

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**UNIVERSITE 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 : Contrôle-Qualité des Matériaux**

## **THEME**

---

**Valorisation des déchets de verre dans la fabrication des granulats légers : Application dans les matériaux isolants**

---

**Réalisé Par :**

**MEDAR MOHAMED AMINE**  
**DJADI BOUALEM**

**Sujet Proposé et suivi par :**

**Dr. SAFI B.**

**Devant le jury :**

|                            |            |  |                  |
|----------------------------|------------|--|------------------|
| <b>Benmounah Abdelbaki</b> | <b>Pr</b>  | <b>Université M'hamed Bougara –Boumerdes</b> | <b>Président</b> |
| <b>Safi Brahim</b>         | <b>MCA</b> | <b>Université M'hamed Bougara –Boumerdes</b> | <b>Encadreur</b> |

## *Résumé*

Cette étude a pour but de valoriser les déchets de verre et de briques pour produire les granulats verre mousse (granulats légers) utilisés pour les matériaux légers. Les granulats de verre mousse ont été fabriqués à une température de 850 ° C à partir de déchets de verre (calcin), les déchets de briques et de calcaire comme agent moussant. Ces granulats ont été utilisés par substitution des granulats classiques (gravillon) dans le béton et aussi pour fabriquer des matériaux isolants (plâtre et béton résineux). Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés physiques (Fluidité, la densité, porosité/absorption d'eau et les tests ultrasoniques), thermiques (conductivité thermique) et mécaniques (résistance mécanique et module d'élasticité dynamique) de ces matériaux. Les résultats obtenus montrent que les granulats de verre mousse fabriqués peuvent être utilisés comme un gros granulat pour produire un béton léger et peuvent également être utilisés pour la fabrication du béton léger résineux et plâtre d'isolation

**Mots clés :** Déchets de verre, verre mousse, granulats léger, béton autoplaçant, résine, masse volumique, isolation phonique et thermique.

## *Abstract*

This study aims to valorize the glass and brick wastes to produce the granulated foam glass for lightweight materials. The aggregates of foam glass were manufactured at a temperature 850 ° C from glass wastes (cullet), brick wastes and limestone as a foaming agent. These aggregates were used for substitution of conventional aggregates (gravel) in the concrete and also to manufacture insulating materials (plaster and concrete resin). An experimental study was conducted to evaluate the physical, thermal and mechanical of these materials. The obtained results show that manufactured foam glass aggregates can be used as a large aggregate to produce a lightweight concrete and can also be used for the manufacture of resin lightweight concrete and insulation plaster.

**Keywords:** Glass wastes, foam glass, lightweight aggregates, self-compacting concrete, resin, density, thermal and sound insulation.

# SOMMAIRE

---

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

## Chapitre I : les bétons autoplaçants « BAP »

|  |    |
|--|----|
| I.1. Introduction :.....   | 8  |
| I.2. Définition :.....   | 9  |
| I.3. Particularité du BAP :.....   | 9  |
| I.4. Domaines d'application :.....   | 10 |
| I.5. Les avantages des BAP : .....   | 10 |
| I.6. Inconvénients des BAP : .....   | 11 |
| I.7. Classification des BAP :.....   | 11 |
| I.8. Constituants d'un BAP :.....  | 12 |
| I.8.1. Le ciment :.....  | 13 |
| I.8.2. Les ajouts minéraux :.....  | 13 |
| I.8.2.a. Les fillers calcaires :.....  | 14 |
| I.8.3. Les Granulats : .....   | 14 |
| I.8.4. Eau : .....   | 16 |
| I.8.5. Les adjuvants : .....   | 16 |
| I.8.5.a. Définition :.....   | 16 |
| I.8.5.b. Les superplastifiant : .....  | 16 |
| I.8.5.c. Mode d'action (eau + ciment) :.....   | 17 |
| I.8.5.d. Mode action des polycarboxylate (l'encombrement ou répulsion stérique) :..... | 18 |
| I.9. Les propriétés du béton autoplaçant : .....                                       | 18 |
| I.10. Essais à l'état frais : .....  | 20 |
| I.10.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8) : .....                     | 20 |
| I.10.2. Essai de la boîte en L (NF EN 12350-10): .....                                 | 20 |
| I.10.3. Essai stabilité au tamis NF EN 12350-11 :.....                                 | 21 |
| I.10.4. Essai d'entonnoir .....  | 21 |
| I.10.5. Essai d'étalement modifié : .....  | 21 |

# SOMMAIRE

---

|  |    |
|--|----|
| I.10.6. Essais complémentaires sur béton frais : .....   | 22 |
| I.11. Essais à l'état durci : .....  | 23 |
| I.11.1. Résistance à la compression : .....  | 23 |
| I.11.2. Résistance à la traction .....   | 24 |
| I.10.3. Le retrait .....   | 24 |
| I.11.4. Module d'élasticité .....  | 25 |
| I.11.5. Le fluage .....  | 25 |
| I.12. Formulation des BAP .....  | 25 |
| I.12.1 Paramètres pris en compte pour la formulation des bétons ordinaires et autoplaçants : ..... | 26 |
| I.13. Fabrication, transport et mise en place des BAP : .....                                      | 26 |
| I.13.1 Fabrication des BAP : .....   | 26 |
| I.13.2 Transport des BAP : .....   | 26 |
| I.13.3 Mise en place des BAP : .....   | 27 |

