

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES**



**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**  
**Département de Génie Des Matériaux**

# **Mémoire**

**Présenté pour l'obtention du diplôme Master**  
**Spécialité : Génie de matériaux**  
**Option : Control de Qualité des Matériaux (MCQ)**

## **THEME**

---

**Effet Des Granulats De Verre Mousse Sur Les Propriétés  
Rhéologiques Et Physico-mécaniques Du Mortier Autoplaçant**

---

**Réalisé Par :**

**BENBRAHIM FAHIMA**

**Devant le jury :**

**Sujet Proposé et suivi par :**

**Dr. SAFI B.**

## *Résumé*

Cette étude a pour objectif de voir l'influence des granulats légers à base de verre mousse sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques du mortier autoplaçant. Les granulats de verre mousse, seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin) et un agent moussant (calcaire) selon le traitement thermique appliqué pour la fabrication du verre mousse (850°C pendant 20min). Après la préparation des granulats légers, des mortiers autoplaçants seront élaborés à base des granulats fins (sable), puis d'autres variantes des mortiers autoplaçants en substituant le sable par les granulats de verre mousse à des rapports (0, 30, 50 et 100% en masse). Des essais de caractérisation rhéologique (fluidité) et physicomécaniques (masse volumique, porosité/absorption d'eau, tests ultrasoniques et résistances mécaniques) seront réalisés sur ces mortiers. Les résultats ainsi obtenus, seront comparés avec les caractéristiques d'un mortier autoplaçant témoin (sable naturel).

**Mots-clés:** Déchet de verre, granulat léger, mortier autoplaçant, fluidité, densité, résistance mécanique.

## *Abstract*

This study aims to see the influence of light aggregates based on foam glass on the rheological and physic mechanical properties of the self-compacting mortar. Granulated Foam glasses have been prepared from the glass powder (cullet) and a foaming agent (limestone) according to the heat treatment applied for the manufacture of foam glass (850 ° C for 20min). After the preparation of lightweight aggregates, self-compacting mortars will be developed based on fine aggregates (sand), then other variants of self-compacting mortars by substituting sand with foam glass aggregates at ratios (0, 30, 50 and 100 % wt.). Rheology (fluidity) and physic mechanical characterization tests (density, porosity / water absorption, ultrasonic tests and mechanical resistance) will be carried out on these mortars. The results thus obtained will be compared with the characteristics of a control self-placing mortar (natural sand).

**Keywords:** Glass wastes, foam glass aggregates, concrete, compressive strength, physical properties

## *Résumé*

Cette étude a pour objectif de voir l'influence des granulats légers à base de verre mousse sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques du mortier autoplaçant. Les granulats de verre mousse, seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin) et un agent moussant (calcaire) selon le traitement thermique appliqué pour la fabrication du verre mousse (850°C pendant 20min). Après la préparation des granulats légers, des mortiers autoplaçants seront élaborés à base des granulats fins (sable), puis d'autres variantes des mortiers autoplaçants en substituant le sable par les granulats de verre mousse à des rapports (0, 30, 50 et 100% en masse). Des essais de caractérisation rhéologique (fluidité) et physicomécaniques (masse volumique, porosité/absorption d'eau, tests ultrasoniques et résistances mécaniques) seront réalisés sur ces mortiers. Les résultats ainsi obtenus, seront comparés avec les caractéristiques d'un mortier autoplaçant témoin (sable naturel).

**Mots-clés:** Déchet de verre, granulat léger, mortier autoplaçant, fluidité, densité, résistance mécanique.

Introduction générale .....	10
-----------------------------	----

## *Partie A : Synthèse bibliographique*

### **Chapitre I : Généralités sur les BAP**

I.1. Introduction .....	12
I.2. Définition.....	13
I.3. Constituants de béton autoplaçant .....	14
I.3.1. Granulats .....	15
I.3.2. Pâte.....	15
I.3.2.1. Ciment .....	15
I.3.2.2. Eau de gâchage.....	16
I.3.2.3. Ajouts minéraux .....	16
I.3.2.4. Super plastifiants .....	16
I.4. Méthodes et techniques de formulation des BAP.....	17
I.4.1. Concept et développement des bétons autoplaçants .....	17
I.4.2. Exigences techniques pour formuler un BAP .....	18
I.4.3. Méthodes de formulation existantes.....	19
a. Approche japonaise .....	19
b. Approche Française .....	20
c. Approche basée sur l'utilisation du mortier du équivalent MBE.....	21
I.5. Propriétés principales d'un BAP.....	21
I.5.1. A l'état frais.....	21
I.5.2. l'état durci .....	24
I.5.2.1. Résistance à la compression.....	24
I.5.2.2. Résistance à la traction.....	25
I.5.2.3. Module d'élasticité.....	25

## **SOMMAIRE**

---

I.5.2.4. Retrait .....	25
I.6. Approche basée sur l'optimisation des mortiers.....	25
I.7. Mortier équivalent de BAP « MBE » .....	26
I.8. Propriétés générale des mortiers.....	26
I.9. Méthode de formulation du MBE.....	30
I.10. Méthode de mortier équivalent.....	30
I.11. Avantage des bétons autoplaçants .....	33
I.12. Domaines d'application.....	34
I.13. Classifications des BAP.....	34
I.14. Conclusion .....	35

## **Chapitre II : Granulats du verre mousse**

II.1. Introduction .....	36
II.2. Définition.....	37
II.3. Fabrication du verre.....	38
II.4. Structure et composition chimique du verre.....	39
II.5. Propriétés du verre.....	42
II.5.1. Propriétés physique.....	42
II.5.2. Propriétés mécaniques .....	42
II.5.3. Propriétés électriques.....	42
II.5.4. Fragilité.....	43
II.5.5. Propriétés chimiques.....	43
II.6. Domaine d'application du verre .....	44
II.7. Recyclage du verre .....	44
II.8. déchet du verre.....	44
II.9. Verre mousse.....	46
II.10. Granulat de verre mousse .....	47

## **SOMMAIRE**

---

II.11. Composition chimique des mousses de verre.....	47
II.11.1. Calcin.....	47
II.11.2. Agents moussants .....	47
II.12. Principe de fabrication des mousses de verre.....	48
II.13. Fabrication industrielle.....	50
II.14. Caractéristiques des granulats de verre mousse .....	51
II.15. Domaine d'application du granulats de verre mousse .....	52
II.16. Etat de l'art : Application des granulats verre mousse dans les bétons.....	55
II.17. Conclusion.....	60

### ***Partie B: parties expérimentales***

#### **Chapitre III: Méthodologie et Caractérisation des matériaux**

III.1. Objectif du travail pratique .....	61
III.2. Méthodologie du travail .....	62
III.3. Caractéristique des matériaux utilisés.....	62
III.3.1. Ciment .....	62
III.3.2. Superplastifiant.....	63
III.3.3. Eau de gâchage .....	65
III.3.4. Fillers de calcaire.....	65
III.3.5. Sable .....	67
III.4. Constituants des granulats de verre mousse.....	70
III. 5. Caractéristiques du calcin .....	70
III.6. Préparation de charges .....	70
III.6.1. Calcin.....	70
III.6.2. Agent moussant .....	71
III.7. Composition des granulats de verre mousse.....	71
III.8. Préparation et élaboration des granulats de verre mousse .....	72

## SOMMAIRE

---

III.9. Choix de variantes.....	73
III.10. Choix du régime thermique.....	73
III.11. Elaboration des granulats de verre mousse.....	74
III.12. Caractéristique du verre mousse.....	76
III.13. Microstructure des granulats de verre mousse élaborés.....	79

### Chapitre IV: Formulation des mortiers

IV.1. Formulation d'un BAP par la méthode japonaise.....	81
a. Calcul de composition.....	81
b. Après l'application de la méthode japonaise, les dosages des constituants pour 1m <sup>3</sup> du béton.....	82
IV.2. Formulation du mortier autoplaçant.....	82
IV.2.1. Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP).....	83
IV.3. Conduite d'essais.....	84
IV.3.1. Etats frais.....	84
IV.3.2. Etats durci.....	85
IV.3.2.1. Porosité/absorption.....	86
IV.3.2.2. Contrôle non destructif par ultrason.....	87
IV.3.2.3. Module d'élasticité dynamique.....	87

### Chapitre V: Résultats et Interprétations

V.1. Propriétés physiques.....	89
V.1.1. Caractérisation de mortier à l'état frais.....	89
V.1.1.1. Fluidité (Essai de l'étalement).....	89
V.1.2. Caractérisation de mortier à l'état durci.....	91
V.1.2.1. Evolution de la masse volumique.....	91
V.1.2.2. Porosité/Absorption d'eau.....	93
V.1.2.3. Contrôle non destructif par ultrason.....	97
V.2. Propriétés mécaniques.....	98

## ***SOMMAIRE***

---

V.2.1. Résistance à la flexion .....	98
V.2.2. Résistance à la compression .....	100
V.3. Module d'élasticité dynamique .....	103
V.3.1. Relation entre le module élastique et la résistance .....	104
V.4. Etude de l'interface granulats/matrice cimentaire.....	105
Conclusion générale.....	107



**Partie A : Partie théorique**

**Chapitre I : Généralités sur les BAP**

<b>Figure I.1 :</b> (a) Constituants des bétons ordinaires(BO) et des BAP .....	14
<b>Figure I.2 :</b> Essai d'étalement .....	22
<b>Figure I.3 :</b> Essais d'écoulement à la boîte L-box ou boîte en L .....	23
<b>Figure I. 4 :</b> Essai de stabilité au tamis .....	24
<b>Figure I.5 :</b> Appareil de Vicat muni .....	27
<b>Figure. I.6 :</b> Moules 4*4*16 .....	28
<b>Figure I.7 :</b> Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion .....	28
<b>Figure I.8 :</b> Dispositif de rupture en compression .....	29
<b>Figure I.9 :</b> Matériel pour mesures d'affaissement et d'étalement au cône MBE.....	32

**Chapitre II : Granulats du verre mousse**

<b>Figure II.1 :</b> verre.....	38
<b>Figure II.2 :</b> Structure du verre (cristalline et vitreuse).....	40
<b>Tableau II.1 :</b> Valeur de densité de différents verres.....	42
<b>Figure II.3 :</b> Image prise par MEB sur le granulats de verre mousse.....	46
<b>Figure II.4 :</b> Granulats à base du verre mousse .....	47
<b>Figure II.5 :</b> Schéma général d'élaboration d'un matériau (Verre mousse).....	49
<b>Figure II.6 :</b> Processus de fabrication des granulats de verre mousse.....	50
<b>Tableau II.2 :</b> Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé .....	52
<b>Figure II.7 :</b> Domaine d'application des granulats de verre mousse .....	52
<b>Figure II.8 :</b> Isolation des murs en verre mousse .....	53
<b>Figure II.9 :</b> Panneaux pour chambre froides en verre mousse .....	54
<b>Figure II.10 :</b> Isolation tuyauterie.....	54

## ***LISTES DES FIGURES***

---

<b>Figure II.11 :</b> Images obtenus par MEB sur des éprouvettes du béton et du mortier à base des granulats de verre mousse (a) comme gros granulats (b) comme granulats fins (sable) .....	55
<b>Figure II.12 :</b> Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport Eau/ciment .....	56
<b>Figure II.13 :</b> Résistance à la compression à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulat traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass). .....	57
<b>Figure II.14 :</b> Résistance à la traction par flexion à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulat traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass).....	58
<b>Figure II.15 :</b> Module d'élasticité statique à 28 jours en fonction du taux de substitution partielle des granulats naturels par les granulats de verre mousse.....	58
<b>Figure II.16 :</b> Microstructure d'un béton léger à base des granulats du verre mousse observé par MEB .....	59

### ***Partie B : Partie Pratique***

#### **Chapitre III : Méthodologie et Caractérisation des matériaux**

<b>Figure III.1 :</b> Utilisation de l'eau potable.....	65
<b>Figure III.2 :</b> Calcaire.....	66
<b>Figure III.3 :</b> Sable.....	67
<b>Figure III.4 :</b> Analyse granulométrique de sable de baghlia 0/5.....	69
<b>Figure III.5 :</b> (a) : déchets de verre ; (b) : poudre de verre.....	71
<b>Figure III.6 :</b> Schéma technologique proposé la fabrication des granulats .....	72
<b>Figure III.7 :</b> Régime thermique.....	74
<b>Figure III.8 :</b> Elaboration des granulats de verre mousse.....	75
<b>Figure III.9 :</b> Analyse granulométrique de verre mousse 0/5.....	77
<b>Figure III.10 :</b> Analyse granulométrique de sable et verre mousse 0/5.....	78
<b>Figure III.11 :</b> Image Macroscopique du granulat de verre mousse utilisé.....	79

## **LISTES DES FIGURES**

---

**Figure III.12 :** Images obtenues par MEB sur les granulats de verre mousse..... 80

### **Chapitre IV : Formulation des mortiers**

**Figure IV.1:** Malaxeur pour les mortiers autoplacants (MAP)..... 84

**Figure IV.2 :** Mini-cône pour mortier..... 85

**Figure IV.3 :** Confection des éprouvettes du mortier autoplacant..... 86

**Figure IV.4 :** Ultrasonique..... 87

### **Chapitre V : Résultats et Interprétations**

**Figure V.1 :** Essai d'étalement sur le mortier autoplacant frais..... 90

**Figure V.2 :** Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse..... 90

**Figure V.3 :** Masse volumique apparente des MAP en fonction du taux de substitution du sable par différents pourcentage du verre mousse à 28 jours de durcissement..... 92

**Figure V.4 :** Evolution de la porosité des mortiers en fonction des taux de substitution du sable par le verre mousse à 28 jours..... 93

**Figure V.5 :** Granulats fin de verre mousse représentant des pores de taille élevée..... 94

**Figure V .6 :** Evolution de l'absorption de l'eau des mortiers en fonction des taux de substitution du sable par les verres mousses à 28 jours ..... 95

**Figure V.7 :** Relation de la porosité et l'absorption d'eau en fonction du taux de substitution du sable par verre mousse à 28 jours ..... 96

**Figure V.8 :** Essai d'ultrason sur le mortier autoplacants durci..... 97

**Figure V.9 :** Histogramme de la vitesse de propagation longitudinale..... 97

**Figure V.10 :** Essai de traction par flexion ..... 99

**Figure V.11 :** Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du sable par les granulats fins du verre mousse à différent âge (2 et 28 jours) ..... 99

## **LISTES DES FIGURES**

---

**Figure III.12** : Images obtenues par MEB sur les granulats de verre mousse..... 80

### **Chapitre IV : Formulation des mortiers**

**Figure IV.1**: Malaxeur pour les mortiers autoplacants (MAP)..... 84

**Figure IV.2** : Mini-cône pour mortier..... 85

**Figure IV.3** : Confection des éprouvettes du mortier autoplacant..... 86

**Figure IV.4** : Ultrasonique..... 87

### **Chapitre V : Résultats et Interprétations**

**Figure V.1** : Essai d'étalement sur le mortier autoplacant frais..... 90

**Figure V.2** : Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse..... 90

**Figure V.3** : Masse volumique apparente des MAP en fonction du taux de substitution du sable par différents pourcentage du verre mousse à 28 jours de durcissement..... 92

**Figure V.4** : Evolution de la porosité des mortiers en fonction des taux de substitution du sable par le verre mousse à 28 jours..... 93

**Figure V.5** : Granulats fin de verre mousse représentant des pores de taille élevée..... 94

**Figure V.6** : Evolution de l'absorption de l'eau des mortiers en fonction des taux de substitution du sable par les verres mousses à 28 jours ..... 95

**Figure V.7** : Relation de la porosité et l'absorption d'eau en fonction du taux de substitution du sable par verre mousse à 28 jours ..... 96

**Figure V.8** : Essai d'ultrason sur le mortier autoplacants durci..... 97

**Figure V.9** : Histogramme de la vitesse de propagation longitudinale..... 97

**Figure V.10** : Essai de traction par flexion ..... 99

**Figure V.11** : Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du sable par les granulats fins du verre mousse à différent âge (2 et 28 jours) ..... 99

## ***LISTES DES FIGURES***

---

<b>Figure V.12:</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion des MAP en fonction du taux de substitution du sable par les verres mousses à différent âge (2 et 28 jours).....	100
<b>Figure V.13 :</b> Essai de compression uni axial.....	101
<b>Figure V.14 :</b> Evolution de la résistance à la compression des MAP en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse à différent âge (2 et 28 jours).....	102
<b>Figure V.15 :</b> Evolution de la résistance à la compression des MAP en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse à différent âge (2 et 28 jours).....	102
<b>Figure V.16 :</b> Module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés à 28 jrs.....	103
<b>Figure V.17 :</b> Effet du rapport de substitution du sable par le verre mousse sur le module élastique dynamique et la résistance à la compression .....	104
<b>Figure V.18 :</b> Images obtenues par MEB sur des mortiers étudiés	
(a) MAP (0%) (b) MAP (100%) (c) interface granulats/matrice cimentaire .....	105

***Partie théorique***

**Chapitre II : Granulats du verre mousse**

**Tableau II.1** : Valeur de densité de différents verres ..... 42  
**Tableau II.2** : Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé.....52

***Partie pratique***

**Chapitre III : Méthodologie et Caractérisation des matériaux**

**Tableau III.1** : Caractéristiques physiques du ciment..... 62  
**Tableau III.2** : Résistance à la compression et à la flexion du ciment..... 63  
**Tableau III.3** : Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X ..... 63  
**Tableau III.4** : Composition minéralogique du ciment par fluorescence X..... 63  
**Tableau III.5** : Analyse chimique du calcaire ..... 66  
**Tableau III.6** : Analyse minéralogique du calcaire ..... 66  
**Tableau III.7** : Propriétés physiques du calcaire..... 66  
**Tableau III.8** : Analyse chimique du sable ..... 67  
**Tableau III.9** : Analyse minéralogique du sable ..... 67  
**Tableau III.10** : Caractéristiques physiques du sable..... 68  
**Tableau III.11** : Analyse granulométrique par tamisage du sable lavé..... 68  
**Tableau III.12** : Caractéristiques chimique du calcin ..... 70  
**Tableau III.13** : Caractéristiques physique du calcin..... 70  
**Tableau III.14** : Différentes teneurs des matières 1<sup>ère</sup> ..... 73  
**Tableau III.15** : Analyse chimique du verre mousse ..... 76  
**Tableau III.16** : Caractéristiques physiques du verre mousse..... 76  
**Tableau III.17** : Analyse granulométrique par tamisage du verre mousse..... 76

**Chapitre IV : Formulation des mortiers**

**Tableau IV.1** : Intervalles pour chaque constituant selon la méthode Japonaise ..... 81

**Tableau IV.2** : Composition pour 1m<sup>3</sup> du BAP ..... 82

**Tableau IV.3** : Composition mortiers autoplaçants étudiés dans 1m<sup>3</sup> ..... 83

**Chapitre V : Résultats et Interprétations**

**Tableau V.1** : Essai de l'étalement ..... 89

**Tableau V.2** : Masse volumique apparente des mortiers étudiés ..... 91

**Tableau V.3** : Porosité des éprouvettes ..... 93

**Tableau V.4** : Absorption des éprouvettes ..... 95

**Tableau V.5** : Vitesse longitudinale de propagation de son ..... 97

**Tableau V.6** : Résistance à la traction par flexion des MAP étudiés ..... 98

**Tableau V.7** : Résistance à la compression des MAP étudiés ..... 100

**Tableau V.8** : Module élastique dynamique des MAP étudiés ..... 103

## **Introduction générale**

Les recherches continuent toujours pour trouver d'autres utilisations adéquates des déchets industriels, en vue de leur valorisation dans le secteur des matériaux de construction. En particulier, les déchets minéraux qui sont actuellement utilisés dans technologie des bétons soit comme ajouts minéraux (par substitution partielle du ciment), soit comme granulats fins ou granulats grossiers (par substitution des granulats traditionnels). A cet effet, le présent travail a pour objectif de valoriser les déchets de l'industrie verrière, en particulier les déchets de verre qui est le calcin. Ce dernier est actuellement utilisé pour produire des granulats de verre mousse.

Cette étude a pour objectif de voir l'influence des granulats légers à base du verre mousse sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques du mortier autoplaçant. Les granulats de verre mousse, seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin) et un agent moussant (calcaire) selon le traitement thermique appliqué pour la fabrication du verre mousse (850°C pendant 20min). Après la préparation des granulats légers, des mortiers autoplaçants seront élaborés à base des granulats fins (sable), puis d'autres variantes des mortiers autoplaçants en substituant le sable par les granulats de verre mousse à des rapports (0, 30, 50 et 100% en volume). Des essais de caractérisation rhéologique (fluidité) et physicomécaniques (masse volumique et résistances mécaniques) seront réalisés sur ces



mortiers. Les résultats ainsi obtenus, seront comparés avec les caractéristiques d'un mortier autoplaçant témoin (sable).

Le présent manuscrit est subdivisé en cinq (4) chapitres, répartie en deux parties pour la synthèse bibliographique et trois autres chapitres pour le travail expérimental.

Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les bétons autoplaçants et les mortiers autoplaçants. Le **chapitre II**, traite des notions sur les granulats de verre mousse ainsi que leur fabrication. Tandis que le **chapitre III** présente la caractérisation des matériaux utilisés, dont nous présentons les caractéristiques chimiques, physiques et mécaniques des matériaux utilisés (ciment, filler calcaire, superplastifiant, déchets du verre). Dans le même chapitre, la procédure de la fabrication des granulats de verre mousse ainsi que les différentes caractéristiques ces derniers, seront traités. Le **chapitre IV** suivant, est consacré à la formulation des mortiers autoplaçants par la méthode des mortiers de béton équivalent (MBE). Les différentes variantes des mortiers étudiés ainsi que leur protocole de mélange sera présenté dans ce chapitre. Le **chapitre V** traitera les résultats des différents essais et leurs interprétations.

Enfin, une conclusion générale clôtura ce mémoire en synthétisant les principaux résultats obtenus par notre travail.

# Chapitre I : les bétons autoplaçants (BAP)

Le présent chapitre consiste à donner des généralités sur les bétons autoplaçants. La définition des BAP, leurs constituants, leurs propriétés essentielles ainsi que les méthodes d'essais de formulation utilisées dans les BAP, leurs particularités de point de vue propriétés à l'état frais et durci ainsi que leurs méthodes de formulation seront présentées dans ce chapitre. Egalement, les mortiers autoplaçants et de béton équivalent, leurs définitions et leurs méthodes de formulation sera présenté dans ce même chapitre.

## I.1.Introduction

L'idée de produire des bétons autoplaçants est apparue pour la première fois au Japon en 1986, le Japon fut le pionnier dans le développement de cette nouvelle technique. Afin de satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique de béton coulés sous l'eau, en effet, la première génération des bétons autoplaçant est formulée de la même manière que les bétons destinés aux structures submergées, mais avec une viscosité plus faible et donc une maniabilité plus élevée.

Les bétons autoplaçant offrent un grand nombre des possibilités d'utilisations très intéressantes dans de nombreux domaines, construction renforcement et réparation d'ouvrage d'art (application de couches minces dans des endroits d'accès difficiles, construction d'éléments préfabriqués à haute résistance, moulage et mise au point de béton pour toute utilisation (béton coulés sous l'eau pour réparations, béton confinés, pieux, etc.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont reconnus pour leur très grande déformabilité et leur facilité de mise en œuvre sous l'effet de leur poids propre, sans nécessiter de vibration, même en présence de ferraillements très denses. Il peut être intéressant de rappeler que les bétons, de manière générale, sont des fluides à seuil : ils ne s'écoulent que si la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à leur seuil d'écoulement. Dans ce cadre, selon Wallevik (2003), un BAP correspond à un béton dont le seuil d'écoulement est inférieur à 200 Pa. Dun point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600 mm [1].

On peut résumer à trois les modes de mise en place des bétons autoplaçants dans des coffrages: [2]

- Le premier consiste à déverser le béton par le haut du coffrage. Mais cette méthode augmente les phénomènes de ségrégation du béton dus à sa chute dans les coffrages. Ensuite, elle favorise la présence de bulles et de taches sur le parement et accentue le lessivage de l'agent de décoffrage utilisé.
- Le deuxième se fait par l'intermédiaire d'un tube plongeur introduit depuis le haut du coffrage. Cette méthode a pour avantage de limiter les effets de la chute du béton frais dans les coffrages. Elle est utilisée pour les éléments verticaux de grande hauteur.
- Le troisième correspond à l'injection du béton par le bas de la banche à l'aide d'une pompe. Ce procédé évite la chute du béton, diminue la présence de bulles sur le parement et favorise l'auto-nivellement, mais nécessite une adaptation des banches et la présence d'une pompe (ce qui libère en contrepartie la grue).

Quelle que soit la méthode de mise en œuvre choisie parmi ces trois, la longueur de cheminement horizontal dans les coffrages doit être réduite pour éviter la ségrégation dynamique du béton. Il est recommandé de limiter cette longueur à un maximum de 10 m [3]

### **I.2.Définition :**

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton qui, à l'état frais, est caractérisé par une fluidité telle que, par le seul effet de son poids propre et sans énergie de compactage supplémentaire suffit pour le remplissage des formes les plus complexes : Le BAP est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex. vibration, damage). Il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles, tout en

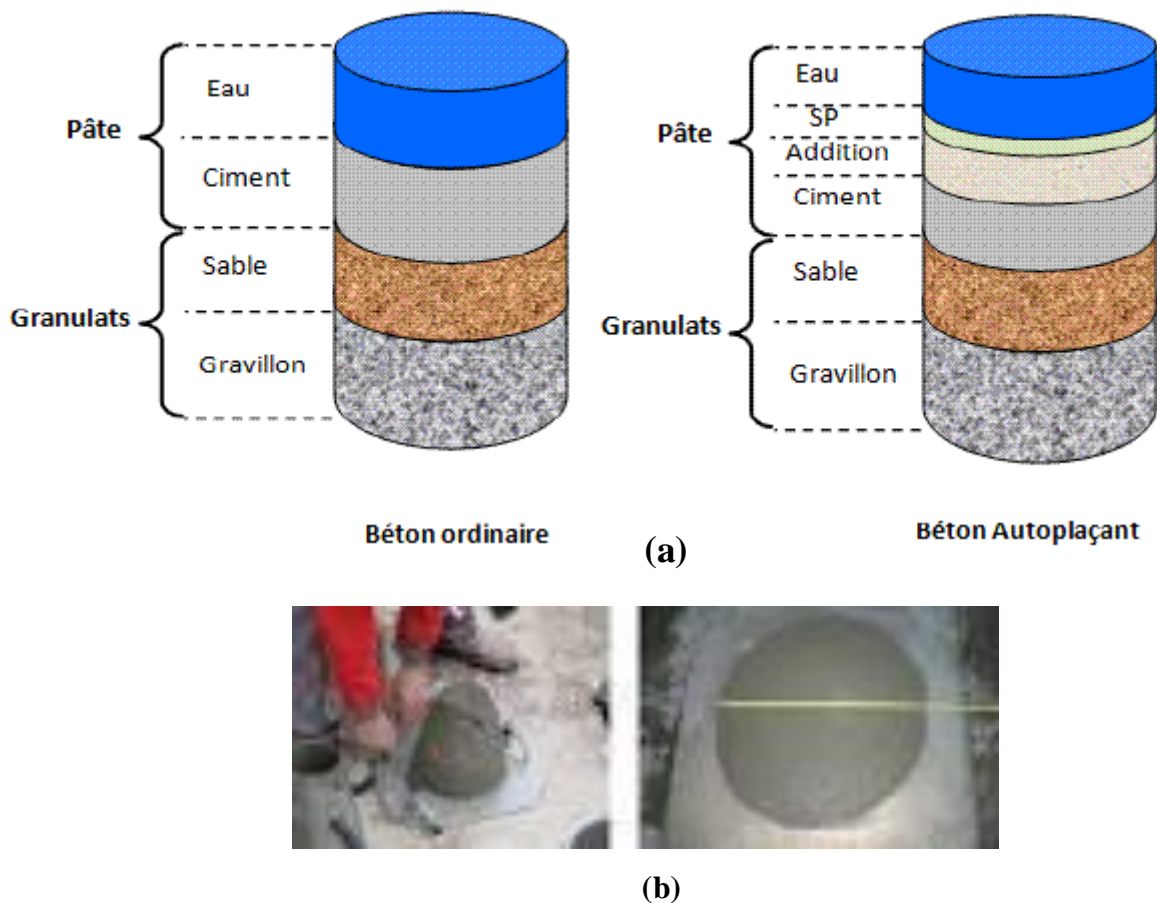
résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre [4].

### I.3. Les constituants de béton autoplaçant :

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte.

Pour toute combinaison des matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment.

