teneur en% de l’un de constituants suivant : laitier-pouzzolanes-cendres-calcaires-schistes-fumées de silice	Teneur en constituants secondaires (filler)
C P A- CEM I	Ciment portland	95à100%		0 à 5%
C PJ-CEM II/A	Ciment portland Composé	80à 94%	-de 6à20% de l’un quelconque des constituants, sauf dans les cas ou les constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10%	0à5%
CPJ-CEMII/B		65 à79%	-de 21à35%avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0à5%
CHF-CEM III/A	Ciment de haut-fourneau	35à64%	-35à65% de laitier de haut-fourneau	0à5%
CHF-CEM III/B		20à34%	-66à80% de laitier de haut-fourneau	0 à5%
CLK-CEMIII/C		5à19%	-81 à95% de laitier de haut-fourneau	0à5%
CPZ-CEMIV/A	ciment pouzzolanique	65 à90%	-10à35%de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à10%.	0à5%
CPZ-CEMIV/B		45à64%	-36à55%comme ci-dessus	0à5%
CLC-CEM V/A	Ciment au laitier et aux cendres	40à64%	-18à30% de laitier de haut-fourneau et 18 à30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0à5%
CLC-CEM V/B		20à39%	-31 à50%de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0à5%

Tableau I-1 : Les différents types de ciment courants [6]

Les ciments courants sont classés en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression ; exprimées en MPA à 28 jours ( $1 \text{ MPA} = 1 \text{ N/mm}^2 = 10 \text{ Bars}$ ). Spécifiant une limite inférieure et une limite supérieure dont les valeurs sont les suivantes (tableau I-2) : [6]

Classe des ciments	Résistance à 2 jours	Résistance minimale à 28 jours	Résistance maximale à 28 jours
32.5	/	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
32.5R	$\geq 13.5$	$\geq 32.5$	$\leq 52.5$
42.5	$\geq 12.5$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
42.5R	$\geq 20$	$\geq 42.5$	$\leq 62.5$
52.5	$\geq 20$	$\geq 52.5$	/
52.5R	$\geq 30$	$\geq 52.5$	/

**Tableau I-2: classification des ciments selon la résistance**

Les classes «R», rapides, présentent aux jeunes âges des caractéristiques mécaniques plus élevées et trouvent leurs intérêts particulièrement dans certaines circonstances telles que le bétonnage par temps froid, décoffrage rapide, préfabrication...

#### I.4.2 Sable :

Le sable, dans le domaine de la construction, avant d'être un matériau qu'on prend à la pelle ou à la truelle, fait l'objet de description et de prescriptions normatives. Pour la confection de mortiers, bétons et enduits.

Dans le sens le plus courant, on entend par sable la fraction des granulats pierreux comprise à l'intérieur d'une fourchette de 0.08 et 5mm. En réalité, cette définition, purement granulométrique, est un peu fluctuante ; elle peut varier suivant les époques et les pays ; elle diffère suivant les utilisations. [8]

D'une manière arbitraire, les sables sont divisés en trois classes :

- Le sable fin : composé de grains de 0.08 à 0.5mm
- Le sable moyen : composé de grains de 0.5 à 2mm
- Le sable grossier : composé de grains de 2 à 5mm

On peut classer les sables selon leurs dimensions dans le tableau suivant :

Type de sables	Dimensions maximum des grains en (mm)
Fines	0.1
Sables fins	0.5
Sables moyens	2
Sables gros	5

**Tableau I-3 : classification des sables en fonction de leur composition granulométrique.**

Les sables sont classés en fonction de leur origine. On distingue deux grandes catégories : les sables naturels et les sables artificiels. Les sables naturels, pour des raisons d'ordre économique et technique, sont les plus utilisés dans le domaine des bétons. Dans un avenir plus ou moins proche, pour divers raisons (épuisement des gisements, contraintes d'urbanisation, ...), il est prévu une augmentation de l'utilisation de sables artificiels. [8]

L'importance du sable dans un mortier est reconnue depuis une longue date. Ainsi en 1728, dans l'architecture moderne ou l'art de bien bâtir, on lit :

«Il se trouve tant d'espèces de sable qu'un volume ne suffirait pas pour en décrire toutes les différentes qualités, on dira seulement ici que le sable de mer ne vaut rien pour faire mortier, quoiqu'à Palerme il se trouve un endroit où il est fort bon ; que le sable pour qu'il puisse faire de bon mortier doit être dénué de parties grasses et terreuses qui l'empêchent de se lier avec la chaux ; pour cette effet le sable de rivières rapides, ou de torrents est excellent : il se trouve en fouillant les terres un sable qu'on nomme communément terrain, il y en a beaucoup en France et dans les autres pays, il s'en trouve de gris, de rouge, de jaune et d'autres couleurs qui ne font rien à sa bonté en le mouillant et le frottant sur du drap ou du linge, qu'il ne doit pas salir comme le ferait la fange : on trouve aux environs de Rome et de Naples une espèce de sable qu'on tire de terre et qu'on appelle Pousolanne qui est admirable pour faire du mortier et dont la qualité est de durcir au fonds de l'eau : si l'on veut examiner les grains de sable, on trouvera que ceux qui sont transparents comme du verre, tel que notre Sablon d'Estampes et le Grais pilé, ne peuvent pas faire une bonne liaison avec la chaux, il faut au contraire qu'ils soient remplis de petits cailloux opaques comme de petits morceaux de pierre ; c'est ce qui a fait dire à Léon Baptiste que le meilleur de tous les sables est celui qui n'est composé que de pierres dures rompues et cassées en miettes ». [9]

On distingue trois groupes de sable selon la composition chimique :

- **Les sables siliceux** ; ils proviennent de la décomposition de roches granitiques ou gréseuses, constitués de silice quasiment pure, ils sont dits quartzeux, ils peuvent contenir des feldspaths et des micas.
- **Les sables calcaires** ; ils sont issus de la décomposition de roches calcaires, certains peuvent être composés de débris de coquillages.
- **Les sables de carrière** ; ils sont formés par un mélange silico-calcaire.



**Figure I- 11: sable de carrière et sable de rivière**

Le sable est le constituant du squelette granulaire qui a le plus d'impact sur le mortier. Il joue un rôle primordial en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées et le prix de revient des bétons et des mortiers.

Généralement on utilise du sable de rivière ou de carrière débarrassé des impuretés, jamais de sable marin (qui contient toujours un peu de sel qui attaque les aciers et dans certains cas, il contient des résidus de coquillage qui sont de moindre résistance) ou de sable de remblai ; car ils contiennent des éléments néfastes pour la qualité du béton et du mortier.

On ne doit employer, pour la fabrication des mortiers, que du sable non ferreux, soit de carrière soit de rivière, rude au toucher et criant à la main. On doit éviter surtout l'emploi de sable mélangé à des matières argileuses qui sont susceptibles de faire pâte avec l'eau et qui n'ont, elles-mêmes, aucune cohérence... [9]

### I.4.2.1 Les caractéristiques de sable : [8], [9]

- ❖ **La granularité** : le choix d'un sable dépend en grande partie des critères granulométriques. Dans le domaine des bétons, les spécifications cherchent un sable capable de rendre une compacité maximale (optimale) qui répond à la fois à des conditions de bonnes maniabilités et de résistances. Ces caractéristiques dépendent de l'arrangement des grains, c'est-à-dire d'une granularité étalée ou les vides entre les grains grossiers sont comblés par les grains plus fins.
- ❖ **La minéralogie** : elle a une incidence sur la dureté et sur l'adhérence liant-granulats ; La présence de certains minéraux doit être limitée ou même évitée car ils sont incompatibles avec les liants hydrauliques. Un sable à produits tendres (calcaires ou craies) ou à grains altérés, lorsqu'ils font partie du béton durci auront une très faible contribution à la résistance. Les sables micacés riches en minéraux phylliteux présentent des adhérences médiocres.
- ❖ **La propreté** : la propreté d'un granulats ne constitue pas une des caractéristiques intrinsèques comme l'est, par exemple, la durabilité, mais elle est basée sur des critères relatifs qui dépendent d'une utilisation. Ainsi, tel sable considéré comme "pollué" pour le béton pourrait, en fait, être très apte à d'autres applications. Nous voyons que la propreté traduit à la fois la granularité, c'est -à-dire la proportion et la dimension des éléments les plus fins, et la minéralogie.
- ❖ **La granulométrie** : c'est la détermination de la granularité par une mesure physique. Déjà Vitruve avait établi l'importance du choix du sable, selon la nature de la chaux utilisée. Au XVIII<sup>e</sup> siècle, Vicat a classé les types de sables en fonction des chaux que l'on utilisait :
  - Pour les chaux éminemment hydrauliques : sables fins, sables à grains inégaux résultant du mélange (soit du gros sable avec le fin, soit du fin avec le gravier) et les gros sables.
  - Pour les chaux communes, grasses et très grasses : les gros sables, les sables mêlés, les sables fins.
- ❖ **Le foisonnement** : c'est l'augmentation de volume que subit un sable, lorsque sous l'influence des forces capillaires, il se gorge d'humidité ou lorsqu'il est remué. Un sable pesé sec a un poids de 20% plus élevé qu'un sable contenant 2% d'eau. Il est donc essentiel de tenir compte de ce phénomène lors du dosage de l'agrégat.

- ❖ **Les fines** : il faut faire attention à ne pas avoir trop de fines dans le sable, celles-ci augmentent le retrait et aussi baissent la résistance.
- ❖ **La densité** : varie en fonction de la nature du sable, de sa composition granulométrique, de son tassement, mais aussi de son degré d'humidité.
- ❖ **La compacité** : correspond au rapport entre le volume des agrégats inertes et le volume occupé par le mortier. La bonne compacité est réalisée en utilisant un sable contenant 2/3 de gros grains et 1/3 de grains fins. On emploie moins d'eau et moins de liant dans ce mélange. La bonne compacité d'un sable permet l'obtention d'un mortier où chaque grain de sable établit un contact direct avec les autres grains, elle favorise la grande dureté des mortiers.

### I.4.3 L'eau :

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci. [10]

Tout comme les autres composants du mélange, elle doit être propre et ne contient aucune substance qui pourrait avoir une influence négative sur les propriétés (Physique et mécanique : prise et résistance ; La durabilité : stabilité et corrosion des armatures), et ne doit pas être ajoutée avec excès. Si ces deux conditions ne sont pas respectées, on risque d'avoir un matériau fragile avec des performances altérées. Son dosage, doit faire preuve d'une attention particulière : trop d'eau dans le béton ou bien le mortier, entraîne la naissance de fissures et une perte de résistance au moment du séchage.

Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants entre eux. L'eau rend également le mélange bien plus maniable, ce qui facilite l'application du béton / mortier.

Dans la catégorie des eaux susceptibles de servir à la confection de béton, on trouve :

- Les eaux potables ;
- Les eaux de recyclage ;
- Les eaux de pluie et des ruissellements.

A coté, les catégories d'eau qui ne doivent pas être utilisées :

- Les eaux usées ;
- Les eaux vannes ou contenant des détergents ;
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organiques ou chimiques.

#### **I.4.4 Adjuvants :**

Les adjuvants sont utilisés depuis très longtemps mais leur développement réel et la multiplication de leur utilisation n'ont commencé que depuis 1960 [11]. Leur qualité et leur constance s'améliorent sans cesse.

Depuis la découverte de ses propriétés dispersantes exceptionnelles, le matériau béton connaît une véritable évolution, offrant ainsi aux concepteurs et aux ingénieurs un produit de plus en plus performant : résistance, durabilité, aspect de surface, porosité interne, ouvrabilité, couleurs, sont parmi les plus grands bénéficiaires des avancées scientifiques et techniques réalisées.

Les adjuvants sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés en faible quantité moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution, avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton ou du mortier, qu'ils seront à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à la l'état durci. Certains ont des fonctions secondaires. Ils ne doivent pas altérer les caractéristiques des composants du béton ou du mortier. Ils sont à la base des bétons modernes.

La raison de l'utilisation croissante des adjuvants est qu'elle confère physiquement et économiquement au béton des avantages considérables. Ces avantages comprennent, entre autres, l'utilisation de béton dans des conditions qui présentaient auparavant des difficultés considérables, voir insurmontables. Ils permettent l'utilisation d'une grande gamme de matériau dans le béton. [12]

##### **I.4.4.1 Les types d'adjuvants :**

Les principaux adjuvants sont : [13], [14], [15], [12], [11]

- ❖ **Accélérateur de prise du ciment :** Ce sont, en général, des sels minéraux. De nombreux composés chimiques ont été utilisés comme accélérateurs de prise, le plus ancien et le plus connu étant le chlorure de calcium. Ils sont utilisés dans le bétonnage en temps froid,

il est conseillé de les utiliser, pour but de provoquer les réactions d'hydratation et accélérer le durcissement freiné par la température ambiante. Ils permettent de réduire les délais de chantier, car ils permettent d'obtenir les résistances prévues pour 28 jours à des âges avancés.

- ❖ **Retardateur de prise du ciment** : Ce sont des produits, le plus souvent des substances organiques, qui retardent la progression de l'hydratation du ciment pendant un certain temps. Comme conséquence de cette prolongation du temps de prise et de durcissement, le développement de la résistance au jeune âge est aussi prolongé avec une augmentation de la résistance à la compression à long terme.

Il est conseillé de les utiliser en temps chaud ou bien d'éléments massifs, pour freiner les réactions d'hydratation et aussi réduire la chaleur au cœur du béton, de manière à ce que les propriétés soient réservées et y aura pas de fissures. Ils sont aussi employés pour éviter toute discontinuité lors de reprises de bétonnage.

- ❖ **Les fluidifiants (réducteurs)** : Ces produits jouent un double rôle, ils sont utilisés pour fluidifier le béton et permettre le maintien du rapport E/C (Eau / Ciment) constant (fixé pour une résistance souhaité. Ils permettent aussi, dans certains cas, de réduire le rapport E/C pour avoir une meilleure résistance tout en ayant la même fluidité du béton. Dans le premier cas, l'ajout du fluidifiant va permettre d'avoir des bétons de même classe de résistance mais de consistance variable ; allant d'un béton ferme, béton plastique, béton très plastique jusqu'au béton auto-plaçant. Dans le cas des bétons auto-plaçant, on utilise des superplastifiants qui sont des fluidifiants très puissants.

- ❖ **Les entraîneurs d'air** : Ils permettent d'entraîner, à l'intérieur du béton, des microbulles d'air parfaitement répartis qui serviront d'espace d'expansion dans le béton durci. Ces microbulles permettent d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel et du dégel. Ils améliorent la résistance du béton sous l'action des incendies.

- ❖ **Les superplastifiants** : Ce sont des produits chimiques permettent de réduire La teneur en eau du béton jusqu'à 30% (c'est un super réducteur d'eau), c'est-à-dire trois ou quatre fois plus qu'un réducteur d'eau normal. son utilisation a plusieurs avantages principaux, comme ; la production de béton de haute ouvrabilité sans réduire la teneur en ciment et la

valeur de la résistance et la production d'un béton contenant moins de ciment, mais ayant une résistance et une ouvrabilité normale.

## I.5 Composition des bétons :

### I.5.1 Définition :

Le béton est l'union de matériaux hétérogène constitué de granulats, sable et de pate (ciment, eau) .La pate de ciment représente 25% à 40%(voir le tableau I- 3) du volume total du béton [16].

Chaque constituant joue un rôle bien défini : liant hydraulique pour la pate de ciment, remplissage atténuateur de variations volumiques (retrait) est la source de la résistance pour les granulats.

Un béton hydraulique est constitué :

- D'une pate pure (ciment, eau),
- D'un mélange granulaire,
- De produits additions (adjuvants, additions minérales)

On désigne habituellement sous le nom :

- De matrice ou de mortier :(liant+sable+eau),
- De squelette solide ou granulaire : mélange de granulats.

On peut les schématiser sur la figure ci- contre :

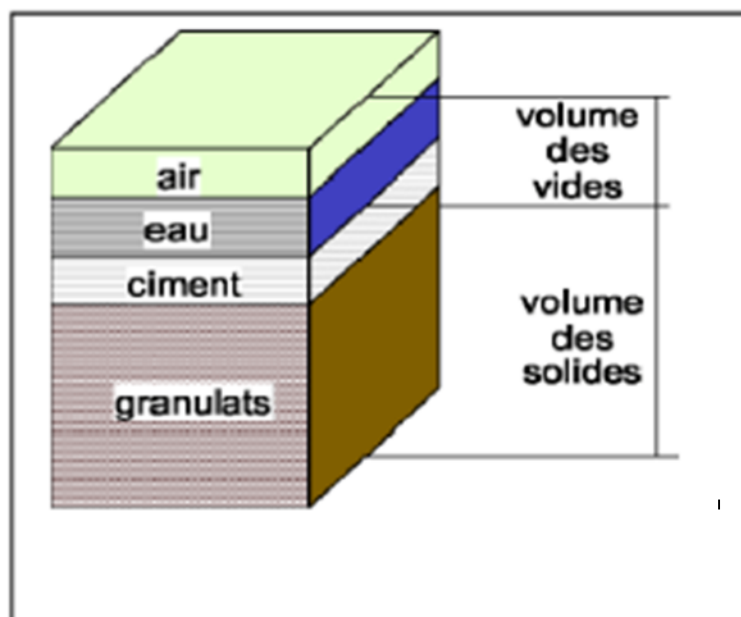


Figure I-12: composition d'un béton ordinaire

### I.5.2 Les constituants du béton :

Le béton hydraulique est constitué de mêmes composants que le mortier, sauf dans le mélange granulaire ; pour un mortier on utilise du sable fin alors que dans un béton on utilise du sable moyen ou gros, gravillons et cailloux.

	Gravillons et cailloux	Dénomination de sable
<b>Béton</b>	Indispensables	Moyen ou gros
<b>Mortier</b>	Non	Fin

**Tableau I-4: Différence entre un mortier et un béton**

L'étude d'une composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soit celles recherchées pour la construction de l'ouvrage [17].

Il existe de nombreuses méthodes dont on retiendra 2 types :

- Celle qui consiste à obtenir une granulométrie « continue ».
- Celle qui consiste à obtenir une granulométrie « discontinue ».

### I.5.3 Les granulats (sables, gravillons) :

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle.

La granularité et la forme de granulats sont fonction de processus d'élaboration [18]. Nous distinguons les granulats extraits de ballastières naturelles ou des rivières (lisses, c'est les plus recherchés), et les granulats concassés obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières ; les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées [19].

Les granulats (sable et gravier) constituent le squelette du béton, ils sont définis comme un ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 12.5 mm. [20]

Dans le béton frais, les granulats servent au remplissage de l'espace (ils occupent environ 70%). De volume de plus en raison de leur porosité ouverte, ils peuvent absorber une certaine quantité d'eau (effet de mouillage). Dans le béton durci, les granulats apparaissent comme des inclusions dures.

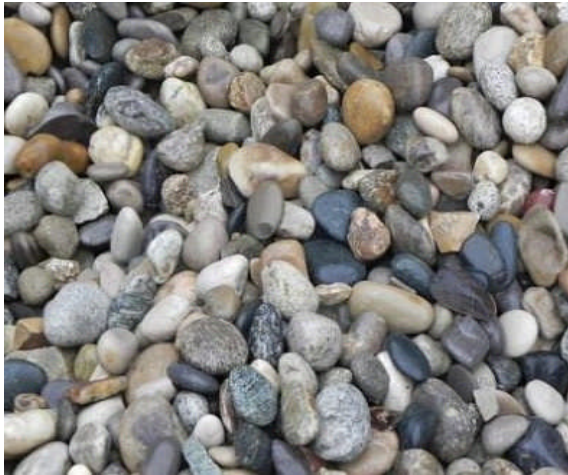
Ils ont un rôle important dans la résistance mécanique et dans la consistance du béton de plusieurs manières :

- leur qualité mécanique ;
- leur capacité d'adhérence avec la pâte du ciment ;
- leur forme (roulés ou concassés) ;
- leur diamètre maximal des granulats.

**Remarque :**

Il faut impérativement que le gravier soit débarrassé de la boue et des saletés qu'il pourrait contenir avant de l'incorporer dans le béton.

Il existe différents calibres de gravier. Les plus gros calibres sont utilisés en général pour les fondations et le gros œuvre.



**Figure I-13: graviers de rivière**



**Figure I-14: graviers concassés**

**I.5.4 Différentes types de béton :**

Les différents types de bétons qui existent sont les suivants :

- Béton à haute performance BHP.
- Bétons à très hautes performance «BHTP», appelé aussi béton du futur.
- Béton de granulats légers.
- Béton cellulaire.
- Béton lourds.
- Béton à base de résines.
- Béton de fibres.

### **I.5.5 Critères en fonction de la destination des bétons :**

Les ouvrages que l'on construit aujourd'hui en béton sont des plus divers tant dans leur destinations que dans leurs dimensions et toutes études de composition de béton doit en tenir compte. Il convient donc d'en définir les critères qui devront constituer clairement les données de l'énoncé du problème que pose l'étude de la composition d'un béton destiné à un ouvrage donné.

Quatre critères principaux doivent être retenus [17] :

- La dimension maximale des granulats ;
- Les résistances ;
- L'ouvrabilité ;
- L'agressivité du milieu ambiant ;

Ces critères sont retenus dans la norme P 18-305 concernant les bétons prêts à l'emploi préparés en usine et sont la base de l'énoncé du problème dans la méthode de Dreux et Gorisse [17].

### **I.6 Les déchets et les matériaux innovants :**

Les professionnels de la construction, de plus en plus confrontés aux questions liées à la préservation de l'environnement, font face depuis quelques années à des difficultés d'approvisionnement en matière première. D'autre part, le secteur du bâtiment produit une quantité très importante de déchets, qui sont encore trop souvent déposés en installation de stockage. La valorisation de ces déchets devient un enjeu environnemental majeur.

#### **I.6.1 Définition des déchets : [21]**

Un déchet est défini comme « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire ».