## Chapitre II : Généralité sur les déchets du verre

|   |    |
|---|----|
| II.1. Introduction .....                  | 28 |
| II.2. Définition du verre .....           | 29 |
| II.2.1. Structure du verre .....          | 29 |
| II.2.2. Transition vitreuse .....         | 31 |
| II.2.3. Type du verre industriel .....    | 32 |
| II.3. Verre issu de recyclage .....       | 32 |
| II.4. Le déchet du verre « calcin » ..... | 33 |
| II.4.1. Introduction : .....              | 33 |
| II.4.2. Définition : .....                | 33 |
| II.5. Verre expansé .....                 | 34 |
| II.5.1. Introduction : .....              | 34 |
| II.5.2. Définition .....                  | 35 |
| II.5.3. Composition chimique .....        | 35 |
| II.5.4. Principe de fabrication .....     | 36 |
| II.5.4.1. Procédé discontinu .....        | 36 |
| II.5.4.2. Procédé continu .....           | 36 |
| II.5.4.3. Frittage .....                  | 36 |
| II.5.5. Fabrication industrielle .....    | 38 |

# SOMMAIRE

---

|   |    |
|---|----|
| II.5.6. Caractéristiques du verre mousse .....                  | 38 |
| II.5.7. Domaine d'application des verres expansés .....         | 41 |
| II.6. Granulats de verre mousse .....                           | 42 |
| II.6.1. Définition .....  | 42 |
| II.6.2. Principe de fabrication .....                           | 42 |
| II.6.3. Agents moussants .....                                  | 43 |
| II.6.3.1. Classification des agents moussants .....             | 43 |
| II.7. Les caractéristiques des granulats de verre mousse .....  | 44 |
| II.8. Domaine d'application de granulats de verre mousse :..... | 46 |

## Chapitre III : Matériaux utilisés

|  |    |
|--|----|
| III.1. Caractéristiques des constituants : ..... | 48 |
| III.1.1. Ciment : .....                          | 48 |
| III.1.1.a. Caractéristiques physiques :.....     | 48 |
| III.1.1.b. Caractéristiques mécaniques : .....   | 49 |
| III.1.1.c. Caractéristiques chimiques :.....     | 49 |
| III.1.2. Fillers du calcaire : .....             | 49 |
| III.1.3. Sable : .....                           | 51 |
| III.1.3.1. Caractéristiques du sable : .....     | 51 |
| Analyse granulométrique du sable corrigé : ..... | 54 |
| III.1.4. Gravier : .....                         | 54 |
| III.1.4.1. Caractéristiques physiques :.....     | 54 |
| Analyse granulométrique de gravier 3/8 : .....   | 55 |
| Analyse granulométrique de gravier 8/15 : .....  | 56 |
| III.1.5. Déchets de verre (calcin) :.....        | 58 |
| III.1.6. Déchets de la brique (Chamotte) .....   | 59 |
| III.1.7. Superplastifiants : .....               | 60 |
| III.1.7.1. Caractéristiques :.....               | 60 |
| III.1.7.2. Domaine d'utilisation : .....         | 60 |
| III.1.7.3. Dosage : .....                        | 61 |
| III.1.7.4. Caractères généraux :.....            | 61 |
| III.1.7.5. Mise en œuvre :.....                  | 61 |
| III.1.7.6. Conditionnement :.....                | 61 |
| III.1.7.7. Stockage : .....                      | 61 |
| III.1.7.8. Conservation :.....                   | 61 |
| III.1.9. La Résine :.....                        | 61 |

# SOMMAIRE

---

|  |    |
|--|----|
| III.1.9.1. Utilisation : .....   | 62 |
| III.1.9.2. Caractéristiques : .....  | 62 |
| III.1.9.3. Couleur : .....   | 62 |
| III.1.9.4. Caractéristiques techniques : .....                                 | 62 |
| III.1.9.5. Caractéristiques mécaniques : .....                                 | 62 |
| III.1.9.6. Conditionnement : .....   | 63 |
| III.1.10. Le plâtre : .....  | 63 |
| III.1.11. Eau de gâchage : .....   | 63 |
| III.2. Composition des granulats par un traitement thermique : .....           | 64 |
| III.2.1. Préparation du mélange : .....  | 64 |
| III.2.2. Régime thermique choisi : .....                                       | 66 |
| III.2.3. La distribution granulométrique des granulats de verre mousse : ..... | 67 |

## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

|   |    |
|---|----|
| IV.1. Confection d'un matériau composite à base de liant hydraulique et de granulats de verre mousse « BAP » .....  | 69 |
| IV.1.1. Formulation d'un BAP par la méthode japonaise .....   | 69 |
| IV.1.2. Résistance à la compression et caractéristique à l'état frais .....   | 69 |
| IV.1.3. Formulation du béton .....  | 70 |
| IV.1.4. Protocole de mélange de béton avec granulats de verre mousse .....  | 71 |
| IV.2. Confection d'un matériau composite à base de liant aérien « plâtre » et de granulats de verre mousse: .....   | 72 |
| IV.2.1. Formulation du composite .....  | 72 |
| IV.3. Confection d'un matériau composite à base de liant organique « résine » et de granulats de verre mousse ..... | 73 |

## Chapitre V : Résultats et interprétations

|   |    |
|---|----|
| V.1. Etat frais .....                           | 75 |
| V.1.1. Fluidité « Essai de l'étalement » .....  | 75 |
| V.2. Propriétés physiques .....                 | 77 |
| V.2.1. La masse volumique .....                 | 77 |
| V.2.2. Porosité .....                           | 78 |
| V.2.3. Absorption d'eau .....                   | 79 |
| V.3. Contrôle non destructif par ultrason ..... | 81 |