Les BAP se différencient des bétons ordinaires (BO) ou vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais, par leur composition [présence indispensable des fines minérales (les ajouts minéraux), et de superplastifiants] ; voir schéma suivant :



**Figure I.1 :** (a) Constituants des bétons ordinaires(BO) et des BAP [5]

(b) Aspet à l'état frais des BO et des BAP

Les constituants du BAP ont un rôle très important dans la détermination des propriétés des BAP à l'état frais et durci. Donc, il est nécessaire de connaître le rôle que peut jouer chaque constituant ainsi que leur influence sur les propriétés des BAP

### **I.3.1. Granulats :**

Les granulats tels que le gravillon et le sable, constituent le squelette du béton. Pour être utilisés dans la composition du BAP, les granulats doivent être chimiquement stables lors du contact avec les autres constituants. La nature, la forme et la granularité des granulats influencent fortement les propriétés des BAP à l'état frais et durci [4]. Il est possible d'utiliser les granulats roulés ou concassés pour la formulation des BAP. Toutefois, afin d'éliminer le risque de blocage, il faut limiter la taille maximale du gravillon et diminuer la quantité des granulats [5]

### **I.3.2. Pâte :**

La pâte (eau, ciment, addition minérale, adjuvant et air) sert à remplir les vides laissés par le squelette granulaire et à englober les grains de granulat. A titre d'illustration, les granulats peuvent être considérés comme étant noyés dans une matrice cimentaire de manière à former un mélange biphasique homogène. Comme les BAP résistent mieux au phénomène de ressuage [6], moins de perturbation sera provoquée vis-à-vis de la porosité de pâte dans la zone de transition.

#### **I.3.2.1. Ciment :**

Plusieurs travaux ont été menés sur les bétons autoplaçants dans le sens du choix du type de ciment à utiliser. Ces travaux montrent que la résistance et la durabilité du béton dépendent principalement du dosage de ciment. Pour les BAP, le dosage du ciment doit ainsi répondre aux exigences prescrites par les normes (par exemple, EN 206-1). Par ailleurs, avec l'augmentation du dosage de ciment dans le béton, plus de chaleur se produit au cours de l'hydratation du ciment, ainsi que plus de déformations différées (retrait et fluage) à long terme. Il est à noter que les effets engendrés par l'ajout excessif du ciment sont propices à l'apparition des fissures pour les éléments en béton. Etant donné que les BAP contiennent plus de fines que les bétons ordinaires, une partie du ciment est souvent remplacée par les additions minérales en vue de limiter les effets défavorables mentionnés ci-dessus tout en assurant la résistance et la durabilité suffisantes des BAP [5].

### **I.3.2.2. Eau de gâchage :**

L'eau remplit deux fonctions : d'une part, elle sert à l'hydratation du ciment et d'autre part, elle permet la fluidification de la pâte [7]. Une partie d'eau est consommée par l'hydratation du ciment, soit entrant dans la composition chimique de l'hydrate, soit étant piégée à l'intérieur des pores de l'hydrate. Cette eau étant physio-chimique fixée par les hydrates, ne contribue pas à la fluidification de la pâte. Par contre, une autre partie de l'eau ne participe pas à l'hydratation du ciment.

### **I.3.2.3. Ajouts minéraux :**

Les ajouts cimentaires sont des matériaux qui, combinés au ciment Portland, contribuent aux propriétés des coulis frais et durcis par action hydraulique ou pouzzolanique ou les deux à la fois. Les pouzzolanes naturelles, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau granulé broyé et les fumées de silice en sont des exemples courants.

Ces ajouts sont incorporés aux mélanges de coulis ou de béton pour différentes raisons:

- Améliorer Les caractéristiques rhéologiques des coulis (viscosité et stabilité).
- Améliorer la résistance du coulis durci et augmenter sa durabilité.
- Réduire le coût de la matière liante: ces ajouts étant le plus souvent des sous-produits d'autres industries, leur incorporation dans le ciment avec des proportions pouvant atteindre les 30% permet de réduire le prix de revient de la matière liante.
- Favoriser la pénétrabilité dans les fissures fines: certains de ces ajouts sont plus fins que le ciment (**exp.** fumée de silice).

L'utilisation croissante d'ajouts cimentaires dans le béton de ciment portland a entraîné la publication en 1982 d'une nouvelle norme CSA-A23.5, qui fut révisée en 1986 .la norme CSA A23.5 reconnaît trois groupes d'ajouts cimentaires : les fumés de silice, les pouzzolanes, les laitiers granulés [5].

### **I.3.2.4. Super plastifiants :**

Les superplastifiants sont apparus à la fin des années 1970 au Japon et en Allemagne. Ce sont généralement des sels sulfoniques de formaldéhydes, naphtalènes ou mélamines, qui ont la propriété de pouvoir améliorer notablement la fluidité d'une gâchée, et donc de diminuer la quantité d'eau nécessaire à sa mise en oeuvre. Leur arrivée sur le marché a permis le développement des bétons à "hautes performances". Ces superplastifiants assurent une

déflocculation de la suspension de ciment en solution aqueuse, ce qui améliore caractéristiques rhéologiques du mélange [5].

Les super plastifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des bétons autoplaçants est assurée par des dosages relativement important en fluidifiants. La capacité de remplissage d'un BAP croit avec le dosage en fluidifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel le phénomène de ségrégation apparaît. Selon [Okamura et al, 1994] rapporté par [Trudel, 1996], l'utilisation d'un superplastifiants à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection de béton autoplaçants. Certains fluidifiants comme le FPC (fluidifiant constitué d'un mélange d'étalements deux polymères de structure très complexe [Mivra, 1998] permettent d'atteindre des étalements de 250 mm sans ségrégation, ce qui n'est pas le cas avec PC (polymère de type polycarboxylate) et NC (naphtalène sulfonate) [8].

#### **I.4. Méthodes et techniques de formulation des BAP :**

Des méthodes rationnelles de formulation des BAP ont été proposées dans la littérature  
Technique :

##### **I.4.1. Concept et développement des bétons autoplaçants :**

Ce n'est qu'à la fin des années 1980 que les bétons autoplaçants ont été utilisés pour la première fois au Japon, afin d'améliorer la rentabilité de la construction, d'assurer constamment une mise en place correcte avec un béton de qualité et de diminuer les nuisances sonores [10]. Depuis que le béton autoplaçant (BAP) désigné auparavant sous le nom « béton haute performance » (BHP), a été utilisé dans l'industrie du bâtiment, une grande partie des travaux de recherche et de développement a été consacrée à la nécessité d'améliorer les propriétés du béton à l'état frais et durci. Le développement du béton autoplaçant (BAP) est récemment devenu l'un des développements les plus importants dans l'industrie du bâtiment. C'est un béton qui a la capacité de remplir complètement le coffrage, même dans les systèmes Trop confinés, sans qu'il y ait ségrégation entre les constituants du béton lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre. Pour parvenir à ce cahier des charges, les BAP sont formulés différemment des BO. Dans leur cas, la pâte, définie comme le mélange du ciment, de l'eau et d'une addition, est privilégiée au détriment des gravillons. En général, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche. C'est donc principalement l'ajout d'une addition qui sert de substitut aux gravillons.

#### I.4.2. Exigences techniques pour formuler un BAP :

Pour qu'un béton soit qualifié d'autoplaçant ou d'autocompactant, il doit avoir certaines propriétés à l'état frais, à savoir, la fluidité, la résistance à la ségrégation et l'aptitude au remplissage, ce qui rend sa formulation relativement compliquée. Contrairement au béton ordinaire, le béton autoplaçant présente une difficulté particulière pour sa formulation et sa caractérisation. A cet effet, et de plus en plus, les bétons autoplaçants nécessitent certaines exigences techniques et tests imposés par chaque méthode pour arriver à une composition adéquate donnant un matériau durable.

Ces exigences peuvent être résumées comme suit :

- Un BAP doit, tout d'abord, s'écouler sous son propre poids, avec un débit suffisant. Ceci se traduit, dans la pratique, par un étalement et une vitesse d'étalement importants. Sachant que le béton est un fluide de Bingham, ceci se traduit par un seuil de cisaillement et une viscosité plastique faibles. Ces grandeurs rhéologiques peuvent être mesurées à l'aide d'un rhéomètre à béton comme le BTRHEOM-LCPC, par exemple.
- Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, à travers des zones confinées (dans un coffrage très ferrailé, au droit d'un diaphragme, ...). Une grande fluidité du béton n'est pas une condition suffisante pour cela. En effet, lors de l'écoulement d'un béton fluide au droit d'un obstacle, les gravillons cisailent le mortier (cf. figure I.7 et ont tendance à venir en contact les uns avec les autres, si ce dernier n'est pas assez résistant au cisaillement. Il faut donc qu'un BAP présente une bonne résistance à la ségrégation en phase d'écoulement dans une zone confinée
- Un BAP doit également avoir une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. Donc, il ne doit pas subir de tassement ou de ressuage trop fort, car ceci peut générer une chute d'adhérence des armatures, en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure, lors du coulage, ainsi que l'apparition de fissures.
- Ajoutons, enfin, que ces bétons sont généralement pompables. En conclusion, la principale difficulté à laquelle le formulateur de BAP est confronté, est de pouvoir concilier de propriétés a priori contradictoires, à savoir la fluidité, et la résistance à la ségrégation et au ressuage du béton.

De nombreux travaux ont été consacrés à l'étude des formulations appropriées aux BAP. Les compositions tirées de la littérature soulignent deux particularités : ces bétons contiennent un



volume de fines plus important que les bétons classiques vibrés et souvent un agent de viscosité (les Japonais utilisent également des forts dosages en superplastifiants).

Les différents constituants, en plus du ciment et de l'eau dosés de manière à obtenir une résistance mécanique donnée, qui sont proposés pour composer les bétons autoplaçants sont : les granulats, les fines, le fluidifiant et l'agent de viscosité. Yurugi et al, et Khayat , considèrent que le volume des gros granulats (grain supérieur à 5mm) dans le béton est l'un des facteurs les plus importants à prendre en considération. En effet, ils ont constaté que, plus la teneur en gros granulats augmente plus la capacité de remplissage diminue. De plus, les gravillons étant la cause du blocage en milieu confiné, leur volume est limité et le rapport gravillon/sable est proche.

Selon Okamura et al, l'utilisation d'un superplastifiant à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection de bétons autoplaçants. Même si de nombreuses études ont été effectuées pour comprendre les principes qui régissent le comportement de ces bétons en milieux confinés, aucune méthodologie pratique de formulation ne semble avoir été établie, permettant à un chercheur ou à un ingénieur de fabriquer un béton autoplaçant à partir de données de base sur les matériaux locaux et un cahier des charges précis [7].

#### **I.4.3. Méthodes de formulation existantes :**

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des bétons ordinaires. En effet, la formulation des BAP est particulière : utilisation d'adjuvants et d'additions minérales. Leur sensibilité en ce qui concerne le dosage et la teneur en eau, la qualité et la régularité des composants ainsi que les conditions de malaxage, nécessite donc la mise en place d'un suivi plus important.

Dans le cas des BAP, la méthode de Dreux n'est pas adaptée, car elle ne prend en considération ni les adjuvants ni les additions. [11]

La formulation de la composition se fait sur la base des méthodes acquises ces dernières années. Parmi ces dernières on peut citer les suivantes:

- La méthode Japonaise.
- La méthode Française (LCPC).
- Approche basée sur l'utilisation du mortier du équivalent MBE

##### **a. Approche japonaise :**

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les

bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Le surcout engendré sur le matériau est compensé, au Japon, par les économies sur la main d'œuvre. Les principes de formulation et leur application sont les suivants :

- **Dosage des gravillons:** Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour  $1 \text{ m}^3$  de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.
- **Dosage du sable:** Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.
- **Dosage du liant:** La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de  $350 \text{ kg/m}^3$ ).
- Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.
- **Dosage de l'eau et du super plastifiant :** Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir. [11].

#### b. Approche Française :

Méthode française (LCPC) : proposé par [F.LARRARD et T.SEDRAN.1994] :

Au LCPC, un modèle mathématique a été développé à partir d'un modèle de suspension solide, il est basé sur les interactions granulaires entre les différents constituants du mélange. Ce modèle peut prévoir la compacité d'un mélange granulaire avec une précision qui est intérieure à 1 % à partir des constituants ci-après :

- ❖ Les proportions du mélange.
- ❖ La compacité propre.
- ❖ La densité apparente.
- ❖ Les distributions granulaires.

La procédure à adopter pour déterminer les proportions des divers constituants est la suivante :

- ✓ La proportion de liant est fixée a priori (70% de ciment ,30% d'addition par exemple)

- ✓ Le dosage, à saturation, du superplastifiant est déterminé. Selon l'expérience du LCPC, ce dosage pourrait conférer au béton une viscosité élevée, la moitié de ce dosage serait plus pertinente.
- ✓ Le besoin en eau de ce mélange (en présence du superplastifiant) est déterminé.
- ✓ Les calculs sont effectués avec le logiciel en tenant compte du confinement (effet de paroi).

La viscosité est fixée de manière arbitraire à  $5.10^4$  La teneur en eau est réduite en conséquence et la proportion liant/filler est maintenue constante. Les proportions granulats/phase liante sont optimisées.

Une formulation de béton autoplaçant est donc proposée basée sur les prévisions du modèle. La teneur en eau est ajustée pour obtenir la résistance ciblée. Le dosage en superplastifiant est ajusté également afin d'obtenir la valeur d'étalement et le seuil de cisaillement souhaités et par conséquent les propriétés requises pour le béton autoplaçant sont atteintes [12].

### **c. Approche basée sur l'utilisation du mortier du équivalent MBE :**

L'approche du Mortier de béton Equivalent (MBE) a été initialement développé au CTG (Guerville, France) pour faciliter la sélection des adjuvants de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de teste sur béton. En fonction des essais préalable réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilité classique.

## **I.5. Les propriétés principales d'un BAP :**

### **I.5.1. A l'état frais:**

Les propriétés générales d'un béton autoplaçant frais sont la fluidité et l'homogénéité. Ces propriétés sont étudiées sur plusieurs aspects, et peuvent se diviser en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation, et la capacité à passer à travers les obstacles que nous appellerons capacité de passage. [4]

#### **I.5.1.1. Essais de caractérisation rhéologiques des BAP :**

Plusieurs essais ont été développés pour déterminer les propriétés rhéologiques tant au point de vue de la fluidité que de la ségrégation (essai à la boîte en L, au tube en U et au cône en V, essai d'étalement, divers rhéomètres, essai d'enfoncement de billes, etc.). Certains

essais permettent de qualifier soit la fluidité du béton, soit son comportement rhéologique. Pour évaluer la résistance à la ségrégation statique, on est actuellement contraint de faire des mesures sur béton en cours de durcissement ou durci (sciage et comptage de granulats, ultrasons, etc...) [4]

#### I.5.1.1.a. Essais d'étalement :

Pour la détermination de l'étalement 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, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP 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 béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies. [4]

La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière. Lorsque la petite ouverture se trouve en bas (fig.....), le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché.



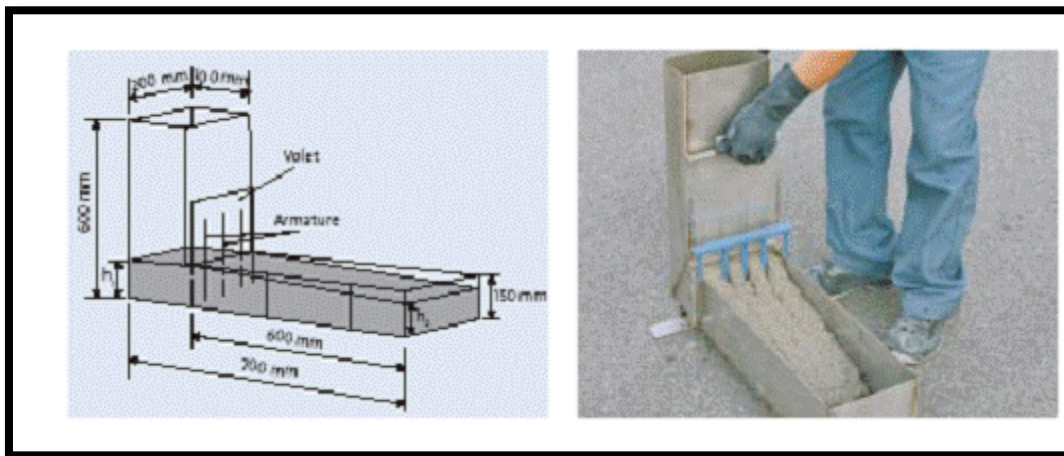
Figure I.2: Essai d'étalement [4]

### I.5.1.1.b. L'essai de la boîte en L :

Cet essai permet de caractériser la mobilité du mélange frais en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables. Le dispositif d'essai est constitué d'une boîte en forme de L.

- La partie, verticale est séparée de la partie horizontale par une trappe. des armatures peuvent être intercalées avant la trappe.
- On laisse le béton reposer pendant une minute on lève la trappe à une hauteur de 16 cm et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers une grille de ferrailage, cette dernière est composée de trois barres éloignées entre elles de 39 mm.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs  $H_1$  et  $H_2$ .
- On vise un rapport  $H_2/H_1$  d'au moins 0.8 pour un béton autoplaçant

Beaucoup d'autres essais similaires à celui de la boîte en L sont utilisés partout dans le monde pour caractériser l'aptitude au remplissage du béton tel que : l'essai de la boîte L, l'essai en U, l'essai de capacité de remplissage etc. ils relèvent de même principe.



**Figure I.3 :** Essai d'écoulement à la boîte L-box ou boîte en L [4]

### I.5.1.1.c. Essai stabilité au tamis :

Cet essai vise à qualifier les BAP vis-à-vis du risque de ségrégation. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un BAP en laboratoire, ou pour le contrôle de la stabilité du béton livré sur chantier (voire figure I.4). Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [4].

Cet essai consiste à déposer deux litre de béton sur un tamis ayant des mailles de 5 mm d'ouverture. Après cinq minutes on pèse la quantité de béton ayant traversé le tamis. Cette

quantité par rapport à la quantité initialement présentée dans le conteneur de 2L donne l'indice de ségrégation du notre béton.

- Si  $0\% < p < 15\%$  : stabilité satisfaisante.
- Si  $15\% < p < 30\%$  : stabilité critique.
- Si  $30\% < p < 100\%$  : stabilité mauvaise.



(a)



(b)

**Figure I. 4 :** Essai de stabilité au tamis.

### I.5.2. l'état durci :

Le comportement à l'état durcis rapporte essentiellement des travaux concernant les performances mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction) et le retrait des bétons autoplaçants

#### I.5.2.1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécanique [13]. L'utilisation de filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge .Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense. Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80 % de celle de référence à 7j et 20 à 40 % 28 j, ils ont expliqués cette augmentation par la poudre à pierre à chaux accélère l'hydratation de ciment et augmente la résistance aux jeunes âges. Le dosage plus ou moins important en adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [13].

### **I.5.2.2. Résistance à la traction :**

Gibbs 99 ont contactés qu'il n'y aucune différence entre la résistance à la traction des BAP et celle des bétons référence. Par contre, Gibbs 02 ont montrés que la résistance à la traction est plus grande que la résistance des bétons références. En comparant des mélange de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [13].

### **I.5.2.3. Module d'élasticité :**

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton .Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré [13].

### **I.5.2.4. Le retrait :**

Le retrait endogène des BAP est plus faible(les valeurs s'échelonnent entre 50-2005(um /m) que celui des BV. Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ; Sur la déformation chimique .Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un coté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est partagées d'un sensiblement supérieur dans le cas des BAP(4). Ogawa et Al, constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'ils contiennent est plus important

## **I.6. Approche basée sur l'optimisation des mortiers:**

Okamura, le concepteur des BAP, propose de formuler en composant en premier lieu le mortier du béton. Dans le mortier, la proportion de sable est posée arbitrairement. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en super plastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formule finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire, à la moitié de leur compacité. A la suite d'une optimisation identique du mortier, Ouchi et al proposent de doser les gravillons en cherchant expérimentalement leur volume limite menant à un blocage. Ce volume est évalué en comparant l'écoulement du mortier dans un entonnoir avec et sans gravillons. [7]

La formulation d'un BAP par le biais de son mortier trouve sa justification dans quelques publications. Billberg et Jacobs et al montrent à cet effet que la rhéologie d'un béton se corrèle bien avec celle de son mortier.

### **I.7. Les mortier équivalent de BAP « MBE » :**

C'est une nouvelle méthode introduite dans la formulation des bétons adjuvants. Elle consiste concevoir, à partir d'une composition de béton qui contient du ciment; de l'eau; du Sable; des adjuvants et éventuellement des additifs, qui présente une bonne Ouvrabilité à l'état frais et des propriétés physico- mécaniques définies à l'état durci. Un mortier, dit mortier de béton équivalent (MBE), dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton. [14]

La composition du mortier de béton équivalent peut être déduite de celle du béton de la manière suivante

- Même nature et dosage en ciment
- Même nature et dosage en additions minérales
- Même rapport E/C
- Même nature et dosage en adjuvant et même mode d'introduction
- Utilisation du sable du béton

Ajout d'une quantité de sable reproduisant la même surface granulaire que les gravillons retiré

Cette définition est valable tant que les gravillons ne contiennent pas une part significative d'éléments inférieures à 5 mm dans le cas contraire ces particules doivent être récupérées par tamisage et ajoutées au mortier

### **I.8. Propriétés générale des mortiers:**

Les caractéristiques principales des mortiers sont [14]:

- Ouvrabilité.
- Prise.
- Résistances mécaniques.

#### **a. Ouvrabilité:**

On peut la définir comme étant l'aptitude du mortier à s'étaler à la truelle pour colmater toutes les fentes et fissures de l'élément de maçonnerie, due à l'effet de «roulement à billes » résultant de la lubrification des granulats par le lait de ciment. En réalité, c'est une combinaison de plusieurs propriétés, comprenant la plasticité, la compacité et la cohérence.



La capacité d'un mortier à garder une certaine ouvrabilité sous l'influence de la succession des blocs dépend de son pouvoir de rétention d'eau mesurée lors d'essais en laboratoire. L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Parmi ces appareils :

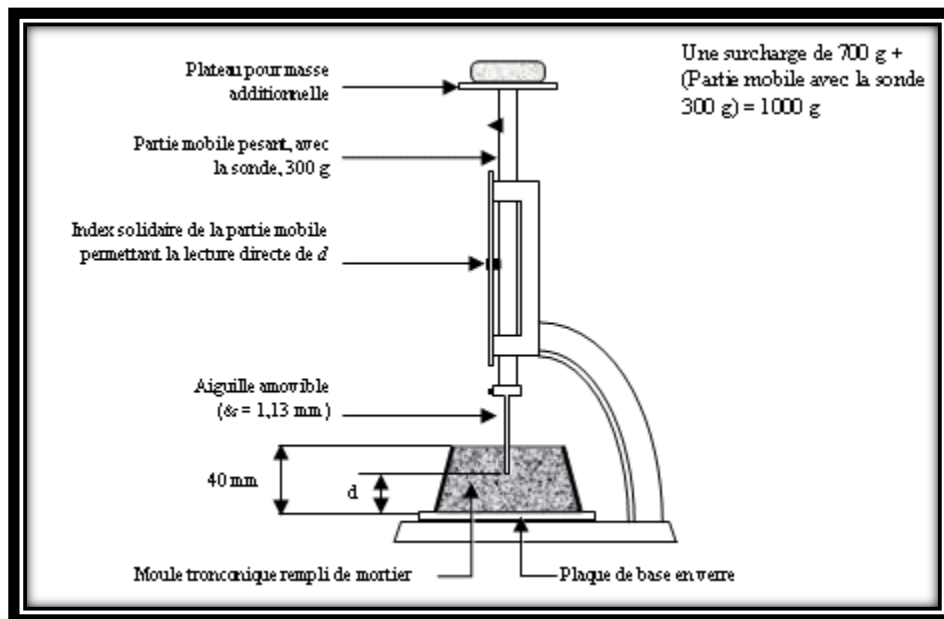
- **Le cône:**

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier à travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

- b. La prise:**

Le temps de prise est mesuré habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur.

Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.



**Figure I.5 :** Appareil de Vicat muni [14]

- c. Résistance mécanique:**

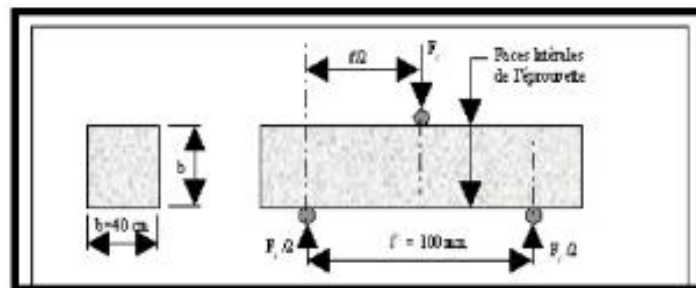
La résistance mécanique prend l'importance majeure par rapport aux autres propriétés de mortier durci, les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm conservés dans l'eau à 20°C



**Figure. I.6 :** les moules 4\*4\*16 [14]

Les éprouvettes subissent des contraintes de traction par flexion puis en compression. Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs, parmi les quelles:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.



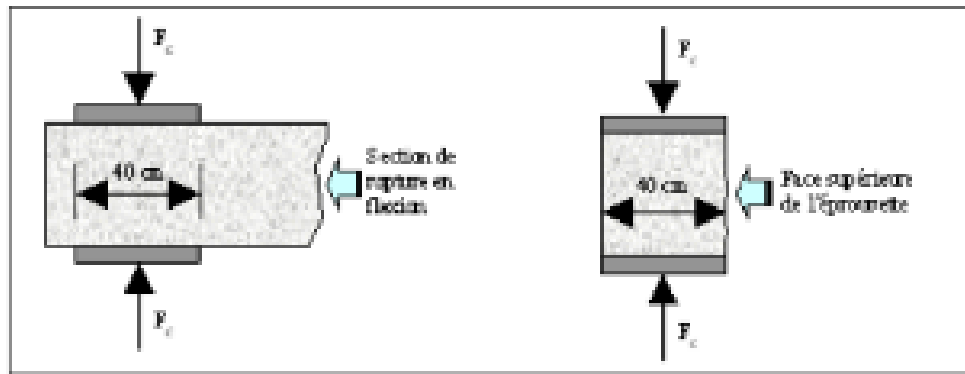
**Figure I.7:** Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion [14]

Si  $F_f$  est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_f = \frac{1.5 F_f \cdot l}{b^3}$$

Cette contrainte est appelé la résistance à la flexion. Compte tenu des dimensions  $b$  et  $L$ , Si  $F_f$  est exprimée en newtons (N), cette résistance exprimée en méga pascals (MPa) vaut :

$$R_f(\text{MPa}) = 0.234 F_f(\text{N})$$



**Figure I.8:** Dispositif de rupture en compression [14]

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression

Si  $F_c$  est la charge de rupture, la contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c(N)}{b^2}$$

Cette contrainte est appelée résistance à la compression et, si  $F_c$  est exprimée en newton, cette résistance exprimée en MPa vaut :

$$R_c(\text{MPa}) = \frac{F_c(N)}{1600}$$

Les résultats obtenus pour chacun des 6 demis la moyenne. Si l'un des 6 résultats diffère de  $\pm 10\%$  de cette moyenne, il est écarté et la moyenne est alors calculée à partir des 5 résultats restants. Si à nouveau un des 5 résultats s'écarte de  $\pm 10\%$  de cette nouvelle moyenne, la série des il convient de chercher les raisons de cette dispersion : malaxage, mis en place, conversation, Lorsque le résultat est satisfaisant, la moyenne ainsi obtenue est la résistance du ciment à l'âge considéré. [14]

### I.9.Méthode de formulation du MBE:

Lors de présentation des principales caractéristiques des BAP nous avons mis en évidence l'influence des différents constituants et établit certains critères permettant d'obtenir les propriétés visées. [10]

Les gammes de valeurs généralement employées sont issues des recommandations provisoires de l'AFGC et présentées ci-dessous:

- Une quantité de pâte élevée (de l'ordre de 40% du volume total)
- Une quantité de fines élevée (de l'ordre de 500 Kg/ m<sup>3</sup>)
- Utilisation d'un superplastifiant (à un dosage proche du dosage à saturation)
- Un faible volume de gravillons (rapport G/S de l'ordre de 1)
- Un diamètre maximal réduit
- Eventuellement utilisation d'un agent de viscosité.

#### **I.10. Méthode de mortier équivalent :**

La méthode de MBE débute nécessite une parfaite connaissance et qui des caractéristiques de béton qui sont liées à sa destination et qui sont en général connues quand on part d'un béton existant. Il est donc nécessaire pour établir les grandes lignes de la formule, de connaître les points suivants :

##### **Caractéristiques du béton :**

- Composition de béton ;
- Catégorie du béton ;
- Classe de consistance....