En fonction de leurs types et de leurs origines, les déchets ont un niveau de dangerosité variable qui, dans certains cas, peut être préjudiciable à l'homme et à l'environnement. Les déchets peuvent être classés en trois catégories :

- Les déchets dangereux, qui présentent une ou plusieurs propriétés dangereuses (comburant, inflammable, explosif, corrosif, cancérigène...)
- Les déchets non dangereux, se sont les déchets qui ne contiennent pas de matières dangereuses ou bien toxiques. Ils sont assimilables aux déchets de consommation ou à des ordures ménagères.

- Les déchets inertes, qui ne sont pas dangereux et ne contiennent pas de constituants évolutifs. Ils « ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine ». Ils proviennent essentiellement du secteur du BTP.

Ils existent plusieurs objectifs de l'utilisation des déchets, Les principaux d'eux sont :

- Réduire la production des déchets ;
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, des matériaux réutilisables ou de l'énergie ;
- Assurer l'information du public sur les effets pour l'environnement et la santé public.

### **I.7 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a tenté de faire une synthèse bibliographique sur le mortier, ses classes et ses constituants ainsi que du béton ordinaire, notamment le sable et le ciment, en présentant certains résultats de recherches relatifs à la valorisation de chaqu'un d'eux dans la fabrication du mortier ou du béton.



## II.1 Introduction :

Par le terme propriétés, on entend les caractéristiques qui déterminent le comportement d'un matériau sous l'effet des forces extérieures. Parmi les caractéristiques mécaniques nous avons : la résistance à la traction, à la compression, à la flexion...Etc. Ces différentes caractéristiques sont déterminées par des essais normalisés.

Leur évolution est souvent attribuée à la matrice liante (ciment + fines) du béton. La perte de résistance mécanique ainsi que la diminution du module élastique à basses températures sont directement liés au phénomène de la déshydratation des ciments

Les caractéristiques mécaniques d'un matériau sont à la base de la construction et de la sécurité d'un ouvrage. Il est donc nécessaire de posséder les connaissances les plus étendues sur ces caractéristiques [22].

Dans ce qui suit nous présentons une étude bibliographique portant sur les différents essais, et le comportement du béton en chacun des essais cités avant.

## II.2 Essai mécaniques :

### II.2.1 Compression :

#### II.2.1.1 Définition :

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, cubique ou carotte placée entre les plateaux d'une presse, à une force croissante et constante jusqu'à la rupture de celle là.

Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test.

Il est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction.

Le plus souvent, un béton est caractérisé par ses résistances mécaniques en compression à un âge donné (28 jours) [5].

La résistance mécanique en compression d'un béton ou d'un mortier correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du béton ou du mortier.

L'essai de compression a plusieurs types : uniaxiale, triaxiale, triaxiale axisymétrique. L'essai le plus répandu pour estimer les caractéristiques générales de la résistance du béton, est l'uniaxiale en raison de sa facilité à réaliser.

### II.2.1.2 Compression uniaxiale :

En raison de sa facilité de réalisation, c'est l'essai le plus répandu pour estimer les caractéristiques générales de résistance mécanique du béton. Plusieurs études dans la littérature comme celles de Hsu (1963) et Benouniche (1978) ont mis en évidence différentes phases de comportement du béton en compression uniaxiale en fonction du niveau de la contrainte appliquée (Figure II- 1) [23]

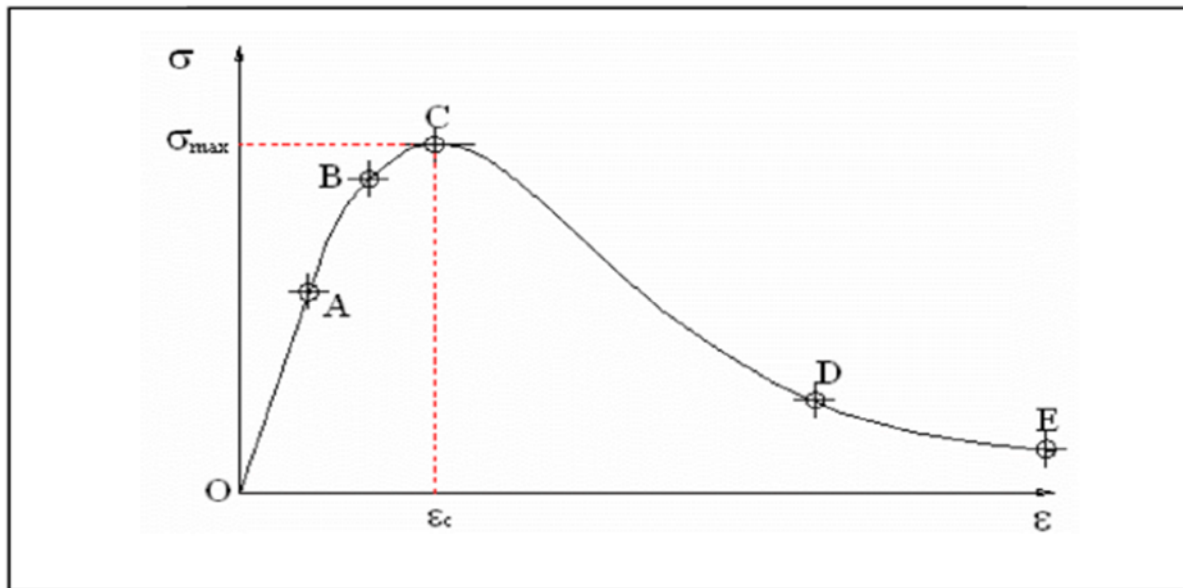


Figure II- 1: le diagramme  $\sigma$ - $\epsilon$  de béton en compression [23]

La figure nous présente 5 phases :

- La phase **(OA)**, c'est un comportement linéaire ou casilinéaire. cette phase est caractérisée par les coefficients du Poisson et le module d'élasticité du béton. N'y a pas de déformations résiduelles dans cette phase.
- La phase **(AB)**, l'apparition des microfissures. Le module du poisson reste constant, alors qu'au module d'élasticité il diminue légèrement. La déformation résiduelle longitudinale augmente, tandis que la déformation latérale reste nulle.
- La phase **(BC)**, représente le développement rapide des microfissures. Le coefficient de Poisson et les déformations résiduelles augmentent rapidement, et on constate une forte diminution du module d'élasticité.
- La phase **(CD)**, apparition et propagation de macro fissures due à la localisation de la déformation. Cette dernière augmente fortement, tandis que le module d'élasticité diminue jusqu'à s'annuler.

- La phase (DE), augmentation très rapide de la déformation et diminution lente de la contrainte.

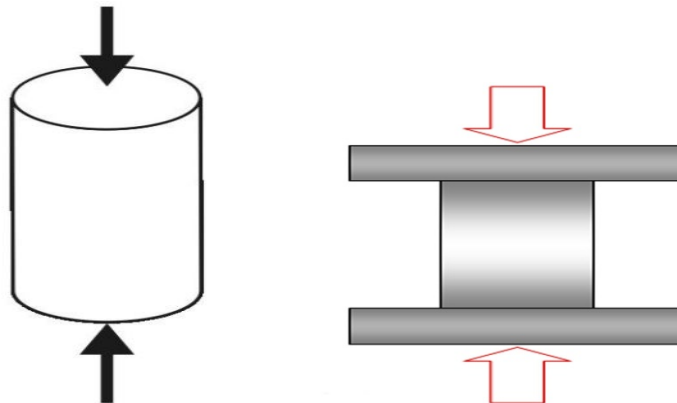


Figure II- 2: Test de compression uniaxiale

Les essais de compression du béton sous charge cyclique ont montré la présence de boucles d'hystérésis assez importantes durant le processus de chargement-déchargement (Figure II-3). L'amplitude de ces hystérésis influence considérablement le comportement à la rupture du béton. Cette hystérésis peut être expliquée par l'importante friction existant entre les fissures lors de leurs ouvertures- fermetures. Cette friction produit des effets viscoplastiques.

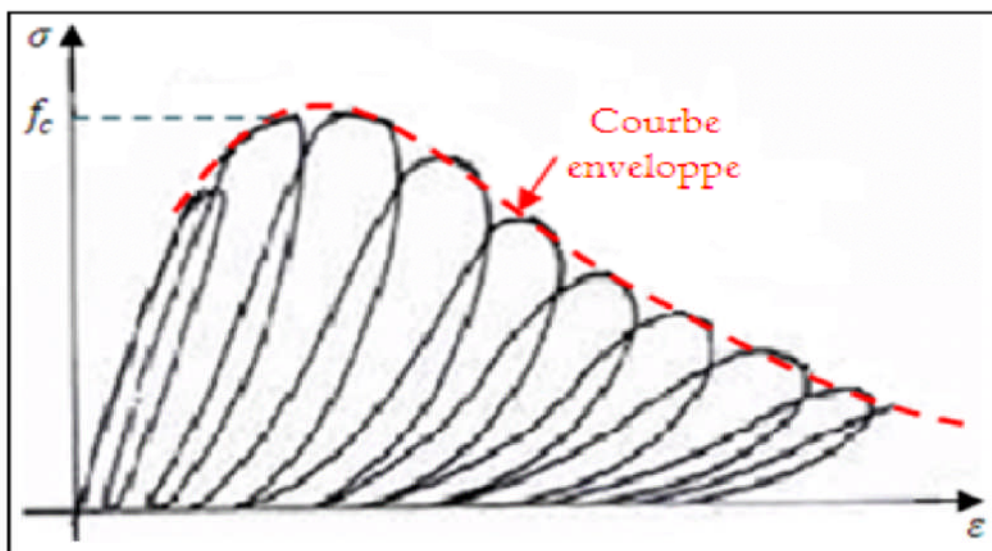


Figure II-3: Boucles d'hystérésis sous charge cyclique en compression (Karsal 1969)

[23]

### II.2.1.3 Compression triaxiale :

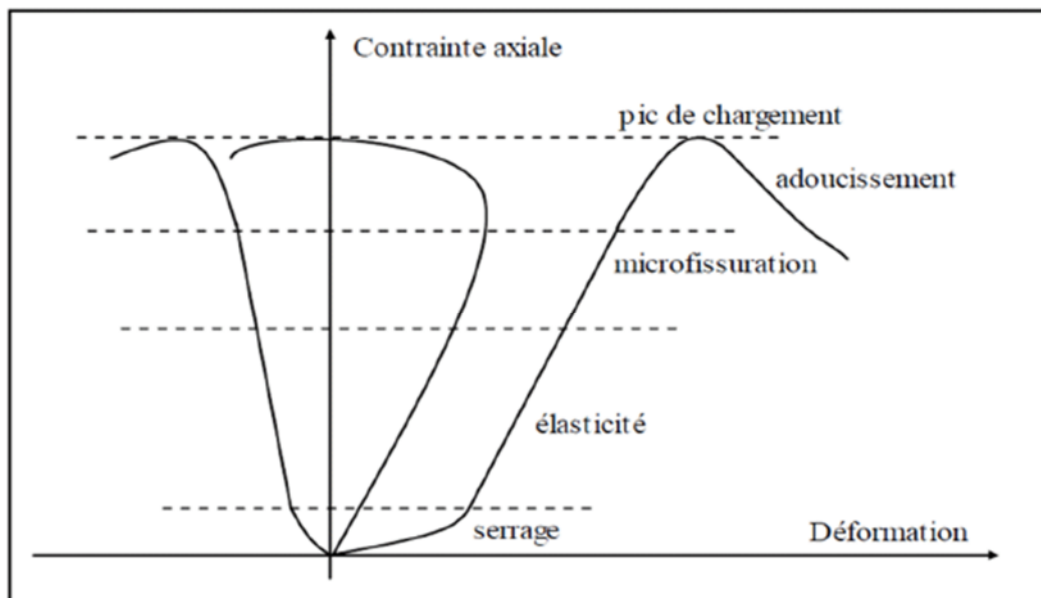
L'étude de l'influence du séchage sur la résistance à la compression triaxiale déviatorique d'un béton de  $E/C = 0.6$  montre qu'au-delà d'une certaine valeur de la pression de

confinement, la résistance déviatorique des éprouvettes humides cesse d'augmenter contrairement à la résistance des éprouvettes préalablement séchées (Akroyd 1961) [23]. L'auteur attribue cette évolution des résistances au rôle joué par l'eau interstitielle induisant des surpressions qui génèrent une microfissuration, influençant le processus rupture de l'éprouvette.

#### II.2.1.4 Compression triaxiale asymétrique :

A la suite de l'application d'une pression hydrostatique constante jusqu'à niveau désiré, on applique progressivement une contrainte déviatorique jusqu'à la rupture. (La figure II-4) présente les cinq différentes phases du comportement des bétons sous faible confinement :

- Une phase de serrage, correspondant à la fermeture des microfissures préexistantes.
- Une phase élastique linéaire avec apparition des microfissures aux interfaces.
- Une phase où les microfissures propagent aux interfaces avec apparition des irréversibilités.
- Une phase de dilatation par l'augmentation importante des déformations latérales.
- Une dernière phase post-pic pendant laquelle un comportement plus ou moins adoucissant est observé si la pression de confinement n'est pas très élevée ; dans le cas contraire cette phase n'existe plus et fait place à une phase d'écrouissage.



**Figure II-4: comportement triaxial du béton à faible confinement (Burlion 2005) [23]**

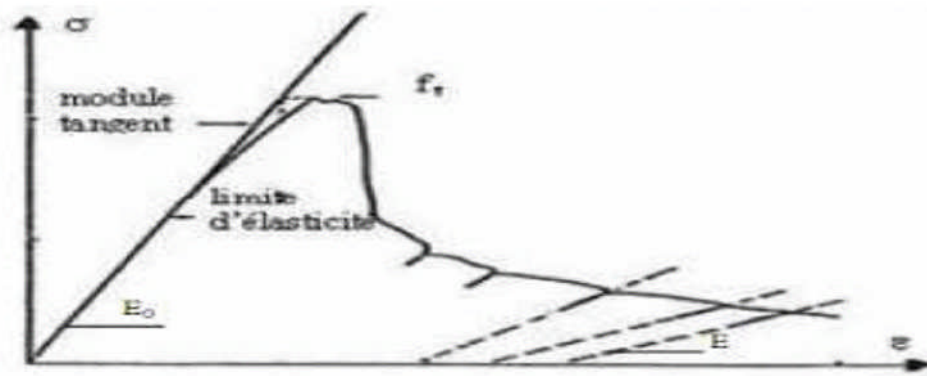
Suivant l'intensité de la pression de confinement, le matériau peut être qualifié de fragile ou ductile. Le comportement du matériau est fragile pour un confinement faible. Ce comportement devient ductile avec l'augmentation du confinement.

**II 2.2 Traction :**

Le test de traction simple est difficile à réaliser pour les matériaux fragiles. Un test spécifique a été mis au point pour ces matériaux.

**II.2.2.1 Traction directe :**

C'est un essai difficile à réaliser vu la faible résistance en traction du béton. Les résultats d'essais réalisés par Berthaud (1988) [23] Terrien (1980) [23] ou Gérard (1996) [23] a démontré qu'un comportement presque élastique linéaire du béton dans la phase pré-pic peut être considéré, avant une rupture brusque dans la phase post-pic (Figure II-5). Le module d'élasticité diminue fortement dans cette phase post-pic. [23]



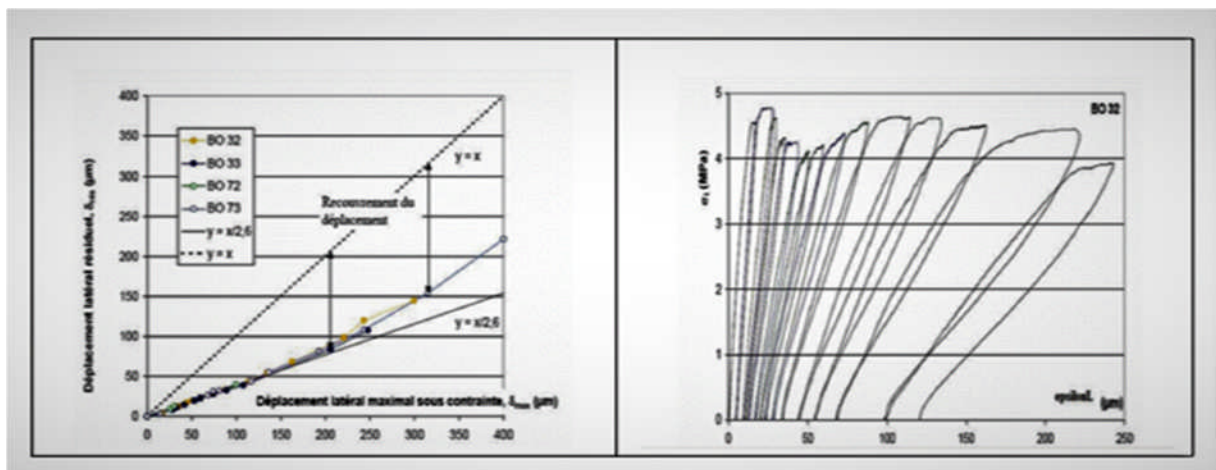
**Figure II-5: comportement en traction directe (Terrien 1980) [23]**

Les essais de traction du béton sont assez peu réalisés et les résultats obtenus dépendent fortement de la méthode d'essai.

**II.2.2.2 Traction Diamétrale ou par fendage :**

Ce test de traction diamétrale consiste à appliquer une charge sur le côté d'un échantillon cylindrique court jusqu'à la rupture. C'est un test simple et très reproductible.

Le comportement du béton avec cet essai est représenté dans la (Figure II-6) suivante :



**Figure II-6: comportement en traction par fendage (Picandet 2001) [23]**

La résistance du béton est évaluée à partir de la déformation latérale de l'échantillon (Picandet 2001) [23]. L'hétérogénéité du champ de contrainte le long du diamètre de rupture et la rupture de traction non typique ont limité l'utilisation des résultats des essais dans les calculs d'application. Les résultats de Picandet (2001) [23] ont montré que la déformation résiduelle latérale d'un cylindre en traction par fendage est approximativement égale à la moitié de la déformation latérale sous chargement.

**Remarque :** Le comportement mécanique des bétons en traction directe est moins étudié que le comportement en compression. Du fait de son comportement fragile et de la forme des échantillons, l'essai de traction directe est difficile à réaliser. La résistance à la compression est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement des structures. C'est pour cette raison que l'essai de compression uniaxiale est le plus étudié.

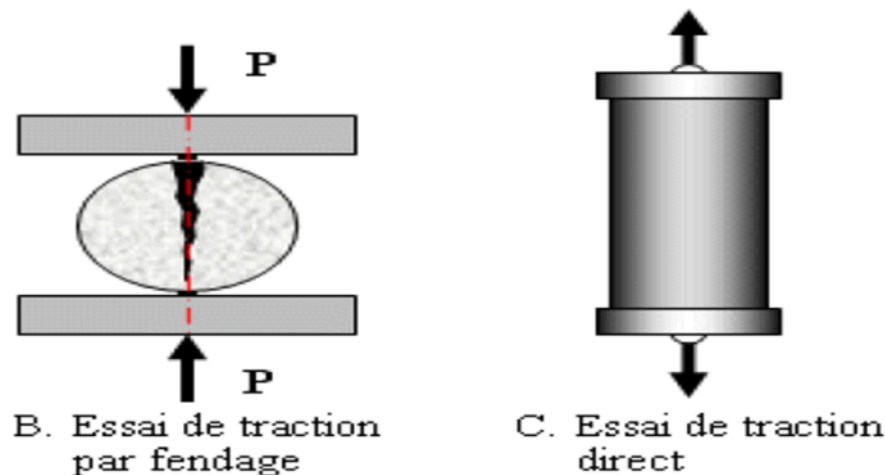
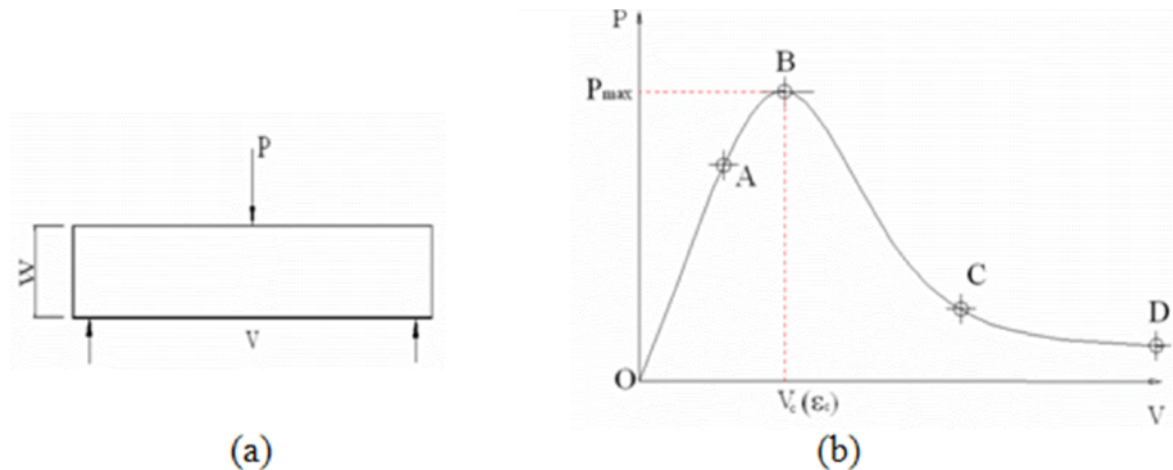


Figure II-7: différents essais de traction d'un béton

### II.2.3 Flexion trois points :

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à rupture.

Cet essai est utilisé couramment au laboratoire en raison de son simplicité et sa capacité de représenter presque exactement le comportement réel du béton dans les structures de génie civil. Les éprouvettes peuvent être fléchies sur trois ou quatre points. Sur la (Figure II- 8), les résultats d'un essai de la flexion sur 3 points sont présentés sous la forme charge  $P$  en fonction de la flèche de l'éprouvette  $V$ .