# SOMMAIRE

---

|  |    |
|--|----|
| V.4. Module d'élasticité dynamique : .....                       | 83 |
| V.4.1. La résistance à la compression et flexion du BAP MV ..... | 83 |
| V.5. Essai de l'isolation thermique des matériaux .....          | 85 |
| V.6. Etude microscopique des bétons élaborés .....               | 88 |
| Conclusion générale.....   | 89 |

# *Liste des TABLEAUX*

---

## **Chapitre I : Les bétons autoplaçants « BAP »**

|  |    |
|--|----|
| Tableau I.1. Intervalle d'écoulement.....                        | 12 |
| Tableau I.2. Spécification des BAP.....                          | 19 |
| Tableau I.3. Classe d'étalement des BAP.....                     | 19 |
| Tableau I.4. Comparaison BAP-BO au niveau de la formulation..... | 26 |

## **Chapitre II : Généralité sur les déchets du verre**

|  |    |
|--|----|
| Tableau II.1 .Caractéristiques techniques des plaques en verre cellulaire Foam glass ..... | 40 |
| Tableau II.2 : Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé .....              | 46 |

## **Chapitre III : Matériaux utilisés**

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.1 : Caractéristiques physiques du ciment.....   | 48 |
| Tableau III.2 : Résistance à la compression et à la flexion pour prisme du ciment « 40×40×160 »mm » :.....                | 49 |
| Tableau III.3 : Composition chimique du ciment.....   | 49 |
| Tableau III.4 : Composition minéralogique du ciment.....  | 49 |
| Tableau III.5. Analyse chimique du calcaire : .....   | 50 |
| Tableau III.6. Propriétés physiques du calcaire.....  | 50 |
| Tableau III.7 : Caractéristiques physiques du sable concassé (0/5) selon la norme NF EN 933-1 : .....                     | 51 |
| Tableau III.8 : Analyse granulométrique par tamisage du sable concassé (0/ 5) de Setif selon la norme NF EN 933-1 : ..... | 52 |
| Tableau III.9 : Caractéristiques physiques du sable de Boussaâda selon la norme .....                                     | 52 |
| NF EN 933-1 .....   | 52 |
| Tableau III.10 : Analyse granulométrique par tamisage du sable de Boussaâda selon la norme NF EN 933-1 : .....            | 53 |
| Tableau III.11 : Analyse granulométrique par tamisage du sable corrigé selon la norme .....                               | 54 |
| NF EN 933-1 : .....   | 54 |



## *Liste des TABLEAUX*

---

|   |    |
|---|----|
| Tableau III.13 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 3/8selon la norme NF EN 933-1 :.....   | 55 |
| Tableau III.14 : Caractéristiques physiques du gravier 8/15 de Sétif : .....                            | 55 |
| Tableau III.15 : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/15 selon la norme NF EN 933-1 :..... | 56 |
| Figure III.8.Courbe granulométrique du mélange.....   | 57 |
| Tableau. III.16.Analyse chimique du calcin par fluorescence X.....                                      | 58 |
| Tableau.III.17.Propriétés physiques du calcin.....  | 58 |
| Tableau.III.18. Analyse chimique du la chamotte par fluorescence X. ....                                | 59 |
| Tableau.III.19. Propriétés physiques du la chamotte.....  | 59 |
| Tableau.III.20. Caractéristiques physiques du plâtre : .....  | 63 |
| Tableau.III.21. Analyse chimique des granulats artificiels avant frittage.....                          | 66 |
| Tableau.III.22. Analyse chimique des granulats artificiels après frittage.....                          | 66 |
| Figure III.23. La distribution granulométrique des granulats de verre mousse. ....                      | 67 |

### **Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études**

|   |    |
|---|----|
| Tableau IV.1.Composition pour 1 m <sup>3</sup> du BAP .....       | 69 |
| Tableau IV.2.essai de la résistance à la compression du BAP ..... | 69 |
| Tableau IV.3.Composition des différentes formulations .....       | 70 |
| Tableau IV.4.Composition des différentes formulations .....       | 72 |
| Tableau IV.5 .Composition des différentes formulations .....      | 73 |

### **Chapitre V : Résultats et interprétations**

|  |    |
|--|----|
| Tableau V.1. Essai de l'étalement.....                             | 76 |
| Tableau V.2. Masse volumique apparente des composites étudiés..... | 77 |
| Tableau V.3.Porosité des éprouvettes .....                         | 78 |

## *Liste des TABLEAUX*

---

|  |    |
|--|----|
| Tableau V.4.Absorption d'eau des éprouvettes.....                  | 80 |
| Tableau V.5 Vitesse de propagation du son des composite .....      | 82 |
| Tableau V.6.Module d'élasticité dynamique.....                     | 83 |
| Tableau V.7 : Les résultats d'essai de conductivité thermique..... | 86 |

# *Liste des figures*

---

## **Chapitre I : Les bétons autoplaçants « BAP »**

|   |    |
|---|----|
| Figure I.1 : Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP..... | 13 |
| Figure I.2 : Polymère de type «peigne ».....                          | 17 |
| Figure I.3 : Mode d'action eau-ciment.....                            | 17 |
| Figure I.4 : Mode d'action de polycabroxylate.....                    | 18 |
| Figure I.5 : Essai d'étalement.....                                   | 20 |
| Figure I.6 : Essai de la boîte en L.....                              | 20 |
| Figure I.7 : Essai de stabilité au tamis.....                         | 20 |
| Figure I.8 : Essai d'entonnoir.....                                   | 21 |
| Figure I.9 : Essai d'étalement modifié.....                           | 22 |
| Figure I.10 : Mesure de la masse volumique réelle. ....               | 23 |