##### **Ses constituants :**

- Ciment ;
- Sable, gravillons ;
- Eau de gâchage ;
- Adjuvant ;
- Additions.

##### **Sa mise en œuvre :**

- Températures du béton frais et extérieur ;
- Condition de coulage et de serrage ;
- Durée et conditions de transport.

Une fois se béton défini (cahier des charges établi), on calcule le mortier équivalent correspondant “MBE”.

### **I.10.1. Technique du mortier de béton équivalent “MBE” :**

#### **I.10.1.1. But de la technique :**

La technique du mortier de béton équivalent n'a pas vocation à remplacer les techniques traditionnelles de la détermination granulair de composition des bétons, mais vient favorablement améliorer les conditions d'études paramétriques pour choix des types et dosages en adjuvant d'un béton.

En ce sens, elle constitue une méthode rapide et faible pour la mise au point des bétons adjuvants et permet de détecter les éventuels incidents rhéologique pouvant survenir sur chantier.

#### **I.10.1.2. Principe de la technique :**

Pour éviter la difficulté à reproduire en laboratoire en utilisant des conditions exacte du malaxage du béton en centrale et pour limiter la lourdeur des études sur le béton, il est avéré nécessaire d'utiliser une technique d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être reliés avec ceux qui seraient obtenus sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons écartés. Pour cette raison, la technique a été appelée technique du mortier de béton équivalent (MBE).

Pour utiliser cette technique, il convient de connaître au préalable les éléments d'identification des constituants et les bases de composition suivants ;

- La granulométrie de chaque classe de granulats,
- Leurs masses volumiques,
- Leur taux d'absorption d'eau,
- Leurs teneurs en eau totales,
- La nature et le dosage en ciment (ou en liant équivalent),
- Les caractéristiques des adjuvants,
- La composition granulair du mélange,
- Le ou les rapports eau efficace-liant (ciment ou liant équivalent) fixés par le chantier.

Ces éléments préalables peuvent être complétés par la connaissance des contraintes particulières imposées par le chantier (durées de transport, variations de températures, conditions de coulage, .....).

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux appliqués sur le béton correspondant. Ainsi, les essais d'affaissement et d'étalement au cône d'abrams du béton correspondant les essais d'affaissement et d'étalement au mini cône du mortier de béton équivalent.

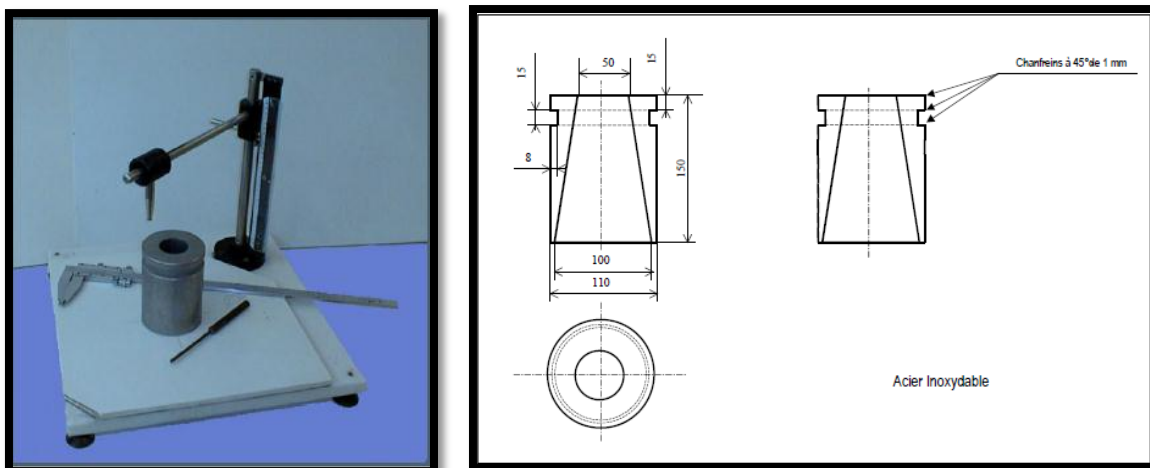
### I.10.2. Essais réalisables sur le mortier du béton équivalent :

Le principe de la méthode MBE est basé sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologiques d'un béton au mortier qui le compose. Cependant, le mortier qui joue un rôle sur la rhéologie du béton n'est pas directement le mortier déduit du béton. En effet, dans un béton, une partie de la pâte et des grains de sable adhère aux gravillons et ne participe pas à la rhéologie. Le MBE, pour un mortier de béton équivalent, est le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie [10]

Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis 5 mm. La composition de MBE qui conduit aux mêmes propriétés rhéologiques que celle du mortier tamisé est déduite de celle du mortier du béton en corrigeant la quantité du sable de manière à ce que la surface granulaire du MBE soit la même que celle du béton [10]

Les propriétés rhéologiques sont mesurées par la mesure d'affaissement au cône d'abrams pour le béton et par la mesure d'affaissement et de l'étalement au mini cône (**figure 8**) pour le MBE.

L'avantage de mesurer sur MBE à la fois l'affaissement et l'étalement permet de balayer une large plage de consistance. [10]



**Figure I.9:** Exemple de matériel pour mesures d'affaissement et d'étalement au cône MBE

### I.10.2.1. Essais d'affaissement au mini cône

Utiliser un mini cône dont la paroi intérieure est propre et légèrement humidifié. La surface d'étalement sur la plaque de base doit également être propre et légèrement humidifié (sans qu'il ne subsiste de l'eau résiduelle sur la plaque) [10]

Pendant le remplissage, le moule est appuyé fermement sur la plaque de base. Au moyen d'une pelle creuse, introduire le mortier dans le moule en trois couches d'épaisseurs équivalentes. Pour chacune des couches, piquer 15 fois le mortier (sauf dans le cas de mortier autoplaçant ou fluide) à l'aide de la tige de piquage métallique, en répartissant les enfoncements sur la surface du mortier et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu.

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton. Puis soulever le cône le plus verticalement possible en 2 secondes, avec précaution, lentement et sans secousses. Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement au centre de la partie supérieure du mortier à l'aide d'un réglet métallique gradué en mm.

### I.10.2.2. Essais d'étalement au mini cône

La mesure de l'étalement est effectuée juste après celle de l'affaissement, sur le même échantillon affaissé précédemment. Elle s'effectue à l'aide du matériel défini précédemment selon 3 diamètres pour les mortiers fermes à très plastiques et selon 2 diamètres orthogonaux pour les mortiers fluides autoplaçant. La valeur de l'étalement est la moyenne de ces valeurs. [10]

Ces procédures sont valables à toutes les échéances retenues. Pour les suivis rhéologiques dans le temps, remettre après essai un maximum de mortier dans le bol du malaxeur et le couvrir d'un linge humide ou d'un film plastique en attendant l'échéance suivante. Il est important de bien remalaxer 15 secondes à petite vitesse avant chaque nouvel essai.

## I.11. Les avantages des bétons autoplaçants :

### Le BAP présente de nombreux avantages :

- Mise en œuvre sans vibration
- Bétonnages plus rapides et optimisation de productivité sur chantier
- Coulage de murs verticaux de grande hauteur
- Bétonnage de formes complexes avec un excellent remplissage
- Plus grande fluidité pour un meilleur pompage

- Enrobage des armatures amélioré
- Optimisation de la qualité de parement
- Amélioration des conditions de travail sur le chantier
- Absence de nuisance sonore liée à la vibration [5].

### I.12. Domaines d'application :

#### **Le BAP est une solution bien adaptée pour**

- Tous types de dalles y compris dalles
- de compression sur poutrelles hourdis
- Plancher dalle pleine et plancher chauffant
- Rattrapage de niveau en rénovation
- Fondations superficielles
- Voiles, poteaux, poutres.

### I.13. Classifications des BAP :

La notion de classification des BAP est apparue tardivement et constitue pourtant un paramètre essentiel du développement de ces bétons.

À l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies de mise en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes: pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques.

Par contre, la problématique spécifique de la capacité à donner de beaux parements est à prendre en compte pour les applications verticales.

On distingue donc aujourd'hui, en France (conformément aux Recommandations pour l'emploi des BAP éditées par l'AFGC et le PN BAP), trois catégories:

- **Catégorie 1:** il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dallages) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface;



- **catégorie 2:** elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques déségrégations statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage)
- **catégorie 3:** ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile).

À chaque catégorie correspondent des spécifications particulières pour le BAP à l'état frais, définies ci-après [6].

### **Conclusion :**

Les bétons autoplaçants sont connus par leurs caractéristiques à l'état frais telle que fluides qui nécessitent un dosage très élevé du mélange liant (ciment + ajout) afin d'assurer cette fluidité et aussi d'éviter le phénomène de ségrégation. Cependant, les travaux réalisés sur ce type des bétons sont à la base des sables naturels ou concassés ou des granulats obtenus à partir des déchets et des sous produits. Il existe d'autre type des granulats ayant des caractéristiques très intéressants pour les bétons autoplaçants, comme les cas des granulats légers à base du verre mousse. Dans la littérature, très peu des études qui ont été réalisées sur les bétons autoplaçants contenant des granulats du verre mousse. Pour cela, le second chapitre sera consacré à présenter des généralités sur le verre ainsi que les déchets du verre et leur applications dans la fabrication des granulats de verre mousse.

## Chapitre II : Les granulats du verre mousse

Notre étude a pour objectif de recycler les déchets du verre pour produire des granulats de verre mousse qui vont être utilisés comme sable dans la formulation des mortiers autoplaçants. Le présent chapitre consiste à donner des généralités sur les granulats de verre mousse (dite aussi mousse de verre). La définition du verre, ses constituants, ses propriétés essentielles ainsi que la fabrication des granulats du verre mousse, seront présentées dans ce chapitre. Également, les travaux de recherche réalisés sur l'utilisation des granulats de verre mousse (comme sable ou gravillon) seront présentés sous forme d'état de l'art à la fin de ce chapitre.

### Introduction:

La première utilisation du verre par l'homme date de la préhistoire, quand l'obsidienne, du verre volcanique, était polie pour former des pointes de flèches. Les tactiques, billes de verre formées par des impacts avec des météorites, servaient également de bijoux.

Les premiers verres artisanaux datent du troisième millénaire avant Jésus-Christ, au Moyen-Orient en Égypte. Il s'agissait d'abord de verre colorés (donc non transparents) qui étaient taillés pour former des bijoux ou de petits flacons. Jusqu'au XII<sup>e</sup> siècle, la production resta limitée à ces deux régions. À partir du IX<sup>e</sup> siècle, la Syrie devient un grand centre puis l'activité se propagea dans toute la région méditerranéenne bien que les verres les plus transparents étaient fabriqués en Phénicie grâce à ces sables très purs.

La plupart des méthodes décoratives, avec des récipients composés de verre de différentes couleurs, datent de l'empire romain. La technique de soufflage du verre date du 1

siècle avant Jésus-Christ, inventée en phénicien, laquelle démocratisa l'usage du verre pour les récipients ou les vitrages.

Pendant le moyen-âge il y eut d'abord un fort déclin de l'utilisation du verre à cause de la fin des routes commerciales avec l'Orient qui fournissaient les sables nécessaires, il fut pourtant utilisé au moins à partir du VI<sup>e</sup> siècle pour faire des vitraux, surtout en France. Il fallut apprendre empiriquement à s'accommoder des sables de moindre pureté qu'on pouvait trouver sur place, en dosant les divers additifs. À partir du XV<sup>e</sup> siècle c'est avant tout les verres vénitiennes qui dominaient le marché, grâce au verre cristallin. Au XVII<sup>e</sup> siècle les Allemands mirent au point des verres à la chaux de potasse plus fins et plus durables. Par la suite la révolution industrielle s'étendit à la fabrication des verres et se développèrent des méthodes de laminage et de fonte en continue [15].

### II.1. Définition:

Le mot verre a connu plusieurs sens au cours des temps. Il peut signifier un certain état de substance un matériau fonctionnel ou un objet. En 1945 « American Society for Testing Materials (ASTM) » a proposé la définition la plus répandue dans le milieu scientifique. « *Le verre est un produit minéral obtenu par fusion qui se solidifie sans cristalliser* » Cette définition a limité le sens du mot verre aux composés minéraux seulement en mettant en marge que plusieurs matériaux organiques forment des verres. L'avancement de la science a permis de préparer d'autres méthodes pour la fabrication du verre par fusion.

Le verre est un matériau amorphe (du point de vue de la diffraction des rayons X) caractérisé par une transition vitreuse. Cette dernière est définie comme étant un phénomène au cours duquel un solide amorphe présenté avec la variation de la température, un certain changement (plus ou moins important) des dérivées de ses propriétés thermodynamiques au point de transformation solide — liquide. Cette définition est la plus appropriée car elle n'impose aucune restriction quant à la manière dont est obtenu le matériau vitreux.

Donc le sens du mot verre se trouve alors limité aux composés minéraux, ce qui, sous cette forme générale est discutable. La définition américaine apporte des précisions supplémentaires, elle indique entre autres qu'on désigne aussi par verre (des objets comme un verre à vin ou verre grossissant). Si l'on veut donner une définition au mot verre, celle-ci doit donc contenir ces sens. Ce n'est naturellement pas possible si elle est courte et une définition doit être courte à cause de ses sens très différents du mot verre qu'on veut exprimer.

Les solides sont caractérisés à la fois par leur incapacité à prendre la forme du récipient dans lequel ils prennent place, et par leur grande résistance aux forces de cisaillement. On les classe en deux catégories: les solides cristallisés et les solides amorphes, qu'on appelle aussi parfois désordonnés ou non cristallisés [15].



**Fig.** verre [..]

## II.2. Fabrication du verre :

Pour fabriquer les verres, on utilise des matières premières constituées en grande partie par des roches naturelles et en plus faibles quantités par des produits chimiques industriels. La quasi-totalité des verres fabriqués industriellement sont constitués par des mélanges d'oxydes, pouvant d'ailleurs contenir à l'état dissous des quantités limitées de composés qui ne sont pas des oxydes tel que les sels (chlorures, fluorures).

L'aptitude à la vitrification dépend de la nature et de la proportion des oxydes formateurs et des oxydes modificateurs. L'oxyde formateur étant, nous le rappelons, celui qui peut former le verre tout seul ou en combinaison avec un autre oxyde, tandis que l'oxyde modificateur, inapte pour lui-même à devenir un verre, modifie avantageusement par sa présence les conditions de vitrification et les propriétés physiques et chimiques du verre obtenu.

Les constituants de base des verres industriels de grande production sont limités à ceux qui peuvent être apportés par les matières premières les moins chères.

- ✓ Le sable (riche en  $\text{SiO}_2$ ), après avoir subi un traitement afin de diminuer sa teneur en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,
- ✓ Le calcaire, la dolomie et dans certains cas des roches alumineuses après avoir subi un broyage.
- ✓ Le carbonate et le sulfate de sodium.
- ✓ Le charbon broyé (charbon de bois) lorsque le verre contient des quantités importantes de sulfate.

Quelques constituants secondaires, dont la proportion n'excède généralement pas 1% sont souvent introduits pour modifier la teinte ou les conditions de l'élaboration du verre (As associé à  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ou  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MnO}_2$ , Se ...etc). Suivant leurs rôles dans le mélange vitrifiable.

### II.3. Structure et composition chimique du verre :

La structure de verre n'a été élucidée de façon satisfaisante que depuis une trentaine d'années. Des travaux exécutés à l'aide des rayons X ont montré que l'ordre moléculaire dans les verres est, d'une façon générale irrégulier, analogue à celui d'un liquide. On avait supposé que le verre, dans sa structure, n'était qu'un liquide figé; c'est ce qui a été confirmé. Les travaux de W.L BRAGG ont démontré l'existence de tétraèdre de  $SiO_4$  constituant l'élément constitutif universel des silicates.

La disposition des formateurs de réseau est donc désordonnée comme dans les liquides, mais figée. Dans la figure (1) des quatre atomes d'oxygène d'un tétraèdre de  $SiO_4$ , trois seulement sont représentés, le quatrième se trouve au dessus ou au dessous de plan du dessin.

Lorsque le verre est constitué par plusieurs composants comme par exemple un verre sodalcalique et nombreux autres verres techniques, il s'y forme également un réseau de tétraèdres  $SiO_4$ , dans les lacunes desquels s'incorporent des cations  $Na$  et  $Ca^{2+}$ . Ces cations ne sont pas à même de former un réseau par eux même, mais au plus de modifier un réseau existant ce sont les modificateurs de réseau qui donnent les liaisons  $Si-O$  par l'oxygène qu'ils apportent et créent des points de séparation. La formation des points de séparations entraîne un changement des propriétés du verre. Plus leur nombre est grand, plus faible est le verre à l'état de fusion, ce qui explique que la viscosité du verre de silice est abaissée après additions de soude [16].

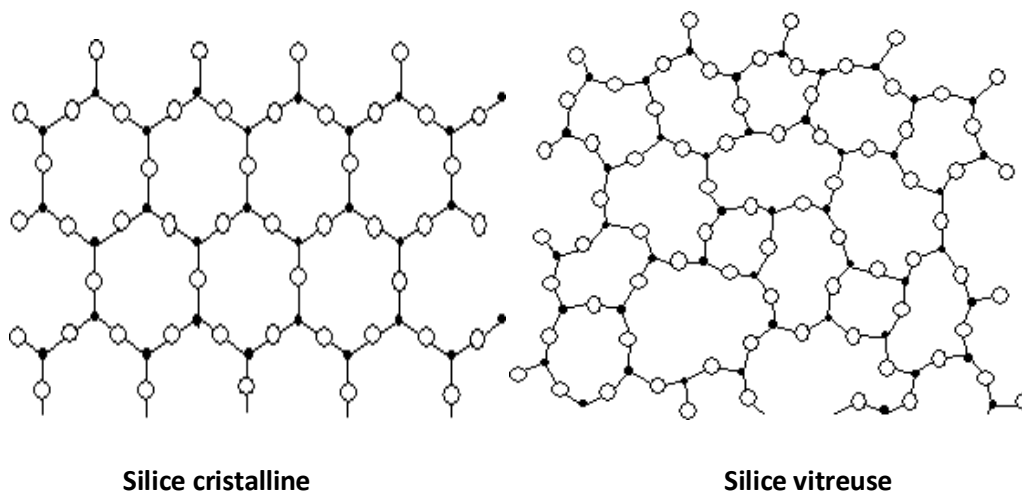


Fig.II. 1: La structure du verre (cristalline et vitreuse) [1]

Certains éléments comme le silicium et le bore peuvent former un verre par leur seule combinaison avec de l'oxygène (oxyde de ...) et par élévation à une très haute température. Ces oxydes sont appelés oxydes formateurs car ils forment le squelette du verre. On les combine avec d'autres éléments dits « modificateurs » qui sont:

- Les fondants qui abaissent la température de fusion des oxydes formateurs (silice =  $1730^{\circ}C$ ).

- Les stabilisants qui modifient les propriétés physiques du verre atténuées par l'adjonction du fondant.

### II.3.1. Les oxydes formateurs (les vitrifiant):

**La silice:** (dioxyde de silicium SiO<sub>2</sub>):

C'est le composant principal du verre qui représente environ 70% de la masse. Elle est l'élément formateur de réseau. Si l'ion augmente sa quantité, on augmente la dureté du verre. Son point de fusion est à 1730°C. Elle entre dans la fabrication sous forme de sable dont les plus purs en contiennent 99,5 % (les sables quartzeux). Le sable de Fontainebleau, du fait de sa qualité, est très recherché pour la fabrication de verres d'optique et de cristal. Plus le pourcentage de silice est élevé et plus le coefficient de dilatation est faible ; donc, plus le verre est résistant [1].

**L'anhydride borique:** (le bore ou borax anhydre B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):

Il diminue le coefficient de dilatation et améliore la résistance aux chocs thermiques ; il est aussi plus résistant à l'eau. Son point de fusion est à 2300°C. Il sert pour le travail de laboratoire (verre thermorésistant comme le Pyrex). Il possède aussi les propriétés d'un fondant.

**L'anhydride phosphorique:** (le phosphore P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>):

Employé dans le domaine de l'optique. La principale source au Moyen Age est les cendres de bois.

### II.3.2. Les oxydes modificateurs:

**Les fondants (oxydes alcalins) :** La silice permet d'obtenir un verre, mais son point de fusion est très élevé (1730°C). En ajoutant des fondants, on abaisse cette température à 1400°C (économie d'énergie) et on facilite les possibilités de travail. Les fondants sodiques et potassiques ont été utilisés conjointement dès le moyen âge.

**L'oxyde de sodium (la soude Na<sub>2</sub>O):** Il entre autre fois dans la composition sous forme de cendres de plantes marines ou de nitre. Il abaisse le point de fusion, augmente l'éclat du verre et sa résistance aux agents atmosphériques ainsi que le coefficient de dilatation. Il est plus utilisé pour le verre industriel que pour le verre soufflé car il doit être constamment réchauffé lors du façonnage.

- L'oxyde de magnésium (MgO): Il est utilisé sous forme de dolomite (calcium+magnésium). Il n'est pas indispensable pour tous les verres, sauf le verre flotté, le verre à vitre et en gobeletterie. Il abaisse la température de fusion et augmente la résistance aux agents chimiques.

### II.3.3. Les stabilisants:

**Oxydes alcalino-terreux:** L'introduction d'un oxyde alcalin (fondant) a provoqué la rupture d'une liaison Si - O et l'apparition d'un oxygène non pontant. Ceci a pour effet de fragiliser le réseau et d'augmenter la solubilité à l'air [1].

## II.4. Propriétés du verre :

### II.4.1. Propriétés physique :

**II.4.1.1. La densité :** La densité du verre dépend de sa composition et jusqu'à un certain degré, de son passé thermique. Le verre à l'état solide ne possède qu'une faible dilatation thermique lorsqu'il commence à se ramollir (dans la zone de transformation) sa densité diminue très rapidement.

**Tableau II.1 : Valeur de densité de différents verres.**

Type de verre	Densité
Verre de quartz	2,2 1
Glaces	2,49
Verre armé	2,59
Verre creux et verre pressé	2,46
Verre au plomb (demi lourd)	3,00
Verre pour appareils optiques	2,34

### II.4.2. Propriétés mécaniques :

Le verre est un corps fragile qui n'admet pas de changement de formes notables, provoqués par la pression, les chocs ou les coups. La grande dispersion des valeurs dépend de la résistance des verres. On suppose que dans la structure du verre, il y a des failles de réseau qui agissent comme des entailles et diminuent fortement la résistance locale. Des rayures et des fissures à peine visibles diminuent fortement la résistance. La durée et la vitesse de l'effort exercé sur le verre ont une influence remarquable [18].

### II.4.3. Propriétés électriques :

A l'état solide et sec les verres sont d'excellents isolants et diélectriques mais il suffit que la surface du verre entre un instant en contact avec la vapeur d'eau pour que la résistance électrique diminue fortement et qu'il y ait conductivité superficielle. C'est notamment le cas pour les verres riches en alcalis. De 200 à 300 °C conductivités électriques du verre augmente fortement; aux hautes températures elle atteint la valeur considérable de 1 cm.

Les verres ne sont pas des conducteurs d'électrons comme les métaux, mais ce sont des conducteurs d'ions. A noter que le constant diélectrique des verres normaux est entre 5 et 7 [18].

### II.4.4. Fragilité :

Vis-à-vis des chocs et vis-à-vis des variations de température. La fragilité aux variations de température s'explique par un coefficient de dilatation élevé et une faible conductibilité thermique: un échauffement localisé provoque la dilatation d'une partie seulement de la masse d'où les tensions qui provoquent la cassure. Cette fragilité à la chaleur

est d'autant plus grande que le verre est épais. Pour les récipients destinés à subir des changements de température, on utilise donc soit des verres très minces, se mettant très vite en équilibre de température, soit des verres peu dilatables (borosilicates) [18].

#### II.4.5. Propriétés chimiques :

Altération chimique des verres; les verres étant des silicates minéraux, les produits organiques sont pratiquement sans action sur eux (avantage sur de nombreuses matières plastiques). En revanche, ils sont attaqués par les réactifs minéraux tels que l'eau, les acides et les bases.

- L'eau dissout complètement les silicates alcalins (Na, K) et c'est pourquoi il est nécessaire d'ajouter des alcalinoterreux, mais malgré cela, il y aura toujours des échanges chimiques entre l'eau et le verre. Dont les cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$  ... étaient dans un état de mobilité relativement grande dans le réseau de silice. Cette mobilité explique la possibilité de leur passage dans les solutions aqueuses qui se trouvent au contact du verre. Dans un verre courant (silicosodocalcique), il y a alors passage de faibles quantités de bases solubles (soude et chaux) dans l'eau, avec formation d'un film de silice hydratée (acide silicique) insoluble qui tapisse la surface. L'alcalinisation de l'eau est faible, mais elle peut être suffisante pour déclencher ou favoriser certaines réactions chimiques des produits en solution.
- Les acides attaquent les verres en hydrolysant les liaisons oxygène-métal mais l'attaque n'est pas profonde car il se forme ici encore une pellicule de silice hydratée insoluble.
- Les bases alcalines ont une action plus énergétique car elles dissolvent la silice elle-même; elles détruisent les liaisons Si-O qui forment le réseau semi-organisé du verre.

En résumé: avec l'eau et les acides, il y a seulement échange des cations entre le verre et l'eau mais les liaisons homéopolaires Si-O ne sont pas touchées, tandis qu'avec les bases, ces dernières sont attaquées et le verre est lentement et totalement détruit [18].

#### II.5. Domaine d'application du verre :

- Automobile et matériel roulant
- l'électroménager
- les équipements industriels
- le mobilier urbain
- Les bâtiments : hôtels ; grandes surfaces ; salles des fêtes ; bureaux ;



## Recyclage du verre

Le verre trié (Tri sélectif) peut être recyclé indéfiniment sans perdre ses qualités. Dans certains pays tels que l'Allemagne, la Belgique, la Suisse ou les pays nordiques, le tri peut différencier le verre blanc, vert et brun pour un recyclage plus performant, et les bouteilles consignées puis réutilisées sont plus fréquemment choisies par les producteurs et consommateurs. Les bouteilles de verre usagées peuvent être fondues. La matière ainsi récupérée permet de fabriquer de nouvelles bouteilles. Le verre peut également être produit à partir de calcin (verre broyé) de récupération. La fabrication du verre à partir de calcin de récupération économise des matières premières et de l'énergie. Avant d'être refondu, le verre subit différents traitements : broyage, lavage, élimination des colles, étiquettes, capsules, séparation du verre et des métaux et élimination des rebuts (porcelaine, cailloux...) [2].

## Le déchet du verre (Calcin)

Le verre usagé peut être traité soit par réemploi direct (système de consigne où les bouteilles sont récupérées, lavées et réutilisées). Le verre peut être produit presque indifféremment à partir de matière minérale vierge (silice) ou de calcin (verre broyé) de récupération. Le verre récupéré, exempt de polluants, se recycle indéfiniment et sans aucune perte, ni qualitative, ni quantitative : il garde toutes ses propriétés mécaniques et physico-chimiques. Il doit être traité avant réutilisation car les polluants peuvent fragiliser les produits finis ou rendre le verre impropre à la commercialisation (traces colorées ou de plomb, ...) [3, 4].

Le calcin (verre broyé), ainsi libéré de corps étrangers, est une matière première qui peut être utilisé pour fabriquer du verre. Il est calibré puis envoyé aux industries verrières pour être refondu. Certains fours utilisent plus de 70% de calcin dans leur production. Les débouchés du verre recyclé sont divers : le verre produit entre principalement dans la fabrication de nouvelles bouteilles, bocaux, pots, flacons mais on peut aussi l'utiliser pour faire de la laine de verre, des abrasifs, ... .

Les déchets du verre ont deux origines : le verre d'origine industrielle : embouteilleurs, miroiteries, pare-brises et chantiers, ... Le verre ménager issu des collectes sélectives : emballages alimentaires, ... etc.

On distingue [3, 4, 5]:

- Le verre creux (emballages en verre),

- Le verre plat (verre trempé, vitrages, glaces, ...),
- La laine et le fil de verre (textile et isolation),
- Le verre technique (optique et électronique).

Le verre creux consigné est trié par type, lavé puis réemployé en l'état notamment dans le secteur de la restauration. Egalement, le verre plat et les verres creux non consignés sont transformés en calcin pour être réintroduits dans le cycle de fabrication du verre. En effet, le calcin est utilisé à raison de 40 à 90% en substitut de matières premières [3]. Toutefois, ils ne doivent pas être mélangés entre eux car leur composition chimique est différente. Le verre usagé subit plusieurs opérations :

En principe le verre est collecté en apport volontaire dans les communes. Tous les emballages collectés sont transportés au centre de tri du verre. Différentes étapes (tri manuel, tri magnétique, tri optique) permettent d'écartier les éléments indésirables tels que les capsules, la porcelaine, les plastiques, limailles et autres céramiques. Les bouteilles, pots et bocaux débarrassés de ces impuretés sont ensuite broyés en petits morceaux et criblés selon leur diamètre. Le produit fini s'appelle le calcin. C'est la nouvelle matière première du verre. Il est ensuite stocké provisoirement sur le site du centre de tri.