**Figure II-8: Essai de traction par flexion 3 points ; (a) : relation entre la charge  $P$  et la flèche  $V$ , (b) : les phases de comportement. [23]**

Le comportement du béton en flexion peut être décomposé en plusieurs phases Karihaloo(1995) [23], Bernard(2000) [23] comme suit :

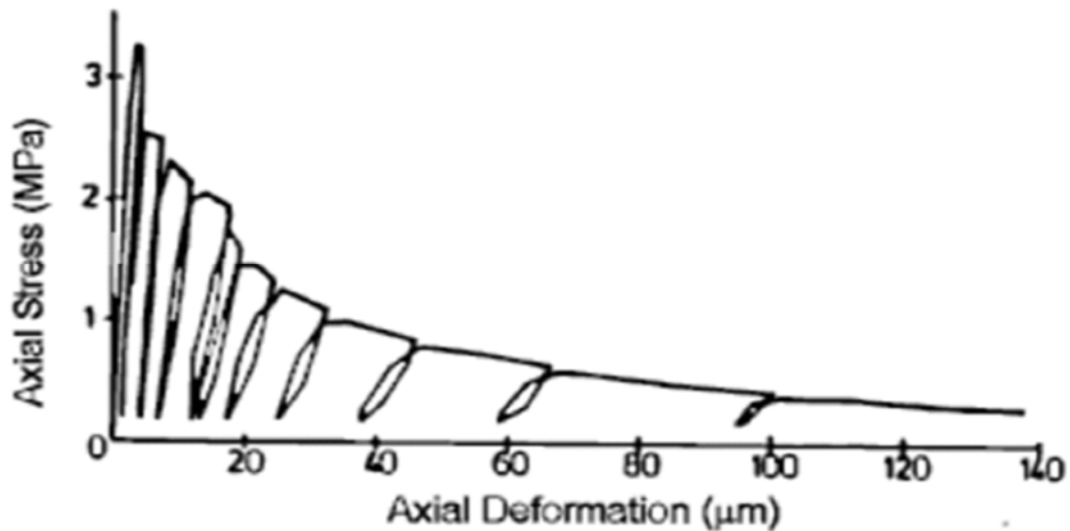
- Comportement linéaire (OA), présence de microfissures superficielles sur l'éprouvette, mais le module d'élasticité ( $E$ ) reste constant.
- Apparition de microfissures à l'intérieur de l'éprouvette, caractérisé par un comportement non linéaire pré-pic (AB).

La propagation des microfissures engendre un endommagement diffus du béton. Le module d'élasticité diminue légèrement et des déformations résiduelles apparaissent.

Accumulation de microfissures (autour du point B). Ces microfissures tendent vers des fissures concentrées. La localisation de la déformation provoquant un endommagement important apparait.

- Déformation d'adoucissement (BC). Les zones de localisation de la déformation apparaissent clairement avec plusieurs microfissures concentrées. Le module d'élasticité diminue fortement. Des macrofissures sont créées par l'accumulation des microfissures, tandis que les granulats empêchent la propagation des macrofissures.
- Augmentation très rapide de la déformation d'adoucissement, tandis que la charge diminue lentement (CD). La vitesse de propagation des fissures diminue vu la friction existant entre les granulats. Cette friction transmet une résistance entre les lèvres des fissures et empêche par conséquent la diminution de la charge.

Les essais de traction par flexion sous charge cylindrique de Reinhardt (1996), voir la (Figure II- 9) ont montré une augmentation considérable de la déformation résiduelle, tandis que les boucles d'hystérésis observées sont plus petites que celles obtenues lors de l'essai en compression.



**Figure II-9: Comportement en traction par flexion sous charge cylindrique  
(Reinhardt1996) [23]**

Avec :  $f_t$  : la résistance directe du béton

$f_c$  : la résistance en compression du béton

On trouve que le rapport entre la résistance directe  $f_t$  et la résistance en compression  $f_c$  du béton varie de 0.05 à 0.1 et selon ACI (American Concrete Institute), la résistance en traction par fendage  $f_t - f \gg 0.3 (f_c)^{3/2}$ .

Comme l'essai de compression, l'essai de flexion ne permet généralement pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

### II.3 Durabilité :

La durabilité d'un ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage pour lesquels il a été conçu (fonctionnement structural, sécurité, confort des usagers) et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement (eaux agressives, gel, ...), avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits. [24]

### II.3.1 Notions sur la durabilité :

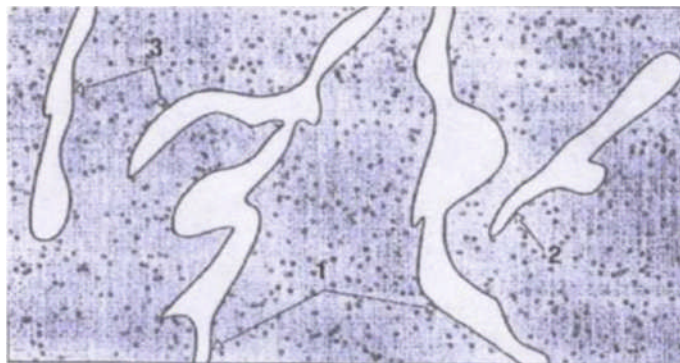
La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux du béton [25]. Traditionnellement l'aptitude d'un béton à résister à la dégradation, c.à.d. sa stabilité, était d'apprécier par sa résistance à la compression. Bien qu'une forte résistance soit une propriété liée étroitement à la structure poreuse, à la perméabilité et la diffusivité et par conséquent à la durabilité. [26]

Ces deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs.

### II.4 Perméabilité :

La perméabilité caractérise l'aptitude du milieu filtrant à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression [27]. Elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide, ainsi que leur interconnecte, voir la (figure II- 10).

La diffusivité est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration. Contrairement à la perméabilité, la diffusivité dans un matériau poreux ne dépend pas de la taille des pores, elle dépend que de leur interconnexion.



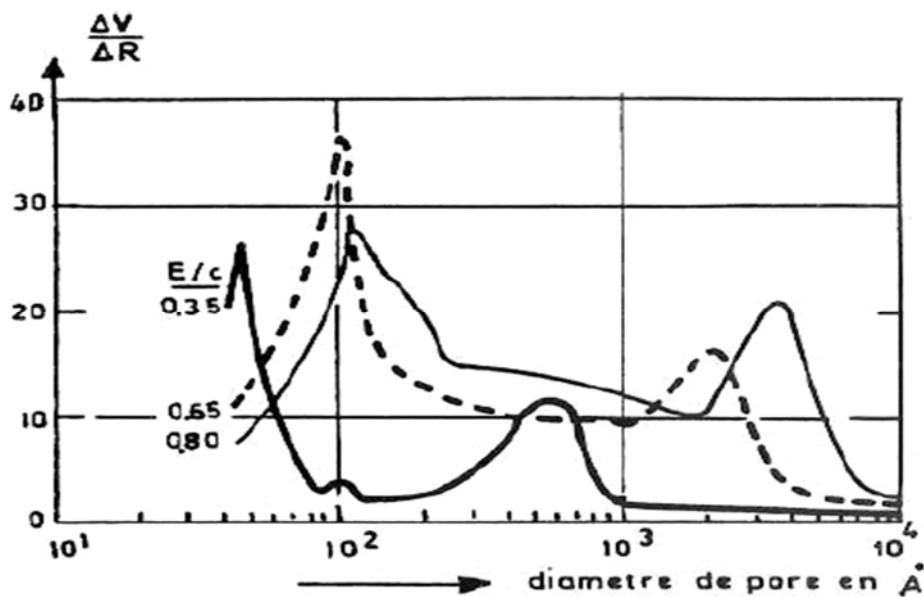
**Figure II-10: Représentation schématique d'un solide poreux [28]**

Les plastifiants et les additions minérales fournissent une grande variété de moyens pour faire des bétons ayant un niveau de résistance à la compression fixée. Les additions minérales peuvent aussi modifier la nature et la texture des hydrates formés, le cas des cendres volantes, les laitiers, la fumée de silice. Un de leurs effets les plus notables est de réduire la proportion de portlandite dans les hydrates. Cette réduction de la portlandite s'accompagne en général d'un affinement des pores et des capillaires, et donc, d'une réduction de la perméabilité. Cela peut apporter en soi un gain important vis-à-vis de la durabilité. [25]

### II.5 Porosité :

Les critères généraux de durabilité qui interviennent dans les textes normatifs et réglementaires correspondent toujours à ce qui est appelé le paramètre de premier ordre de la durabilité : la porosité, mais il a «été conclu que plusieurs paramètres influent sur cette durabilité. [29]

Le réseau poreux dépend de l'arrangement des divers produits d'hydratation de la pâte de ciment. On distingue des pores capillaires, correspondant au pic de grand diamètre, et des pores d'hydrates, correspondant au pic du petit diagramme, la (Figure II-11) donne la distribution de la porosité des pâtes de ciment pour divers rapport E/C. Plus le rapport E/C est grand, plus les courbes sont décalées vers les grands rayons. On distingue des pores capillaires, correspondent au pic de grand diamètre, et des pores d'hydrates, correspondent au pic de petit diamètre. [27]



**Figure II- 11: Courbe de distribution de la porosité pour des pâtes de ciment à divers E/C [27]**

$\Delta V$  et  $\Delta R$  sont respectivement la variation du volume de mercure injecté et celle de rayon minimum des pores pénétrés par le mercure.

Le béton renferme aussi des vides dus, entre autres, à l'eau excédentaire. Le béton durci courant représente une porosité de 10 à 12 % du à la présence de pores inclus dans la texture mêmes des hydrates et de capillaires qui se développent dans la structure des grains.

Les capillaires qui sont dimensionnellement les plus importants, ne dépassent pas un diamètre de quelques microns (le diamètre varie de quelques centaines à quelques milliers d'angströms), sont initialement occupés par l'eau de gâchage et non comblé par les hydrates. Pour un âge donné, la dimension typique et le volume global de ces capillaires augmentent avec le rapport E/C et, pour un rapport E/C donné, le volume global diminue avec la maturation du matériau. [27]

Les pores des hydrates sont 10 à 100 fois plus petits (de diamètre nanométrique), ils représentent les espaces interfeuillet leurs rayons caractéristiques est de 17 angströms environs, dépend peu du rapport E/C et des conditions de l'hydratation, et constitue donc une caractéristique intrinsèque des hydrates formés. L'augmentation de la quantité de ces hydrates au fur et à mesure de la maturation conduit à une augmentation de la microporosité. Le volume total représenté par cette microporosité est d'environ 26% du volume d'hydrates. [27]

## **II.6 Résistance en milieu agressif :**

Les altérations du béton ou du mortier peuvent être dues à des agents extérieurs (solution acide, milieu salin, ..) ou à des appuis internes (hydratation de CaO et de MgO libres dans le ciment, solidification de l'eau sous l'action du gel). Les altérations sont deux types : soit l'érosion, qui entraîne une partie du liant, soit le gonflement par formation de composés expansifs. [28]

**II.6.1 La dissolution et l'érosion :** de tout les constituants hydratés du ciment. La chaux est la plus soluble, elle peut être dissoute par attaque superficielle. La dissolution de la chaux peut s'accompagner de la formation de composés nouveaux. S'ils sont solubles, les sels formés diminuent la résistance du béton. S'ils sont insolubles, ils peuvent au contraire, se substituer à la chaux et former une couche protectrice. [28]

**II.6.2 Les gonflements et les éclatements :** le béton est un matériau poreux, l'eau de l'extérieur peut pénétrer dans son réseau de pores et de capillaires et apporter avec elle des ions agressifs qui peuvent réagir avec les hydrates et changer leur structure.

L'action des eaux souterraines sulfatées offre le cas le plus simple d'une agression donnant naissance à des composés nouveaux expansifs à partir des constituants du ciment, voir la (figure II- 12). La réaction de base est la formation d'ettringite ou sel de Candlot [30]

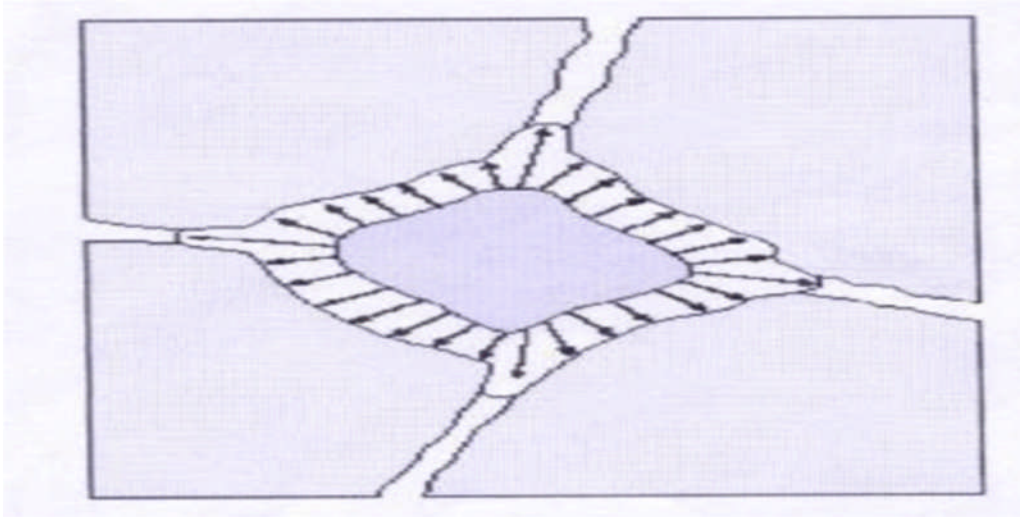


Figure II- 12: gonflement au sein de la pate de ciment durci (Augmentation du volume)

[31]

### II.6.3 Action des sulfates :

Dans ce cas l y aura une formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates.

- L'attaque externe, souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton.
- L'attaque interne, les sulfates proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouve dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pate hydratée et le seul produit expansif expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration, la lixiviation et le délaminage des couches superficielles.

### II.6.4 Action des acides :

Les acides sont deux types organiques et inorganiques, ces derniers sont plus nuisibles pour les bétons et les mortiers que les organiques, ils forment avec le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  contenu dans la pate de ciment durcie des composés facilement solubles dans l'eau [32]

- Les acides inorganiques forts ; ne réagissent pas seulement avec l'hydroxyde de calcium, ils attaquent également les autres composants de la pate de ciment durcie, en formant des sels calciques, aluminiques ou ferriques, ainsi que des acides siliciques colloïdaux (gel de silice).

- Les acides organiques, attaquent également le béton, en transformant le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en sels facilement à difficilement solubles.

### II.6.5 Action des bases :

Les bases sont en général peu nuisibles pour les bétons, les bases fortes, tel que l'hydroxyde de sodium ou de potassium, réagissent toutefois avec les composés d'aluminates hydratés, en particulier avec l'aluminate tricalcique hydratés. Le ciment portland ne contenant que peu d'aluminates, ces réactions sont d'importance secondaire. Avec l'hydroxyde de sodium, on a observé que des solutions à 10% avaient pour effet d'augmenter la résistance ; ce n'est qu'à partir de concentrations à 25% que les bases entraînent d'importantes pertes de résistance.

### II.6.6 Action de l'eau de mer :

Les sels dissous sont principalement des sulfates et des chlorures, l'attaque du béton ou du mortier est suite aux réactions séparées et simultanées entre ces derniers et les constituants du ciment.

Aucun des composants des ciments portland n'est stable devant en milieu marin. Vicat dès 1857 avait établi un lien entre l'attaque chimique du ciment et la présence de  $\text{MgSO}_4$ , les sels de magnésium et  $\text{MgCl}_2$  sont les plus agressifs.

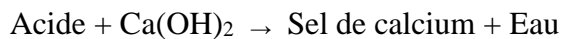
### II.6.7 Action des sels :

De très nombreux sels attaquent la pâte de ciment durcie en formant des sels solubles dans l'eau, lesquels sont lessivés. Tous les sels de magnésium, à l'exception du sulfate de magnésium très difficilement soluble dans l'eau sont ainsi à même de remplacer les ions de calcium dans la pâte de ciment durcie. Il se forme à la surface du béton de l'hydroxyde de magnésium et des silicates de magnésium qui empêchent une autre attaque. L'hydroxyde de magnésium se présente toute fois sous forme de masse molle, gélatineuse, qui est emportée par l'eau coulant plus rapidement

### II.7 Les mécanismes d'attaques :

Le comportement mécanique des matrices dans les milieux agressifs diffère de l'un à l'autre. Cela est du au mécanisme de dégradation qui est du, lui à son tour, aux attaques sulfatiques, attaque des acides, des chlorures et des nitrates qui sont totalement différentes l'une de l'autre.

Le cas d'attaque sulfatique provoque des dégradations internes du matériau, par contre la solution de nitrate d'ammonium, provoque le dépôt des produits superficiels sur la surface d'éprouvette dus à la formation du carbonate, c'est la décalcification rapide du mortier [33] Ce que l'on peut expliquer par l'influence de la NaCl, par le phénomène de diffusion en contact avec la surface de l'éprouvette, l'incursion d'ions de chlorure (les ions de chlorures attachés aux cations divalents pénètrent plus vite que ceux attachés aux cations monovalents. Une réaction d'échange peut provoquer une modification des composés hydratés, principalement la portlandite.



### II.8 Conclusion :

La résistance mécanique est l'une des caractéristiques essentielles du béton. Le béton est employé, en général, comme matériau porteur et le taux de travail d'un ouvrage en béton dépend de sa résistance mécanique qui évolue avec le durcissement du béton. La résistance mécanique d'un béton dépend de plusieurs paramètres à savoir :

- la nature et la qualité des constituants (ciment, granulats, eau, adjuvant)
- les conditions de mise en œuvre de ces constituants
- les conditions thermo hygrométriques ambiantes de conservation.

Elle est définie par la résistance à la compression et par la résistance à la traction.

- **Résistance à la compression** : est la propriété la plus utilisée dans le dimensionnement et la conception des ouvrages en béton armé. Le béton est caractérisé par la résistance à la compression  $R_{c28}$  mesurée sur des éprouvettes écrasées à 28 jours.

- **Résistance à la traction** : Elle est moins étudiée que la résistance à la compression car le béton est conçu essentiellement pour résister à la compression, et son comportement en traction est quasi fragile. Le comportement en traction du béton peut être identifié par l'essai de flexion sur trois points, désignée par  $F_{t28}$ .

### III.1 Introduction :

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son avenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

Dans ce chapitre, nous décrivons le contexte d'ajout cimentaire ainsi le recyclage des matériaux dans le domaine de Génie Civil. Mais en Algérie, le processus d'industrialisation et de développement urbain du pays s'est effectué jusqu'à récemment sans que les précautions environnementales ne soient réellement prises en considération.

### III.2 Les ajouts cimentaires :

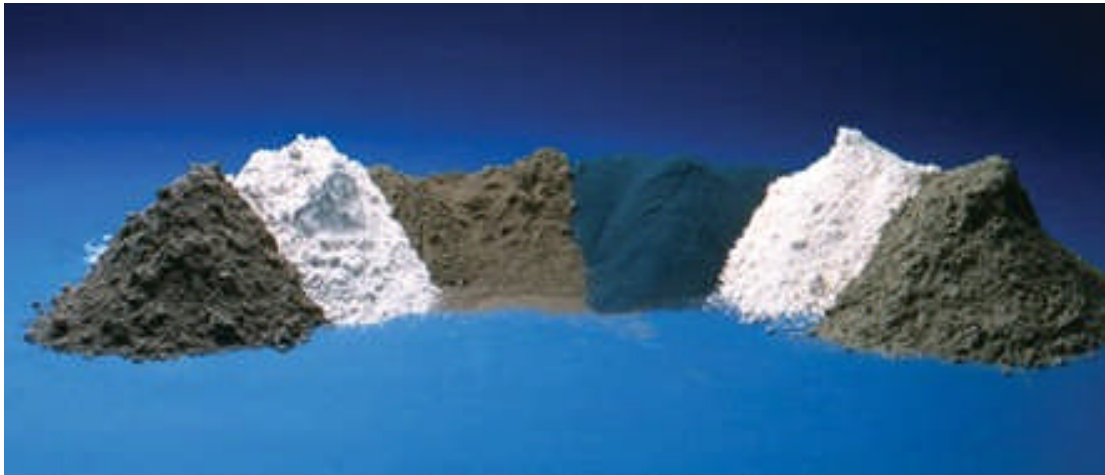
L'industrie cimentaire est d'importance primordiale pour l'Algérie comme tous pays en voie de développement. Cependant, parmi les moyens efficaces qui existent pour augmenter la production du ciment est celui d'utiliser des ajouts qui sont très peu coûteux et disponibles en grandes quantités en Algérie,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

Les ajouts cimentaires influencent plus au moins sur les caractéristiques physico-mécaniques des liants en fonction de leur composition minéralogique, leur finesse et leur pourcentage. [34]

Le tableau suivant donne une idée sur les ajouts utilisés dans les cimenteries algériennes.

Entreprise	Cimenterie	Ajouts Utilisés
ERCE	Ain Touta	Pouzzolane
	Ain El Kebira	
	Hamma Bouziane	
	H'djar Essaoud	Laitier
	Tebessa	
ERCC	Meftah	Tuf / Calcaire
	Raïss Hamidou	Poussière
	Sour EL Ghozlane	Calcaire/Tuf
ECDE	Chlef	Calcaire
ERCO	Beni Saf	Pouzzolane
	Zahana	
	Saida	

Tableau III- 1 : Utilisation d'ajouts dans les cimenteries Algériennes



**Figure III-1 : Différents agents cimentaires**

### **III.2.1 Role des ajouts cimentaires :**

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau. [34]

De plus en plus l'industrie du ciment et du béton va faire usage d'un nombre de produits secondaires des certains plus communément appelés ajouts minéraux.