## **Chapitre II : Généralité sur les déchets du verre**

|  |    |
|--|----|
| Figure II.1). Structure de SiO <sub>2</sub> .....  | 30 |
| Figure II.2. Diffractogramme de rayons X d'un mélange de deux composés : l'un vitreux et l'autre cristallin [30] ..... | 31 |
| Figure II.4. Calcin traité du verre .....  | 34 |
| Figure II.5. Image prise par MEB sur le granulat de verre mousse .....   | 35 |
| Figure II.6. Procédé de fabrication de verre mousse Certifié ISO 9002 .....  | 38 |
| Figure II.7. Granulat à base du verre mousse.....  | 42 |
| Figure II.8. Domaine d'application des granulats de verre mousse .....   | 47 |

## **Chapitre III : Matériaux utilisés**

|  |    |
|--|----|
| Figure III.1. Fillers du calcaire. ....  | 49 |
| Figure III.2. Sable de Setif et de Boussaâda.....  | 51 |
| Figure III.4. Poudre de calcin 200µm.....  | 58 |
| Figure III.5. Déchet de brique « chamotte » 200µm .....  | 59 |
| Figure III.6. Elaboration des granulats de verre mousse. ....                                      | 64 |
| Figure III.7. Schéma technologique proposé pour la fabrication des granulats du verre expansé..... | 65 |
| Fig III.8. Granulats de verre avant concassage .....   | 66 |

## *Liste des figures*

---

|   |    |
|---|----|
| Figure III.23. La distribution granulométrique des granulats de verre mousse..... | 67 |
|---|----|

### **Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études**

|  |    |
|--|----|
| FigureIV.1 : Composition du BAP.....                   | 71 |
| FigureIV.3 : Composition du BAP MV.....                | 71 |
| FigureIV.4 : Éprouvettes BAP MV.....                   | 71 |
| Figure IV.5 : Plaque de plâtre.....                    | 72 |
| Figure IV.6 : Plaque de plâtre avec GVM.....           | 72 |
| FigureIV.7 : Béton résineux avec granulats mousse..... | 73 |
| Figure IV.8 : Béton résineux avec sable.....           | 73 |

### **Chapitre V : Résultats et interprétations**

|   |    |
|---|----|
| Figure V.4 :L'évolution de l'absorption d'eau du BAP en fonction de la substitution des granulats de verres mousse..... | 80 |
| FigureV.5 : L'appareil d'ultrason.....  | 81 |
| FigureV.6 : Etalonnage de l'appareil.....   | 81 |
| FigureV.7 : Essai non destructif ultrason.....  | 81 |
| Figure.V.8 : Vitesse de propagation du son des composite étudiés à 28 jours.....  | 82 |
| Figure.V.9 : Module d'élasticité dynamique des matériaux étudiés à 28 jours.....  | 84 |
| FigureV.10 : Appareil CT-METRE.....   | 85 |
| FigureV.11 : Essais de la conductivité thermique.....   | 85 |
| Figure V.12. Conductivité thermique des matériaux étudiés mesurée à 28 jours.....                                       | 86 |
| Figure 14 Interface Granulats de verre mousse/Matrice cimentaire.....   | 88 |

## *Liste des figures*

---

### **Introduction générale**

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des déchets de verre a considérablement augmenté dans différents domaines de la fabrication des matériaux. En effet, le développement des techniques de recyclage et de classification des déchets, les déchets de verre peuvent être recyclé pour la production de verre comme additif (appelé calcin) ou comme ajout minéral (poudre de verre) dans le ciment pour le béton et peut également être utilisé sous forme d'agrégats dans les bétons. Cependant, le verre recyclé est également utilisé pour la production de granulés légers appelé granulats de verre expansé (ou granulats de verre mousse). Des recherches antérieures ont démontré que ce granulats de verre expansé peut être utilisé pour produire un béton ultraléger à la fois avec une faible densité et une faible conductivité thermique. Des chercheurs ont étudié l'effet de différentes proportions de granulats grossiers de mousse de verre (30%, 40%, 50%, 60% et 100%) et granulats fins (5%, 10% et 15%) sur les propriétés du béton à l'état frais et durci. Une série de mélanges de béton ont été dosés avec des rapports eau-ciment (E / C) de 0,40, 0,55, 0,62 et 0,76. Les auteurs ont constaté que l'incorporation de granulats de mousse de verre ou comme agrégats fins (sable) ou grossiers (gravier), n'a pas montré une grande influence sur l'affaissement des valeurs initiales des mélanges de mortiers/bétons étudiés. Une légère diminution dans les mortiers de fluidité ou ouvrabilité du béton, ont été observés par ces auteurs.

Cependant, certains déchets de verre est impropre à être réutilisé et de nos jours, l'élimination de ce type de déchets de verre est apparaît nécessaire parce qu'il y a un problème environnemental partout dans le monde, a cause de la nature non-

# *Introduction générale*

---

biodégradable de verre. A cet effet, cette étude vise à valoriser les déchets minéraux en particulier les déchets de verre et les déchets de briques pour produire les granulats de verre mousse. Ces granulats ont été utilisés par substitution des granulats classiques (gravillon) dans le béton et aussi pour fabriquer des matériaux isolants (plâtre et béton résineux). Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés physiques, thermiques et mécaniques de ces matériaux

Le présent manuscrit est subdivisé en cinq (5) chapitres, répartie en deux chapitres pour la synthèse bibliographique et trois autres chapitres pour le travail expérimental.