Le calcin est transporté vers l'usine de transformation. Celui ci est mélangé aux matières premières nécessaires à la fabrication du verre (sable, silice, carbonates) et ce dans des proportions importantes.

Selon sa couleur (blanc ou de couleur) il sera utilisé de deux manières différentes:

- le verre vert destiné à la fabrication de bouteilles de vin couleur feuille morte
- le verre blanc est affecté aux jus de fruits, sodas, bières, huile d'olive

Le calcin est aussi utilisé fréquemment dans la fabrication de la mousse de verre ou appelé ainsi (verre mousse).

#### **Verre mousse :**

Verre expansé est un matériau isolant industriel hautement efficace et polyvalent fait principalement à partir de verre recyclé. Verre cellulaire est fabriqué selon un procédé qui emprisonne des bulles de gaz dans le verre, la création d'un matériau expansé avec une consistance spongieuse [3, 4]. Aussi connu comme le grain de verre expansé ou verre cellulaire, verre cellulaire est léger et fines, les pores étanches qui en font une barrière

exceptionnelle contre l'humidité, l'humidité et les débris. Matériaux pour la fabrication du verre expansé peuvent être obtenus auprès de sociétés de fabrication de verre et d'approvisionnement en mousse.

### Définition :

Verre mousse (ou cellulaire) est le matériau écologique innovant fabriqué à partir de verre pur. Il a une structure poreuse obtenue par un traitement thermique d'un mélange du verre recyclé broyé (calcin et des agents moussants à des températures (850°C)). Granulat de mousse de verre est unique pour sa structure de granules, car cela permet de garder l'air fermé à l'intérieur du granulat.

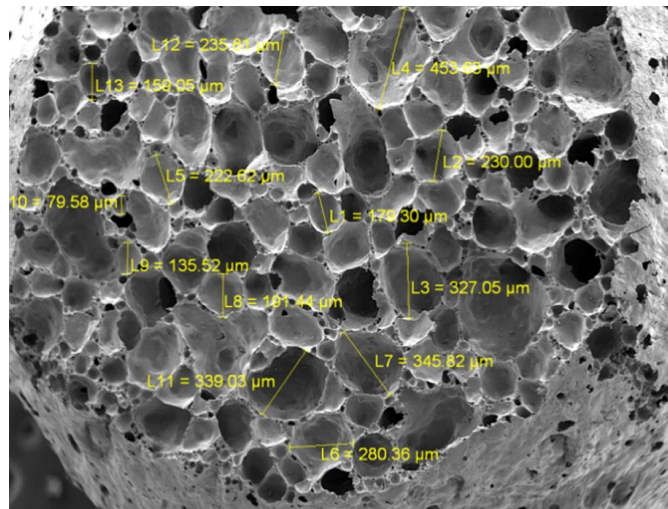


Figure : Image prise par MEB sur le granulat de verre mousse [5]

### Granulat de verre mousse

Le granulat de verre cellulaire est un nouveau matériau minéral de construction et d'isolation avec un large éventuel de domaines d'application. Produit à partir de 100% de verre recyclé trié, la matière première est broyée et chauffée après adjonction d'un produit naturel d'expansion [3]. La fabrication de granulés de verre expansé a commencé en Allemagne dans les années 60 et a débuté en France en 1973. Les granulés de verre produits en France sont d'une composition entièrement minérale, de forme sphérique presque régulière, avec une structure cellulaire à pores fermés remplis d'un gaz incolore et non toxique. [3, 4]

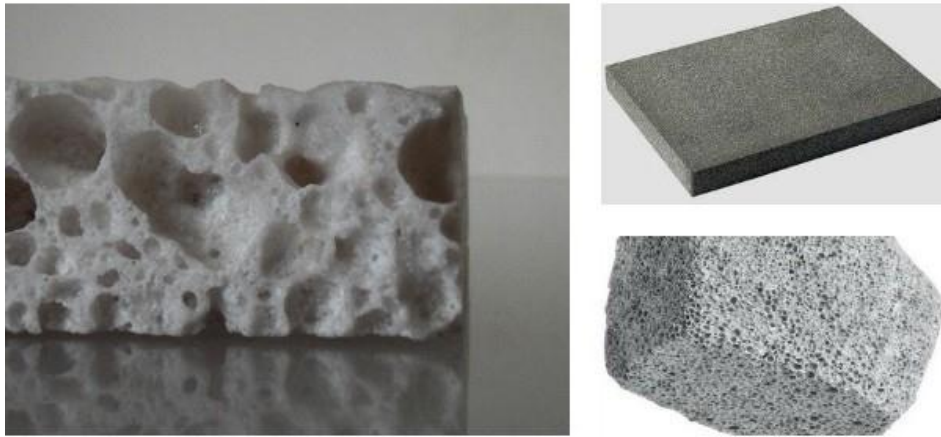


Figure : Granulats à base du verre mousse [4]

## III.2. Composition chimique des mousses de verre :

La mousse de verre est un matériau écologique obtenu à partir d'un mélange des matières premières (calcin, agent moussant et ajouts) après un traitement thermique.

### III.2.1. Le calcin :

C'est la matière initiale pour la production de verre cellulaire, le type de calcin est varié selon le verre d'origine. V.A. Lotov utilise les déchets de verre creux, le verre de lampe (borosilicate) et le verre plat pour élaborer le verre cellulaire, Pascal G.Yota et Michel Ribes ont utilisé les déchets de tube cathodique comme matière première pour préparer un verre cellulaire cristallin, dont l'utilisation des tubes cathodiques de perte des ensembles de TV, ordinateurs [18].

### III.2.2. Les agents moussants :

Selon la littérature de SPIRIDONOV et ORLOVA ont classé les agents moussants en deux classes : agents moussants de neutralisation et agents moussants de réduction

#### III.2.2.1. Les agents moussants de neutralisation :

Comprendre des sels (généralement des carbonates), qui se décomposent avec l'émission des gaz carboniques ( $\text{CO}_2$ ) au cours du chauffage. Le dégagement intense de gaz pendant la décomposition d'agent neutralisant permet de casser les parois de différents pores, ce qui fusionne et créent à labyrinthe comme le système des cavités dans le verre. Parmi les carbonates utilisés par les chercheurs on cite la dolomie  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)$  avec une surface spécifique de  $250 \text{ m}^2/\text{kg}$  [11], le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ , la craie, le carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  qui donne des résultats moins importants que le  $\text{CaCO}_3$  et le mica dont l'utilisation de ce dernier permettait la formation des cellules par la déshydratation des molécules d'eau et d'augmenter la résistance mécanique de la mousse de verre [18].

### III.2.2.2. Les agents moussants réducteurs :

Sont employés pour produire un verre spongieux thermo-isolant, c.-à-d., un matériel en lequel ont scellé des pores règne. Tels agents moussants sont des matériaux contiennent le carbone: coke, graphite, carbone de bois, et moins fréquemment carbure de silicium. La raison de l'émission de gaz en ces matériaux est la réaction de l'oxydation du moussant par des gaz dissous dans la fonte de verre, de tels gaz sont principalement l'oxygène et anhydride sulfurique. D'autres agents moussants sont utilisés par les chercheurs telle que le TiN à des quantités varie entre 4 et 9 % le nitrate d'Aluminium et le  $MnO_2$  [18].

### III.3. Principe de fabrication des mousses de verre :

Généralement, n'importe quel verre (sous forme de poudre) peut être transformé en un matériau cellulaire par l'ajout d'un agent moussant, à des températures au-dessus du point de ramollissement. La mousse de verre est obtenue par frittage. Le procédé de fabrication retenu est le pressage du mélange de la poudre de verre et de l'agent moussant à une humidité et une pression de compactage optimisées. Les différentes étapes suivies pour l'élaboration du verre cellulaire sont représentées par **la figure III.4.**

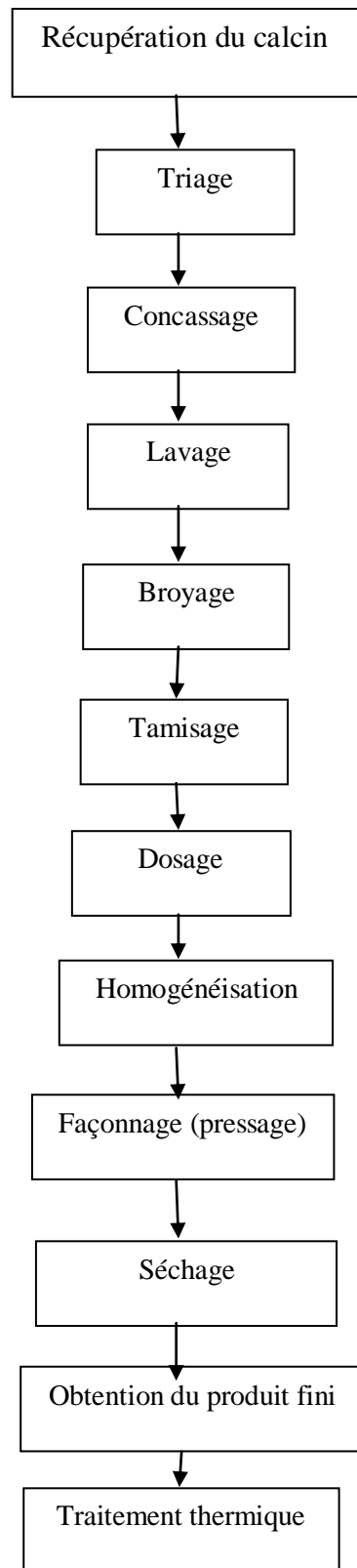


Figure III.4 : Schéma général d'élaboration d'un matériau (Verre mousse) [18].

III.4. Fabrication industrielle :

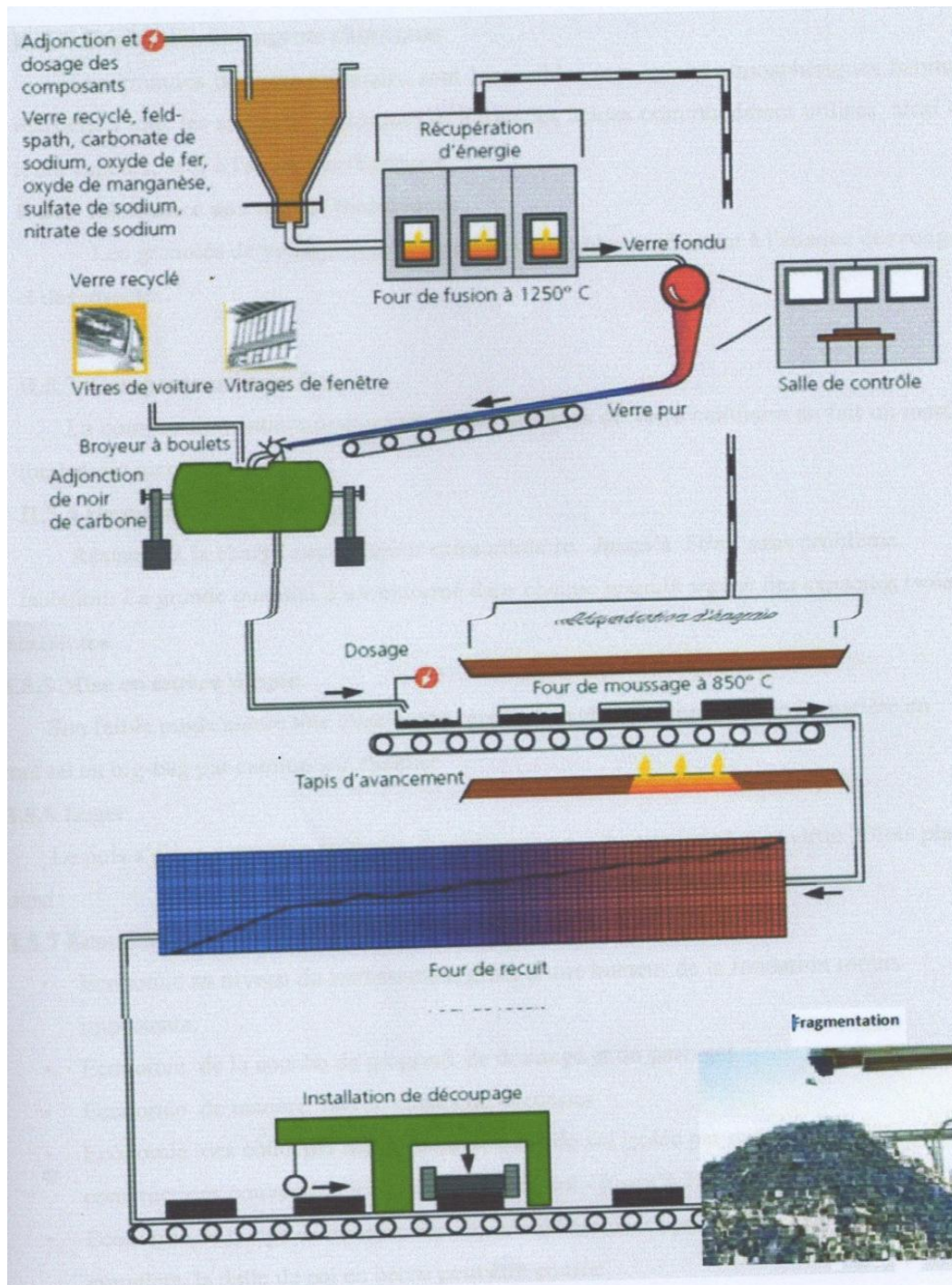


Fig.III.5. Processus de fabrication des granulats de verre mousse [20]

### **III.5. Les Caractéristiques des granulats de verre mousse :**

#### **III.5.1. Résistance aux agents chimiques :**

Les granulés de verre cellulaire sont insensibles aux agents atmosphériques habituels, résistent à tous les solvants organiques et à tous les acides communément utilisés, ainsi qu'à leurs vapeurs, sauf à l'acide fluorhydrique.

#### **III.5.2. Résistance aux agents biologiques :**

Les granulés de verre cellulaire sont imputrescibles et résistent à l'attaque des rongeurs et des insectes.

#### **III.5.3. Comportement au feu :**

La composition entièrement minérale des granulés de verre cellulaire en fait un matériau totalement incombustible.

#### **III.5.4. Grand charge admissible :**

Résistant à la charge compression extraordinaire. Jusqu'à 5t/m<sup>2</sup> sans problème. Isolation. La grande quantité d'air enfermé dans chaque granulé amène des capacités isolantes excellentes.

#### **III.5.5. Mise en œuvre simple :**

Son faible poids assure une mise œuvre rapide sure chantier livraison de la matière en vrac ou en big-bag par camion sur chantier

#### **III.5.6. Leger**

Le pois s'élève a environ 170 kg/m en comparaison : du gravier pèse environ 20fois plus lourd

#### **III.5.7. Économisez du temps et de l'argent :**

- Economie au niveau du terrassement grâce à une hauteur de la fondation moins importante.
- Economie de la couche de propreté, de drainage et du pare-gel.
- Economie de matière: pas de chutes de découpes
- Economie des coûts par mètre carré de dalle de sol isolée par rapport aux constructions conventionnelles de fondation/sol – jusqu'à 15%.
- Economie de temps de mise en œuvre: immédiatement après compactage des granulats, la dalle de sol en béton peut être coulée
- Economie grâce à une réduction durable des coûts de chauffage



**Tableau III.2 : Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé [21]**

Caractéristiques	Unités	Valeurs
Masse volumique	Kg/m <sup>3</sup>	130 à 150
Conductivité thermique	w/m <sup>°c</sup>	0.041 à 0.48
Résistance à la compression	Kg/cm <sup>3</sup>	5 à 30
Température limitée d'utilisation	°c	-250 à +450
Température de ramollissement	°c	600
Pouvoir calorifique	Kcal/kg	0

### III.7. Domaine d'application du granulat de verre mousse :

La mousse de verre, sous forme de plaques, présente d'excellentes propriétés thermiques, acoustiques et mécaniques, ce qui favorise son application diverse dans les domaines suivants:

- ✓ Les bâtiments;
- ✓ Les applications aux hautes températures;
- ✓ Les applications industrielles.

#### III.7.1. Bâtiments :

Les principales applications sont:

- ❖ Les toits plats et inclinés;
- ❖ Les parkings terrasse et terrasses accessibles;
- ❖ Les doubles murs;
- ❖ Les revêtements de murs;
- ❖ Les panneaux d'allèges;
- ❖ L'isolation des plafonds;
- ❖ L'isolation périmétrique;
- ❖ Les cheminées.



Figure : Domaine d'application des granulats de verre mousse [6]

L'aspect décoratif et les propriétés acoustiques de la mousse de verre permettent largement son emploi dans l'aménagement des plafonds, des halls, des théâtres, des salles de concert, des studios de radiodiffusion et des hôpitaux [18].



Fig.III.5. isolation des murs en verre mousse [..]

### III.7.2. Applications aux basses températures:

Dans les zones de bases températures telles que les chambres frigorifiques, les verres cellulaires peuvent être utilisés selon deux techniques différents; comme isolant classique ou en construction autoportante [18].



Fig.III.6. Panneaux pour chambre froides en verre mousse [..]

### III.7.3. Applications industrielles :

Les applications les plus courantes sont:

- L'isolation des réservoirs et tuyauteries à haute et à basse température, y compris les températures cryogéniques;
- L'isolation des tuyauteries enterrées;
- L'isolation des cheminées industrielles;



Fig.III.7. Isolation tuyauterie [..]

**Etat de l'art : Application des granulats verre mousse dans les bétons**

Récemment, les travaux de Mukesh Limbachiya et al, ont été menées sur l'utilisation de verre mousse granulé par substitut en volume des granulats naturels pour produire du béton. Ce travail a pour objectif d'élaborer du béton léger à base des granulats de verre mousse en tant que sable et gros granulats (voir figure).

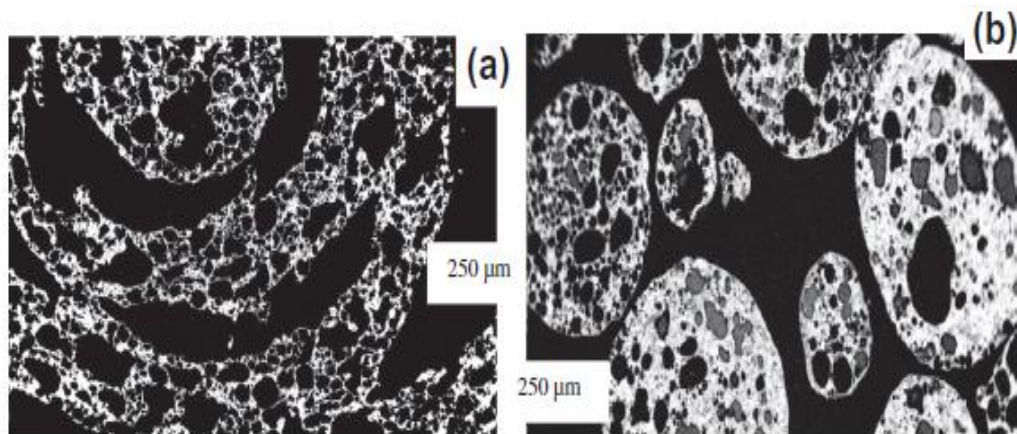


Figure : Images obtenus par MEB sur des éprouvettes du béton et du mortier à base des granulats de verre mousse (a) comme gros granulats (b) comme granulats fins (sable) [7]

Les granulats de verre mousse utilisés dans leur étude, ont été produits à partir de déchet de verre de bouteilles de couleurs différents. Les auteurs ont étudiés l'effet de diverses proportions de granulats de verre mousse grossier (30%, 40%, 50%, 60% et 100%) et granulats fins (5%, 10% et 15%) sur les propriétés du béton à l'état frais et durcie. Une série de mélanges de béton ont été dosées avec des rapports eau-ciment (E/C) de 0,40, 0,55, 0,62 et 0,76 [7].

Les auteurs ont constatés que l'incorporation des granulats de verre mousse soit comme granulats fins (sable) ou grossière (gravillon), n'a pas montré une grande influence sur les valeurs d'affaissement initiales des mélanges des mortiers/bétons étudiés. Une diminution faible de la fluidité des mortiers ou l'ouvrabilité des bétons, ont été observés par ces auteurs [7].

D'autre part, l'utilisation des granulats de verre mousse comme gros granulats dans le béton (comme un remplacement partiel ou total de l'agrégat naturel), a diminuée la résistance à la compression par rapport au mélange de béton de référence. En fait, la résistance à la compression obtenue avec des mélanges des bétons avec le rapport E/C de 0,76 et contenant

30% et 40% de gros granulats de verre mousse ont montré une réduction significative de la résistance à la compression par rapport à la composition du béton témoin. Figure montre que l'incorporation de diverses proportions de gros granulats de verre mousse (GFG) dans les mélanges de béton conçus avec différents E/C, a conduit à une diminution de la résistance à la compression, plus la quantité de la GFG est ajoutée, plus la perte de résistance observée.

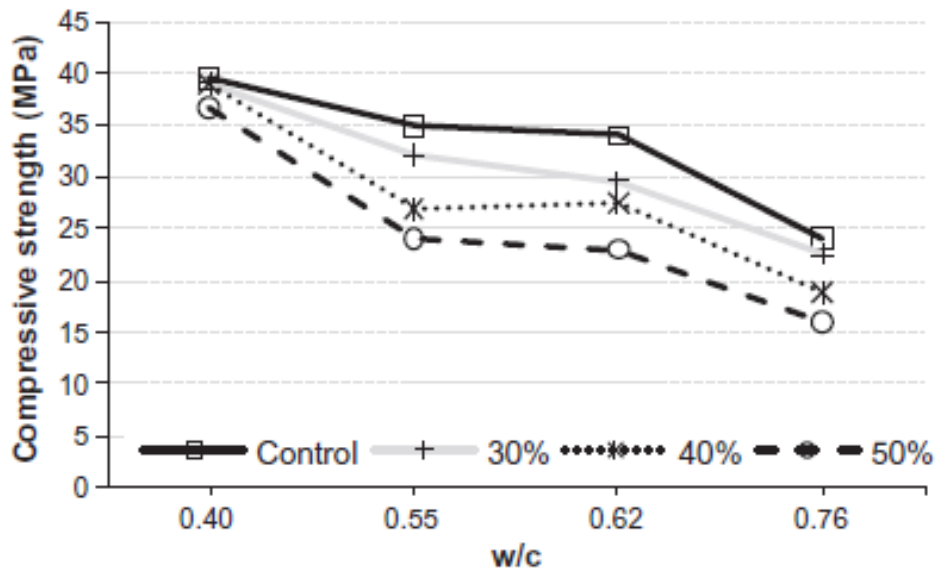


Figure : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport Eau/ciment [7]

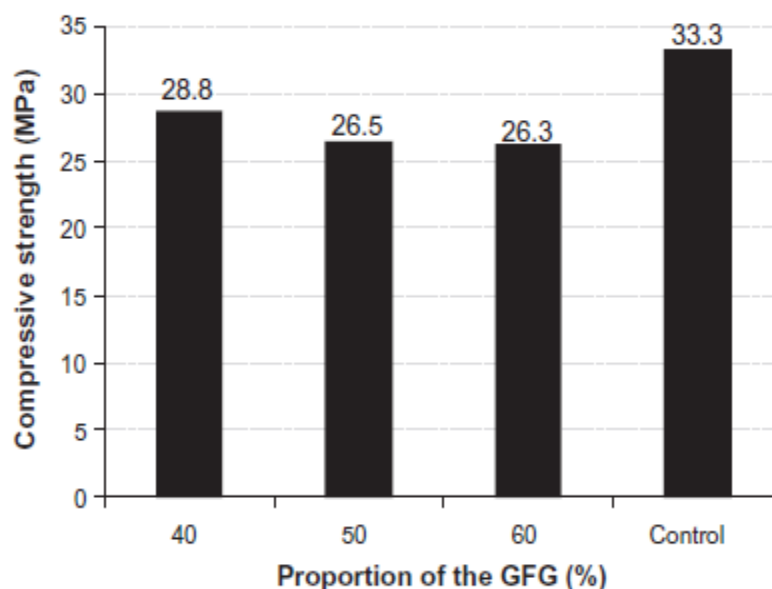


Figure : Résistance à la compression à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulat traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass) [7].

Les résultats des tests de caractérisation effectués sur les granulats, ont démontré leur potentiel pour un usage comme agrégats légers dans la production de béton. Les résultats des essais mécaniques ont montrés que jusqu'à 30% granulats grossier ou 5% granulats de verre mousse (en tant que sable) avait généralement un effet négligeable sur la résistance mécanique de béton.

Figure présentes les résultats du développement la résistance à la flexion en fonction du taux de substitution des aux granulats de verre mousse GFG. En général, l'utilisation de GFG comme gros granulats (substitution partielle) a montré un effet négligeable sur la résistance à la flexion du béton. On peut voir que le béton léger en mousse de verre a développé une résistance à la flexion tout à fait comparable ou légèrement supérieure à celui du mélange de contrôle. Sauf une légère réduction de la résistance à la flexion du béton avec 40% GFG, l'utilisation de 50% et 60% a légèrement augmenté la résistance à la flexion de 28 jours [5, 7].

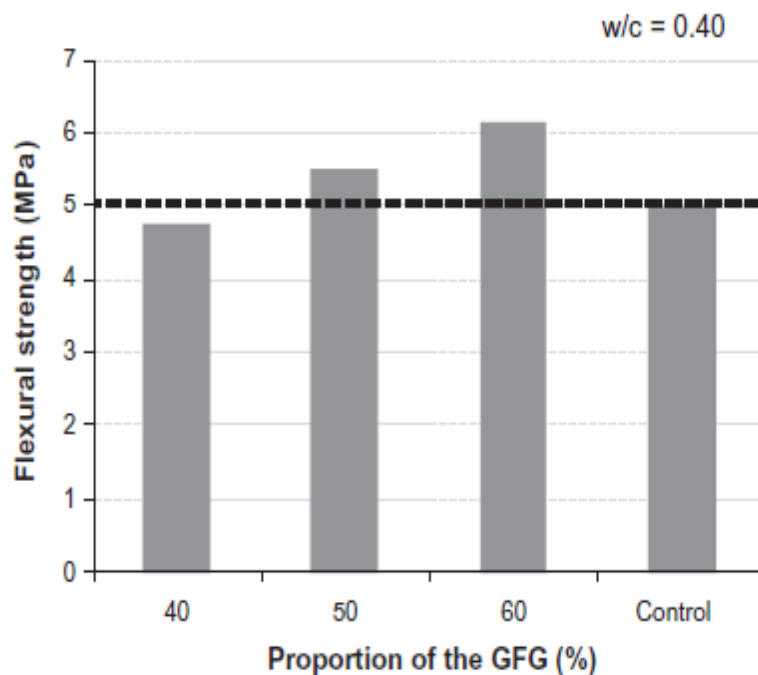


Figure : Résistance à la traction par flexion à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulat traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass) [7]

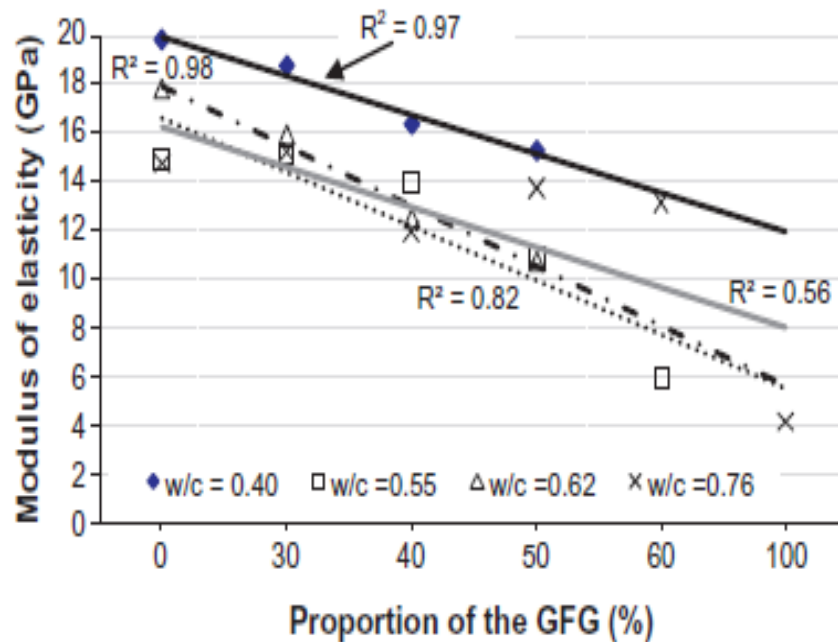


Figure Module d'élasticité statique à 28 jours en fonction du taux de substitution partielle des granulats naturels par les granulats de verre mousse [7]

En ce qui concerne le module de Young des bétons à base de granulats de verre mousse, Limbachiya et al, ont mesuré ce paramètre après 28 jours de durcissement. La figure montre le module d'élasticité statique à 28 jours en fonction du taux de substitution partielle des granulats naturels par les granulats de verre mousse [7]. Pour chaque rapport  $E/c$ , l'augmentation de la proportion de gros granulats du GFG dans le mélange de béton a entraînée une réduction significative du module d'élasticité par rapport à la composition du béton témoin. Il semble que jusqu'à 30% du GFG utilisé comme pourrait être considéré comme le montant maximal qui pourrait être ajouté sans effet négatif majeur sur le module d'élasticité du béton à base des granulats légers GFG.