Un des arguments souvent avancé en faveur de l'utilisation des ajouts minéraux est qu'ils permettent d'économiser de l'énergie et de préserver les ressources naturelles comparées au ciment Portland. Cet argument est en partie juste, mais le principal argument en faveur de l'incorporation de ces matériaux dans les mortiers et bétons est en réalité qu'ils apportent des avantages techniques considérables.

En effet, ils affectent la cinétique de la réaction d'hydratation, améliorent les caractéristiques physiques des mortiers et bétons à l'état frais et contribuent positivement aux résistances mécaniques des mortiers et bétons à l'état durci et ceci en raison de leur composition chimique, de leur réactivité, de leur granulométrie ainsi que de la forme de leurs éléments.

### **III.3 Définition des ajouts minéraux :**

Les ajouts sont des matériaux minéraux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment, quelques fois également au béton afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et / ou pouzzolanique. Ils sont souvent meilleur marché que le ciment Portland et permettent d'obtenir un ciment composé ou divers plus économique. Contrairement aux adjuvants, les ajouts doivent être pris en compte dans le calcul de la composition du béton.

On peut fabriquer des bétons en utilisant seulement du ciment Portland. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de ciment par un ou plusieurs ajouts minéraux lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue résistance et durabilité. Les ajouts minéraux cimentaires typiques sont les cendres volantes (C.V), le laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) et les fumées de silice (F.S). L'utilisation d'ajouts cimentaires dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

### **III.3.1 Avantages des ajouts minéraux**

#### **III.3.1.1 Avantages techniques**

D'abord, l'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Ensuite, les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration.

#### **III.3.1.2 Avantages économiques**

Typiquement, le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux (ajouts) susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton sont des sous-produits, et, à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, sinon aucune, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels. De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le (CO<sub>2</sub>). Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées.

#### **III.3.1.3 Avantages écologiques**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de (CO<sub>2</sub>). En général l'utilisation de cendres volantes (C.V) et de fumées de silice (F.S) comme ajouts cimentaires ne demande pas un

traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de (CO<sub>2</sub>) par tonne de laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) produit. A cela, il faut ajouter les émissions de CO<sub>2</sub> causées par le transport des matériaux (ajouts) jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 Km libère environ 0,022 tonne de (CO<sub>2</sub>).

### III.3.2 Classification des ajouts minéraux

Selon la norme ENV 2006, les ajouts minéraux dans le ciment sont classés en actifs et inertes.

- **Principaux ajouts minéraux inertes** : Fillers calcaires et La poussière.
- **Les ajouts minéraux actifs** : La pouzzolane (naturelle et artificielle)

### II.3.3 Les inconvénients d'utilisation des ajouts minéraux :

- Retard de prise.
- Résistance à la compression à jeune âge plus faible.
- Mûrissement plus long.
- Résistance à l'écaillage controversée.
- Le broyage et le transport plus cher.

### III.4 Le recyclage :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés.

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. [35]

### III.4.1 Les matériaux recyclés :

Les matériaux de construction recyclables suscitent un intérêt grandissant du fait de leur bas coût, de leurs qualités isolantes, de leur longévité ainsi que de leur faible impact sur l'environnement. Dans une perspective de développement durable sont considérés comme écologiques, les matériaux renouvelables dont la transformation et le transport consomment peu d'énergie.

### III.4.2 Les principaux matériaux recyclés dans la construction :

#### III.4.2.1 Le bois :

Au premier rang des matériaux de construction recyclables se situe le bois : en plaques, en panneaux, ou en parpaings, il constitue un excellent isolant thermique et phonique. Il s'utilise à toutes les étapes... de la construction, des fondations aux finitions. Servant tout autant à l'édification de la charpente, de l'ossature ou des poutres d'une maison, le bois sert aussi à construire les parois et les toitures, sans parler des terrasses. Bien entretenu, il demeure un matériau durable des plus appréciables et peut s'avérer recyclable à la condition expresse de n'avoir pas été trop traité.

Certains matériaux de recyclage de bois de construction peuvent devenir d'excellents matériaux de combustion avec une performance supérieure au bois vert. Cela pourrait vous faire économiser même sur vos frais de chauffage. Alors il y a de nombreux avantages au recyclage et à se procurer du bois de construction.



Figure III- 2: Bois avant et après le recyclage

### III.4.2.2 La brique

La brique en terre cuite s'apparente aussi à un autre matériau 100 % recyclable pouvant servir à la construction d'une maison. Sans solvants, facile à poser, sa structure alvéolaire se charge à elle seule de l'isolation thermique et acoustique de l'habitat. La terre cuite assure également une climatisation naturelle ainsi qu'une protection contre l'humidité.



Figure III-3: déchets de brique en terre cuite à recycler

### III.4.2.3 Gravats :

Les gravats sont les débris résultant de la démolition ou de la construction des bâtiments et des routes comme les bétons, les matériaux morainiques, les déblais graveleux, les enrobés bitumineux. Ils sont triés sur le chantier et complétés par un deuxième tri, qui permet d'isoler les déchets types bois, racines et métaux, destinés à des filières de recyclage adhoc. Les gravats une fois triés sont concassés, lavés, séparés et recomposés selon la réutilisation prévue, généralement, broyés sous forme de granulats (graves et sables) employés à nouveau dans le secteur de la construction ou le secteur industriel.



Figure III- 4: Gravats à recycler

#### III.4.2.4 Verre :

On distingue deux sources de verre usagé destiné, après traitement, au recyclage dans les fours de verrerie :

- **le verre ménager** issu des collectes sélectives (conteneur verre) et des collectes multi matériaux (poubelle verte) ; cette source représente 85 % du verre recyclé et se caractérise par une composition chimique assez homogène et stable, pour une région donnée, puisqu'il s'agit du mélange de tous les emballages en verre consommés sur un territoire bien défini; par contre ce verre est très pollué par des contaminants minéraux (cailloux, poteries, porcelaine...) et par des contaminants organiques (bois, papiers, plastiques, résidus alimentaires...). La figure III-3, ci-dessous montre l'état de ce verre collecté avant traitement.
- **le verre industriel** issu d'activités industrielles utilisant du verre plat ou du verre creux et produisant ponctuellement des rebuts importants, comme les brasseurs ou les entreprises de découpe et de façonnage de verre plat et de verres spéciaux ; ce gisement représente 15 % du verre recyclé, reconnu pour être de bonne qualité car peu contaminé mais de composition chimique variable [36].



Figure III- 5: Les étapes de recyclage de bouteilles en verre

Le verre subissant un léger concassage peut être utilisé comme granulats dans le béton. Ce traitement a l'avantage de présenter un faible coût. Cependant, l'utilisation de ce sable est susceptible de générer une réaction défavorable pour la structure. Qualifiée de « Cancer des bétons ».

Un broyage du verre à une plus grande finesse laisse envisager une utilisation de ce matériau en tant que liant. Dans ce cas, la silice du verre réagit avec la chaux produite par la réaction du ciment, créant ainsi des composés dotés de propriétés liantes : c'est la réaction pouzzolanique.

#### III.4.2.5 Les matériaux d'intérieur

Pour l'intérieur, une attention particulière doit être portée aux peintures naturelles, dépourvues de solvants, capables de diminuer d'une manière pérenne le taux d'émanations chimiques. Pour les sols, les matériaux recyclables concernent notamment le bambou pour certains parquets ainsi que les moquettes écologiques réalisées en poils de chèvre ou en papier recyclé. Respectueux de l'environnement, accessible et économique, l'usage des matériaux de construction recyclables est en plein essor.



Figure III- 6: Moquettes écologiques obtenues par recyclage du papier

#### III.4.2.6 Les matériaux d'isolation

Concernant les matériaux d'isolation recyclables, on peut citer la laine de chanvre ou la laine de bois ainsi que les produits à base de cellulose tels que la boue papetière, sans oublier le lin et le liège. Pour l'extérieur, les toitures ou les murs végétalisés assurent un bon isolement thermique et phonique. Les bottes de paille peuvent être utilisées comme isolants ou comme matériau de construction une fois comprimés.



**Figure III- 7: La ouate de cellulose (meilleur isolant thermique) obtenue par recyclage**

#### III.4.2.7 L'acier

L'acier fait partie des matériaux les plus recyclables pouvant entrer dans la construction de bâtiments ou de maisons. Particulièrement résistant aux vents et aux secousses sismiques, il s'avère plus solide que le bois susceptible de « travailler » au fil du temps. De très faible coût, les maisons en acier sont désormais proposées en kit par les constructeurs.



**Figure III- 8: Fonderie d'acier**

### III.5 La poudre du marbre :

#### III.5.1 Définition :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris, pouvant présenter des veines, ou marbrures (veines et coloris sont dus à des inclusions d'oxydes métalliques, le plus souvent).

Certains types de marbres portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte.

Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement mélangée à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,7.

La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins : outre le blanc ils existent des variétés, beiges, bleues, roses, gris, jaunes, rouges, vertes, violettes ou noires.

[35]

Le degré de pureté du marbre est responsable de sa couleur et de son aspect : il est blanc si la roche dont il provient était uniquement composée de calcite ( $100\% \text{CaCO}_3$ ). Mis en œuvre dans la construction et la décoration, le marbre se révèle être une matière noble et durable très recherchée. [37]

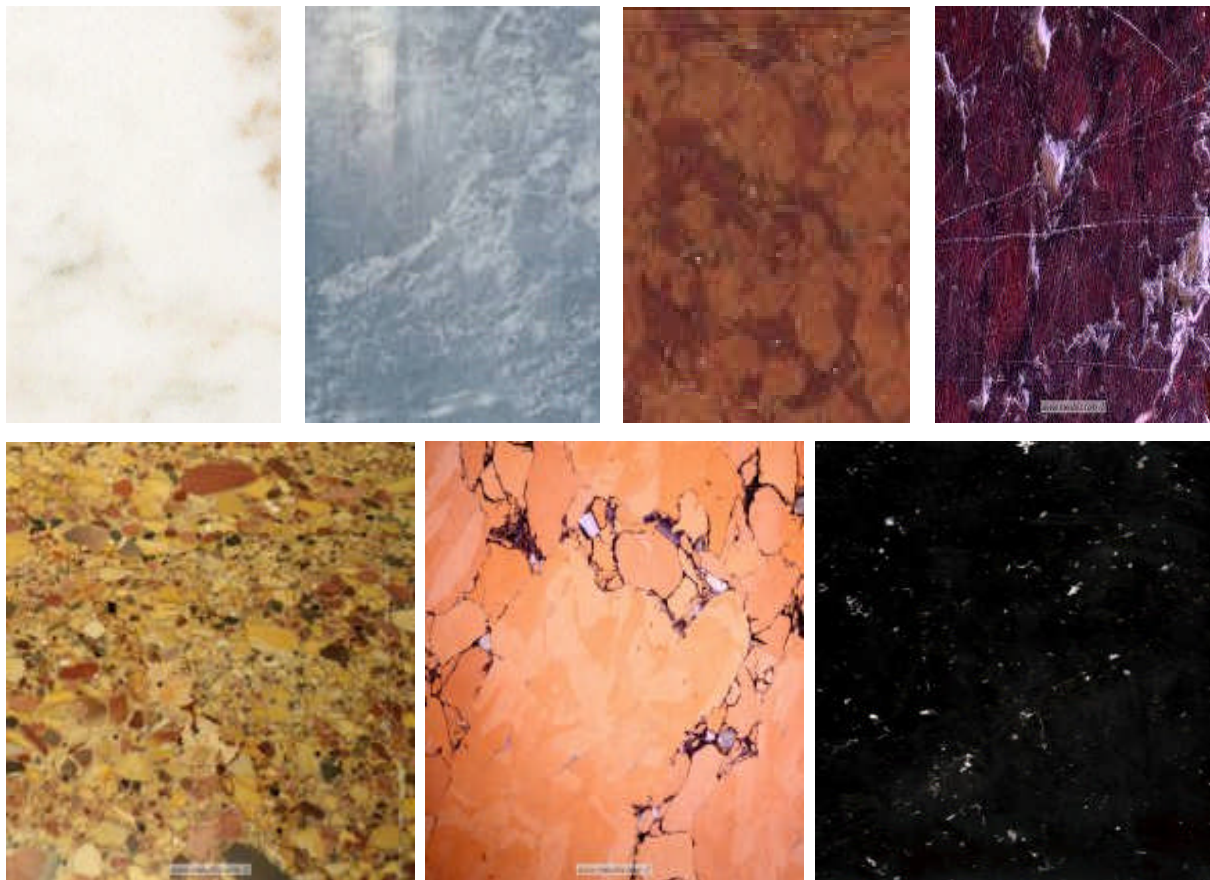


Figure III- 9: Quelques variétés du marbre

### III.5.2 Le recyclage des déchets du marbre : [35]

Les déchets de carrières à blocs sont les blocs, chutes et moellons ayant différentes formes géométriques,

Le produit de recyclage de déchets est un sous produit de marbre «granulats et poudre». Les déchets de l'usine de transformation sont exploités partiellement en revêtement de sol extérieur pour les chutes de carreaux et en construction de carreaux de granito, en peinture pour la poudre de marbre.

L'exploitation des moellons de dimension variant de (80-100cm), qui sont concassées, broyés pour obtenir des granulats dont la granulométrie varie de 0-18mm.

Poudre de marbre : obtenue après broyage et pulvérisation du marbre de dimension variant de 30 à 02 microns.

Les dérivés de marbre sont deux types :

- Dérivés de marbre blanc.
- Dérivés de marbre gris (à l'arrêt)



**Figure III- 10: Quelques grains et poudre du marbre des deux carrières Tlemcen et Skikda**

### Conclusion :

Dans un béton ou un mortier, la substitution du sable apporte la consistance, le volume et la résistance de ce dernier ; nous avons exposé dans ce chapitre les ajouts cimentaires, le recyclage, les différents déchets exploités dans le domaine de génie civil et la poudre de marbre qu'est un élément de base dans notre étude expérimentale.



**IV.1 Introduction :**

La connaissance des divers propriétés : physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale dans toute opération de construction ou de réparation, dont le but tout d'abord l'emploi judicieux de ces matériaux, ensuite pour faire un choix répondant à leur destination, et enfin pour que ces matériaux soient malaxés d'une façon correcte afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes.

A cet effet, essayons dans ce chapitre de présenter les normes, des différents constituants entrant dans la composition de nos mortiers, ainsi que leurs formulations.

**IV.2 Normes :****IV.2.1 Préparation des matériaux**

- Analyse granulométrique: EN 933-1
- Equivalent de sable : NFP 18-597
- Confection des mortiers : EN 196-1

**IV.2.2 Normes utilisées à l'état durci**

- Essai de compression : NFP 18-406.
- Essai de traction par flexion : NFP 18-407.
- Essai de poinçonnement : Essai non normalisé
- Essai du l'ultrason : Essai non normalisé

**IV.3 Matériaux utilisés**

Dans notre étude, nous avons utilisé des matériaux naturels locaux, les bétons et les mortiers sont réalisés avec les mêmes matériaux.

**IV.3.1. Sable**

L'élément le plus important dans la confection de tous les mortiers dans cette expérimentation, nous avons utilisé un sable local prélevé de rivière situé à la ville de Bouira, il s'agit d'un sable siliceux de classe granulaire (0/3 mm) et utilisé couramment dans la confection du béton dans cette région, après l'avoir laver, l'avoir laissé égoutter pendant 24h, en l'a introduit dans l'étuve à un degré de (105)° pendant 24h, puis en l'a tamisé.



Figure IV-1 : Sable de rivière (0/3)

### IV.3.2 Ciment

Pour tous les mortiers, on a utilisé un seul type de ciment Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II de classe de résistance 42,5, il provient de la cimenterie de L'AFARGE de ce ciment ; la qualité de ce ciment constitue une constante au niveau des paramètres d'étude.



Figure IV-2 : Ciment (CEM 42.5)

Ses analyses ou bien ses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques communiquées par le producteur sont représentées respectivement comme suit dans les tableaux (IV.1), (IV.2), (IV.3) et (IV.4)

#### ❖ Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	27,8	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	190	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	265	(min)	NF EN 196-3
SSB	4410	(Cm <sup>2</sup> /g)	NF EN 196-6
masse spécifique	2.99	(g/cm <sup>3</sup> )	NF EN 196-5
Retrait à 28 jours	<1000	(µm/mm)	NF EN 197-7

Tableau IV-1 : Caractéristiques physiques du ciment CEM 42.5 R

❖ **Caractéristiques chimiques**

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	Chlorures	PAF	insoluble
60.4	20.71	5.45	3.63	2.37	0.23	0.65	2.15	0.007	4.28	-

Tableau IV-2: Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X

❖ **Caractéristiques minéralogiques**

Eléments	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO	gypse	Calcaire	pouzzolane
%	58	18	05	13	01	05	05	07

Tableau IV-3: Composition minéralogique du ciment par fluorescence X

❖ **Caractéristiques mécaniques du ciment**

Essais	Âge [ J ]		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	35,81	40,4	48,87
Résistance à la flexion (MPa)	4,41	6,37	8,35

Tableau IV-4: Résistance à la compression et à la flexion du ciment (NF EN 196-1)

**IV.3.3 Eau de gâchage**

Il s'agit de l'eau du robinet de l'Université de Tizi Ouzou, nous supposons qu'elle répond à toutes les prescriptions de la norme (EN 1008) en matière de béton.

**IV.3.4 Les additions minérales**

Dans notre étude, nous avons utilisé un seul type d'additions minérales- la poudre du marbre ; présentée ci dessous.

La poudre du marbre qui fait l'objet de cette étude est un déchet résultant de concassage et broyage des déchets du marbre blanc, jusqu'à l'obtention d'une poudre à grains de classe granulaire (0/3 mm) provient de l'exploitation de l'entreprise nationale de marbre «ENAMARBRE» de la carrière de Fil-Fila qui se trouve à 25 Km à l'est de la ville de Skikda.



**Figure IV-3 : Poudre du marbre de classe (0/3)**

Ses caractéristiques pétrographiques-minéralogiques ; physico-mécaniques et chimiques sont présentées dans les tableaux (IV.5), (IV.6), (IV.7) et (IV.8)

Nature pétrographique	Couleur	Aspect	Texture	Structure
Calcaire microcristallin	Blanche	Homogène	Massive	Microcristallin

**Tableau IV-5: Caractéristiques pétrographiques de la poudre utilisée**

	Calcite	Quartz	Oxyde de fer
Composition minéralogique	100%	--	--

**Tableau IV-6: Composition minéralogique de la poudre utilisée**

Masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ]	2,736
Compacité [%]	98,03
Porosité [%]	1,96
Coefficient d'absorption d'eau [%]	0,39
Coefficient de saturation [%]	0,87
Résistance à la compression à l'état sec [kg/cm <sup>2</sup> ]	961
Résistance à la compression après refroidissement [kg/cm <sup>2</sup> ]	966
Résistance à l'usure [g/cm <sup>2</sup> ]	1,82
Résistance au choc [kg/cm <sup>2</sup> ]	40

**Tableau IV-7: Caractéristiques physico-mécaniques de la poudre utilisée**

<b>Caco<sub>3</sub></b>	<b>Mgo</b>	<b>Cao</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>P.C</b>
99.05	1.03	54.86	0.04	0.08	0.15	44.26

**Tableau IV-8: Caractéristiques chimiques de la poudre utilisée**

<b>Caractéristiques</b>	<b>Résultats</b>	<b>Unité</b>
<b>Masse volumique absolue</b>	<b>2.564</b>	<b>(g /cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Masse volumique apparente</b>	<b>20.349</b>	<b>(g /cm<sup>3</sup>)</b>

**Tableau IV-9: Caractéristiques physiques de la poudre utilisée selon la norme NF EN 933-1**

### IV.3.5 Superplastifiant:

Le superplastifiant utilisé est un adjuvant de SIKA ® de type VISCOCRETE ® TEMPO 12 Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi. Conforme à la norme NF EN 934-2. Cet adjuvant est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalente de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.

### Domaines d'application

- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- Dans les bétons autoplaçants, SIK A VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
- SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet de réduire significativement le rapport E/C ce qui améliore la durabilité du béton durci (diminution de la perméabilité, augmentation des résistances mécaniques, diminution du retrait).

**Caractères généraux :** SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h),
- Robustesse à la ségrégation,
- Qualité de parement.

**Conditionnement**

- Fûts de 230 kg
- CP de 1000 L
- Vrac

**Stockage**

Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.

**Caractéristiques**

- Données techniques densité  $1,06 \pm 0,01$
- PH 4,5 à 6,5
- Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq.  $\leq 1$  %
- Extrait sec 28,0 à 31,0 %
- Teneur en ions Cl -  $\leq 0,1$  %

**Conditions d'application :** Dosage Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.

**Propriétés et effets :** Grace à ces propriétés le SIKA ® VISCOCRETE ® TEMPO 12 permet d'avoir les effets suivants :

**Sur béton frais**

- Obtention d'un E/C très bas
- Béton plastiques à fluides
- Une très bonne maniabilité
- Un long maintien de l'ouvrabilité
- De faciliter la mise en œuvre du béton

**Sur béton durci**

- Bonne résistances initiale et finales
- De diminuer la porosité

- Bel aspect de parement au décoffrage
- De diminuer le retrait

**Délai de conservation :** Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

#### IV.4 La caractérisation des mortiers :

La caractérisation des matériaux de construction telle que la matrice cimentaire nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux ainsi que l'illustration de certaines interprétations ne pourraient être possible que si les différents constituants sont bien caractérisés par le biais d'essais normalisés au laboratoire.

##### IV.4.1 Essais sur granulats

###### IV.4.1.1 Echantillonnage et prélèvement (sable)

Les essais que nous avons réalisés au laboratoire, ont porté sur des échantillons obtenus par des prélèvements sur les tas puisque il s'agit d'un sable mis en stock. Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres.

On prélève donc le sable en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

###### IV.4.1.2 Analyse granulométrique (sable et la poudre du marbre)

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un échantillon. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer ces grains selon leur diamètre à l'aide de tamis, emboîtés les un sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur et le classement des grains est obtenu par vibration de la colonne de tamis.