Le **chapitre I** est consacré aux généralités sur les bétons autoplacants ;

Le **chapitre II** décrit un état de l'art sur les déchets de verre ainsi que les granulats de verre mousse ;

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 de verre, sable et gravillon). La fabrication et les caractéristiques des granulats de verre mousse est aussi donnée le même chapitre ;

Le **chapitre IV** est consacré à l'élaboration des matériaux d'études qui sont des matériaux composites à base des granulats de verre mousse à différents type de liant. La procédure d'élaboration de ces matériaux sera aussi présentée dans ce chapitre ;

Le **chapitre V** donnera les résultats des différents essais réalisés et leurs interprétations.

## *Introduction générale*

---

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



# *Introduction générale*

---

## *Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»*

*Le présent chapitre vient à apporté des connaissances sur les bétons autoplaçants, leurs particularités de point de vue performances ainsi que leurs méthodes de formulation. Egalement, un état de l'art sur les bétons autoplaçants sera présenté dans ce même chapitre*

### **I.1. Introduction :**

Le Japon est le pionnier du développement de ce béton ou il a été apparu en 1986. Pour satisfaire les conditions habituellement contradictoires (déformabilité et résistance à la ségrégation), on a fait appel à la technique des bétons coulés sous l'eau, en effet, la première génération des bétons autoplaçants 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.

Construire avec cette nouvelle gamme de béton est en train de prendre de l'ampleur à travers le monde, en effet, depuis son développement, le nombre d'ouvrages réalisés avec les bétons autoplaçants est en bonne croissance notamment au Japon.

Nous citons quelques exemples de réalisations Japonaises :

- ✓ Le pont Kiba Park ou 650 m<sup>3</sup> de bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 60Mpa. [1].
- ✓ Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde d'une portée de (3910 m) ou 390.000m<sup>3</sup> de béton autoplaçant versés dans les coffrages des fondations et des piliers (OKAMURA et al. 1994). [2].
- ✓ Le bâtiment Landmark Tower ou un béton autoplaçant de déformabilité remarquable a été mis en place dans 66 colonnes de 40m de hauteur chacune (HAYAKAWA et

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

al.1995) [3].

- ✓ Le stade de Fukaka ou 10.000m<sup>3</sup> de béton autoplaçant ont été utilisés pour des sections très ferraillées de forme complexe (IZUMI et Coll.1995). [4].

## I.2. Définition :

Les BAP sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage du coffrage tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais. La fluidité du BAP permet sa mise en place aisément par pompage. Ces caractéristiques en font du BAP un produit bien adapté en milieu fortement armé ou géométrie complexe .il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armatures dense ou en présence d'autres obstacles (réservations, ouvertures...), tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage et de la mise en œuvre

## I.3. Particularité du BAP :

Les principes de formulation de bétons autoplaçants se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils présentent un volume de pâte (ciment + fines + eau + adjuvants) plus élevé, Ils sont caractérisés par une quantité de fines élevée et l'emploi d'adjuvants nommés : superplastifiants hauts réducteurs d'eau.

Une nouvelle vague d'adjuvants appelés : rétenteurs d'eau ou agents de viscosité entrant quelque fois dans leur formulation. Ces derniers assurent la viscosité de la pâte pour lui conférer des propriétés limitant la ségrégation.

Pour ce béton, on se fixe de travailler le plus possible avec des granulats de 16mm de taille maximale, voire dans la mesure du possible moins.

A l'état frais, les BAP se distinguent des bétons ordinaires par le fait qu'ils s'écoulent sous leur poids propre avec un débit suffisant écartant les moyens de vibration. Dans les zones confinées ou très ferraillées, tout en gardant une fluidité élevée et une bonne résistance à la ségrégation.

Seulement, la fluidité n'est pas la seule propriété recherchée, car il faut bien s'assurer de

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

l'homogénéité de l'ensemble pâte-granulats. De façon corollaire, le mélange du BAP doit être très cohésif et très stable lors de la mise en place et cela jusqu'à son durcissement. Ceci implique que le BAP doit présenter le minimum de tassement et de sédimentation des particules solides et éviter de présenter un ressuage trop fort, car cela génère une hétérogénéité des propriétés mécaniques, telle qu'une chute d'adhérence des armatures en partie supérieure des levées par rapport à celles situées en zone inférieure lors du coulage.[4].

## I.4. Domaines d'application :

Le BAP est une solution bien adapté pour :

- ✓ Tous les types de dalles.
- ✓ Compression sur poutrelles hourdis.
- ✓ Radiers.
- ✓ Plancher dalle pleine et plancher chauffant.
- ✓ Rattrapage de niveau en rénovation.
- ✓ Fondation superficielles.
- ✓ Voiles, poteaux, poutres. [5]

## I.5. Les avantages des BAP :

### ➤ La mise en œuvre :

- ✓ Diminution du temps de coulée.
- ✓ Suppression de la vibration et donc diminution notable des nuisances sonores et de l'usure des moules métalliques et des coffrages.
- ✓ Meilleures conditions de travail, ce qui permet d'attirer une main d'œuvre qui n'appréciait pas toujours les conditions de travail « bruyantes ».
- ✓ Possibilité de couler des bétons dans des endroits inaccessibles.
- ✓ Possibilité de couler des voiles de grande hauteur en une seule opération. [5]

### ➤ La qualité du béton :

- ✓ Parfait remplissage des éléments fortement ferrailés.
- ✓ Obtention d'une bonne qualité de parement (surface de béton lisse et donc moins de pores en surface).