Concernant l'analyse de l'interface des granulats de verre mousse et la matrice cimentaire à l'intérieur du béton, Des analyses par MEB ont été effectués par Bumanis et al, sur des spécimens d'un béton léger à base des granulats du verre mousse [5]. Après 28 jours de durcissement, les auteurs ont observés que l'interface de la matrice cimentaire et les granulats de verre mousse est très compacté (bonne adhérence) et avec la forte présence des pores. Des hydrates de silicate de calcium poreux (CSH) et les grandes particules d'échelle (jusqu'à 100  $\mu\text{m}$ ) ont été observés dans la microstructure de l'échantillon à base de ciment CEM I 42.5R.

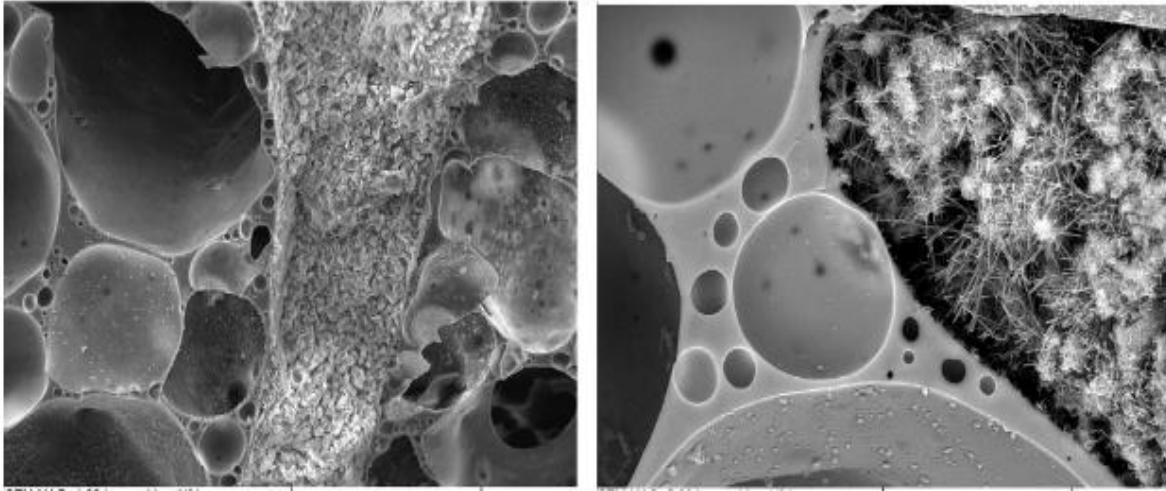


Figure Microstructure d'un béton léger à base des granulats du verre mousse observé par MEB [5]

### **Conclusion :**

L'état de l'art sur l'utilisation du verre mousse dans les bétons, ici, nous a permis de conclure que ces granulats ont des caractéristiques très importantes à savoir la légèreté qui leur permet d'être utilisés dans la fabrication des bétons légers ayant des propriétés très intéressantes dans le domaine des bétons spéciaux tels que les bétons dits cellulaires. Cependant, selon cette étude bibliographique, il serait très intéressant d'utiliser les granulats de verre mousse dans d'autres types de bétons comme les cas des bétons autoplaçants pour produire les éléments en bétons légers ou cellulaires.



## Références

- [1] Barton J., Guillemet C., Le verre, science et technologie. L'Éditeur: EDP Sciences, 2005.
- [2] Prisca Chételat, Rapport technique / domaine du bâtiment, Isolation de verre cellulaire en vrac : Utilisation de verre cellulaire dans le domaine du bâtiment ; p. 1-9, mars 2012
- [3] Rapport du TECHNOpor ; granulat de mousse de verre, Edition TECHNOpor, www.technopor.com, août 2009.
- [4] Rapport TECHNOpor, Granulats de mousse de verre Catalogue du TECHNOpor, janvier 2012
- [5] G. Bumanis, D. Bajare, J. Locs, A. Korjakins, Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete, Construction and Building Materials 47 (2013) 274–281
- [6] Druskininkai Lithuania, Foamglass granulate PENOSTEK™, STIKLOPoras Invent compagny, www.stikloporas.lt, 2004
- [7] Mukesh Limbachiya, Mohammed Seddik Meddah, Soumela Fotiadou, Performance of granulated foam glass concrete, Construction and Building Materials 28 (2012) 759–768

# Chapitre I : Méthodologie du travail et Caractérisation des matériaux

Pour réaliser ce travail, la méthodologie suivit et les différentes caractéristiques des constituants utilisés, seront présentées dans ce chapitre. Les matériaux utilisés dans cette étude, Il est connu que la connaissance des caractéristiques de ces matériaux, est impérative à toute recherche, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Sont caractérisés avant d'être utilisés.

## III.1. Objectif du travail pratique :

Notre objectif est d'étudier l'influence des granulats légers à base du verre mousse sur les propriétés rhéologiques et physico mécanique du mortier autoplaçants léger. Les granulats de verre mousse, seront préparés à partir de la poudre de verre (calcin) et un agent moussant (calcaire).Le sable est substitué par les granulats des verres mousses concassées (0-5mm) à des teneurs (0 ,30 50 et 100% en masse du sable) .Ce travail a donc un objectif économique en remplacement le sable par un déchet, avoir un mortier autoplaçants de qualité comparable à mortier témoins (sable) et enfin environnementale (recyclage d'un déchet stocké).

### III.2. Méthodologie du travail :

La caractérisation de toutes les matières utilisées, a été réalisée en premier lieu :

- Le ciment CEM II/ A 42.5 R
- Super plastifiant haut réducteur d'eau MEDAFLOW 30 (GRANITEX)
- Filler calcaire.
- Sable 0.5 (BAGHLIA)
- Déchets de verre (calcin)

En second lieu, nous avons déterminé la composition du mortier autoplaçant témoins ainsi que toutes les variantes des mortiers étudiés.

Des essais physico mécaniques, ont été ensuite réalisés sur des mortiers autoplaçants afin d'évaluer l'effet de la substitution du sable par les verres mousses concassés.

Enfin, une conclusion générale est présentée qui traitera des points issus de cette étude.

### III.3. Caractéristique des matériaux utilisés :

#### III.3.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé CEM II /A de résistance 42.5, il provient de la cimenterie de ZAHANA.les caractéristiques de ce ciment sont comme suit :

##### a. Les caractéristiques physiques du ciment :

**Tableau III.1** : Caractéristiques physiques du ciment

		Résultats	Unités
Consistance normalisée	H <sub>2</sub> O	25.0	(%)
Temps de prise	Début	210	(Min)
	Fin	300	
Essai de retrait	3jours	191	(µm/m)
	7jours	459	
	28jours	644	
Essai de gonflement	3jours	0	(µm/m)
	7jours	0	
	28jours	0	
Masse volumique absolue du ciment		3.14	(g/cm <sup>3</sup> )
Finesse suivant la méthode Blaine		3347	(cm <sup>2</sup> /g)

**b. Les caractéristiques mécaniques du ciment :**

**Tableau III.2 :** Résistance à la compression et à la flexion du ciment

Essais	Echéances en jours		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la Flexion (N/mm <sup>2</sup> )	3.5	5.9	6.8
Résistance à la Compression (N/mm <sup>2</sup> )	14.2	28.9	43.8

**c. Les caractéristiques chimiques :**

**Tableau III.3 :** Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X

Eléments	Mgo	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	CaO	CaO libre	Cl-	Insoluble	P.F
%	2.58	23.71	6.34	4.26	1.61	0.62	0.94	58.00	0.852	0.024	8.16	1.280

**d. Les caractéristiques minéralogiques :**

**Tableau III.4 :** Composition minéralogique du ciment par fluorescence X

Eléments	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	CaO.L	Gypse	Pouzzolane
%	53	23	06	12	01	05	10

**III.3.2. Superplastifiant :**

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant réducteur d'eau dit « MIDAFLOW 30 » fabriqué par GRANITEX, le MEDAFLOW 30 est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération .il est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons, il permet d'obtenir des bétons et des mortiers des très hautes qualités.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable.

Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

**III.3.2.1. Domaine d'utilisation :**

- Béton à hautes performances.
- Béton autoplaçant.
- Béton pompés.
- Béton précontraints.
- Béton architecturaux.

**III.3.2.2. Caractéristiques :**

- Aspect.....liquide.
- Couleur.....jaunâtre.
- PH..... 6 – 6.5.
- Densité..... 1.07 ± 0.01.
- Teneur en chlorure..... < 0.1 g/l.
- Extrait sec ..... 30 %.

**III.3.2.3. Propriétés :**

**a. sur béton frais :**

- L'obtention d'un rapport E/C très faible.
- L'amélioration considérable de la fluidité.
- Une très bonne maniabilité.
- Un long maintien d'ouvrabilité.
- D'éviter la ségrégation.
- De faciliter la mise en œuvre du béton.

**b. sur béton durci :**

- D'augmenter les résistances mécaniques à jeune âge et à long terme (voir tableau).
- De diminuer la porosité.
- D'augmenter la durabilité.
- De diminuer le retrait et le risque de fissuration.

**III.3.2.4. Mode d'emploi :**

Le MEDAFLOW 30 est introduit dans l'eau de gâchage, il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70 % de l'eau de gâchage ait déjà été introduite.

**III.3.2.5. Dosage :**

*Plage de dosage recommandée :* 0.5 à 0.2 % du poids du ciment soit 0.5 à 1.85 litres pour 100 kg de ciment, le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

**III.3.2.6. Conditionnement et stockage :** Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 11 kg, futs de 210 kg, cubténaire 1100 kg.

**III.3.2.7. Délai de conservation :** Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

**III.3.3. Eau de gâchage :** L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable du réseau public de la ville de BOUMERDES.



**Figure III.1:** L'utilisation de l'eau potable

**III.3.4. Fillers de calcaire :**

C'est un calcaire issu du gisement d'EL-KHAROUB qui occupe la partie sud-ouest du massif Oum settas au nord-est de Constantine il est de calcaire d'origine biochimique néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée. Les carbonates de calcium, broyés et tamisés à  $200\mu\text{m}$



**Figure III.2:** Calcaire.

**Tableau III.5 :** Analyse chimique du calcaire

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	So3	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	PAF
(%)	3,95	0,20	0,35	51.85	0,02	0,01	1,22	0,03	0,25	42,12

**Tableau III.6 :** Analyse minéralogique du calcaire

Eléments	Quartz (SiO <sub>2</sub> )	Calcaire (CaCO <sub>3</sub> )	Dolomite CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
%	04	90	06

**Tableau III.7 :** Propriétés physiques du calcaire :

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2,70
Finesse suivant la méthode Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	5831

### III.3.5. Sable:

Elément inerte entrant dans la composition des bétons peut être naturel ou artificiel ou provenant de recyclage. Les caractéristiques principales requises pour un bon sable à béton sont la propreté définie par l'essai d'équivalent de sable et la granularité.



Figure III.3 : Sable

Le sable utilisé est un sable lavé concassé de baghlia, Wilaya de BOUMERDES. Après traitement du sable, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique suivant :

#### III.3.5.1. Caractéristiques du sable

Tableau III.8 : Analyse chimique du sable

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	So <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	na <sub>2</sub> o	PAF
(%)	67.90	4,22	4,41	11.35	0,02	0,35	1,22	0,11	0,51	10,42

Tableau III.9 : Analyse minéralogique du sable

Minéraux présents	Composition minéralogique %
Quartz SiO <sub>2</sub>	63
Calcite Caco <sub>3</sub>	20
Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-
Albite (NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	04
Illite (2K <sub>2</sub> O Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24SiO <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O)	03
Kaolinite (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )	06
Minéraux ferrugineux +autres	04



**Tableau III.10** : Caractéristiques physiques du sable

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique réelle	2.53	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique imbibée	2.58	g/cm <sup>3</sup>
Masse spécifique	2.70	g/cm <sup>3</sup>
La teneur en bleu	0.4	%
EVS	75	%
Taux d'absorption	1.14	%

❖ **Analyse granulométrique et classe granulaire :**

**Tableau III.11** : Analyse granulométrique par tamisage du sable lavé

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
6,3	0	0,0	100,0
5	14	1,0	99,0
4	153	10,5	89,5
3,15	248	17,0	83,0
2,5	418	28,6	71,4
2	519	35,6	64,4
1,25	790	54,1	45,9
1	865	59,3	40,7
0,63	1026	70,3	29,7
0,5	1085	74,4	25,6
0,315	1177	80,7	19,3
0,25	1217	83,4	16,6
0,125	1335	91,5	8,5
0,08	1404	96,2	3,8
0,063	1414	96,9	3,1
Fond de tamis :	1416	97,1	2,9
Module de finesse du sable $M_f = 3.55$			

Analyse granulométrique par tamisage selon p18-560

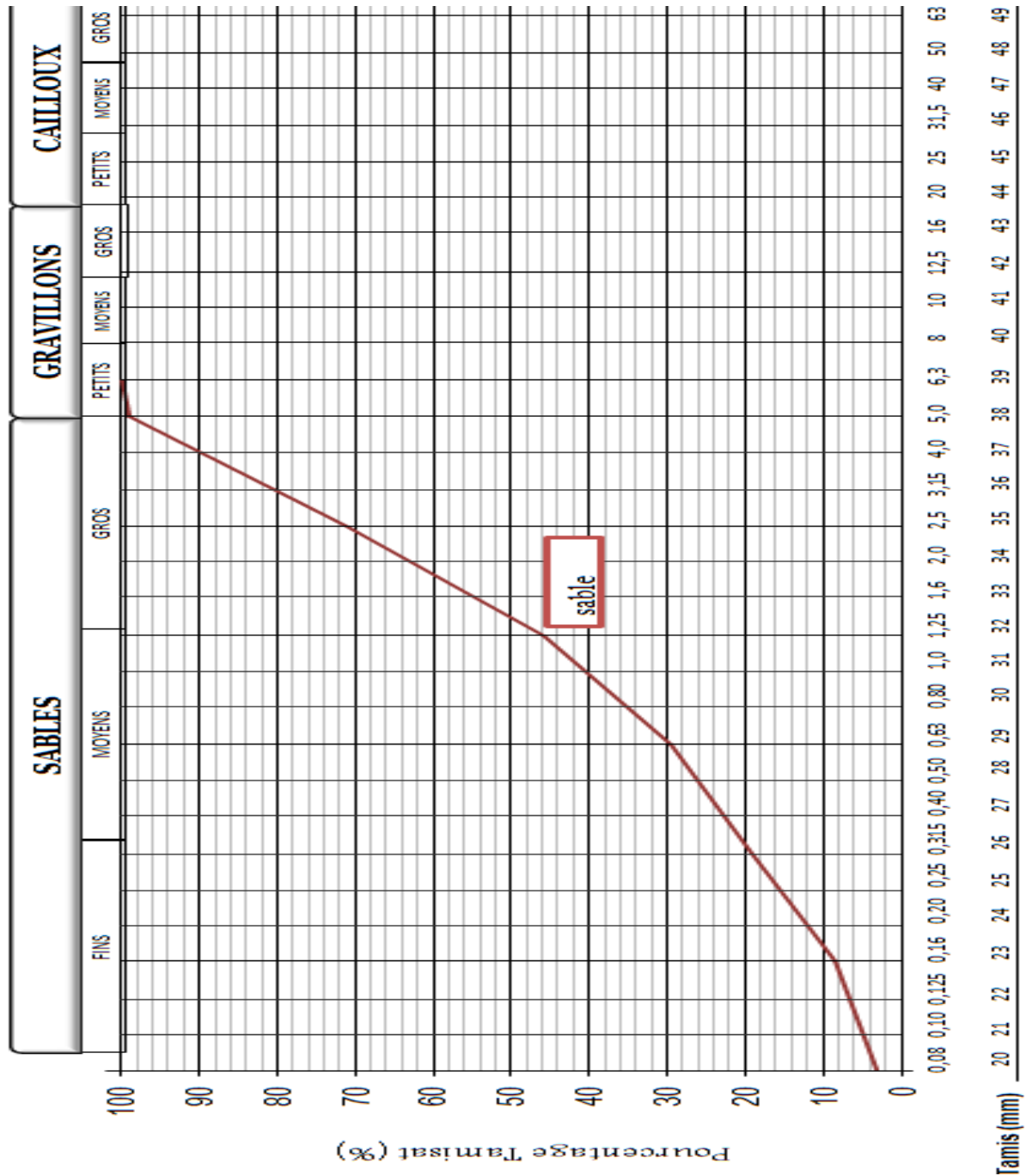
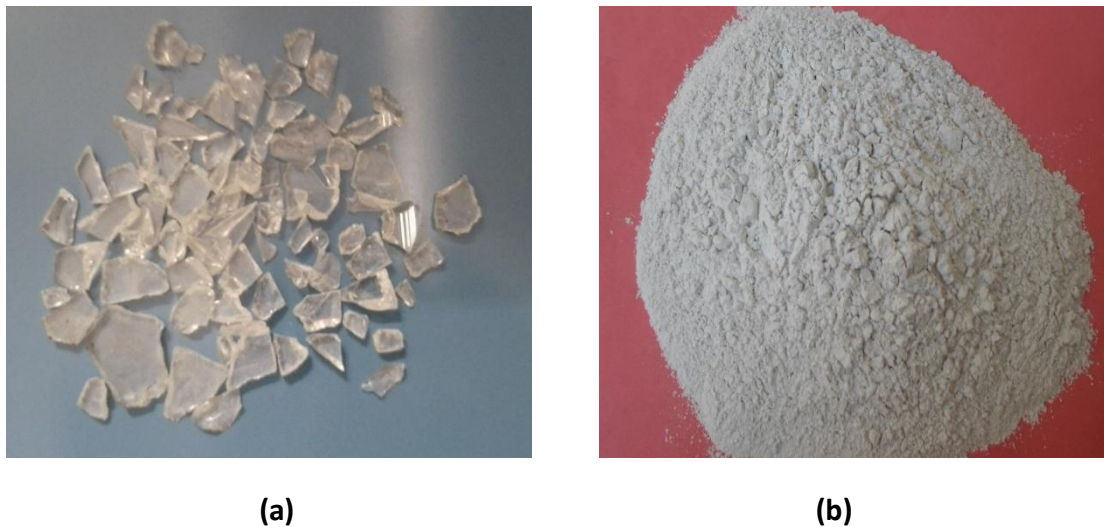


Figure III.4 : Analyse granulométrique de sable de baghlia 0/5.

**III.4. Les constituants des granulats de verre moussé :**

**III.4.1. Calcin :**

Après la collecte, le triage et le lavage de déchets on a fait le concassage puis le broyage à l'aide d'un broyeur à boulet .après 30minutes de broyage, la poudre obtenue est passée à travers le tamis de 200µm. Le calcin utilisé après un traitement est récupéré de verre (les déchets de verre



**Figure III.5 :** (a) : déchets de verre ; (b) : poudre de verre

➤ **Les Caractéristiques du calcin :**

**Tableau III.12 :** Caractéristiques chimique du calcin

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	So3	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	PAF
(%)	73.52	0,86	0,40	10.00	0,22	0,53	1,90	0,01	11,52	1,01

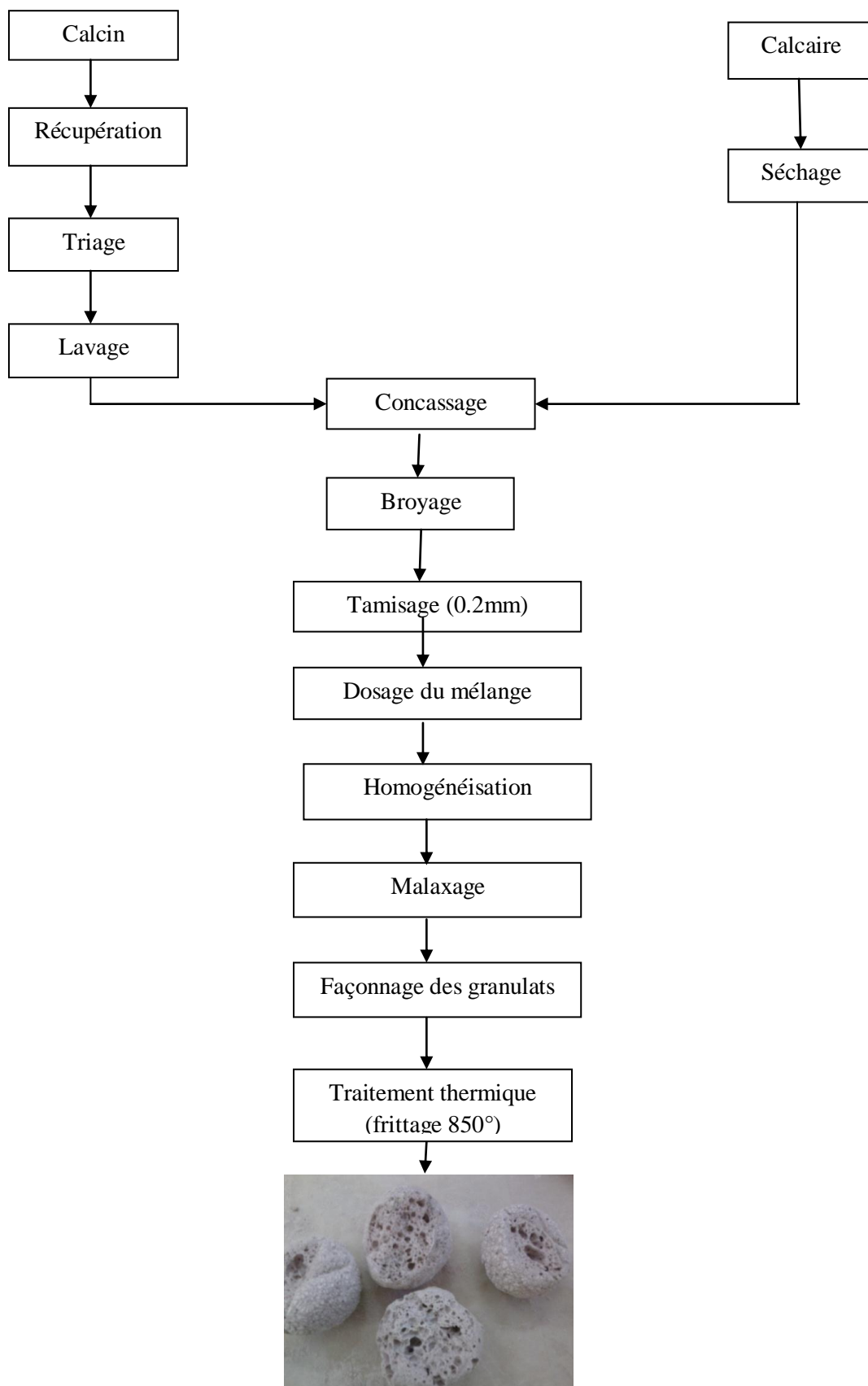
**Tableau III.13 :** Caractéristiques physique du calcin

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.3
Finesse suivant la méthode Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	2140

**III.5. composition des granulats de verre moussé :**

**VM :** 3% calcaire + 20% eau + 77% calcin

**III.6. Préparation et élaboration des granulats de verre mousse :**



**Figure III.6 :** Schéma technologique proposé pour la fabrication des granulats

**III.7. choix de variantes :**

Pour le choix des variantes, on a élaboré des échantillons de verre mousse avec différentes charges des sables.

**Tableau III.14 :** les différentes teneurs des matières 1<sup>ère</sup>

	<b>Verre mousse (%)</b>	<b>Sable (%)</b>
<b>V1</b>	0	100
<b>V2</b>	30	70
<b>V3</b>	50	50
<b>V4</b>	100	0

**III.8. Choix du régime thermique :**

Le régime thermique choisi pour l'élaboration des granulats de mousse de verre, consiste à augmenter linéairement la température avec une vitesse de 8 °C/min jusqu'à la température de 850°C .On fixe la température pendant un palier de 20 minutes, et à la fin on laisse refroidir à l'intérieur du four (refroidissement très lent) pour permettre au matériau d'acquérir une bonne résistance mécanique.

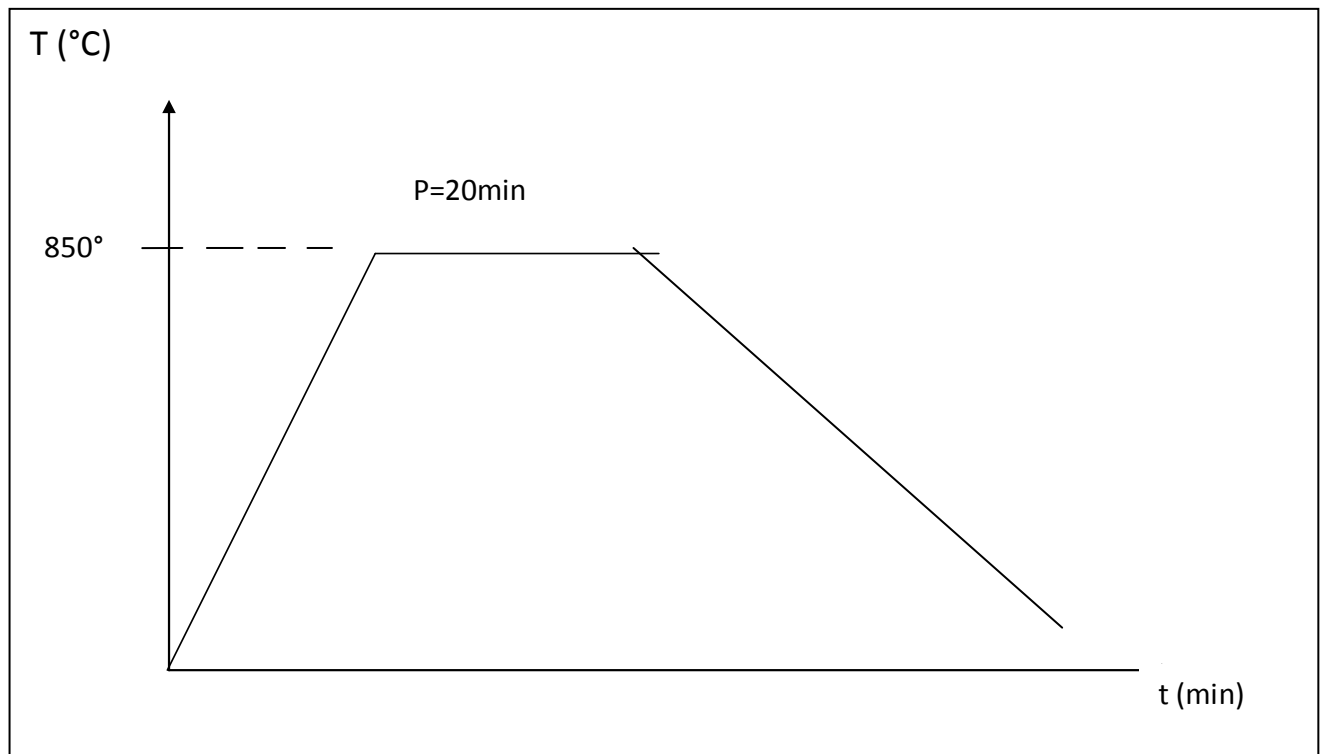


Figure III.7 : Régime thermique

### III.9. Elaboration des granulats de verre mousse :

L'élaboration des granulats de mousse de verre on ajoute au mélange (calcin –calcaire) une quantité d'eau de 35-40% jusqu'à l'obtention d'une pâte modelable.les granulats de forme sphérique et différents diamètres sont façonnés manuellement.