Figure IV-4: les tamis utilisés dans l'analyse granulométrique

- **REFUS** sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- **TAMISAT** (ou **passant**) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant dans les tamis successifs.

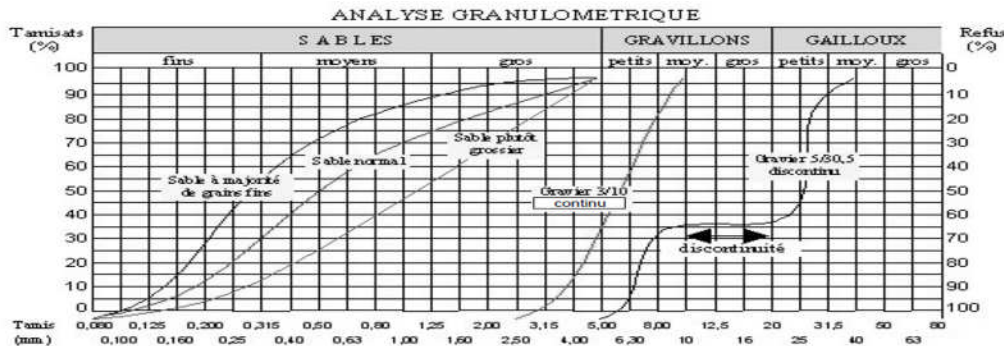


Figure IV-5: La courbe de l'analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur notre sable sont présentés dans le tableau (IV.10).

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés R <sub>i</sub> (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisats cumulés (%)
5	1	0.066	99.934
3,15	140	9.333	90.667
2,5	231.5	15.433	84.567
1,25	535	35.666	64.334
0,63	858	57.2	42.8
0,315	1162	77.466	22.534
0,16	1411.5	94.1	5.9
0,08	1465	97.666	2.334
Fond des tamis	1500	100	0

Tableau IV-10: Analyse granulométrique par tamisage du sable (NF P 18-560)

Les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur notre poudre de marbre sont présentés dans le tableau (IV.11)

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus cumulés R <sub>i</sub> (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage Tamisats cumulés (%)
5	0	0	100
3,15	0	0	100
2,5	41	2.733	97.267
1,25	424.5	28.3	71.7
0,63	736	49.066	50.934
0,315	950.5	63.366	36.634
0,16	1127	75.133	24.867
0,08	1250.5	83.366	16.634
Fond des tamis	1500	100	0

Tableau IV-11: Analyse granulométrique par tamisage de la poudre du marbre (NF P 18-560)

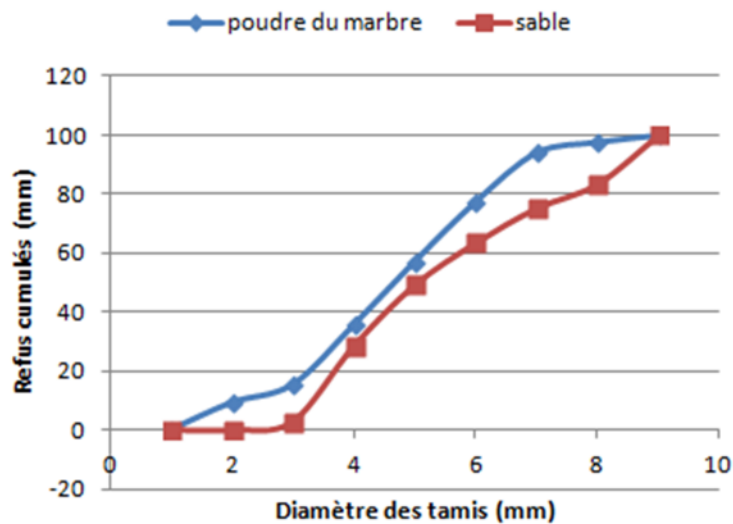


Figure VI-6: la courbe de l'analyse granulométrique du sable et de la poudre du marbre de classe (0/3)

En remarque que la poudre de marbre soit plus fine que le sable de carrière. En effet, ce dernier contient des grains ayant de diamètre 0,1µm plus que la poudre de marbre. Par contre, la poudre du marbre a des particules de diamètre 5µm dépassant les 20% par rapport au sable de carrière.

**IV.4.1.4 Module de finesse (sable et la poudre du marbre)**

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 (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

Granulats	Spécifications
Module de finesse $M_f$	$2,8 < M_f < 3,2$ sable grossier $2,2 < M_f < 2,8$ sable moyen $1,8 < M_f < 2,2$ sable fin

Tableau IV- 12: Module de finesse du sable [34]

Dans notre cas, les modules de finesse de sable et de la poudre du marbre sont :

$$Mf_{\text{sable}} = 2.798$$

$$Mf_{\text{poudre du marbre}} = 2.218$$

Alors en a un sable et une poudre de marbre qui ont les spécifications d'un sable moyen.

#### IV.4.1.5 Equivalent de sable :

Cet essai est un essai de propreté, la valeur de l'E.S. exprime le pourcentage de fines contenues dans le sable.

L'absence de fines ne permet pas d'obtenir un béton ou un mortier compact et leurs excès est défavorable dans la mesure où il augmente la demande en eau, donc le rapport E/C donc une faible valeur de la résistance.

Les spécifications de l'équivalent de sable sont :

- 70 à 80 pour un sable roulé
- >65 pour un sable concassé

Cette méthode nécessite une éprouvette graduée, ou à défaut un récipient à fond bien plat ; en remplit l'éprouvette sur environs un tiers de la hauteur avec de l'eau, en mesure 120g de sable et en l'introduit dedans, en attend quelque minutes puis en bouche bien le récipient, en brasse l'éprouvette de façon horizontale en théorie 90 fois en 1min, en finit par remplir l'éprouvette de l'eau, en brasse un dernier coup, en attend 20 min et à l'issue de ce délai en relève la hauteur totale (sable + fines) désigné par (a) et la hauteur du sable seul sans fine désigné par (b), puis en effectue le calcul suivant :

$$ES = b/a * 100$$

Dans notre cas, en a eu,  $a = 11.2\text{cm}$  et  $b = 8.3\text{cm}$  donc notre ES est égal à 74.10%, donc notre sable fait partie des sables roulés.



Figure IV-7: Equivalent de sable

#### IV.4.1.6 Masse volumique absolue (la poudre du marbre)

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule, pores à l'intérieur des grains exclus), après passage à l'étuve à 105° C, notée et exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup>, T/m<sup>3</sup>).

Son expression est la suivante :

$$\rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

#### Le mode opératoire

Dans une éprouvette graduée contenant un volume d'eau  $V_1=150\text{ml}$ , avec l'entonnoir on verse une masse de la poudre du marbre ou du sable de classe (0/3)  $m=300\text{ g}$ , on lit le nouveau volume d'eau  $V_2= 617\text{ml}$  pour la poudre du marbre et  $V_2 = 622.5\text{ ml}$  pour le sable, puis on calcule la masse volumique absolue pour chacun des deux..

- Pour la poudre du marbre :  $\rho_{\text{abs}} = \frac{300}{617-150} \Rightarrow \rho_{\text{abs}} = 2.56\text{ g/cm}^3$
- Pour le sable :  $\rho_{\text{abs}} = \frac{300}{622.5-150} \Rightarrow \rho_{\text{abs}} = 2.449\text{ g/cm}^3$

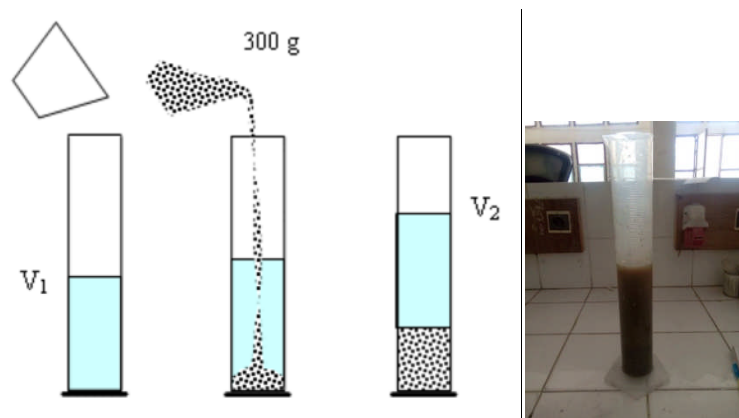


Figure IV-8: La masse volumique absolue

#### IV.4.1.7 La masse volumique apparente

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à une température de  $105 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ , notée et exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, kg/m<sup>3</sup>, T/m<sup>3</sup>).

Son expression est la suivante :

$$\rho_a = \frac{M}{V}$$

#### Le mode opératoire :

En verse dans un récipient qui pèse vide ( $m_1 = 301\text{g}$ ), d'un volume ( $V = 1601,6\text{ cm}^3$ ), la poudre de marbre ou le sable, par couches successives et sans tassement à l'aide d'un entonnoir ou seulement avec les mains, puis on arase avec une règle métallique, puis on pèse le récipient rempli et on le note avec ( $m_2 = 2076\text{g}$ ) pour la poudre du marbre et ( $m_2 = 2854\text{g}$ ) pour le sable, enfin on calcule la masse volumique apparente tel que :

La hauteur du récipient  $H = 15,7 \text{ cm}$

Son diamètre  $D = 11,4 \text{ cm}$

Donc :  $V = (\pi * D^2 / 4) * H \Rightarrow V = 1601,6 \text{ cm}^3$

➤ Pour la poudre du marbre :  $M = m_2 - m_1 \Rightarrow M = 1775 \text{ g}$  donc  $\rho_a = \frac{1775}{1601,6} \Rightarrow \rho_a = 1,108$

➤ pour le sable :  $M = m_2 - m_1 \Rightarrow M = 2553 \text{ g}$  donc  $\rho_a = \frac{2553}{1601,6} \Rightarrow \rho_a = 1,593$

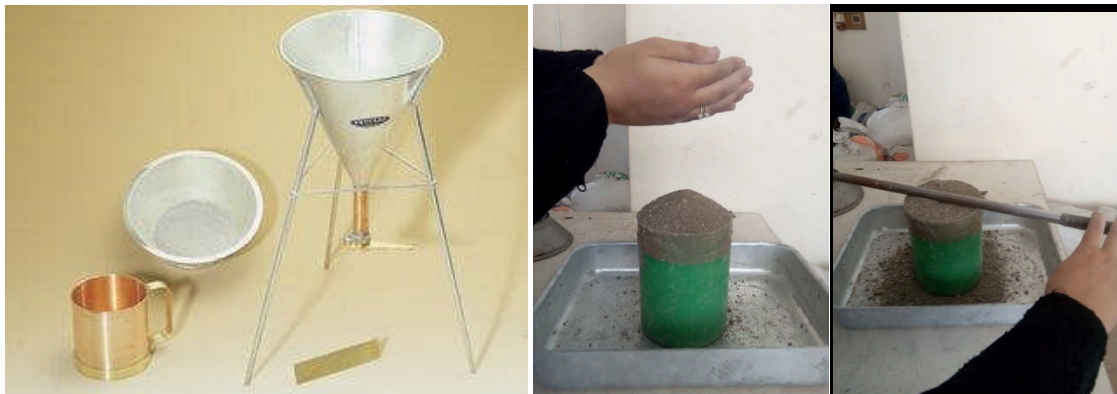


Figure IV-9: la masse volumique apparente

**IV.5 Formulation des mortiers :**

**IV.5.1 Composition d'un mortier témoin :**

Composants	Ciment	Sable	Eau	L'adjuvant
Le poids (kg)	400	1400	250	3

Tableau IV-13: composition d'un mortier pour  $1\text{m}^3$

Tel que, le poids de l'adjuvant égale à 1,5% du poids du ciment

Dans cette étude, en va confectionner des éprouvettes prismatiques de dimensions  $(4*4*16\text{cm}^3)$ , cubiques de dimensions  $(5*5*5\text{cm}^3)$  et des dalles de dimensions  $(3*36*36\text{cm}^3)$  avec un mortier témoin et avec des différents mortiers en dosage de l'incorporation de la poudre du marbre (10%, 30%, 50%, 70%, et 100%).

Les masses de composants pour la confection d'une éprouvette prismatique d'un mortier témoin ;

❖ Les éprouvettes prismatiques sont d'un volume égal à  $256 \text{ cm}^3$

– Ciment :  $400 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ m}^3$

$$X \text{ kg} \rightarrow 256 * 10^{-6} \text{ m}^3 \Rightarrow X = 400 * 256 * 10^{-6} \Rightarrow X = 103 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 103 + 11 \Rightarrow X = 114 \text{ g}$$

– Sable :  $1400 \text{ kg} \rightarrow 1 \text{ m}^3$

$$X \text{ kg} \rightarrow 256 * 10^{-6} \text{ m}^3 \Rightarrow X = 1400 * 256 * 10^{-6} \Rightarrow X = 359 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 359 + 36 \quad \Rightarrow X = 395 \text{ g}$$

– Eau : 250 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 250 \cdot 256 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 64 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 64 + 7 \quad \Rightarrow X = 71 \text{ g}$$

– Adjuvant : 3 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 256 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 3 \cdot 256 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 1 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 1 + 0.1 \quad \Rightarrow X \simeq 2 \text{ g}$$

❖ Les éprouvettes cubiques ont un volume égal à 125 cm<sup>3</sup>

– Ciment : 400 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 400 \cdot 125 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 50 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 50 + 5 \quad \Rightarrow X = 55 \text{ g}$$

– Sable : 1400 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 1400 \cdot 125 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 175 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 175 + 18 \quad \Rightarrow X = 193 \text{ g}$$

– Eau : 250 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 250 \cdot 125 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 31,25 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 31,25 + 3,125 \quad \Rightarrow X = 34,38 \text{ g}$$

– Adjuvant : 3 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 125 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 3 \cdot 125 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 0.375 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 0.375 + 0.0375 \quad \Rightarrow X \simeq 0.5 \text{ g}$$

❖ Les dalles ont un volume égal à 3888 cm<sup>3</sup>

– Ciment : 400 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 3888 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 400 \cdot 3888 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 1555,2 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 1555,2 + 155,52 \quad \Rightarrow X = 1710,72 \text{ g}$$

– Sable : 1400 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 3888 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 1400 \cdot 3888 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 5443,2 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 5443,2 + 544,32 \quad \Rightarrow X = 5987,5 \text{ g}$$

– Eau : 250 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 3888 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 250 \cdot 3888 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 972 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 972 + 97,2 \quad \Rightarrow X = 1069,2 \text{ g}$$

– Adjuvant : 3 kg  $\rightarrow$  1 m<sup>3</sup>

$$X \text{ kg} \rightarrow 3888 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \quad \Rightarrow X = 3 \cdot 3888 \cdot 10^{-6} \quad \Rightarrow X = 11,664 + 10\%$$

$$\Rightarrow X = 11,664 + 1,1664 \quad \Rightarrow X \simeq 13 \text{ g}$$

#### IV.5.2 Composition des mortiers avec différents dosages de la poudre de marbre :

Pour la substitution partielle du sable avec de la poudre du marbre ; par exemple pour une éprouvette prismatique avec un dosage égal à 30% de la poudre du marbre, le facteur c'est 0.3, on a la masse du sable pour une éprouvette témoin est égale à 197.5g

Donc la masse de la poudre du marbre à introduire est égale à :  $395g * 0.3 = 118.5 g$

Pour la masse du sable à utiliser, en va extraire la masse de la poudre du marbre de la masse initiale du sable, c.à.d :  $395 - 118.5 = 276.5 g$

Donc les proportions de composants de cette éprouvette sont comme suit :

- Ciment : 114 g
- Sable : 276.5 g
- Poudre du marbre : 118.5g
- Eau : 71 g
- Adjuvant : 2 g

Et c'est de la même procédure qu'on calcule les autres composants de mortiers, avec les différents dosages pour chaque type d'éprouvette.

Dans ce qui suit, en a résumé les calculs pour chaque mortier dans des tableaux.

Le tableau (IV-14), résume le calcul des proportions de chaque constituant pour les éprouvettes prismatiques avec différents dosage de poudre du marbre.

Composants (g/m <sup>3</sup> )	Mortier témoin 0% de PM	Mortier 1 10% de PM	Mortier 2 30% de PM	Mortier 3 50% de PM	Mortier 4 70% de PM	Mortier 5 100%
<b>Ciment</b>	114	114	114	114	114	114
<b>PM</b>	0	39.5	118.5	197.5	276.5	395
<b>Sable (0/3)</b>	395	355.5	276.5	197.5	118.5	0
<b>Eau</b>	71	71	71	71	71	71
<b>L'adjuvant</b>	2	2	2	2	2	2

**Tableau IV-14: compositions de mortiers prismatiques avec différents dosages de la poudre de marbre**

Le tableau (IV-15), résume le calcul des proportions de chaque constituant pour les éprouvettes cubiques avec différents dosage de poudre du marbre.

Composants (g/m <sup>3</sup> )	Mortier témoin 0% de PM	Mortier 1 10% de PM	Mortier 2 30% de PM	Mortier 3 50% de PM	Mortier 4 70% de PM	Mortier 5 100%
Ciment	55	55	55	55	55	55
PM	0	19.3	57.9	96.5	135.1	193
Sable (0/3)	193	173.7	135.1	96.5	57.9	0
Eau	34.38	34.38	34.38	34.38	34.38	34.38
L'adjuvant	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

**Tableau IV-15: compositions de mortiers cubiques avec différents dosages de la poudre de marbre**

Le tableau (IV-16), résume le calcul des proportions de chaque constituant pour les dalles avec différents dosage de poudre du marbre.

Composants (g/m <sup>3</sup> )	Mortier témoin 0% de PM	Mortier 1 10% de PM	Mortier 2 30% de PM	Mortier 3 50% de PM	Mortier 4 70% de PM	Mortier 5 100%
Ciment	1710.7	1710.7	1710.7	1710.7	1710.7	1710.7
PM	0	598.75	1796.25	2993.75	4191.25	5987.5
Sable (0/3)	5987.5	5388.75	4191.25	2993.75	2993.75	0
Eau	1069.2	1069.2	1069.2	1069.2	1069.2	1069.2
L'adjuvant	13	13	13	13	13	13

**Tableau IV-16: compositions de mortiers dalles avec différents dosages de la poudre de marbre**

#### IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté en détails tous les éléments de l'analyse expérimentale, en commençant par la caractérisation des différents constituants, la formulation des mélanges, la confection des éprouvettes et le mode opératoire. Les différents résultats obtenus pour différents essais mécaniques considérés dans ce travail seront présentés et illustrés dans le chapitre suivant.



## V.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les procédures de la confection de nos mortiers depuis les pesés des matériaux jusqu'à la rupture des éprouvettes, en va décrire toutes les étapes, les conditions et leurs conservation ainsi que les différents essais expérimentaux pour les caractériser à l'état frais et à l'état durci ; par la suite en présentera les résultats de caractérisation à différents âges, à 14, à 28 et 56 jours sur les différentes éprouvettes avec différents dosages en poudre du marbre ; nous faisons des interprétations, des comparaisons et des conclusions pour les résultats obtenus.

Le programme expérimental comprend quatre types d'essais qui devant être effectués à des échéances bien précises.

Le tableau suivant définit les éprouvettes d'essais effectués dans cette expérimentation.

Les éprouvettes	La composition
P0	0 % de la poudre du marbre
P30	30% de la poudre du marbre
P50	50% de la poudre du marbre
P70	70% de la poudre de marbre
P100	100% de la poudre de marbre

**Tableau V- 1 : les éprouvettes utilisées pour performances mécaniques**

### ❖ Les éprouvettes cubiques :

Ce type d'éprouvettes a été conçu pour l'essai d'écrasement compression simple conformément à la NF P18-406 (NA427), afin de déterminer la résistance à la compression, la charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours des essais.

### ❖ Les éprouvettes prismatiques :

Selon les normes NF P18-407 (NA428), ces éprouvettes sont réalisées pour les essais de traction par flexion.

### ❖ Les dalles :

Ces éprouvettes ont été conçues pour les essais de poinçonnement et l'ultrason.

## V.2 Confection des mortiers :

### V.2.1 Préparation de la gâchée :

La préparation des matériels et des matériaux nécessaires est la première étape indispensable avant tout essai expérimental.

- Pour uniformiser les essais, nous avons lavé décidé de travailler avec des granulats secs, alors en il a fallu laver le sable puis le mettre à l'étuve pendant 24h. après séchage, en l'a

fait sortir à la température ambiante et en l'a couvert avec un sac pour éviter qu'il reprenne son humidité.

- La préparation des moules prévus pour les éprouvettes de mortier, les bien huiler pour faciliter le décoffrage.



**Figure V- 1 : les moules utilisés**

- La préparation des pesées de matériaux à utiliser (ciment, sable, poudre du marbre, eau, adjuvant).



**Figure V- 2 : préparation des pesées**

- La vérification de la propreté du malaxeur.

Tous les matériels nécessaires est préparé (balance, récipient, spatules, truelles, cône d'Abrams, table pour l'étalement, chronomètre, mètre...) Tout le matériel est pré-humidifié. Le malaxeur utilisé est à axe vertical de mouvement planétaire.

Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage qui vient ; après avoir humidifier tous le matériel, en introduit les matériaux secs (sable, ciment, poudre du marbre) dans le malaxeur, en met ce dernier en marche pour homogénéiser le mélange sec pendant 30 sec jusqu'à obtenir une couleur unique, en met le malaxeur en marche et en verse 2/3 du mélange liquide (eau et adjuvant) pendant 30sec, en fait tomber les bords et en mélange de nouveau pendant 30 sec en ajoutant successivement le tiers restant du mélange liquide. Le mortier est dit prêt quand, si en pose la truelle dessus, il se lisse et l'eau

remonte à la surface, en remplit les moules d'éprouvettes en vibrant avec la table vibrante pendant 30sec pour éliminer les bulles d'air.