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

- ✓ Et d'une manière générale, obtention d'une meilleure qualité du béton, in situ, pratiquement indépendante du savoir-faire des ouvriers durant la réalisation ; cela va dans le sens d'une durabilité accrue des ouvrages.

### ➤ **Concernant la conception :**

- ✓ Permet d'envisager de nouveaux types d'éléments en béton.
- ✓ Possibilité d'intégrer des réservations dans le coffrage. [5]

### **I.6. Inconvénients des BAP :**

Le désavantage principal de ce béton est qu'il entraîne un accroissement du coût des matières premières, de la fabrication et du contrôle. Sur chantier, il nécessite également des coffrages plus lourds afin de reprendre les pressions exercées. En effet, les données de la littérature concernant les pressions exercées par les BAP sont parfois contradictoires mais il est recommandé de retenir de manière conservatrice une pression en pied de coffrage correspondant à la poussée hydrostatique du béton frais. Cependant, de manière globale, des économies résultant de la rapidité de mise en place, de la diminution de main d'œuvre, de l'usure moindre des coffrages et de l'amélioration sensible de la qualité finale ont toujours été constatées. [5]

### **I.7. Classification des BAP :**

Les BAP sont classés en trois catégories (numérotées de 1 à 3) suivant leur domaine d'utilisation. Le classement s'effectue suivant la valeur de l'intervalle d'écoulement, le type d'application (horizontal ou vertical) et l'épaisseur (dans le cas d'application horizontale) et selon le tableau ci-après :

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

|                         |                                  | Application horizontale |                 |                      |                 | Application verticale |                 |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
|                         |                                  | Epaisseur $\leq$ 300 mm |                 | Epaisseur $>$ 300 mm |                 |                       |                 |
|                         | Longueur maximale de cheminement | Inférieur à 5m          | Entre 5m et 10m | Inférieur à 5m       | Entre 5m et 10m | Inférieur à 5m        | Entre 5m et 10m |
| Intervalle d'écoulement | $I \geq 100$                     | ①                       |                 | ②a                   | ②b              | ②a                    | ②b              |
|                         | $80 \leq I < 100$                | ②a                      | ②b              | ②a                   | ②b              | ②a                    | ②b              |
|                         | $I < 80$                         | ③a                      | ③b              | ③a                   | ③b              | ③a                    | ③b              |

**Tableau I.1.** Intervalle d'écoulement. [6]

Dimension (en mm) de l'espace le plus petit à travers lequel le béton doit cheminer pour remplir correctement l'élément à bétonner. L'intervalle d'écoulement I tient compte de la géométrie des coffrages, de la disposition des armatures et des différents accès à un point donné pour le béton.

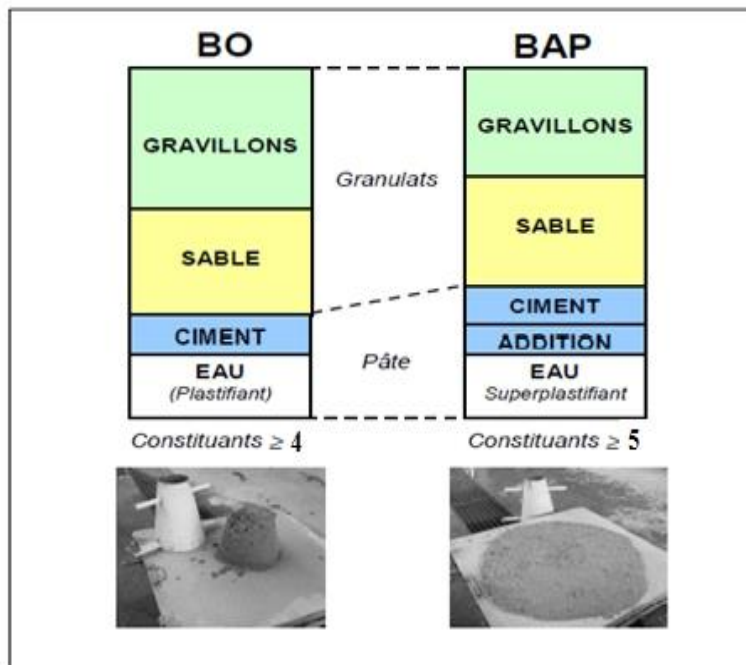
- ✓ **La catégorie 1 :** correspond aux BAP utilisés dans le cas de coulages horizontaux de faible épaisseur (inférieure ou égale à 300 mm) et ayant un intervalle d'écoulement supérieur 100 mm (anciennement appelés BAN – bétons auto-nivelant).
- ✓ **La catégorie 2 :** couvre principalement les BAP utilisés pour des applications horizontales de forte épaisseur (supérieure à 300 mm) ou pour des coulages courants en vertical. L'intervalle d'écoulement I est supérieur ou égal à 80mm.
- ✓ **La catégorie 3 :** est réservée aux BAP pour lesquels l'intervalle d'écoulement I est inférieur à 80 mm (parties d'ouvrage exiguës ou fortement ferraiillées).
- ✓ **Pour les catégories 2 et 3 :** on distingue de plus deux sous-classes (2a, 2b et 3a, 3b) en fonction de la longueur maximale de cheminement horizontal du BAP dans le coffrage (5 m pour 2a et 3a, 10 m pour 2b et 3b). [6].