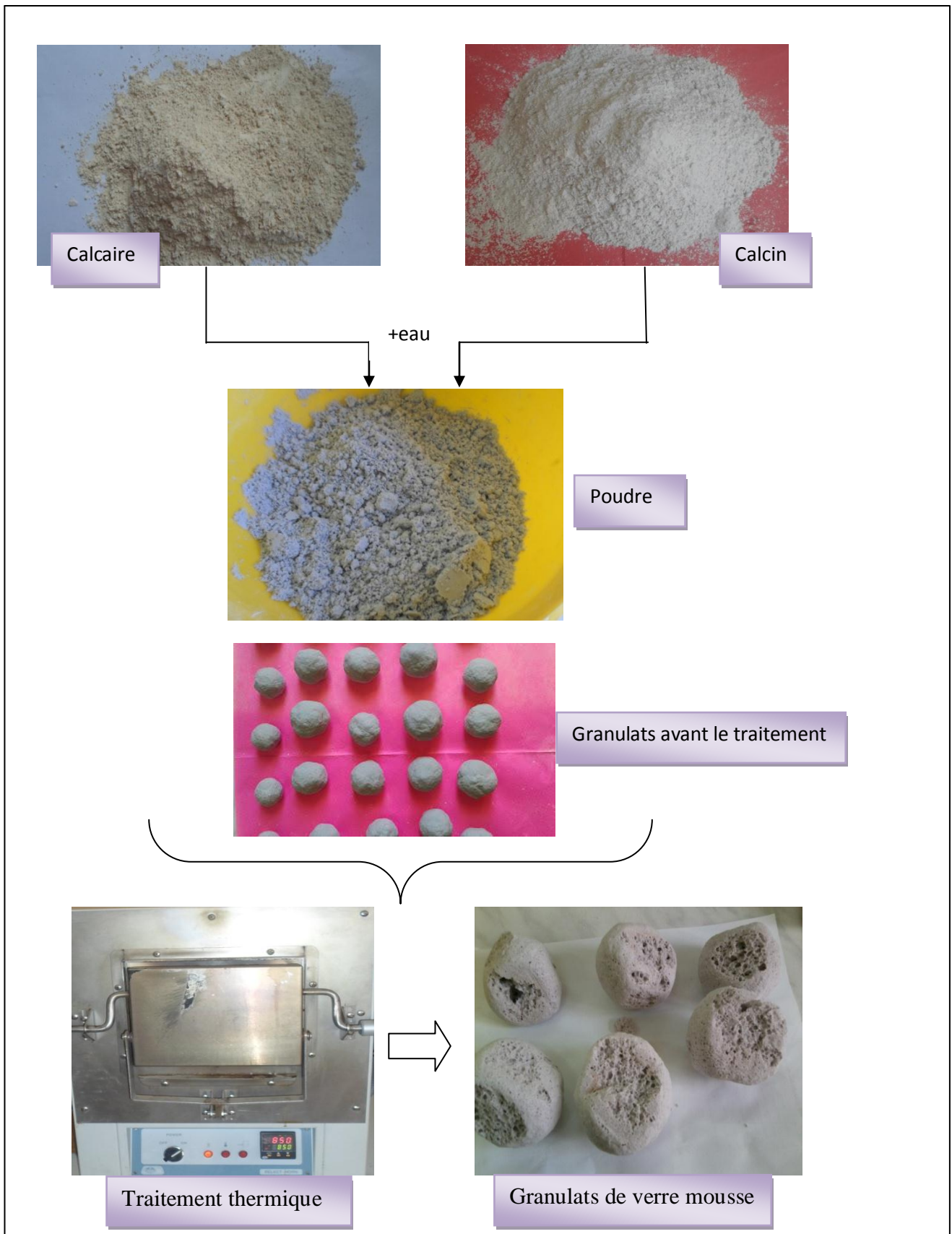


Figure III.8 : L'élaboration des granulats de verre mousse

**III.10. Caractéristique du verre mousse :****Tableau III.15 :** Analyse chimique du verre mousse

Eléments	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	So3	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PAF
(%)	72.15	1,01	0,39	11.72	0,24	0,53	1,82	0,01	11,51	0.02	0,60

**Tableau III.16 :** Caractéristiques physiques du verre mousse

Caractéristiques	Résultats	Unités
Masse volumique réelle	0.5	g/cm <sup>3</sup>
Masse spécifique		g/cm <sup>3</sup>

❖ **Analyse granulométrique et classe granulaire :****Tableau III.17 :** Analyse granulométrique par tamisage du verre mousse

Tamis ouverture (mm)	Masse des refus Cumulés Ri (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	0	0	100
4	85	19.81	80.19
3,15	93	21.67	78.4
2,5	115	26.80	73.2
2	128	29.83	70.2
1,25	158	36.82	63.18
1	169	39.39	60.7
0,63	199	46.38	53.7
0,5	219	51.04	49
0,315	253	58.97	41.1
0,25	266	62.00	38
0,125	337	78.55	21.5
0,08	359	83.68	16.4
0,063	365	85.08	15
Fond de tamis :	368	85.78	14.3
Module de finesse du verre mousse Mf = 2.80			



Analyse granulométrique par tamisage selon

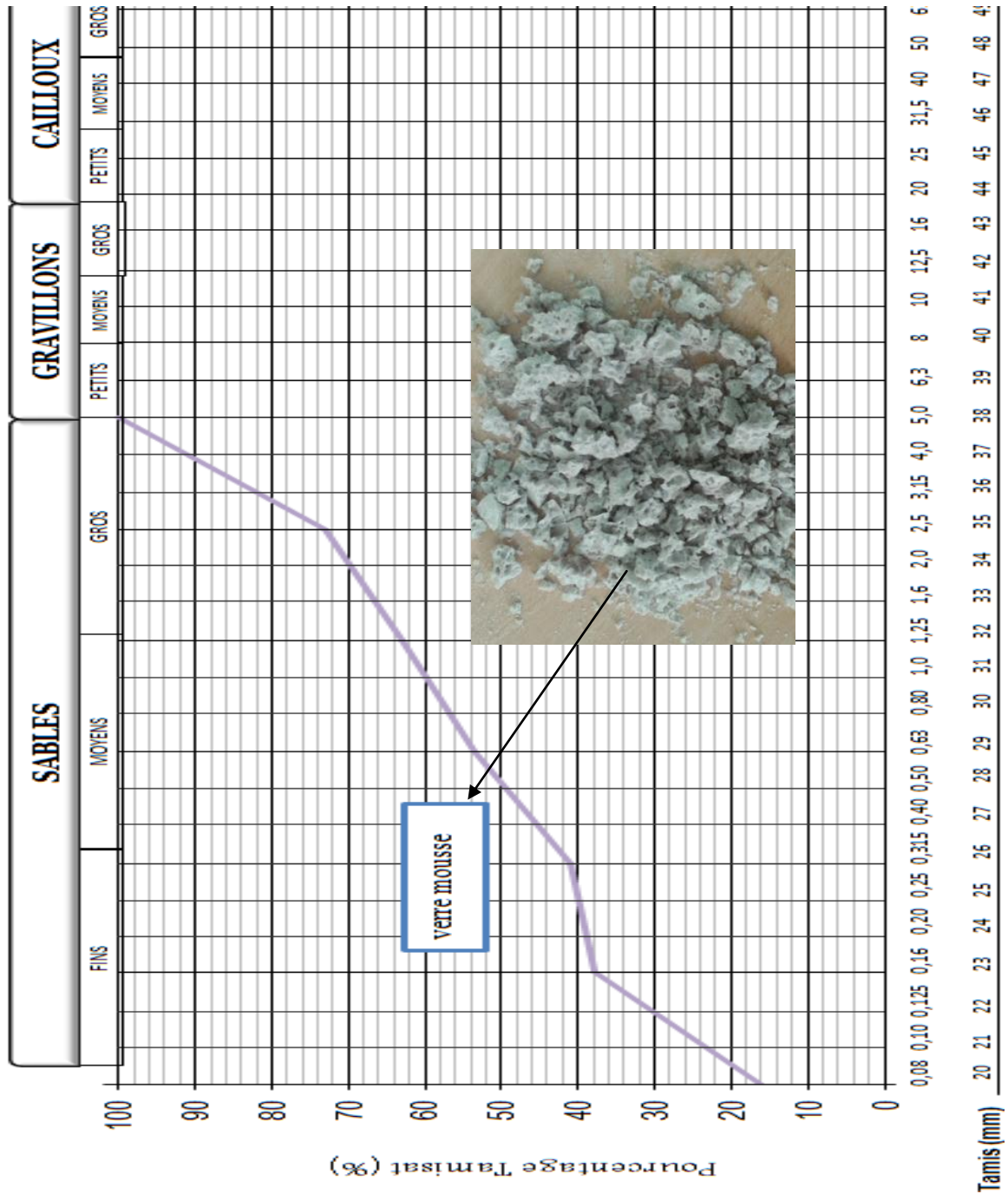


Figure III.9 : Analyse granulométrique de verre mousse 0/5.

Analyse granulométrique par tamisage selon p18-560

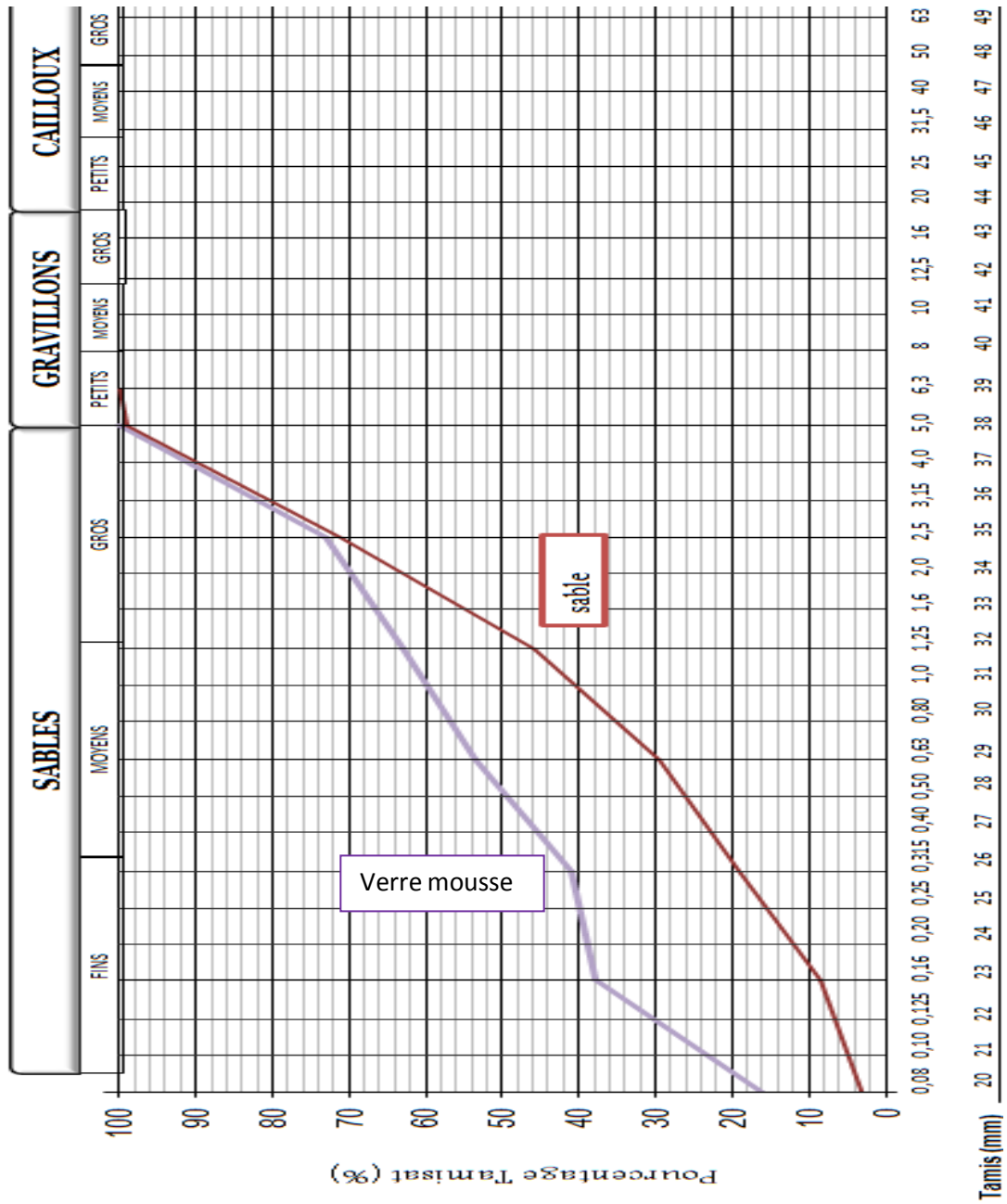


Figure III.10 : Analyse granulométrique de sable et verre mousse 0/5.

**Microstructure des granulats de verre mousse élaborés :**

Afin d'analyser les granulats de verre mousse avant de leur utilisation dans le mortier, nous avons procédé à l'analyse de la microstructure des ce granulats. Des images ont été obtenues par photo numérique et par microscope électronique à Balayage (MEB).

De point macroscopique, les granulats de verre mousse ont une structure très poreuse ayant des pores de taille élevée (Voir figure III.5). Ces pores sont le résultat de dégagement du gaz de CO<sub>2</sub> contenu dans le calcaire ajouté la composition de la poudre du calcin (à la température 850°C).

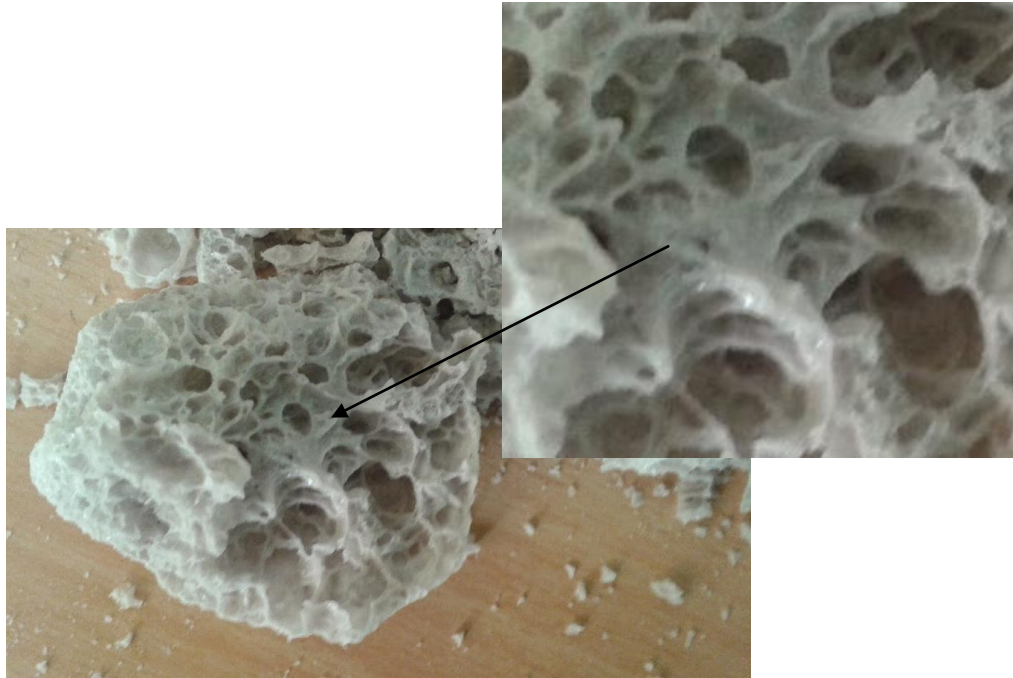


Figure Image Macroscopique du granulats de verre mousse utilisé

Du De point microscopique, les granulats de verre mousse ont une structure non seulement poreuse mais aussi présentent une phase amorphe qui caractérise le verre mousse (voir figure III.6).

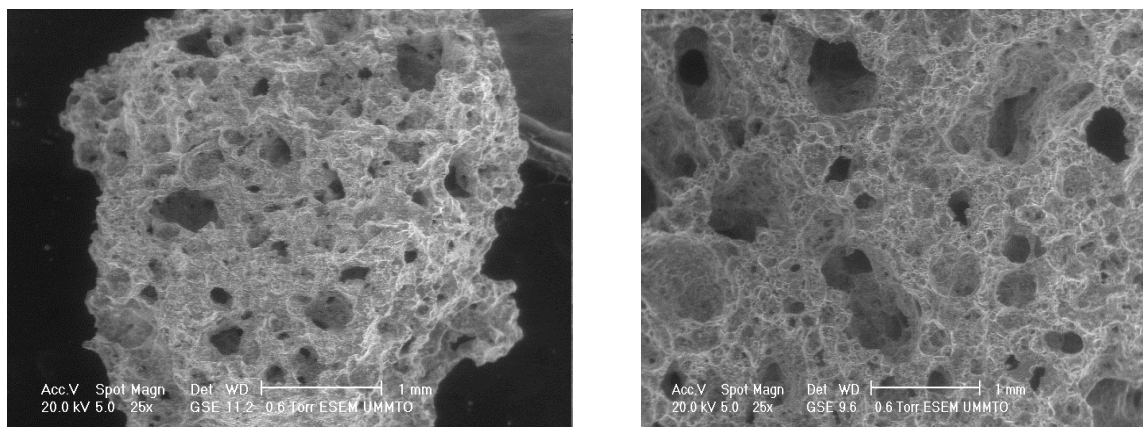


Figure : Images obtenues par MEB sur les granulats de verre mousse

# Chapitre IV : Formulation des mortiers autoplaçants

En premier lieu, nous avons procédé à la formulation d'un béton autoplaçants selon la méthode japonaise. A partir de la composition du béton autoplaçant, la composition du mortier autoplaçant témoin a été ensuite déterminée en utilisant la méthode du mortier équivalent du béton connue par le nom MBE (Mortier du Béton Equivalent).

## IV.1. Formulation d'un BAP par la méthode japonaise :

### a. Calcul de composition :

Le calcul des constituants du BAP est basé sur le principe de la méthode japonaise qui définit des intervalles pour chaque constituant donnés. Ces intervalles sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau IV.1** : Intervalles pour chaque constituant selon la méthode Japonaise

Constituant	Intervalle Préconisé
Volume de la pate	330 à 400 (l/m <sup>3</sup> )
La masse de ciment	300 à 400 (Kg/m <sup>3</sup> )
Le dosage de calcaire	10% de poids du ciment
Le volume de gravillons	G /S proche de 1
Le dosage en superplastifiant	Proche de son dosage de saturation

**b. Après l'application de la méthode japonaise, les dosages des constituants pour 1m<sup>3</sup> du béton :**

Eau = 173.12L

Ciment = 430kg

Filler = 43kg

Sable = 820.27 kg/m<sup>3</sup>

Gravier = 914.42 kg/m<sup>3</sup>

1. Classe 3/8 = 457.21kg/m<sup>3</sup>

2. Classe 8/15 = 457.12kg/m<sup>3</sup>

Sp = 2.58% = 12.2 kg

**Tableau IV.2 :** Composition pour 1m<sup>3</sup> du BAP

<b>Constituants</b>	<b>Masse (Kg /m<sup>3</sup>)</b>
Ciment	<b>430</b>
Fillers Calcaire	<b>43</b>
Sable	<b>820.27</b>
Graviers (3/8)	<b>475.21</b>
Graviers (8/15)	<b>475.21</b>
Eau	<b>173</b>
Superplastifiant	<b>9.46</b>

**IV.2. Formulation du mortier autoplaçant :**

En appliquant la méthode du MBE (Mortier du Béton Equivalent) établie par Schwartzenruber, nous avons obtenu les dosages des constituants mentionnés dans le Tableau IV.3. Une vérification a été effectuée sur la composition du mortier témoin qui sera utilisée dans notre travail. Rappelons que ce mortier est un mortier équivalent du béton autoplaçant.

**Tableau IV.3** : Composition mortiers autoplaçants étudiés dans 1m<sup>3</sup>

<b>Constituant</b>	<b>Dosage (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Rapport</b>	<b>Calculer</b>
<b>Ciment</b>	664.1	F/C	0.10
<b>Filler</b>	66.41	E/C	0.38
<b>Sable</b>	1372.4	E/L	0.35
<b>Eau</b>	250	S/L	1.88
<b>SP</b>	12.17	S/C	2.06

**IV.2.4. Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP) :**

Le protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP), a été établi selon les caractéristiques recherchées (la fluidité du mortier selon le béton autoplaçant). Ce protocole a été appliqué sur tous les mélanges des mortiers étudiés durant notre étude.

Le Protocole de mélange des mortiers MAP, suivit dans cette partie est comme suit:

- Mettre l'eau et 2/3 de superplastifiant dans le récipient ;
- Mettre le mélange de liant (Ciment+ fines) ;
- Mélanger à vitesse lente pendant 1mn30sec ensuite racler le bord et mélanger encore 1mn30sec ;
- Verser le 1/2 de 1/3 de superplastifiant et le 1/2 de sable ;
- Mélanger à vitesse lente pendant 1 mn ;
- Rajouter encore le reste de 1/3 superplastifiant et le 2ième 1/2 de sable ;
- Mélanger à vitesse lente pendant 1 mn ;
- Enfin mélanger à vitesse rapide pendant 1 mn (le total 6 min).



**Figure IV.1:** Malaxeur pour les mortiers autoplaçants (MAP)

### **IV.3. Conduite d'essais :**

#### **IV.3.1. Etats frais :**

Etant donné que notre étude est réalisée sur des mortiers autoplaçants, il est nécessaire de vérifier les propriétés rhéologiques de ces mortiers. En plus, les mortiers autoplaçants doivent être très fluides avec une bonne mise en œuvre du matériau (sans secousse ou vibration) et aussi ces mortiers doivent être stables (ne présentent pas de ségrégation). Toutes ces propriétés rhéologiques sont les principales propriétés des bétons autoplaçants. Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation à l'état frais des mortiers autoplaçants étudiés. Ces derniers ont été élaborés en substituant partiellement le sable par les verres mousses à des rapports ( $V_M/S = 0, 30, 50$  et  $100\%$ ). Après chaque préparation du mélange de mortier, des essais à l'état frais ont été effectués, à savoir la fluidité (test d'étalement) et la mise en œuvre. Et cela, pour voir l'effet des verres mousse sur les propriétés à l'état frais des mortiers étudiés.

#### **a. Fluidité des mortiers :**

La fluidité des mortiers a été réalisée par le test de mini-cône (voir figure IV.2). Ce test consiste à mesurer le diamètre moyen de la gaulette après affaissement du mortier (c,à-d ; après soulèvement du cône. Nous rappelons que les diamètres préconisés pour un mortier

autoplaçant est de . Cette plage du diamètre, peut nous donner des valeurs des étalements pour un béton autoplaçant qui sont de 650 à 750 mm



Figure IV.2 : Mini-cône pour mortier

### IV.3.2. Etats durci :

Pour réaliser cette étude, des éprouvettes prismatiques  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  (Figure IV.3) ont été fabriqués pour chaque mélange des mortiers MAP. Un jour après de la coulée, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre à la température ambiante, divers tests et mesures ont été effectués afin d'étudier les propriétés physiques (masse volumique, absorption/porosité et ultrasonique) et mécaniques (module d'élasticité dynamique, résistance à la traction par flexion et à la compression)



Figure IV.3 : Confection des éprouvettes du mortier autoplaçant



**IV.3.2.1. Porosité/absorption :****a. Porosité :**

La porosité des mortiers à été déterminée en utilisant la relation ci-dessous, après les mesures des masses des éprouvettes.

$$P\% = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{totale}}} \times 100$$

$$V_{\text{vide}} = M_a - M_s$$

P% : La porosité d'éprouvette en pourcentage (%) :

M<sub>a</sub> : La masse d'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours (g)

M<sub>s</sub> : La masse sèche d'éprouvette (g)

**b. Absorption :**

En utilisant les pesés des masses réalisées dans l'essai de la porosité des mortiers, l'absorption de l'eau de ces dernier a été calculée selon la suivante,

$$Ab\% = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

Ab% : Absorption d'éprouvette en pourcentage (%)

M<sub>a</sub> : La masse d'éprouvette après l'immersion dans l'eau pendant 28 jours (g)

M<sub>s</sub> : La masse sèche d'éprouvette (g)

**IV.3.2.2. Contrôle non destructif par ultrason :**

La méthode de mesure directe consiste à appliquer directement les transducteurs (émetteur et récepteur) sur les deux faces de l'élément à mesurer. On utilise un produit couplant entre la sonde et l'élément pour améliorer le contact.



**Figure IV.4 :** Ultrasonique

### VI.3.2.3. Module d'élasticité dynamique :

Le module d'élasticité dynamique, a été déterminé par la méthode acoustique (test ultrasonique), sur des éprouvettes des mortiers autoplaçants étudiés à l'âge 28 jours. Après la détermination de la vitesse de propagation du son à travers l'éprouvette, on calcul le module élastique dynamique en utilisant la formule suivante :

$$E_d = \rho \cdot V^2$$

Ou :

$E_d$  : Module élastique dynamique ; en GPa

$\rho$  : Masse volumique de l'éprouvette ; en  $\text{Kg/m}^3$

$V^2$  : Vitesse de son ; en m/s

### Notation des mélanges :

**MAP (0%)**: mortier autoplaçant de référence à 100% sable du superplastifiant ;

**MAP (30%)**: mortier autoplaçant à 30% de substitution du sable par les verres moussés

**MAP (50%)** : mortier autoplaçant à 50% de substitution du sable par les verres moussés

**MAP (100%)**: mortier autoplaçant à 100% de substitution du sable par les verres moussés

# Chapitre V. Résultats et Interprétations

Après avoir formulé les différentes formulations du mortier témoin et les mortiers à base des granulats de verre mousse, Des essais physiques et mécaniques ont été effectués. Ce chapitre présent les différents résultats des essais rhéologiques et physico-mécaniques des mortiers autoplacants (MAP) à base de verre mousse par substitution partielle du sable. Des interprétations de ces résultats seront également présentées dans le même chapitre.

## V.1. Propriétés physiques :

### V.1.1. Caractérisation de mortier à l'état frais :

#### V.1.1.1. Fluidité (Essai de l'étalement)

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau V.1** : Essai de l'étalement

Mortier	Etalement Diamètre (mm)	Mise en ouvre
MAP (0%)	240	Bonne
MAP (30%)	210	Bonne
MAP (50%)	190	acceptable
MAP (100%)	180	accep



Figure V.1 : L'essai d'étalement sur le mortier autoplaçant frais

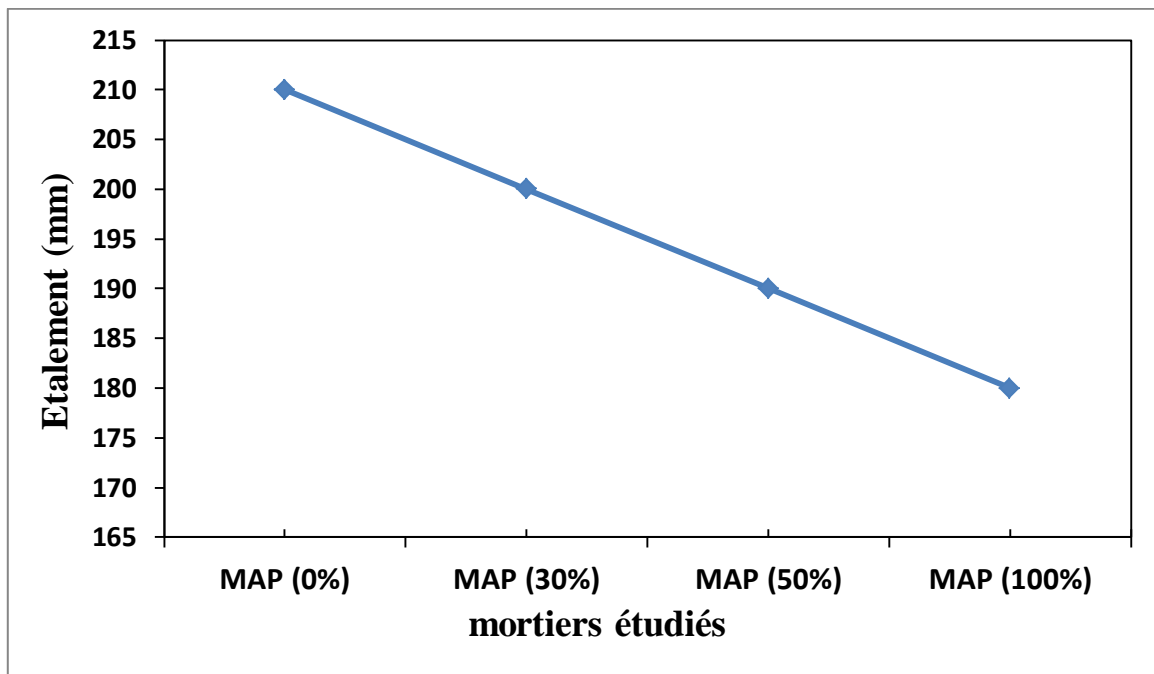


Figure V.2 : Fluidité des mortiers étudiés en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse

La **figure V.2** représente l'évolution de la fluidité des mortiers autoplaçants en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse à des rapports (0, 30, 50 et 100%). D'après les résultats des essais, la fluidité diminue en fonction du taux de substitution du sable par verre mousse. En effet, plus la substitution du sable par le verre mousse augmente plus l'étalement des mortiers diminue (**Figure V.2**). Cela est du probablement à la porosité des granulats fins de verre mousse, qui provoque l'absorption d'une quantité d'eau de gâchage. Il est à noter que le même constat a été obtenu par les auteurs [...].