Figure V- 3 : les étapes du malaxage

### V.2.2 Conservation des éprouvettes :

Après le gâchage de mortier, les moules sont conservés dans une pièce à température ambiante, démoulés après 24 h, une fois ils sont démoulés les éprouvettes sont marquées et conservé dans un bac rempli d'eau à température ambiante (20°C), cette conservation évite la perte d'eau et garantie le processus d'hydratation du ciment, elles seront conservées dans l'eau jusqu'à la veille du jour de l'essai, en les fait sortir puis les mettre à l'air libre (dans laboratoire) pour qu'elles acquièrent l'état normal d'humidité et comme en a plusieurs essais en plusieurs jours, on fait sortir seulement le nombre à caractériser, ensuite elles seront écrasées chaque série à son âge prévu.



Figure V-4 : le démoulage et le marquage et des éprouvettes



Figure V- 5 : la conservation des éprouvettes dans l'eau

### V.3 Essais expérimentaux

#### V.3.1 Essais sur mortier frais :

##### V.3.1.1 Essai d'affaissement (Slump Flow) :

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams est un essai réalisé sur le béton de ciment frais peu fluide pour déterminer sa consistance. L'affaissement est aussi connu par le nom Slump provenant de l'anglais.



Figure V- 6 : cône d'Abrams

Pour réaliser cet essai une plaque et un cône d'Abrams sont utilisés :

- la plaque est en acier et a une surface dure et non-absorbante ;
- une tige d'acier lisse de diamètre 16 mm et à extrémité arrondie.
- le cône d'Abrams est un cône en acier galvanisé. Il a un diamètre intérieur à sa base de 200 mm, un diamètre intérieur à son sommet de 100 mm et une hauteur de 300 mm<sup>2</sup>. Il porte le nom de son inventeur Duff Abrams ;

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- le cône d'Abrams est placé puis fixé sur la plaque ;
- le cône est rempli avec du béton frais ou bien le mortier en trois fois. A chaque fois, chaque couche est piquée par 25 coups à l'aide de la tige ;
- le cône est arasé avec une tige ;
- le cône est levé immédiatement, verticalement et doucement en le tournant un peu pour le démouler ;
- l'affaissement du béton frais ou de mortier est mesuré

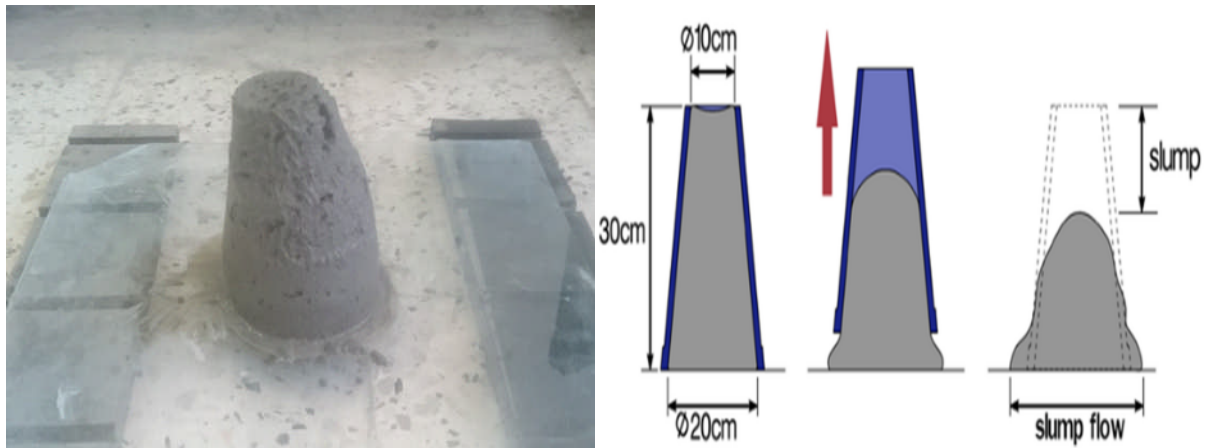


Figure V- 7 : l'essai d'affaissement au cône d'Abrams et son schématisation

Consistance du béton	Affaissement au cône (cm)	serrage nécessaire
Très ferme	< 2	Vibration puissante
Ferme	3 à 5	Bonne vibration
Plastique	6 à 9	Vibration normale
Très plastique	10 à 15	Simple piquage
Fluide	> 16	Léger piquage

Tableau V-2 : consistance du béton

Désignation de mélanges	Slump (affaissement) (cm)	Slump (affaissement) (%)
P0	10	33,3
P30	12,5	16,6
P50	13	13,3
P70	13,2	12
P100	13,4	10,6

Tableau V- 3 : Affaissement des mortiers

- D'après ces résultats d'affaissement obtenus et les valeurs de consistance du béton indiquées dans le tableau (IV- 3), en déduit que nos mortiers ont tous une consistance très plastique. Car leur affaissement est compris entre 10 et 14 cm.
- On constate que l'affaissement augmente avec l'augmentation de l'ajout de la poudre de marbre dans les mortiers linéairement avec l'équation Y.

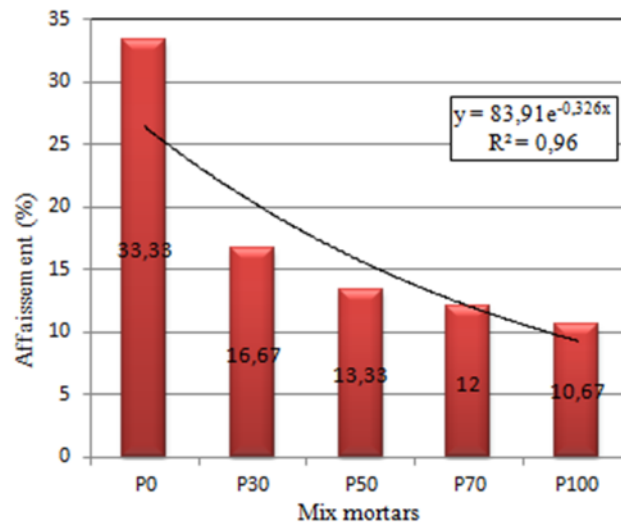


Figure V- 8: Histogramme d'affaissement des mortiers

On remarque que nos valeurs d'affaissement de nos mortiers ont pris la forme d'une équation hyperbolique d'équation :  $y = 83,91e^{-0,326x}$

### V.3.1.2 Essai d'Étalement (Slump Flow) :

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow), on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante (800 par 800 mm), puis il est rempli de béton BAP ou bien du mortier. Le cône est ensuite soulevé et le mélange en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de mélange ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. L'important est de procéder toujours de la même manière. Le remplissage du cône avec le BAP ou bien le mortier est facilité et son soulèvement est empêché.

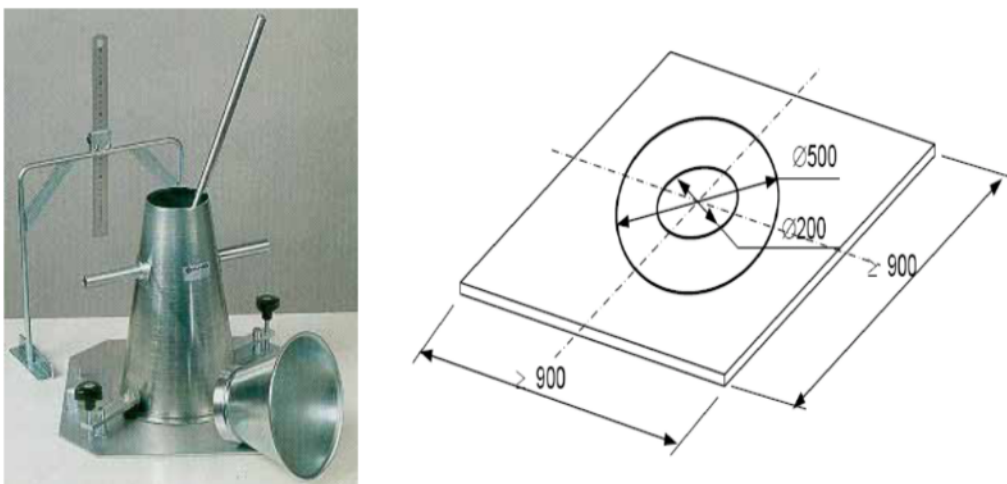


Figure V-9 : Essai d'étalement

Désignation de mélanges	Slump (étalement) (cm)	Slump (étalement) (%)
P0	12,5	25
P30	11,3	13
P50	10,9	9
P70	10,4	4
P100	10,3	3

Tableau V-4 : étalement des mortiers

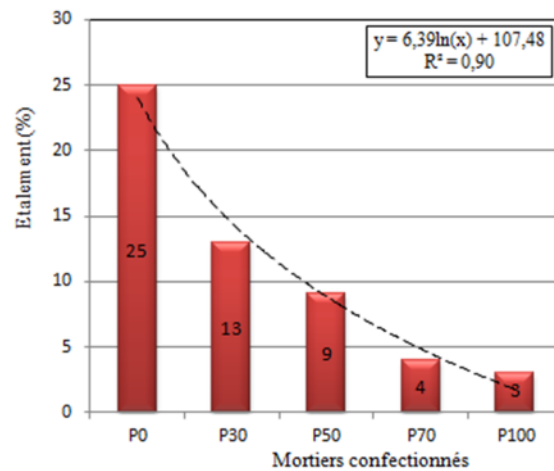


Figure V- 10: étalement des mortiers

### Maniabilité

Les tableaux (IV-3), (VI-4) et les figures (VI-8), (VI-10) montrent les résultats de la maniabilité du mortier avec remplacement du sable par de la poudre de marbre en différents pourcentages allant de 10% à 100% (0%, 10%, 30%, 50%, 70 %, 100%). Il semble que la maniabilité du mortier diminue à mesure que la teneur en poudre du marbre augmente.

### V.3.2 Les essais à l'état durci :

#### V.3.2.1 Essai de compression (NF P18- 406)

La résistance mécanique en compression correspond à la charge de rupture (charge maximale enregistrée) au cours de l'essai d'écrasement sous une contrainte normale axiale. La mise en charge doit se faire d'une manière continue jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La résistance mécanique en compression est une caractéristique essentielle du matériau mortier et est le paramètre fondamental de notre étude, notre objectif est de déterminer la résistance à la compression des différents mortiers à l'âge de 14, 28 et 56 jours.

La presse utilisée est d'une capacité maximale de 200 KN (voir la figure IV-11)

Les essais ont été effectués avec une vitesse de chargement de 2.4 KN/S.

On note la charge maximale atteinte P (KN) et la surface de chargement S (m<sup>2</sup>), la contrainte maximale (résistance à la compression) s'écrit alors :

$$E_c = P / S$$



Figure V- 11: presse hydraulique Ibertest



Figure V- 12 : Une éprouvette avant, pendant et après la compression



Figure V- 13 : éprouvettes cubiques après l'écrasement

### V.3.2.2 Essai de traction par flexion (NF P18- 407)

L'essai de traction par flexion est effectué sur des éprouvettes de sections prismatiques avec une vitesse de chargement de 0.5 KN/S. Le prisme est placé dans une presse hydraulique de

marque Ibertest piloté par un micro-ordinateur. Sa capacité maximale est de 200 KN, voir (figure V- 14), elle est programmée pour les essais de compression et les essais de flexion pour les éprouvettes en béton ou en mortier. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture.



Figure V- 14: Eprouvette avant, pendant et après l'essai de flexion trois points



Figure V- 15: éprouvettes prismatiques après l'essai

### V.3.2.3 Essai de poinçonnement :

Ce test se réalise sur des plaques en mortier de 3\*36\*36cm poinçonnées au centre.

La rupture par poinçonnement est caractérisée par une force concentrée agissant perpendiculairement sur une dalle - réaction d'une colonne ou charge concentrée en utilisant un carré d'impact de dimensions (3\*3 cm<sup>2</sup>) – qui crée une rupture locale par pénétration à travers la dalle avec une vitesse de chargement de 0.01KN/S.



Figure V- 16: Une éprouvette soumise à l'essai de poinçonnement



**Figure V-17 : dalles après l'essai poinçonnement à 14, 28 et 56 jours (de gauche à droite)**

#### **Observations :**

- Apparition de considérables et visibles fissures transversales à l'âge de 14 jours, on dit que les dalles résistent moins.
- Les fissures des dalles à l'âge de 28 jours sont moins considérables que celles obtenues à l'âge de 14 jours, les dalles résistent mieux qu'avant cela est dû peut être au durcissement.
- A l'âge de 56 jours, les dalles sont restées intactes on constate difficilement l'apparition de quelques fissures, on dit que les dalles sont beaucoup plus résistantes.

#### **V.3.2.4 Essai de l'ultrason :**

Afin de caractériser un béton ou un mortier, on utilise un ultrason qui est un appareil non destructif basé sur la mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques à travers le matériau.

C'est une méthode d'auscultation qui a été utilisée avec succès pour plus de 60 ans pour l'évaluation de la qualité des matériaux.

Il est nécessaire d'effectuer certaines opérations préliminaires sur les éprouvettes pour les préparer à l'auscultation ; à savoir le calibrage de l'appareil et la préparation des points de mesure, cette dernière opération consiste à marquer les points d'essais afin de centrer les transducteurs dessus (on peut marquer ces points avec de la craie ou avec un crayon), en a effectué deux essais pour chaque point pour la précision des résultats; en évite d'appliquer les sondes sur des cavités, ces sondes transmises par la paire de transducteurs reliés au boîtier principal (**Punditlink**), qui sont utilisés l'un en émetteur et l'autre en récepteur, ainsi les enduire de matière plastique pour assurer le couplage acoustique et garantir le passage d'onde (pour notre cas nous avons utilisé du gel).



Figure V- 18 : Disposition et emplacement des transducteurs sur l'éprouvette d'essai

**V.3.2.5 Essai de l'attaque chimique :**

Cet essai consiste à caractériser la durabilité de nos mortiers en les introduisant dans une solution acide à 7, 14 et 28 jours.

En a préparé d'abord la solution en diluant une masse  $m = 1190g$  l'acide chloridrique ( HCl) qui a une masse molaire  $M= 3.6$  dans un volume  $V = 2 l$  de l'eau déminéralisée afin d'obtenir un acide carbonique qui a un PH= 1, avec une couleur rose foncé ; en ajoute par exemple 20 ml puis en vérifie le PH, aussi si la couleur est rose clair en ajoute 5 ml par exemple jusqu'à obtention d'un PH qui égal à 1 ou bien une couleur rose foncé.



Figure V- 19: l'acide utilisé dans l'essai de durabilité



Figure V- 20: la préparation de la solution acide

#### V.4 Résultats de caractérisation des mortiers à l'état durci et discussion :

##### V.4.1 Essai de flexion

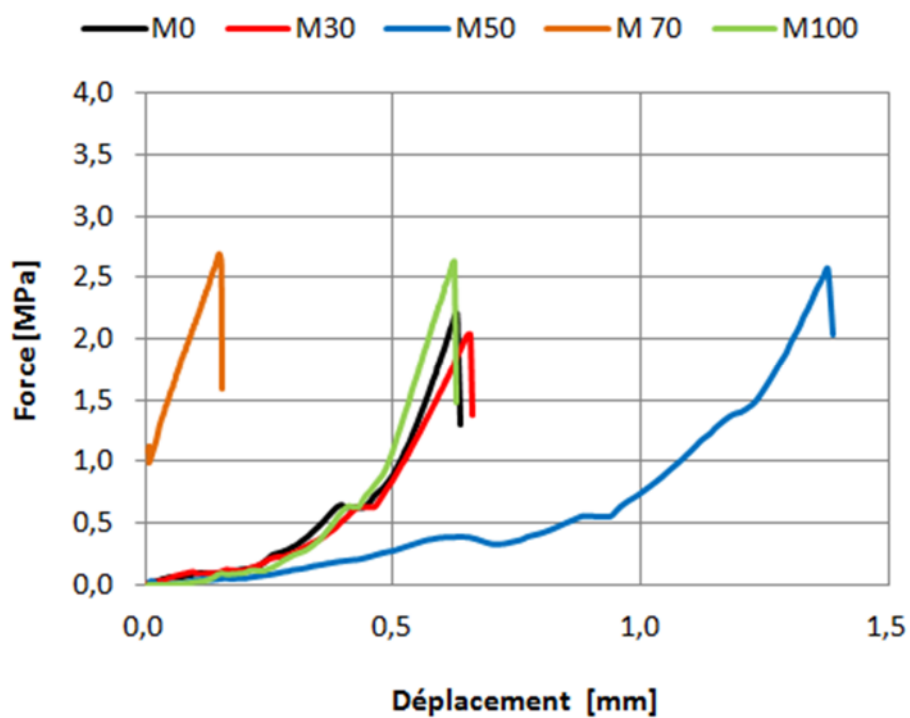


Figure V- 21 : Courbe de résistance à la flexion trois points obtenue à 14 jours

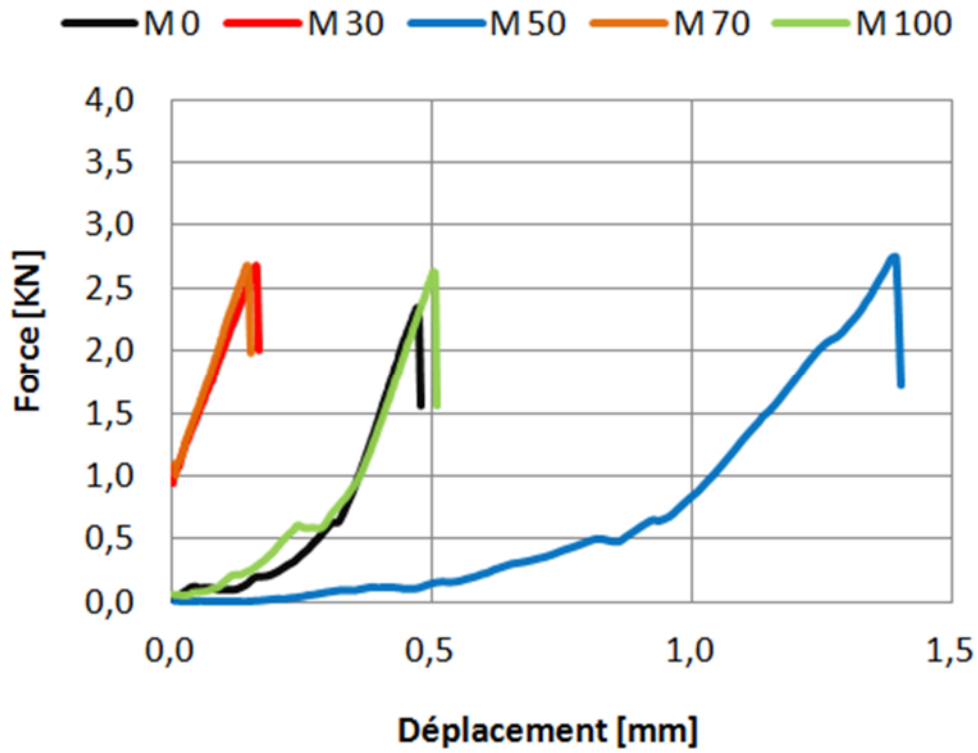


Figure V- 22 : Courbe de résistance à la flexion trois points obtenue à 28 jours

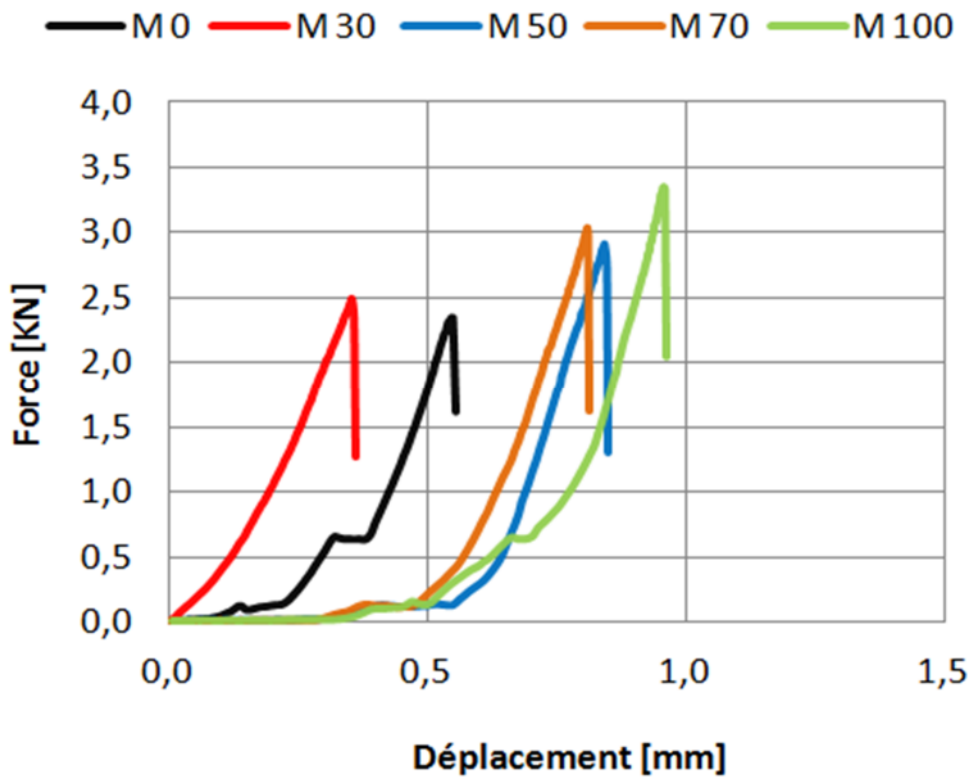


Figure V- 23: Courbe de résistance à la flexion trois points obtenue à 56 jours

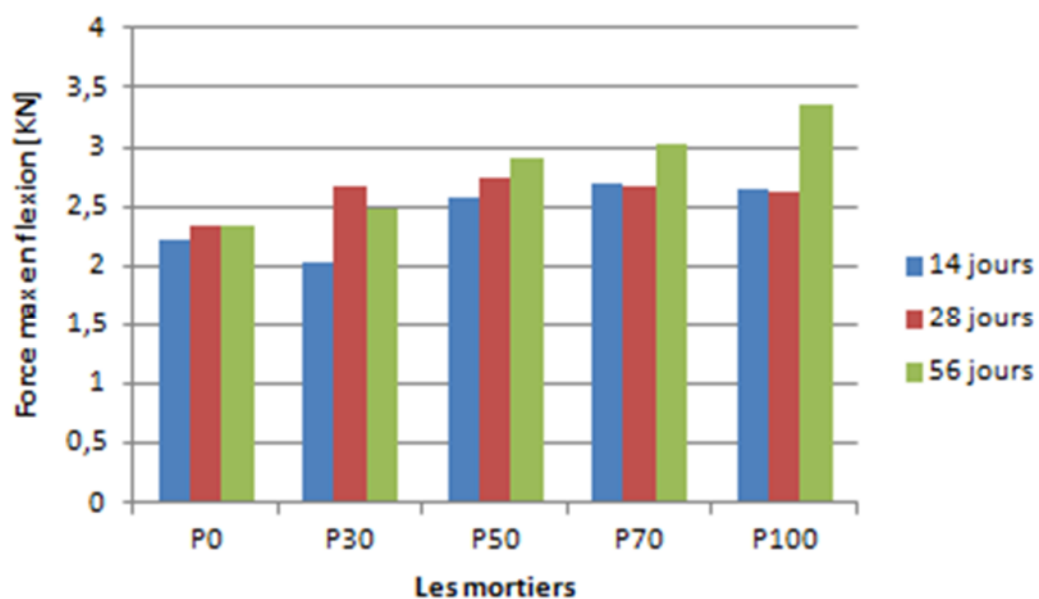
**Interprétation :**

- A l'âge de 14 jours, les mortiers M100 et M50 ont la plus grande résistance en flexion par rapport aux autres mortiers notamment le mortier témoin.
- Au 28<sup>ème</sup> jour, les résistances des mortiers ont marqué une augmentation considérable de résistance, en remarque que les mortiers confectionnés à base de la poudre du marbre ont presque atteint la même résistance qui est supérieure par rapport à celle du mortier témoin.
- A long terme, on constate que tous les mortiers ont eu une augmentation de résistance, cette dernière augmente avec l'augmentation du dosage de la poudre du marbre dans le mortier et diminue avec sa diminution.
- Le mortier M100 a la plus grande résistance en flexion aux différents âges.