### I.8. Constituants d'un BAP :

Les constituants d'un BAP sont le ciment, les fines (ajouts minéraux), les granulats (sable, gravier), eau et les adjuvants (superplastifiants, rétenteurs d'eau). Les BAP se différencient des

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

bétons ordinaires (BO) ou vibrés, par leurs caractéristiques à l'état frais, par leur composition (présence indispensable des fines minérales et de superplastifiants) ; voir le schéma suivant :



**Figure I.1.** Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BAP. [7]

## I.8.1. Le ciment :

C'est une poudre finement broyée qui lorsqu'il est mélangé avec l'eau fait prise, durcit et conserve ces propriétés dans l'air et dans l'eau.

Le ciment résulte du broyage d'un certain nombre de constituants. Les plus importants étant le clinker formé de silicates et d'aluminates de chaux.

En principe tous les ciments conformes à la norme SN EN 197-1, conviennent pour la fabrication des bétons autoplaçants.

Le choix correct du type de ciment est normalement imposé par les conditions spécifiques de chaque application.

## I.8.2. Les ajouts minéraux :

Les ajouts cimentaires sont des contributeurs 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 :

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

- 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 (fumée de silice). [8]

### I.8.2.a. Les fillers calcaires :

Les fillers calcaires sont des produits secs finement divisés obtenus par broyage industriel des roches calcaires, dont les caractéristiques sont définies par la norme NF P18 – 305. Parmi ces caractéristiques, deux sont particulièrement significatives :

Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomite) ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$ .

Une valeur minimale de l'indice d'activité. Les dimensions des particules de fillers s'étendent de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques dizaines de  $\mu\text{m}$ , déterminées en utilisant la granulométrie laser. [8]

#### ➤ Influence des fillers calcaires sur les BAP :

Ogawa et al. (1995) (ont développé des formulations de bétons fluides ( $D_{\text{étal}} = 650 \pm 30 \text{ mm}$ ) qui présentent de faibles pertes d'étalement au cours du temps (maximum 30 mm après 60 min.). Ces bétons de rapports  $E/C = 0,55 \pm 5\%$ , contiennent du filler calcaire, un volume de la pâte supérieur à 300 l, des granulats concassés de diamètre maximum 20 mm, un rapport volumique de Sable / Granulats de  $51 \pm 1\%$ , 8  $\text{kg/m}^3$  de superplastifiant (Naphtalène) et 3 $\text{kg/m}^3$  d'agent colloïdal à base de polyacrylate. Ils ont trouvé que pour un remplacement de 20% du volume des granulats par le filler calcaire, on obtient les meilleures fluidités. De même qu'ils ont obtenus de bonnes résistances à la ségrégation et au ressuage rapporté par. [9].

### I.8.3. Les Granulats :

Les granulats sont définis comme l'ensemble de grains inertes compris entre 0 mm et 40 mm (sable, graviers et cailloux) dont l'origine peut être naturelle ou artificielle. Nous distinguons les granulats roulés extraits de ballastières naturelles ou de rivières, et les granulats concassés, obtenus à partir des roches concassées exploitées en carrières.



## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

Les granulats sont classés selon les dimensions des grains qui les constituent et la courbe granulométrique représente la distribution, en pourcentage, des poids des matériaux passants dans des tamis de dimensions normalisées.

Pour faciliter l'écoulement du mélange, la confection d'un bon béton autoplaçant utilise généralement des granulats roulés de rivières et un apport de fines (par exemple des fillers calcaires) plus importants. Du fait que les frottements entre les granulats limitent l'étalement et l'aptitude au remplissage des bétons, la quantité de granulats est donc limitée, en général le rapport granulats / sable (G/S) exprimé en masse est de 1 dans un BAP. Le risque de blocage dans un milieu fortement ferrailé augmente lorsque le  $D_{max}$  augmente. Ainsi, le  $D_{max}$  des granulats doit être compris entre 10 et 20mm. [13]

### ➤ Influence des granulats sur les propriétés des BAP :

Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer les quantités optimales en gros granulats capables de donner un maximum de déformabilité et d'ouvrabilité au béton.

Selon Yurugi et al. (1989) le volume des gros granulats dans le béton est le facteur le plus important pour le contrôle de la maniabilité et de la capacité de remplissage : plus la teneur en gros granulats augmente et plus la capacité de remplissage diminue.

Okamura et al. (1993) mentionnent que le premier point dont il faut tenir compte lors de la formulation d'un BAP est de limiter la teneur en gros granulats car les bétons frais à faibles dosages en granulats se caractérisent généralement par une haute résistance aux ségrégations

Khayat et al. (1994) ont déterminé les quantités optimales en gros granulats et en sable capables d'améliorer la fluidité des mélanges de béton en présence d'un agent colloïdal et de superplastifiant. La quantité des granulats (granulats concassés lavés) a été de 300 l/m<sup>3</sup> avec une teneur de 70% de granulats de diamètre maximum 14 mm et 30% de diamètre maximum 20mm. Quant à la quantité de sable, elle correspondait à un rapport Sable/Pâte (volumique) de 0,6. [10, 11,12]

### I.8.4. Eau :

Pratiquement, toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Cependant, certaines eaux non potables peuvent convenir.