### V.1.2. Caractérisation de mortier à l'état durci :

Pour mieux comprendre l'effet de la substitution du sable naturel par les granulats fins de verre mousse utilisés sur les propriétés mécaniques des mortiers à l'état durci, nous avons procédé aux essais du contrôle suivants :

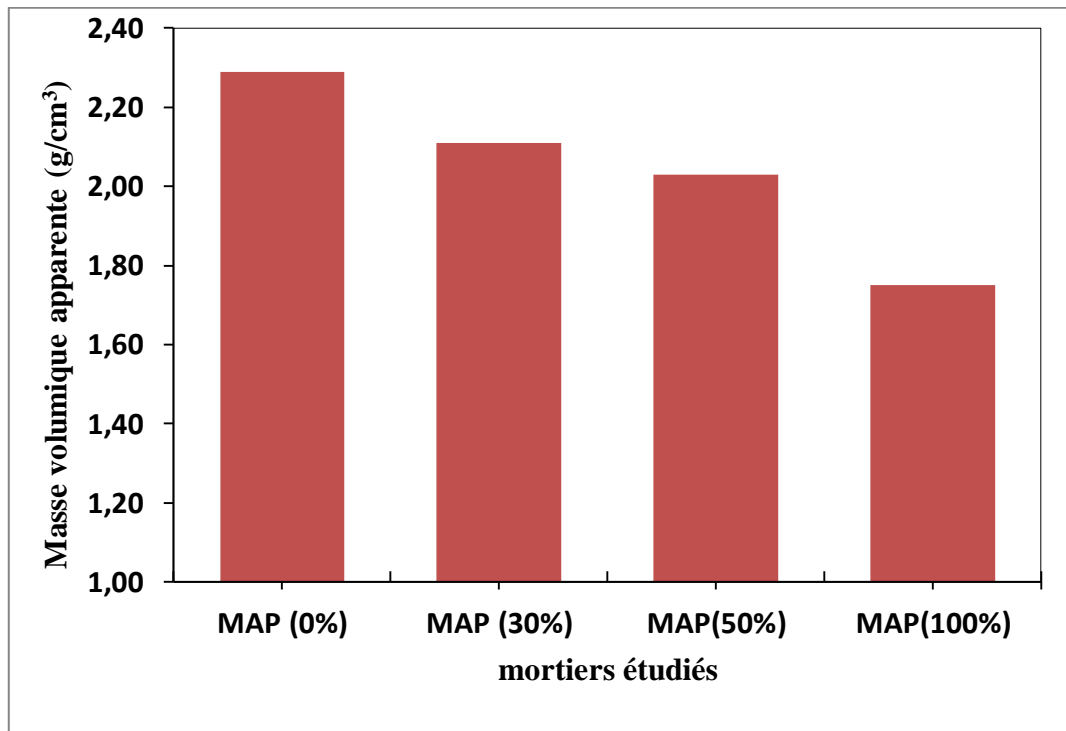
- La masse volumique.
- Porosité/absorption
- Contrôle non destructif par ultrason
- La résistance à la compression.
- La résistance à la flexion.

#### V.1.2.1. Evolution de la masse volumique :

Le tableau V.2. Présente la masse volumique calculée à 2 et 28 jours pour les quatre types des mortiers.

**Tableau V.2:** Masse volumique apparente des mortiers étudiés

Variantes	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	
	2j	28j
MAP (%0)	2.31	2.29
MAP (30%)	2.25	2.11
MAP (50%)	2.09	2.03
MAP (100%)	1.9	1.75



**Figure V.3 :** Masse volumique apparente des MAP en fonction du taux de substitution du sable par différents pourcentage du verre mousse à 28 jours de durcissement

Lés échantillons préparés pour les mesures de la masse volumique ne sont pas conservés dans l'eau. La figure V.3 représente l'évolution de la masse volumique des mortiers autoplacants en fonction du taux de substitution du sable par différents pourcentage des granulats fins du verre mousse à l'âge 28 jours. D'après les résultats obtenus présentés, on remarque que la masse volumique apparente diminue en fonction du remplacement du sable par le verre mousse. En effet, jusqu'à 100% du remplacement du sable par le verre mousse, la densité en vrac des mortiers est de l'ordre de 1750 kg/m<sup>3</sup>, c.-à-d. le mortier devient plus léger. Ceci est expliqué par la substitution du sable qui est plus dense que le verre mousse.

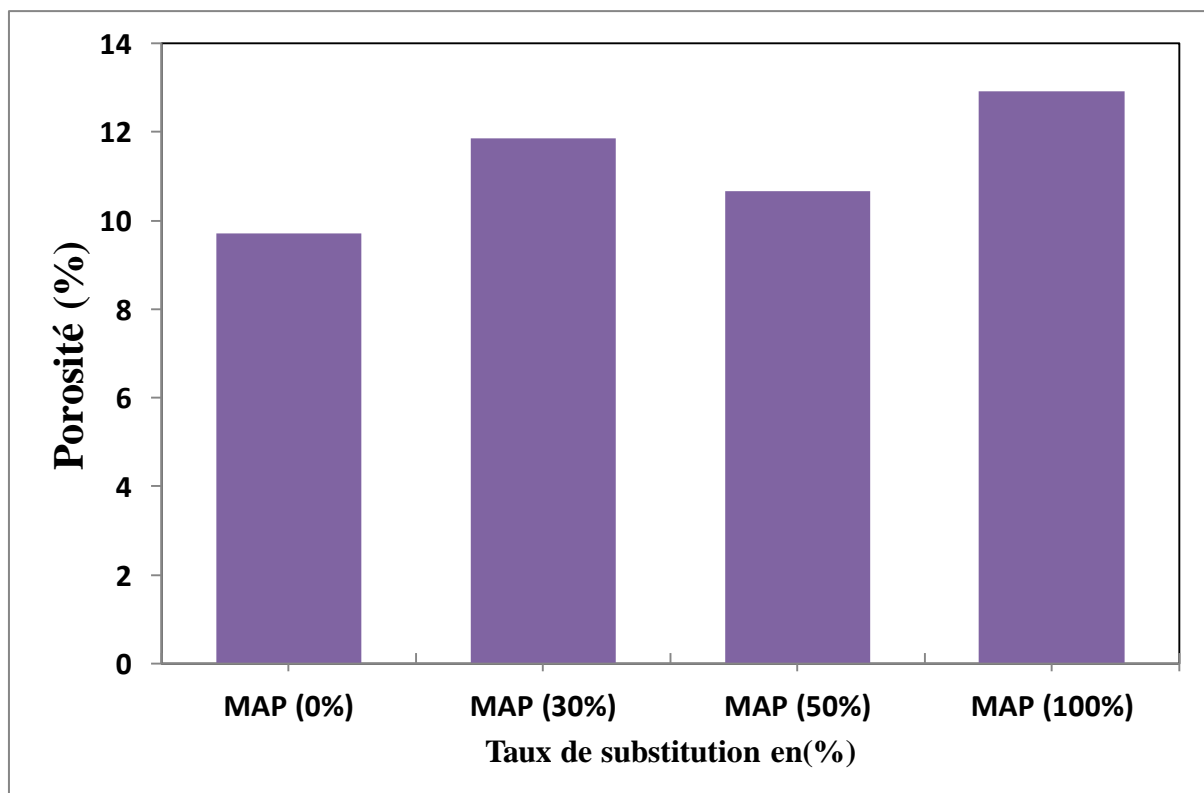
### V.1.2.2. Porosité/Absorption d'eau :

#### a). Porosité :

Les résultats de la porosité des mortiers sont présentés dans le **tableau V.3**.

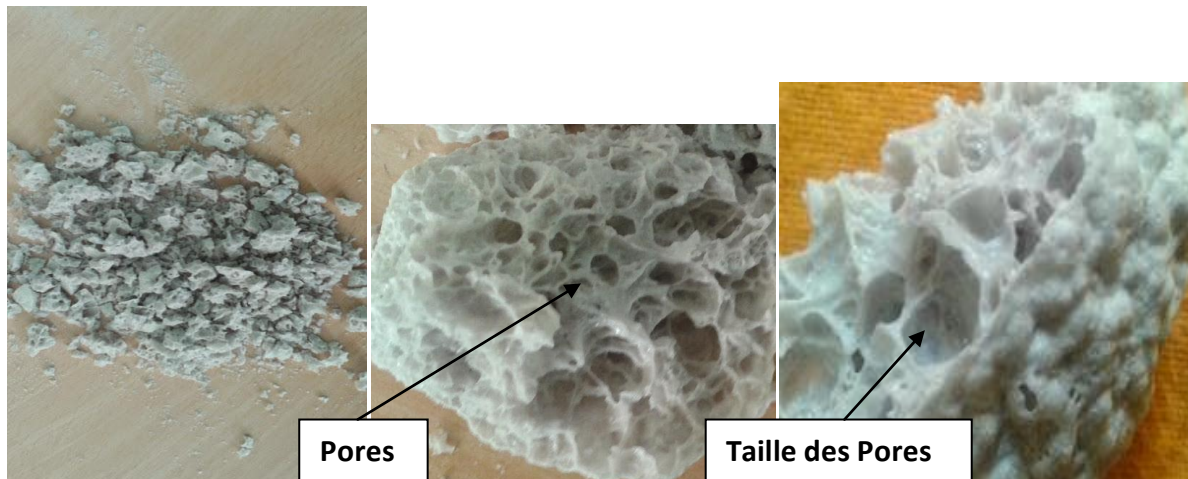
**Tableau V.3** : Porosité des éprouvettes

	MAP (0%)	MAP (30%)	MAP (50%)	MAP (100%)
<b>Ma (g)</b>	288.32	271.52	269.77	225.007
<b>Ms (g)</b>	276.17	256.71	256.44	208.86
<b>P (%)</b>	9.72	11.85	10.66	12.92



**Figure V.4** : Evolution de la porosité des mortiers en fonction des taux de substitution du sable par le verre mousse à 28 jours

La **figure V.4**, présente l'évolution de la porosité accessible à l'eau des mortiers (0%, 30%, 50% et 100%) de substitution du sable par les granulats de verre mousse mesurée à 28 jours. D'après les résultats obtenus, une augmentation de la porosité des mortiers ensuite à 50% de verre mousse, elle diminue presque devient proche celle de mortier de référence MAP (0%). Après à 100% de verre mousse, elle augmente presque devient proche celle de mortier 50%. L'augmentation de la porosité des mortiers à base du verre mousse, est du la nature de celui-ci qui contient un % élevée des pores ayant de taille plus élevée (voir **figure V.5**).



**Figure V.5** Granulats fin de verre mousse représentant des pores de taille élevée

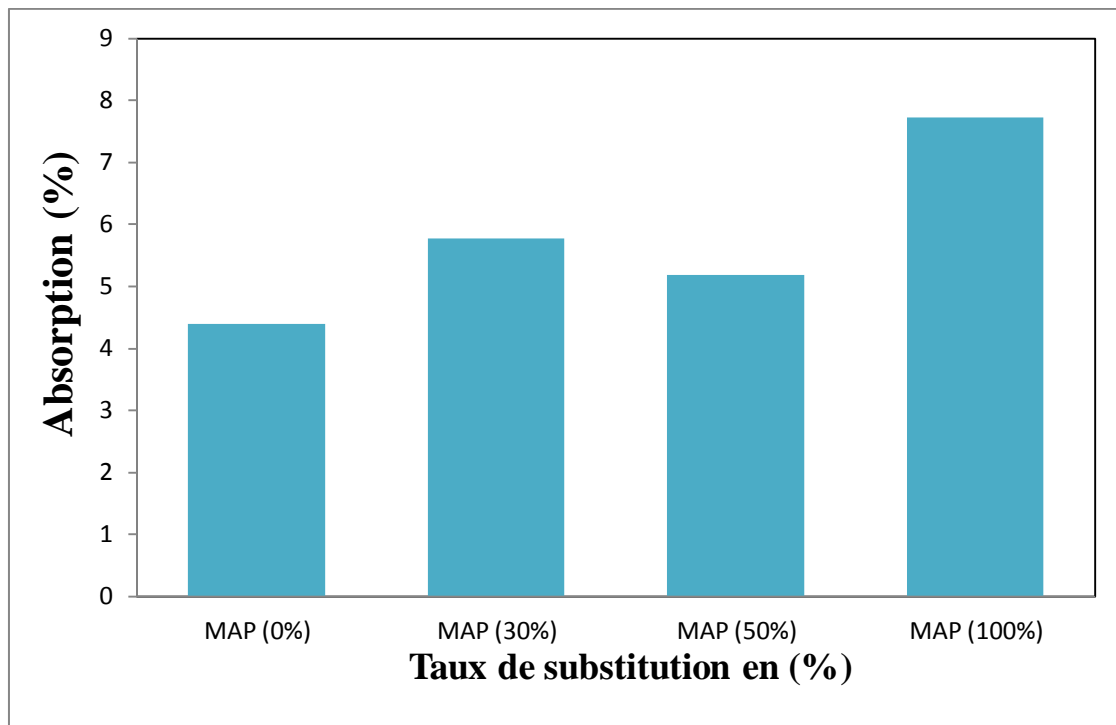
**b). Absorption de l'eau :**

Les résultats obtenus de l'absorption de l'eau des mortiers sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau V.4** : Absorption des éprouvettes

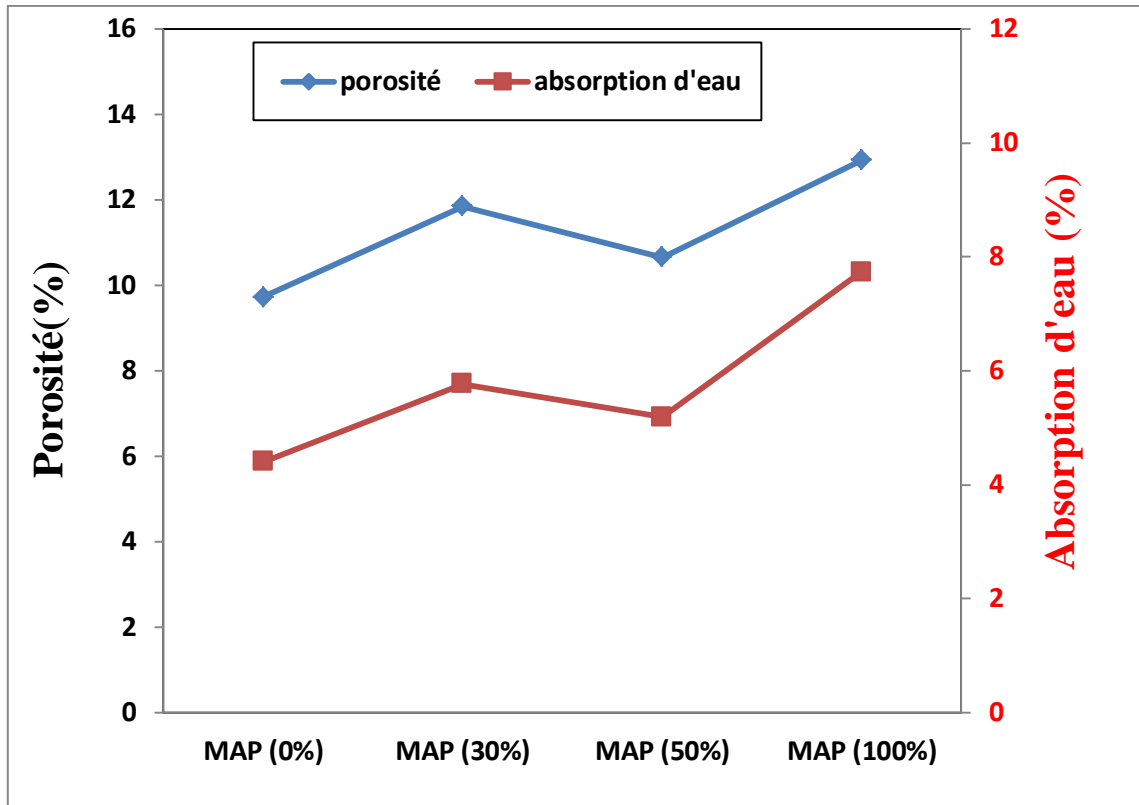
	MAP (0%)	MAP (30%)	MAP (50%)	MAP (100%)
<b>Ma (g)</b>	288.32	271.52	269.77	225.007
<b>Ms (g)</b>	276.17	256.71	256.44	208.86
<b>Ab (%)</b>	4.40	5.77	5.19	7.73





**Figure V.5** : Evolution de l'absorption de l'eau des mortiers en fonction des taux de substitution du sable par les verres mousses à 28 jours

L'évolution de l'absorption de l'eau des mortiers (0%,30%, 50% et 100%) en fonction des taux de substitution du sable par le verre mousse, est donnée dans la **figure V.5**. D'après les résultats obtenus, nous remarquons le même phénomène observé par la porosité. En effet, une augmentation de la porosité des mortiers ensuit à 50% de verre mousse puis elle diminue presque devient proche celle de mortier de référence MAP (0%). Après à 100% de verre mousse, elle augmente presque devient proche celle de mortier 50%. Etant donné que l'absorption d'eau et la porosité accessible à l'eau sont des propriétés interdépendantes entre eux. La **figure V.6**, présente cette relation entre les deux propriétés.



**Figure V.6 :** Relation de la porosité et l’absorption d’eau en fonction du taux de substitution du sable par verre mousse à 28 jours

La **figure V.6** présente l’évolution de la porosité et de l’absorption de l’eau à différents substitutions des verres mousses (0%,30%, 50% et 100%). L’analyse de la porosité montre que la valeur la plus élevée est obtenue pour le mortier qui contient 100% des verres mousses. On sait très bien que la porosité inter granulaire d’un échantillon de granulat est un paramètre important de formulation d’un béton, car elle influence sa compacité ce qui impact sur ses propriétés mécaniques. Nous remarquons aussi que les deux mortiers MAP(0%), MAP(50%) ont presque la même valeur de porosité et l’absorption d’eau.....

**V.1.2.3. Contrôle non destructif par ultrason :**

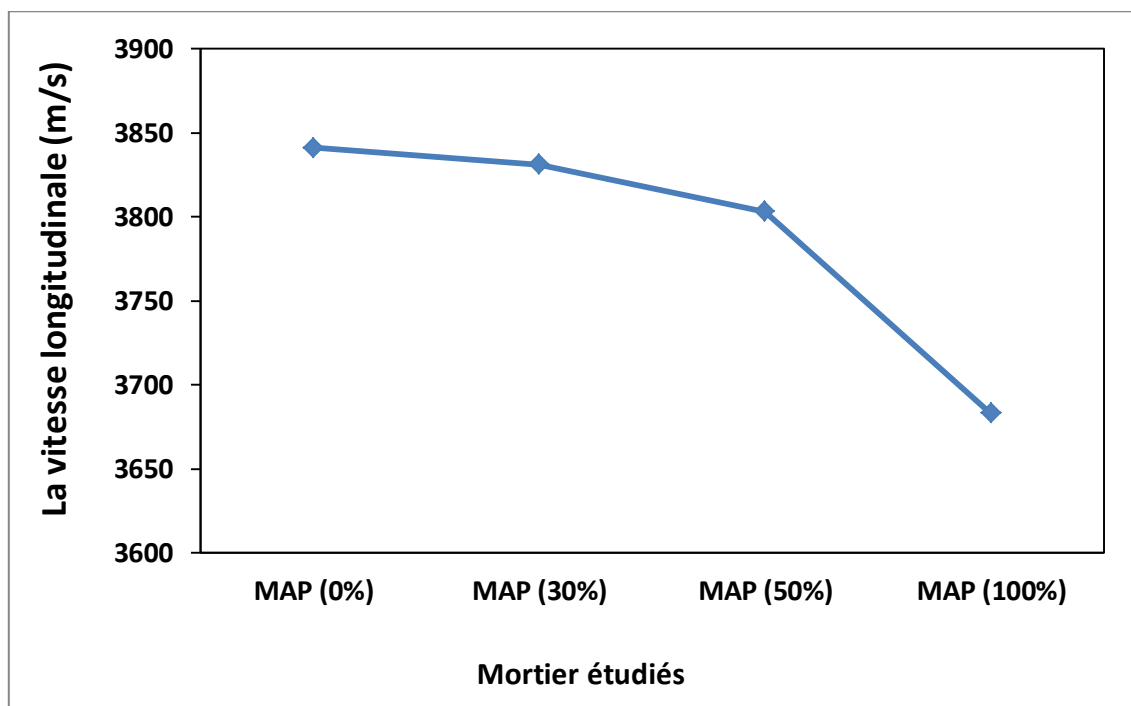
Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant :

**Tableau V.5 :** Vitesse longitudinale de propagation de son

Mortier	MAP (0%)	MAP (30%)	MAP (50%)	MAP (100%)
Vitesse (m/s)	3841	3831.6	3803.3	3683
Temps ( $\mu$ s)	41.13	41.23	41.4	43.3



**Figure V.7 :** L'essai d'ultrason sur le mortier autoplaçants durci



**Figure V.8 :** Histogramme de la vitesse de propagation longitudinale

Il est évident que plus le matériau est plus poreux plus il devient plus léger et par conséquent il devient aussi plus isolant phonique. A cet effet, la figure V.8 montre clairement que la diminution de la vitesse de propagation du son à l'intérieur du mortier au fur à et mesure la substitution du sable par le verre mousse augmente. Ceci est traduit par la porosité des mortiers qui fait diminuer la vitesse de propagation du son, ce qui rend le mortier plus isolant et réduit la propagation du bruit à travers le matériau.

## V.2. Propriétés mécaniques :

Les essais mécaniques effectués sur les éprouvettes des mortiers autoplaçants étudiés, ont été réalisés selon les normes préconisées pour les mortiers. La résistance à la traction par flexion (**figure V.9**) sur les éprouvettes prismatiques (03 éprouvettes) et après l'essai de flexion, les demis de chaque éprouvette (06 demi- éprouvettes) est utilisée pour la détermination de la résistance à la compression (**figure V.12**).

### V.2.1. Résistance à la flexion : NF-EN 196-1

**Tableau V.6** : Résistance à la traction par flexion des MAP étudiés

Variantes	Résistance à la traction par flexion (MPa)	
	2 j	28 j
MAP (0%)	2.16	3.81
MAP (30%)	2.34	3.33
MAP (50%)	2.28	3.23
MAP (100%)	2.51	3.03



Figure V.9 : Essai de traction par flexion

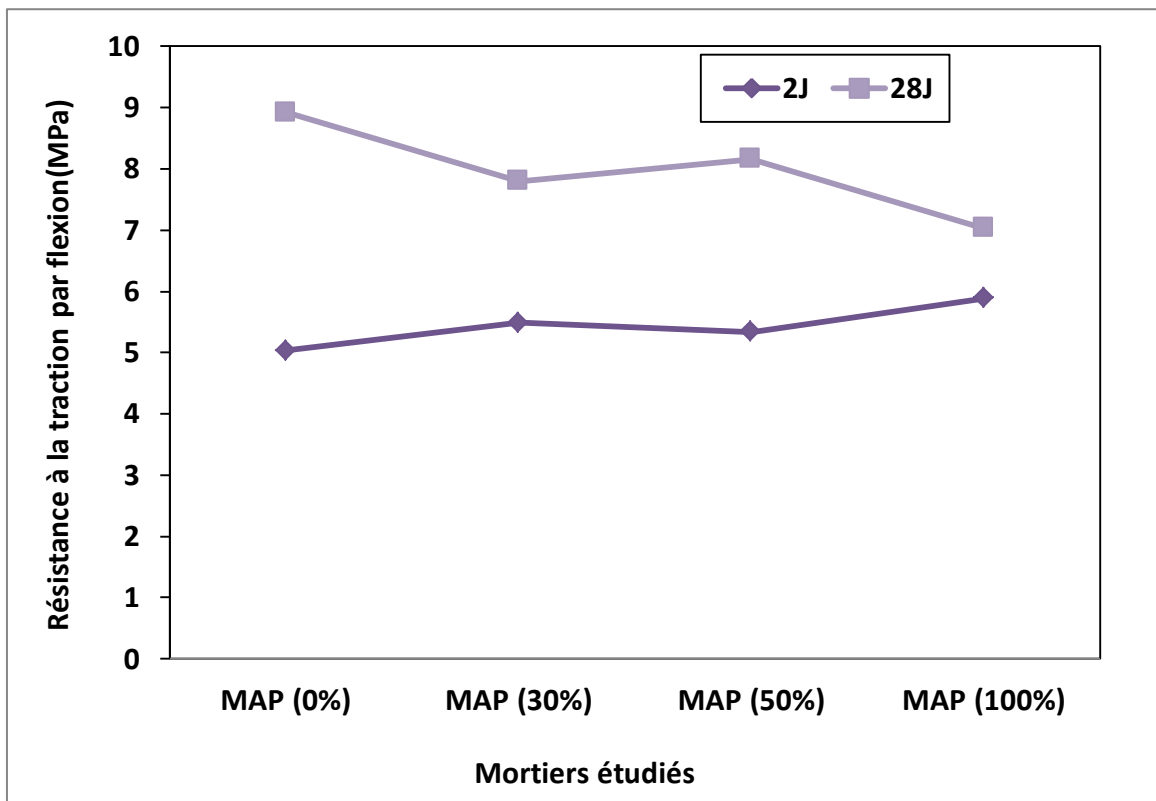
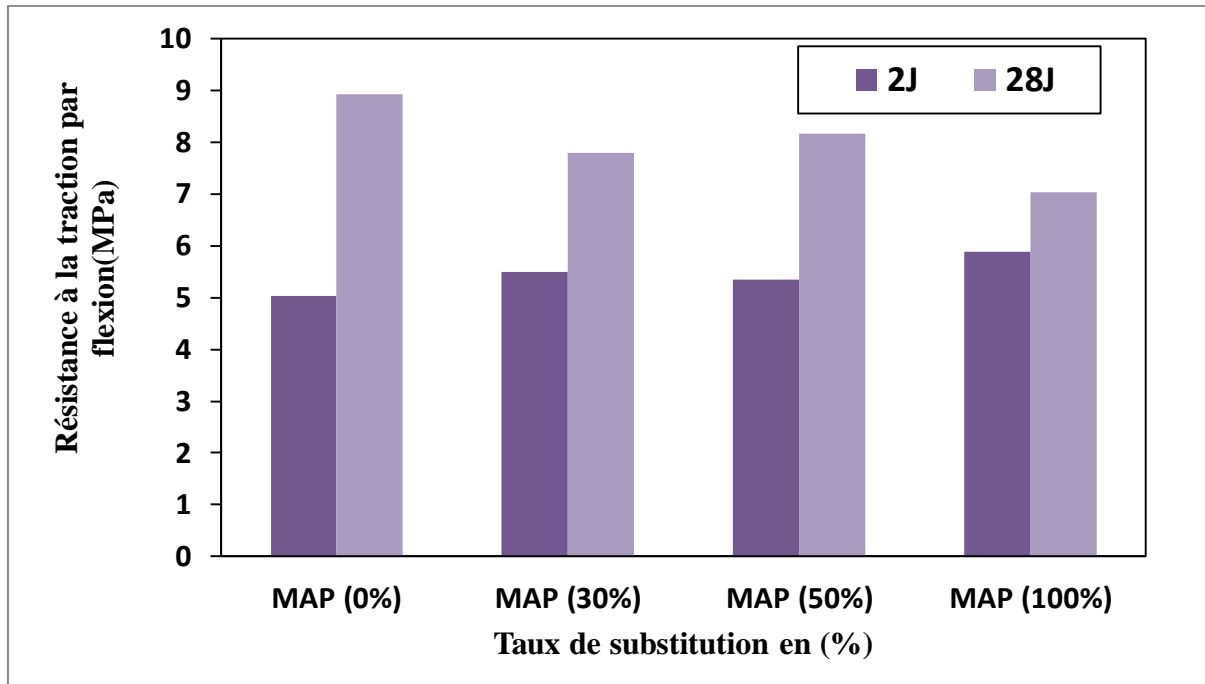


Figure V.10 : Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du sable par les granulats fins du verre mousse à différent âge (2 et 28 jours)



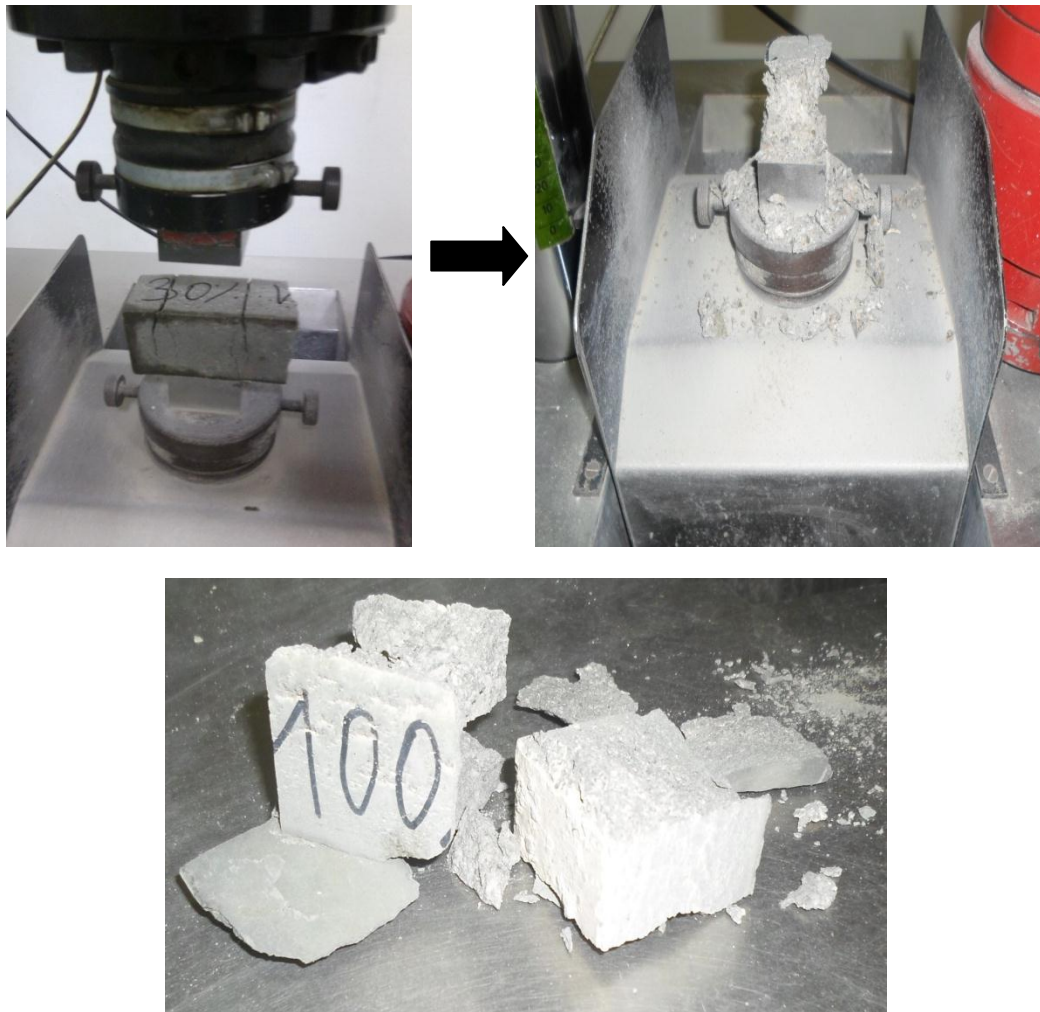
**Figure V.11:** Evolution de la résistance à la traction par flexion des MAP en fonction du taux de substitution du sable par les verres mousses à différent âge (2 et 28 jours)

Les figures V.10 et V.11, présentent l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction d'âge pour les mélanges des mortiers à base du verre mousse à différents rapport de substitution. Selon ces résultats, il est remarquable que la résistance à la flexion diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du sable par le verre mousse. Du fait que le mortier devient plus poreux avec les granulats de verre mousse (verre mousse de forte porosité), il est évident que la résistance a diminuée. Il est à noté que ce constat a été confirmé par plusieurs auteurs [Bumanis et al, Limbachiyy et al].