Dans le tableau suivant, on a résumé les forces maximales de différents mortiers à différents âges à 14, 28 et 56 jours.

	14 Jours [KN]	28 Jours [KN]	56 Jours [KN]
<b>P0</b>	2,21	2,34	2,34
<b>P30</b>	2,03	2,67	2,49
<b>P50</b>	2,57	2,75	2,91
<b>P70</b>	2,69	2,67	3,03
<b>P100</b>	2,64	2,62	3,35

**Tableau V- 5 : Récapitulatif des résultats d'essais de flexion effectués sur différents mortiers**



**Figure V- 24 : Force max en flexion des différents mortiers à différents âges**

**Observations :**

En général les forces maximales des différents mortiers marquent une augmentation considérable au 56<sup>ème</sup> jour.

**V.4.2 Essai de compression :**

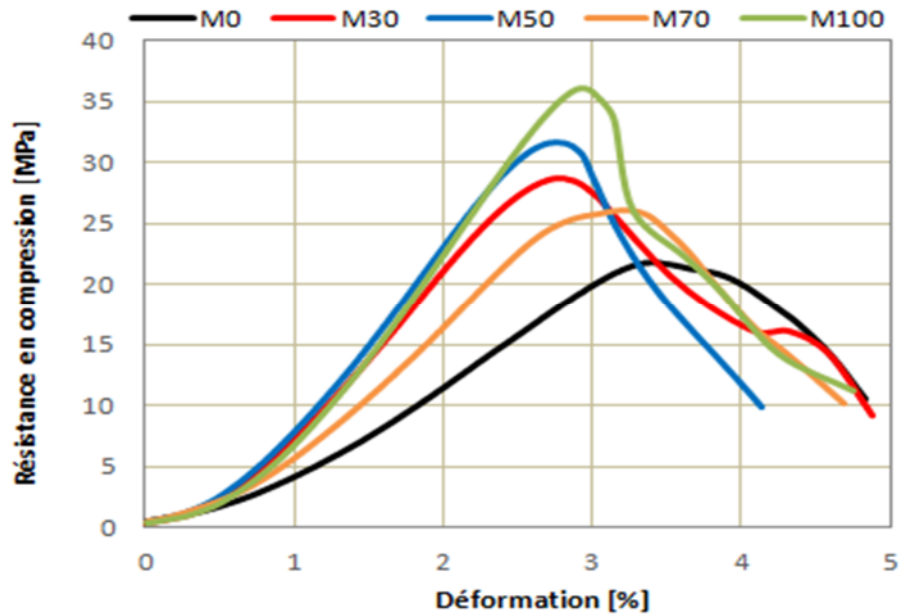


Figure V- 25 : Courbe de résistance à la compression des mortiers obtenue à 14 jours

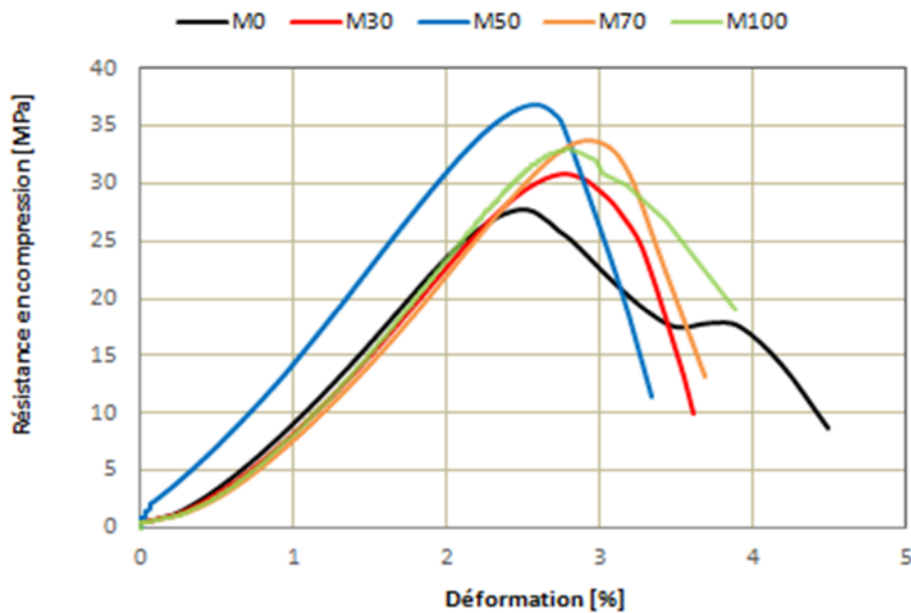


Figure V- 26 : Courbe de résistance à la compression des mortiers obtenue à 28 jours

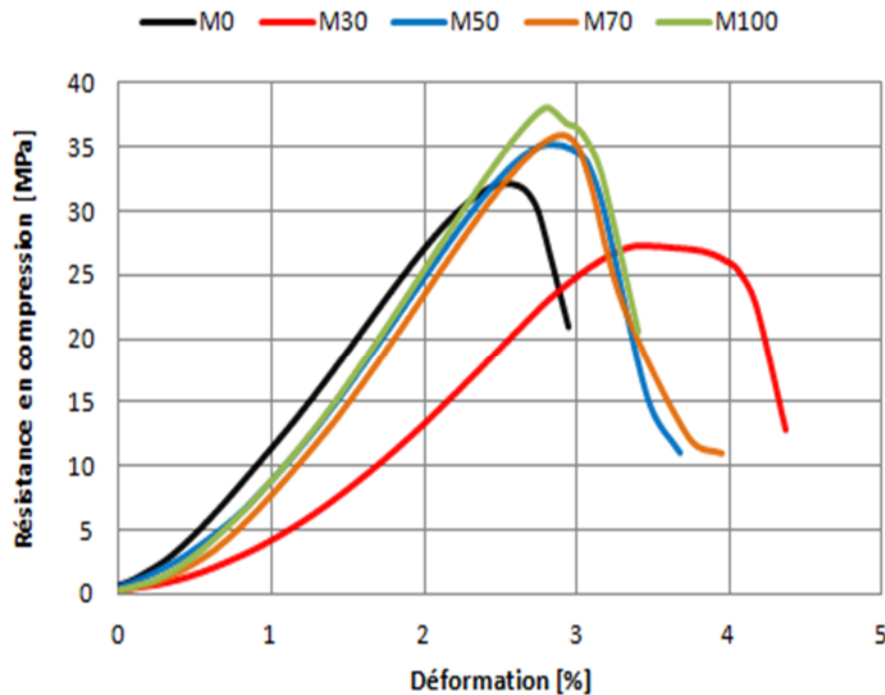


Figure V- 27 : Courbe de résistance à la compression des mortiers obtenue à 56 jours

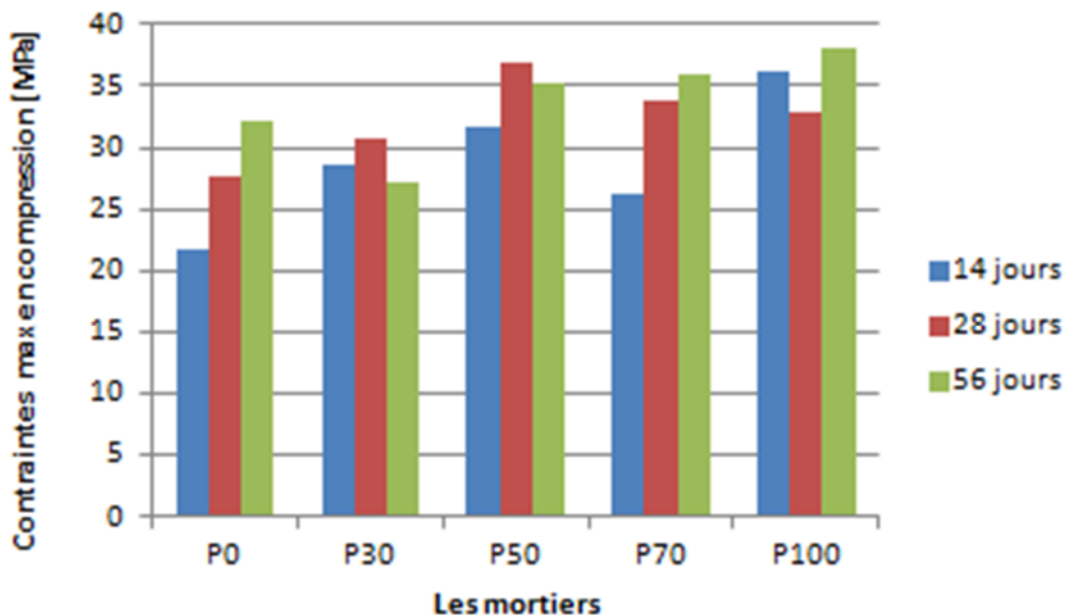
#### Interprétation :

- Les courbes obtenues présentent toutes une partie droite dans le domaine élastique linéaire, puis ces courbes s'éloignent de cette droite c'est ce qui présente la partie non linéaire.
- Le maximum des courbes correspond à la résistance maximale  $F_{c_j}$  et au-delà, les courbes présentent une branche descendante jusqu'à rupture du mortier.
- A l'âge de 14 jours, en remarque des résistances considérables de mortiers confectionnés avec de la poudre du marbre par rapport à celle de mortier témoin qui a la plus petite résistance qu'est égale à 22 MPa, alors qu'au mortier P100 qui a la plus grande résistance en compression qu'est estimée à plus de 35 MPa.
- Au 28<sup>ème</sup> jour, en constate que les résistances de tout les mortiers sont augmentées beaucoup plus, celle du mortier P70 qui égale a 30 MPa et celle du mortier P50 avec une résistance qui dépasse les 35MPa.
- A long terme, Les autres mortiers présentent tous des résistances beaucoup plus élevés qu'avant, en remarque que la résistance du mortier P100 est la plus supérieure.

Le tableau suivant est un récapitulatif des résultats d'essais de compression effectués sur les différents mortiers à différents âges, il résume les résistances maximales en compression de chaque mortier à 14, 28 et 56 jours.

	14 Jours [MPa]	28 Jours [MPa]	56 Jours [MPa]
<b>P0</b>	21,83	27,67	32,18
<b>P30</b>	28,67	30,8	27,23
<b>P50</b>	31,7	36,77	35,23
<b>P70</b>	26,13	33,74	35,85
<b>P100</b>	36,07	32,94	38,06

**Tableau V- 6 : Récapitulatif des résultats d'essais de compression effectués sur différents mortiers**



**Figure V- 28 : Résistance à la compression des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours**

#### Observation :

Toutes les résistances des différents mortiers sont augmentées avec le temps, notamment à 28 et 56 jours, en dit que les mortiers ont atteint des hautes résistances avec le temps comparant à celles obtenues à l'âge de 14 jours.

On constate des résistances considérables à l'âge de 28 jours des mortiers P30 et P50 par rapport aux autres mortiers.

A 14 et 56 jours, c'est le mortier P100 qui a marqué les résistances max, alors qu'au 28<sup>ème</sup> jour c'est le mortier P50 qui a eu la résistance max.

On peut dire que la résistance des mortiers en compression s'améliore avec son durcissement.

V.4.3 Essai poinçonnement :

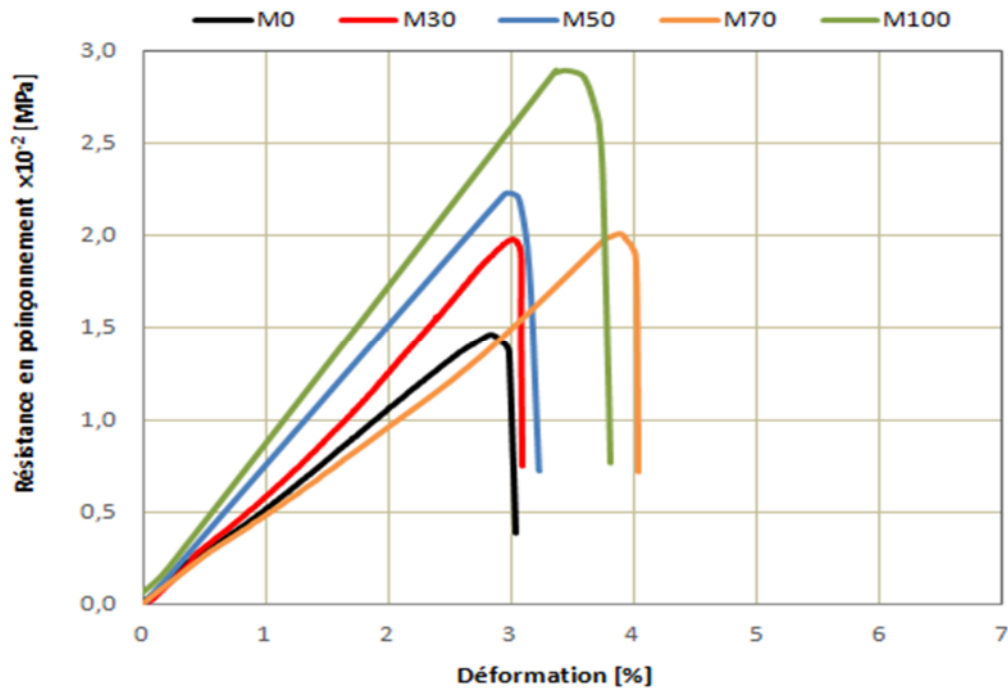


Figure V- 29: Courbe de résistance en poinçonnement des mortiers obtenue à 14 jours

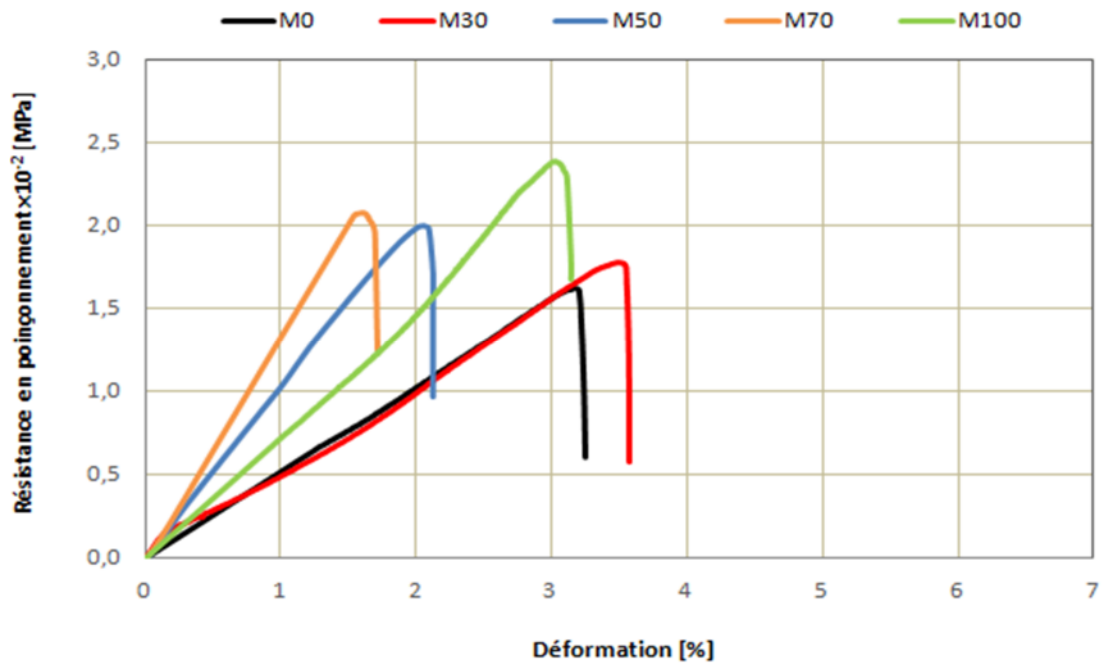


Figure V- 30: Courbe de résistance en poinçonnement des mortiers obtenue à 28 jours

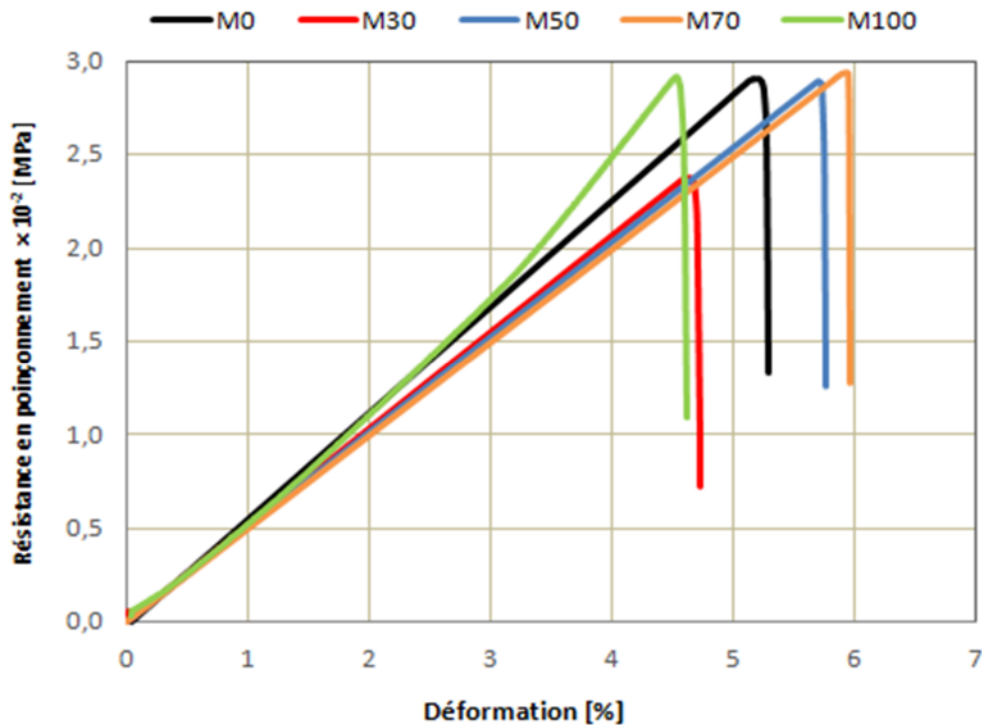


Figure V- 31: Courbe de résistance en poinçonnement des mortiers obtenue à 56 jours

**Interprétation :**

- En remarque qu'à l'âge de 14 jours, la résistance du mortier P100 est la plus élevée par rapport aux autres mortiers, alors que celle du mortier témoin est la plus petite.
- En marque une augmentation de résistance très peu significative de mortier témoin, et une légère diminution de résistances des autres mortiers à l'âge de 28 jours.
- A l'âge de 56 jours, on constate une nette augmentation de résistance de la quasi-totalité de mortiers, du peut être au bon durcissement de ces derniers avec le temps.
- La résistance de mortiers au 56ème jour est nettement supérieure par rapport au 14ème et 28ème jours.

	14 Jours [MPa]	28 Jours [MPa]	56 Jours [MPa]
<b>P0</b>	1,89	2,1	3,76
<b>P30</b>	2,56	2,29	3,08
<b>P50</b>	2,88	2,58	3,74
<b>P70</b>	2,6	2,69	3,8
<b>P100</b>	3,74	3,09	3,78

Tableau V-7 : Récapitulatif des résultats d'essais de poinçonnement effectués sur différents mortiers

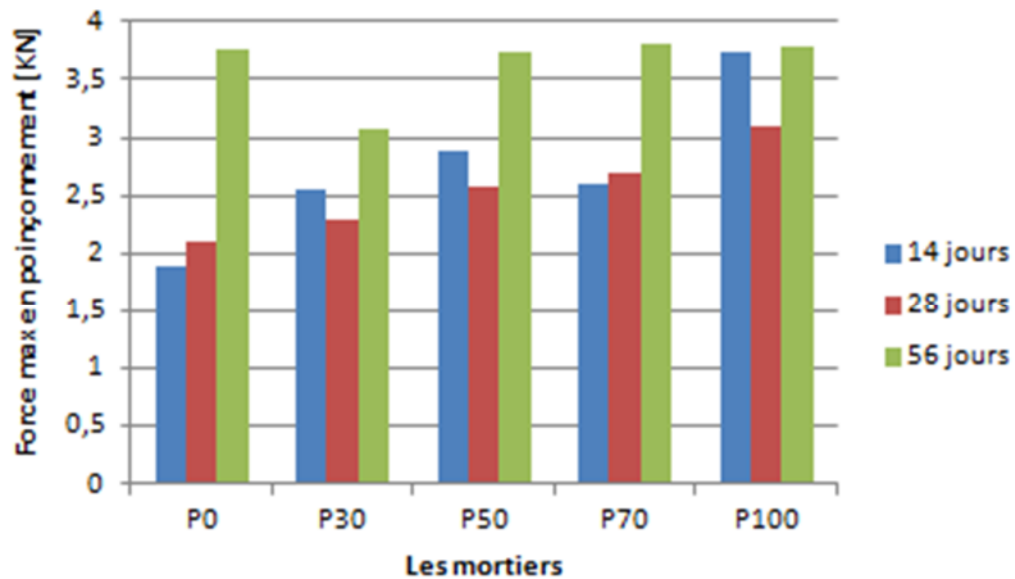


Figure V- 32: Force max en poinçonnement des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours

#### Observation :

On remarque que les force max en poinçonnement à l'âge de 14 jours des deux mortiers P30 et P50 sont supérieures à celles obtenues à l'âge de 28 jour.

Les forces max en poinçonnement du mortier P100 à 14 jours et 56 jours sont presque les mêmes.

Tous les mortiers ont une force max en poinçonnement au 56<sup>ème</sup> jour, on comparant à celle trouvée soit à 14 ou à 28 jours, on constate une grande différence même.

Le tableau (V-8) résume la valeur du module de Young de chaque mortier à 14, 28 et 56 jours.

	14 Jours [KN]	28 Jours [KN]	56 Jours [KN]
<b>P0</b>	0.51	0.51	0.55
<b>P30</b>	0.66	0.5	0.53
<b>P50</b>	0.76	0.95	0.5
<b>P70</b>	0.51	1.23	0.48
<b>P100</b>	0.82	0.96	0.64

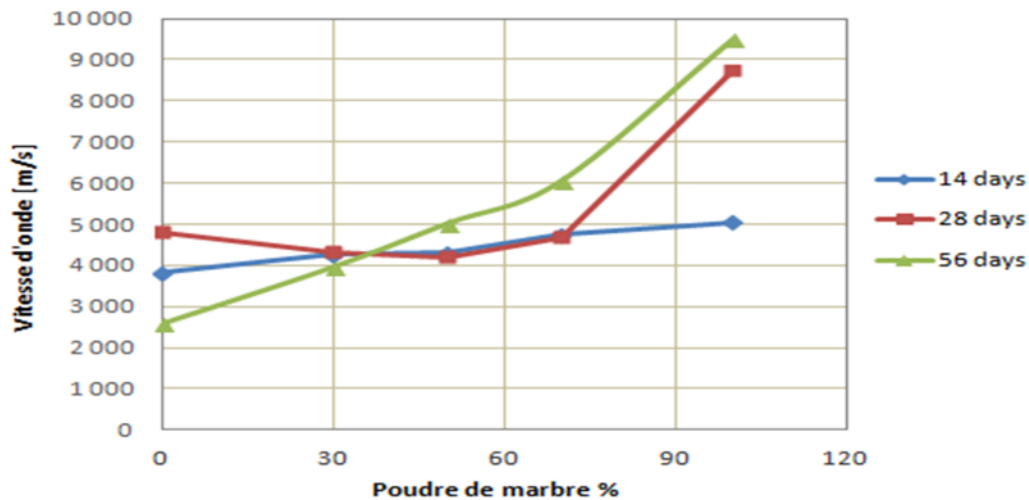
Tableau V- 8 : Le module de Young des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours

#### Observation :

On remarque que les valeurs maximum de module de Young de la quasi totalité des mortiers sont obtenus à l'âge de 28 jours, et la valeur max c'est celle du mortier P100.

#### V.4.4 Essai du l'ultrason :

Après avoir calculé la vitesse d'ondes moyenne des trois points pour chaque mortier et à différents âges, en a résumé les résultats trouvés dans la (figure IV- 33).



**Figure V- 33: Courbes de vitesse d'onde obtenues des différents mortiers à 14, 28 et 56 jours**

#### Interprétation :

- Pour le mortier témoin, la vitesse de la propagation d'ondes au 28ème jours est la plus élevée par rapport aux autres âges spécifiquement le 56ème jour.
- La vitesse de la propagation d'ondes du mortier P30, est maintenue constante au cours du temps que ça soit au jeune âge ou à long terme.
- Les autres mortiers marquent une augmentation considérable de la vitesse de propagation d'onde au 56ème jour puis vient celle au 28ème jour.
- En remarque que la vitesse de propagation d'ondes des mortiers confectionnés avec de la poudre du marbre est plus élevée à long terme, alors que pour le mortier témoin c'est seulement à 28 jours qu'elle atteint la vitesse maximale de propagation d'ondes.

#### V.4.5 Essai de durabilité (l'attaque chimique) :



**Figure V- 34 : Dégradation d'éprouvettes dans le milieu acide**



Figure V- 35: éprouvettes dégradées aux 7 ème et 14 ème jours

Le tableau suivant donne les masses d'éprouvettes avant et après avoir introduire les cubes dans la solution acide au cours du temps :

	A 7 jours [g]	A 14 jours [g]	A 21 jours [g]
<b>P0</b>	271.3	268.1	268.3
<b>P30</b>	279.2	268.6	265.1
<b>P50</b>	277.5	255.1	247.3
<b>P70</b>	276.9	235.6	225
<b>P100</b>	272.4	104.5	63.4

Tableau V- 9: masses d'éprouvettes sous l'attaque chimique à différents âges

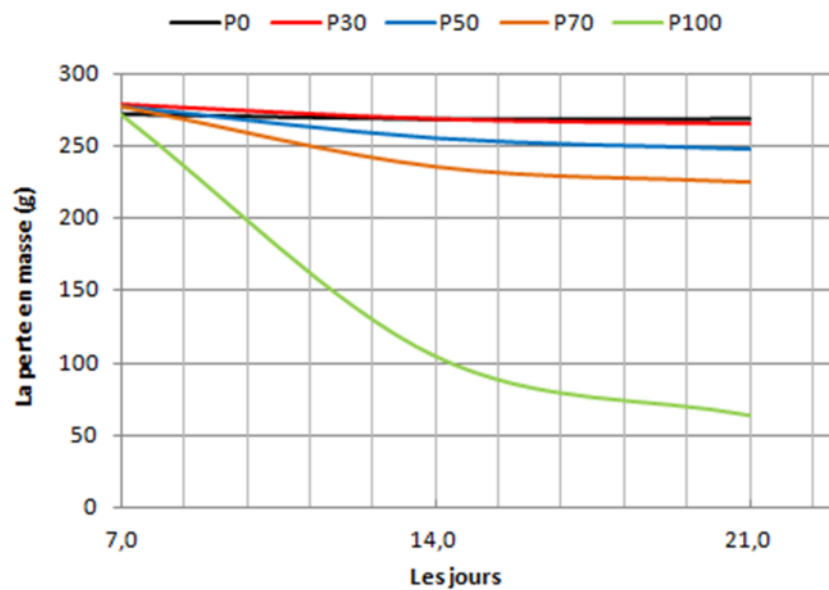


Figure V- 36: la perte de masse des mortiers en fonction du temps

**Observations :**

- On constate une très grande perte de masse au cours du temps, du mortier P100 et c'est un résultat attendu vu ce mortier est confectionné à 100% avec la poudre de marbre.
- La perte en masse des mortiers P0 et P30 sont pas considérables par rapport à celles des mortiers P50 et P70.

**V.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à l'influence du dosage de la poudre du marbre et l'influence du temps sur la caractérisation des mortiers avec la compression, la flexion trois points, l'ultrason, le poinçonnement et aussi l'attaque chimique, et d'après les résultats trouvés au laboratoire, on a constaté que la résistance des mortiers augmente en fonction de l'ajout de la poudre du marbre.

Les valeurs trouvées pour les mortiers confectionnés avec de la poudre du marbre notamment à un dosage de 50, 70 ou 100% sont meilleurs que celles trouvées pour les mortiers témoins sous les mêmes conditions, juste que pour le dosage 100% en poudre du marbre est déconseillé dans les milieux acides, donc on peut conclure que l'utilisation de la poudre de marbre en substitution partielle avec le sable dans la confection des mortiers à 50 ou 70% est une méthode fiable, le mortier aura des résistances beaucoup plus élevées que celles d'un mortier témoin.

### V. conclusion :

Dans le cadre de ce mémoire en s'est intéressée à l'influence d'addition cimentaire- la poudre de marbre sur les caractéristiques mécaniques des mortiers. Des essais expérimentaux ont été effectués en vue de conforter ou compléter les éléments bibliographiques présentés.

La poudre de marbre a été caractérisée par sa dimension, sa masse volumique apparente et absolue, ses caractéristiques chimiques et physiques ainsi 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 de 100 % de la poudre de marbre améliore la résistance à la flexion à long terme.
- Les résistances en poinçonnement de différents mortiers ne sont pas relatives à la présence ou l'absence de l'ajout dans leur composition, en remarque qu'elles atteignent leurs max à long terme.
- l'ajout de poudre de marbre à un dosage supérieur à 30% est nocif, il n'améliore pas la durabilité des mortiers vis-à-vis des attaques des acides et c'est confirmé par le changement physique et les considérables pertes de masses enregistrées sur les mortiers confectionnés avec un dosage de 50%, 70% et notamment 100%.
- Le comportement des mélanges à l'état frais à 70% et 100% est nettement amélioré par rapport à celui d'un mortier témoin, en constate que l'affaissement de ce dernier est 3 fois plus grand, son étalement est supérieur de presque 10 fois que ces mortiers confectionnés avec ce dosage d'ajout.
- 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.
- Un dosage de 50% est suffisant pour avoir la résistance max en compression à 28 jours, alors qu'à 56 jours il est conseillé d'augmenter le dosage à 100%.

- L'introduction de la poudre de marbre dans un mortier améliore sa compacité et son homogénéité à long terme, ce qu'est constaté après l'essai du l'ultrason, vu que les vitesses de propagation d'ondes du mortier témoin à court terme sont plus grande que celle de mortier confectionnés avec l'ajout, alors qu'à long terme elles augmentent et deviennent supérieures à celles du mortier témoin.

Ces essais nous ont permis de confirmer un certain nombre de résultats relevés dans la littérature. Une base de données expérimentales a ainsi été mise en place.

Certains résultats relevés dans la bibliographie sont confirmés.

Concernant les caractéristiques intrinsèques des mélanges élaborés, il se dégage de l'étude que le dosage est, à court et à long terme est un paramètre de premier ordre, contrairement à la nature minéralogique de l'addition.

Concernant l'attaque chimique, c'est la cause principale qui influence sur la durabilité des mortiers utilisés dans les agents agressifs. La durabilité des matériaux dans des matrices sévères peut être grossièrement classée en deux groupes :

- Dégradation du mortier qui ouvre des pores dans la structure et conduit à une perte de résistance.
- Production des phases expansives qui engendrent les contraintes internes et modifient l'aspect physico-chimique et minéralogique des mortiers.

Sur le plan général, l'ajout de la poudre de marbre en substitution partielle avec le sable influe positivement sur les caractéristiques mécaniques de mortiers, donc son utilisation est recommandée.

A coté 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 et l'homme, elle contribue à la réduction de déchets de marbre, comme la création des emplois, autrement dit, pour avoir de la poudre de marbre, on a besoin des carrières de recyclage pour recycler ces déchets et ça nécessite une main d'œuvre ce qui va aider à la réduction de taux de chômage ; aussi, en l'exportant notre pays pourra créer sa propre richesse, durable et propice pour l'accroissement de l'économie du pays, qu'est la conception de l'intérêt général, ça va créer un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures que se soit dans le domaine de génie civil ou d'autres domaines.

Références Bibliographique

- [1]- . Dupain R., Lanchon R., Santattoman J.C., Granulats, sols, ciments et bétons caractéristiques des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire, Edition Casteilla. Paris 2000.
- [2]- Senhadji Y., Escadeillas G., Khelafi H., Mouli M., Benosman A.S., European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2012.
- [3]- Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD), Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. Janvier 2002, Algérie.
- [4]- A. KOMAR, " Matériaux et éléments de construction ", Quatrième édition, Editions MIR. MOSCU.
- [5]- MICHEL VENUAT, " La pratique des ciments mortiers et bétons ", Tome 1, Caractéristiques des liants et des bétons, Mise en œuvre des coulis et mortiers, Editions du Moniteur.
- [6]- GEORGES DREUX, JEAN FESTA, " Nouveau guide du béton et de ses constituants ", Editions Eyrolles, 2002.
- [7]- Emile Olivier, "Technologie des matériaux de construction", Techniciens de la construction (Tome 1), entreprise moderne d'édition, Paris, 1978.
- [8]- Zilmar R. UNIKOWSKI Rapport de recherche LPC N°110, "Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment", Février 1982.
- [9]- Ecole d'Avignon, "Techniques et pratique de la chaux", Deuxième édition 2003, Cinquième tirage 2007, Edition Eyrolles
- [10]- Fichier technique, Tome 1, "Les constituants des bétons et des mortiers", Edition septembre 2005.
- [11]- Manai K., Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995.
-

- [12]- Amouri Chahinaz, " Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité)", Thèse de doctorat, Université Mantouri Constantine, 2009.
- [13]- D. L. Kantro, "Influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur les propriétés de la pâte de ciment- un slump test miniature", cement and concrete aggregate, Vol, 1980.
- [14]- A. M. Paillere, "Les adjuvants", Le béton hydraulique, Presse de ENPC, 1982.
- [15]- P. C. Aitcin, "L'emploi des fluidifiants dans les BHP, les bétons à ultra hautes performances", presse de l'ENPC, 1992.
- [16]- Gunning. J. G, "Concret technology: level 4", Longman technician series; Const & civil, England, 1983.
- [17]- George Dreux, "composition des bétons" techniques de l'ingénieur : 10 Mai 1982.
- [18]- Hermime Hassiba, "Caractérisation expérimentale et numérique du béton autoplaçant – Utilisation des déchets de construction", Thèse de doctorat, Université de Mouloud Mammeri, 2016.
- [19]- M. Rissel Khelifa, "Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants", Thèse de doctorat, 2009.
- [20]- Baron J, Olivier JP, " Les bétons – Bases et données pour leurs formulations" Editions Eyrolles, 1996.
- [21]- Elise Grisey, "Impact de l'évolution des déchets d'une installation de stockage de déchets non dangereux sur l'environnement ", Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, 26 juin 2013.
- [22]- S N, "Bulletin du ciment", 9<sup>ème</sup> année, Numéro 13, Juillet 1941.
- [23]- Thèse TRAN THE TRUYEN, "Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton", 2009.
- [24]- "La fumée de silice : L'addition incontournable pour des bétons durables (Patrick Guiraud CIM béton)", Chambéry, 2012.
- [25]- J Baron, "Introduction à la durabilité des bétons", -La durabilité des bétons, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, ISBN 2-85978-184-6, Paris 1992.
-

- [26]- F Randell, "Le comportement des bétons dans les systèmes d'assainissement", Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliqués de Renne, Janvier 2004, N° d'ordre D00-01, LMDC, INSA de Toulouse, France.
- [27]- Ismail Yurtdas, "Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : Etude expérimentale sur mortiers", Ecole centrale de Lille, Thèse de Doctorat, 02 octobre 2003.
- [28]- S Boualleg, "Effet des milieux agressifs sur les caractéristiques de durabilité des bétons et des matrices cimentaire", Thèse de magister, 2004.
- [29]- M Belouadah, "Evaluation des effets secondaires liés à l'incorporation de durabilité du béton à base de matériaux locaux", Thèse de magister, 2004.
- [30]- M Regourd, "La résistance du béton aux altérations physique et chimique", Le béton hydraulique Connaissance et Pratique, Presse de l'imprimerie : la source D'or, dépôt légal : 2<sup>ème</sup> trimestre 1995.
- [31]- L'attaque sulfatique "Durabilité et réparation du béton", Universit2 de Sherbrooke, article d'internet, GC174.
- [32]- Communication Science & technologie (Resistance Aux Acides Et A La Pénétration Des Ions Chlorures Des Mortiers Avec Pouzzolane Et Fine Calcaire), COST N°8, Janvier
- [33]- R. Jauberthie, "Etude physico chimique d'altération et modification exposer aux sels d'ammonium", Article, University of east London, received 20 october 2001, accepted 9 july 2002.
- [34]- Nechaf Samia, "L'influence de l'ajout de la poudre de verre sur les bétons ordinaires soumis à un chargement extérieur", Thèse de Magister, Université de Mouloud Mammeri, 2015.
- [35]- Saadani Sabrina, "Comportement des bétons à base de granulats recyclés", Thèse de Magister, Université Mantouri Constantine.
-

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



## FICHE TECHNIQUE

Réf : DC/FT MT. v03

### Analyses et caractérisation

#### Analyses chimiques

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

#### Composition hypothétique du clinker (Bogue)

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

#### Propriétés physiques

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

#### Temps de prise à 20°C (NA 230)

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

#### Résistance à la compression (NA 234)

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

Algerian Cement Company (SPA)

Hamman - Datas, Nisla (ACC)  
Tél: +213 35 80 78 20  
Fax: +213 35 55 70 30

Direction générale

33, Rue des Pins Hydra, Alger  
Tél: +213 (0) 21 48 16 65  
Fax: +213 (0) 21 48 10 71

Ciment Blanc Algérie (SPA)

Usine Oggaz (CBA)  
BP 57, 20060, Mascara  
Tél. / Fax: +213 (0) 40 04 66 66



**Notice technique**

Edition janvier 2013

Numéro 2.11

Version n°136.2006 R 001

SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12

**SIKA® VISCOCRETE® TEMPO 12**

Superplastifiant /Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi.

Conforme à la norme NF EN 934-2 Tab. 1, 3.1 et 3.2.

<b>Présentation</b>	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant/haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique.
<b>Domaines d'application</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 permet la fabrication de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.</li> <li>■ Dans les bétons autoplaçants, SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.</li> </ul>
<b>Caractères généraux</b>	<p>SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ longue rhéologie (&gt;2h),</li> <li>■ robustesse à la ségrégation,</li> <li>■ qualité de parement.</li> </ul>
<b>Agréments, essais de laboratoire</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ PV CNERIB : DTEM : 33/2010.</li> </ul>
<b>Caractéristiques</b>	
<b>Aspect</b>	Liquide brun clair
<b>Conditionnement</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fûts de 230 kg</li> <li>■ CP de 1000 L</li> <li>■ Vrac</li> </ul>
<b>Stockage</b>	<p>Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.</p> <p>En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.</p>
<b>Conservation</b>	1 an en emballage intact
<b>Données techniques</b>	
<b>Densité</b>	1,06 ± 0,01
<b>PH</b>	6 ± 1
<b>Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq.</b>	≤ 1 %
<b>Extrait sec</b>	30,2 ± 1,3 %



<b>Teneur en ions Cl<sup>-</sup></b>	≤ 0,1 %
<b>Conditions d'application</b>	
<b>Dosage</b>	Plage d'utilisation recommandée : 0,2 à 3 % du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées. Plage d'utilisation usuelle : 0,4 à 1,5 % du poids du ciment ou du liant.
<b>Mise en œuvre</b>	SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
<b>Précautions d'emploi</b>	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité.
<b>Mentions légales</b>	Produit réservé à un usage strictement professionnel. Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile. «Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika El Djazair  
08 route de l'Arbaa, 16111 Eucalyptus  
Alger/ ALGERIE  
Web : dza.sika.com

Tel.: 213 (0) 21 50 21 84  
213 (0) 21 50 16 92 à 95  
Fax: 213 (0) 21 50 22 08



## ***Résumé***

Les ajouts minéraux font actuellement partie des développements les plus récents dans le domaine du Génie Civil, car leurs utilisations apportent une amélioration des propriétés mécaniques et chimiques (durabilité) des matériaux cimentaires (mortier et béton).

D'autre part leurs utilisations ont pour objectifs de réduire la consommation de quelques matériaux, en contribuant de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement. Ce travail expérimental étudie la substitution partielle du sable par l'ajout de la poudre de marbre dans le mortier avec les pourcentages suivants : 10, 30, 50, 70 et 100% et l'effet de cet ajout sur la résistance mécanique et la durabilité de mortier.

**Mots clés :** mortier, résistance mécanique, durabilité, absorption capillaire, poudre de marbre, sable, béton.

## ***Abstract***

Mineral additions are currently one of the most recent developments in the field of civil engineering, as their uses improve the mechanical and chemical properties (durability) of cement materials (mortar and concrete). On the other hand, their uses aim to reduce the consumption of the new materials, by contributing in a simple and economical way to solve the problems related to the environment. This experimental study studies the partial substitution of sand by adding the marble powder in the mortar with the following percentages: 10, 30, 50, 70 and 100% and the effect of this addition on the strength and durability of mortar.

**Key words:** mortar, mechanical resistance, durability, capillary absorption, marble powder, sand, concrete.