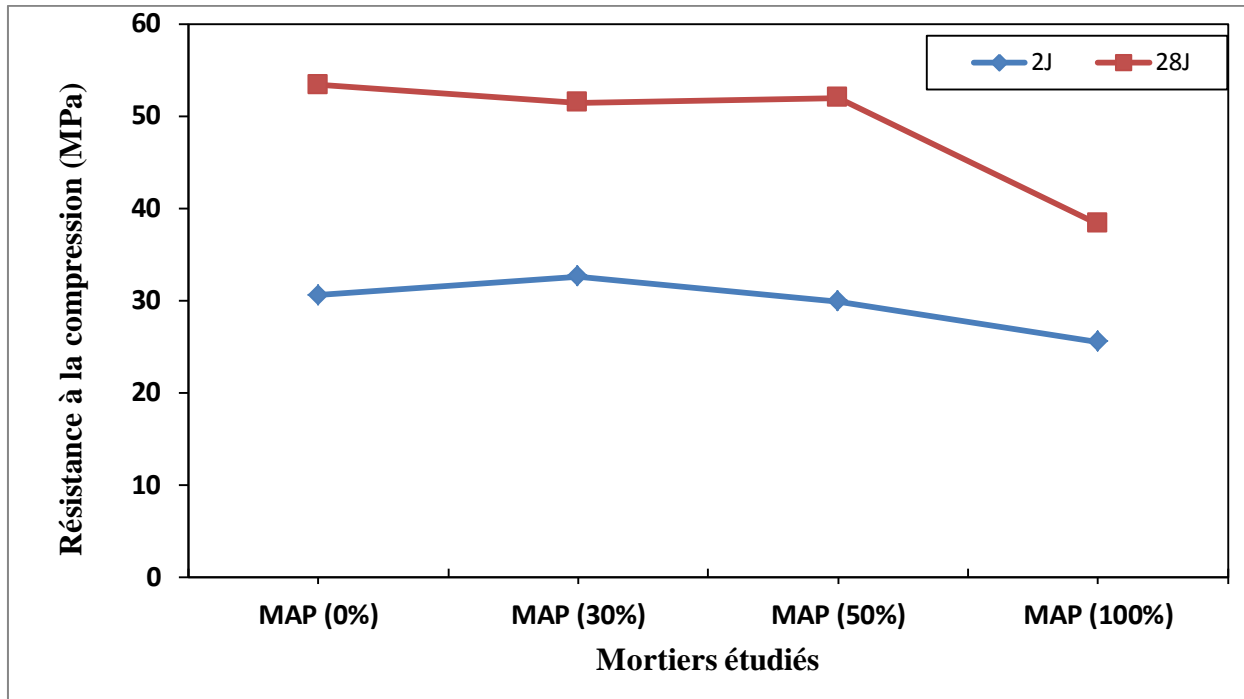
**V.2.2. Résistance à la compression: NF-EN 196-1**

**Tableau V.7 :** Résistance à la compression des MAP étudiés

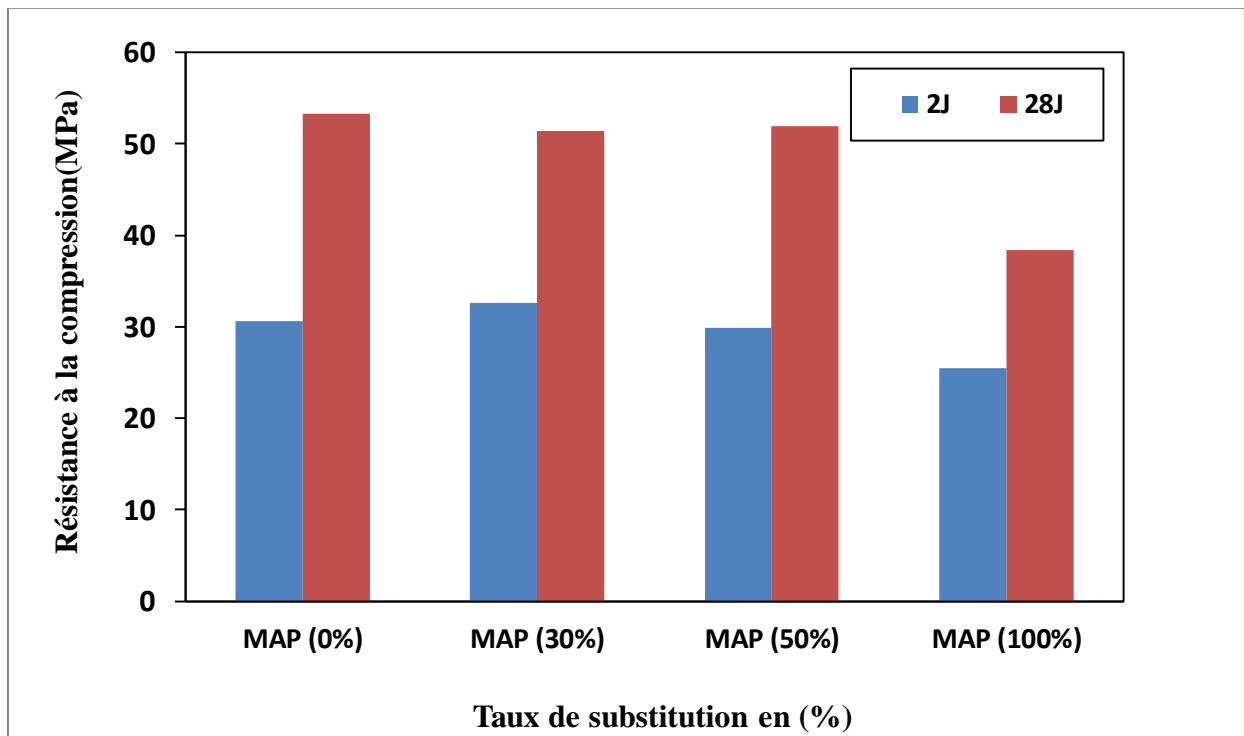
Variantes	Résistance à la compression (N/mm <sup>2</sup> )	
	2 j	28 j
MAP (0%)	30.58	53.36
MAP (30%)	32.63	51.46
MAP (50%)	29.9	51.98
MAP (100%)	25.52	38.35



**Figure V.12 : Essai de compression uniaxial**



**Figure V.13 :** Evolution de la résistance à la compression des MAP en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse à différent âge (2 et 28 jours)



**Figure V.14 :** Evolution de la résistance à la compression des MAP en fonction du taux de substitution du sable par le verre mousse à différent âge (2 et 28 jours)

La **figure V.14** montre l'évolution de la résistance à la compression en fonction d'âge pour les mélanges des mortiers étudiés. D'après les résultats obtenus, la résistance à la



compression varie de la même manière que celle de la traction par flexion en fonction de l'âge de conservation des éprouvettes. En effet, elle augmente en fonction d'âge de durcissement pour tous les mélanges de mortiers, cela est du l'effet de l'hydratation des minéraux du clinker.

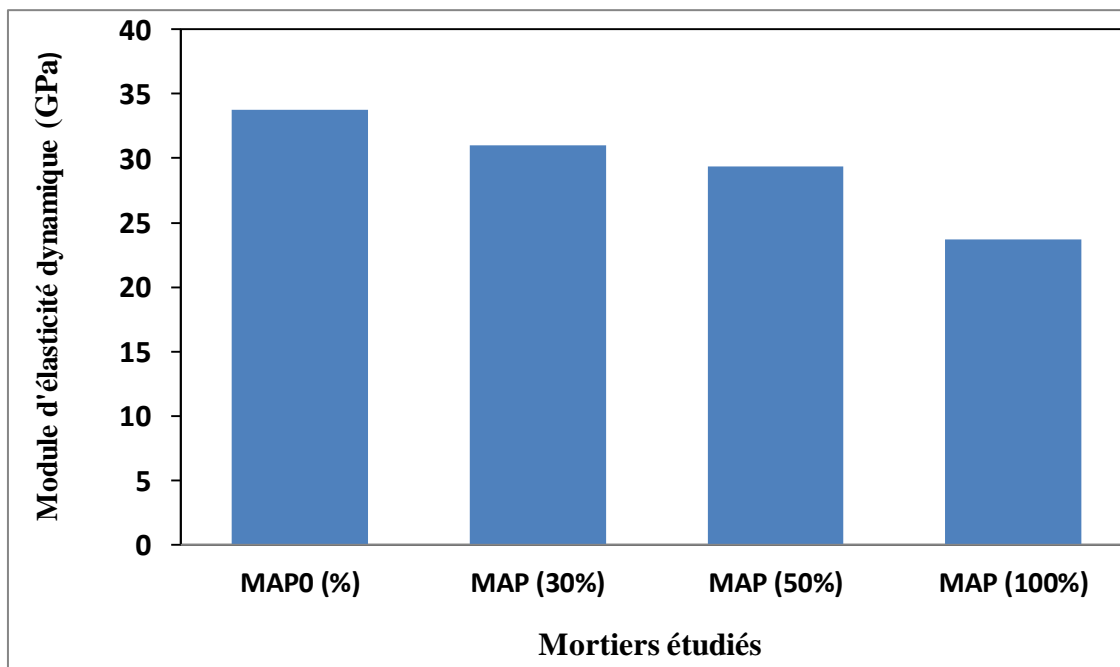
Cependant, par rapport au mortier témoin MAP (0%), les valeurs de la résistance à la compression des mortiers à base du verre mousse (en tant que sable) enregistrées, restent proches à l'âge 28 jours, quel que soit le taux de substitution (Voir **figure V.14**). Les valeurs de résistance enregistrées sont de l'ordre de 51 MPa pour les mortiers MAP (30%) et 38 MPa pour les mortiers MAP (100%) avec 100% de substitution du sable par le verre mousse.

### V.3. Module d'élasticité dynamique :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau V.8** : module élastique dynamique des MAP étudiés

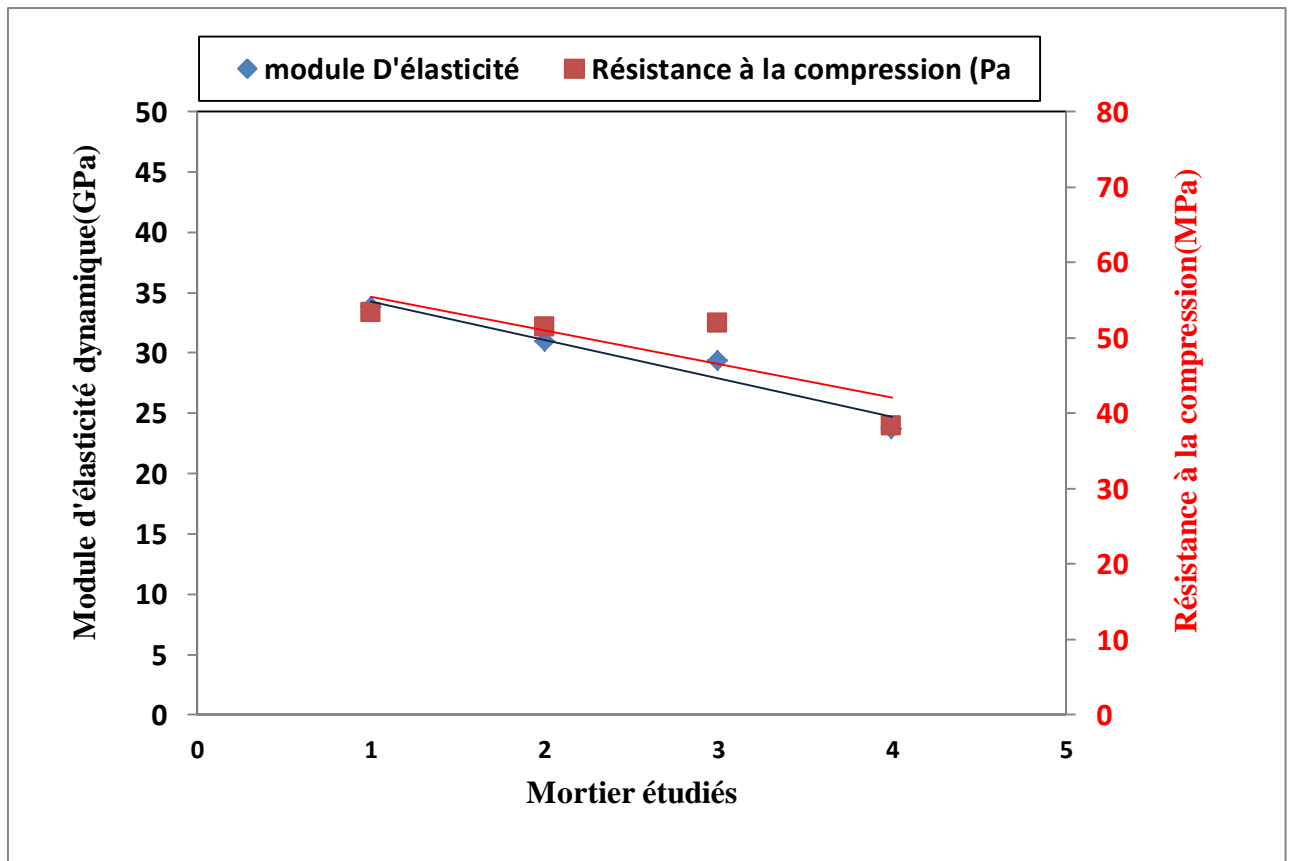
	MAP (0%)	MAP (30%)	MAP (50%)	MAP (100%)
<b>Ed</b>	3.87	3.58	3.48	3.28



**Figure V.15** : Module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés à 28 jrs

D'après les résultats obtenus, le module d'élasticité dynamique suit la même tendance que la résistance. En effet, une légère diminution du module des mortiers autoplaçants étudiés en fonction de taux de substitution du sable par le verre mousse.

### V.3.1. Relation entre le module élastique et la résistance :



**Figure V.16 :** Effet du rapport de substitution du sable par le verre mousse sur le module élastique dynamique et la résistance à la compression

Il est remarquable que la variation de deux caractéristiques mécaniques ( $E_d$  et  $R_c$ ) est pratiquement la même. En effet ces deux caractéristiques ont les mêmes tendances cela est évident que le module d'élasticité et la résistance sont interdépendant.

### V.3.3. Etude de l'interface granulats/matrice cimentaire :

Afin de mieux examiner l'effet de l'incorporation des granulats fins de verre mousse dans le mortier en tant que sable (par substitution du sable naturel), nous avons procédé à l'analyse microscopique la structure des mortiers durcis après 28 jours. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage MEB.

Pour réaliser cette analyse, des éprouvettes de mortiers autoplaçants ont été choisis. Nous avons choisis les éprouvettes de mortiers de référence MAP (R) et MAP(100%) après l'écrasement à 28 âge de durcissement. Les résultats obtenus sont présentés dans la **figure V.6**.

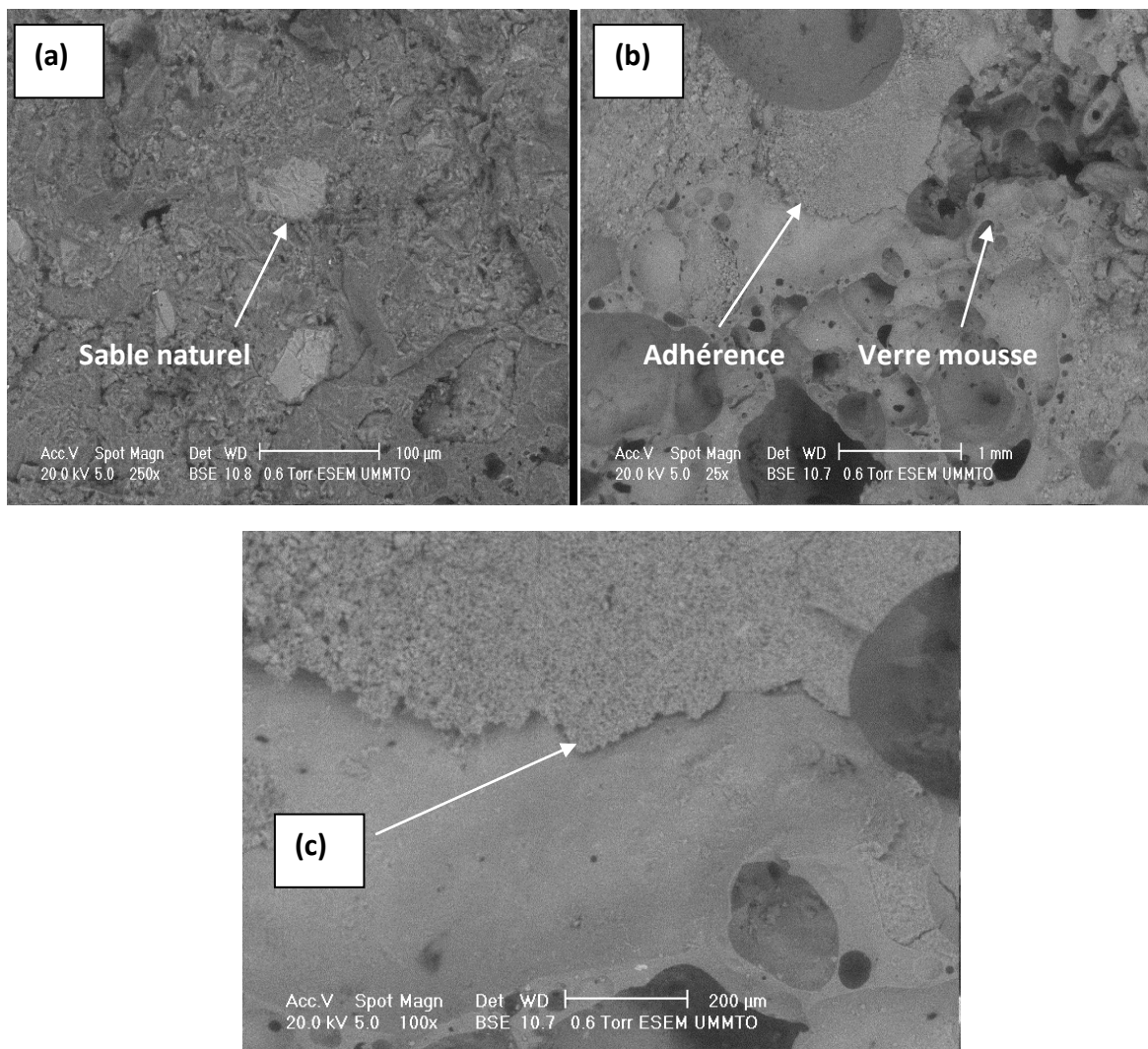


Figure V.6 Images obtenues par MEB sur des mortiers étudiés

(a) MAP(0%) (b) MAP(100%) (c) interface granulats/matrice cimentaire

D'après les images, la forme des grains de verre mousse ainsi que la porosité de ces derniers a favorisé l'adhérence avec la matrice cimentaire. En effet, comparativement au mortier MAP (R), le mortier de MAP (100%) présente à l'interface une bonne adhérence avec la matrice cimentaire. Egaleme nt, on observe sur les mêmes images (**figure V.6 b**) des pores et avec leur taille du verre mousse.

## Conclusion générale

Rappelons que l'objectif de ce travail, était la valorisation des déchets de l'industrie verrière, en particulier les déchets de verre qui est le calcin pour produire des granulats fins en tant que sable dans la formulation des mortiers autoplaçants. L'étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durcis des mortiers autoplaçants, en substituant le sable par les granulats de verre mousse à des rapports (0, 30, 50 et 100% en volume). A l'issue des résultats obtenus dans cette étude, on peut conclure que ;

1. La substitution de sable par les granulats fins de verre mousse, a légèrement diminuée la fluidité des mortiers autoplaçants. Cependant, la fluidité enregistrée pour les mortiers contenant 100% de verre mousse, est de l'ordre de 180 mm qui est une fluidité peut être corrigée par addition d'une petite dose du superplastifiant.
2. La substitution de sable par le verre mousse, a aussi diminuée la densité en vrac de tous les mélanges des mortiers autoplaçants. Jusqu'à 100% du remplacement du sable par le verre mousse, la densité en vrac des mortiers est de l'ordre de 1750 kg/m<sup>3</sup>.
3. La résistance à traction par flexion des mortiers autoplaçants étudiés, a légèrement diminue avec l'augmentation du taux de substitution du sable. Du fait que le mortier devient plus poreux avec les granulats de verre mousse (verre mousse de forte porosité), il est évident que la résistance a diminuée.
4. Avec 100% de remplacement de sable par les granulats de verre mousse, a provoquée aussi une réduction de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants étudiés.

Par rapport au mortier de référence, Cette réduction est de l'ordre 28% pour les mortiers à 100% du verre mousse.

5. Les valeurs obtenues du module d'élasticité dynamique est de l'ordre de 43 GPa pour les mortiers à 100% des granulats de verre mousse (cad par remplacement totale du sable).
6. L'étude microscopique de l'interface granulats/matrice cimentaire des éprouvettes de mortiers par microscope électronique à balayage MEB, nous a permis de conclure que la forme des grains de verre mousse ainsi que leurs porosité a jouer un rôle important dans l'adhérence des grains avec la matrice cimentaire. En effet, comparativement au mortier MAP (R), le mortier de MAP (100%) présente à l'interface une bonne adhérence avec la matrice cimentaire.

# BIBLIOGRAPHIE

- [1] Haifi Mohamed Redha « Formulation des bétons autoplaçants »Thèse Magister en Génie Civil. Université Mentouri-Constantine. 2011.
- [2] Recommandation éditées par HOLCIM « le béton autoplaçant ».Version 26-11-2004.
- [3] Thèse de doctorat de Philippe TURCRY : retrait et fissuration des bétons autoplaçants, influence de la formulation (*l'université de NANTES*).
- [4] Sandrine Bethmont « mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants » Thèse doctorat. Laboratoire central des ponts et chaussées.58Bd Lefbvre 75015 Paris. Soutenue le 15 décembre 2005.
- [5] SIAHMED Hamza, OUALIT Mehenna « formulation et caractérisation rhéologique d'un BAP : action de différents superplastifiants sur les propriétés rhéologique ».PFE Université de Boumerdes .juin 2007.
- [6] Safi Brahim « formulation et caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pates cimentaires et mortiers autoplaçants » thèse de doctorat. UMBB. 2011/2012.
- [7] Hanna Fares « propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons autoplaçants exposés à une température élevée » Thèse Doctorat. Ecole Doctorale Science et ingénierie. Université de Cergy-Pontoise. Soutenue le 07 Décembre 2009.
- [8] Stéphan ASSIE « Durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Octobre 2004.
- [9] Franck CASSAGNABERE « produits préfabriqués en béton file:vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procéder de production» Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse III 2007.
- [10] Wilfried Kurz, Jean-Pierre Mercier et Gérald Zambelli, Traité des matériaux - Volume 1 - Introduction à la science des matériaux - PPUR - 1999.

- [11] Rossington, D. R., Surface chemistry of glass, In Introduction to Glass Science, Springer US., p. 513-543, 1972.
- [12] Michel F. Ashby, D.R.H. Jones, Matériaux, Dunod, coll. Sciences Sup, 1981.
- [13] Lucas, J, Verres et optiques Bulletin de l'Union des Physiciens (BUP), 100, p. 581-598, 2006
- [14] Prisca Chételat, Rapport technique / domaine du bâtiment, Isolation de verre cellulaire en vrac : Utilisation de verre cellulaire dans le domaine du bâtiment ; p. 1-9, mars 2012
- [15] Rapport du TECHNOpor ; granulats de mousse de verre, Edition TECHNOpor, www.technopor.com, août 2009.
- [16] G. Bumanis, D. Bajare, J. Locs, A. Korjamins, Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete, Construction and Building Materials 47 (2013) 274–281
- [17] Rapport TECHNOpor, Granulats de mousse de verre Catalogue du TECHNOpor, janvier 2012
- [18] Benhaoua F., Study and Influence of the alkali silicate glass addition on the porosity of the foam glass prepared based on cullet, thesis of magister, M'hamed Bougara university of Boumerdes, 2012
- [19] Guide pratique d'isolation thermique des bâtiments, Paris : eyrolle, 1977
- [20] Elaboration d'un granulats léger du verre mousse pour obtention des composites, mémoire fin d'étude, 1995.
- [21] Markus WELTER, Lucerne, isolation en verre cellulaire isolé de manière économique et écologique.
- [22] Druskininkai Lithuania, Foamglass granulate PENOSTEK™, STIKLOPoras Invent compagny, www.stikloporas.lt, 2004
- [23] Mukesh Limbachiya, Mohammed Seddik Meddah, Soumela Fotiadou, Performance of granulated foam glass concrete, Construction and Building Materials 28 (2012) 759–768



- [24] A.S. Apkaryan, S.N. Kulkov and László A. Gömze, Foam Glass Ceramics as Composite Granulated Heat-Insulating Material, , *Építőanyag-Journal of Silicate Based and Composite Materials*, Vol. 66, No. 2 (2014), p.38–42
- [25] Russian Federation invention patent № 2374191. “A method of producing of a granular foam glass ceramics” A. Apkarian, V. Khristyukov, reg. the 27th of November 2009
- [26] Apkaryan, A. S. – Khristyukov, V. G. – Smirnov, G. V.: Granulated foam glass ceramic – a promising heat insulating material. *Glass and Ceramics*, Springer New York Consultants Bureau. 2008, T. 65. № 3 - 4. pp. 74-76.