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

Une eau de qualité douteuse peut être utilisée à condition que des cubes de mortier préparés avec cette eau donnent des résistances à 28 jours au moins égales à 90 % de celles obtenues sur des échantillons témoins préparés avec de l'eau que l'on sait potable. De plus, il est recommandé d'exécuter les essais de la norme afin de s'assurer que le temps de prise du ciment n'est pas affecté par les impuretés contenues dans l'eau de gâchage. Un excès d'impuretés peut influencer non seulement le temps de prise, la résistance et la stabilité volumétrique du béton, mais peut aussi faire apparaître des efflorescences, des tâches, attaquer les armatures et réduire la durabilité.

Certaines limites peuvent donc être établies pour les chlorures, sulfates, alcalis et solides présents dans l'eau de gâchage ou l'on peut effectuer des essais appropriés pour déterminer l'effet de l'impureté sur diverses propriétés. [13]

### **I.8.5. Les adjuvants :**

#### **I.8.5.a. Définition :**

Ainsi que le définit la norme NF EN 934-2, un adjuvant est un Produit chimique incorporé à faible dose (moins de 5% de la masse du ciment) dans le béton ou le Mortier, afin de modifier certaines de ses propriétés.

Les adjuvants utilisés en faible proportion améliorent les propriétés du béton (béton frais ou béton durci). Ils permettent de formuler des bétons "sur mesure" aux performances adaptées à chaque ouvrage. Certains, par exemple, rendent le béton liquide lors de sa mise en œuvre, sans pour autant réduire ses résistances mécaniques finales.

Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants.

#### **I.8.5.b. Les superplastifiant :**

Les superplastifiant sont des polymères de synthés fabriquer spécialement pour l'industrie du béton, ils améliorent la fluidité en réduisent le rapport  $\frac{E}{C}$

A l'heure actuelle cinq familles des superplastifiants qui sont utilisé :

- 1- Les polycondensats de formaldéhyde et de naphthalène sulfoné (PNS)
- 2- Les polycondensats de formaldéhyde et de mélamine sulfonée (PMS)
- 3- Les lignosulfonates

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

4- Les polyacrylates

5- Les polycarboxylates [14].

## ➤ Superplastifiants à base de carboxylates :

### • Définition :

Les superplastifiants à base de polycarboxylates ont été mis au point après les Polysulfonates et sont pour cette raison communément appelés superplastifiants de nouvelle génération.

La molécule d'un superplastifiant de type polycarboxylate est composée d'une **chaîne Principale**, qui porte les fonctions carboxylates —COO- et sur laquelle sont greffées de nombreuses **chaînes secondaires**.

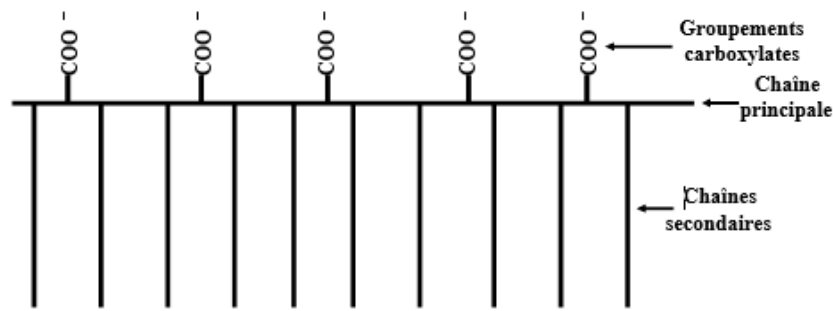


Figure I.2. Polymère de type « peigne ». [14].

### I.8.5.c. Mode d'action (eau + ciment) :

En raison de leurs compositions chimiques différentes, les particules de ciment peuvent présenter des charges différentes. Les charges opposées vont s'attirer les unes les autres. Les particules de ciment vont flocculer et augmenter la viscosité du coulis.

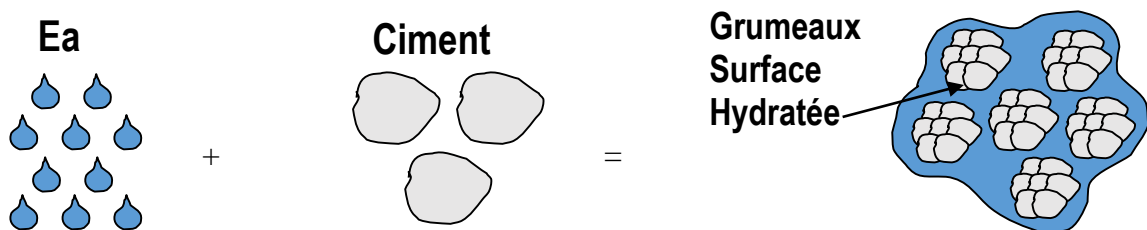


Figure I.3. Mode d'action eau-ciment.

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

## I.8.5.d. Mode action des polycarboxylate (l'encombrement ou répulsion stérique) :

L'encombrement stérique est le type de répulsion créée par les superplastifiants de type polycarboxylate. Les polymères anioniques s'adsorbent à la surface des particules et les chaînes secondaires s'étendent aux alentours.

Lors du rapprochement de deux grains de ciment, les couches d'adsorption des superplastifiants se chevauchent. La densité de chaînes augmente et les molécules d'eau vont s'accumuler dans la solution. Cela a pour conséquence l'apparition d'une pression osmotique, laquelle maintient les particules séparées l'une de l'autre

L'encombrement stérique apparaît dès que la distance entre les polymères adsorbés est inférieure à deux fois l'épaisseur des polymères. L'encombrement stérique est donc une force purement répulsive, qui n'agit que si les molécules sont très proches [14].

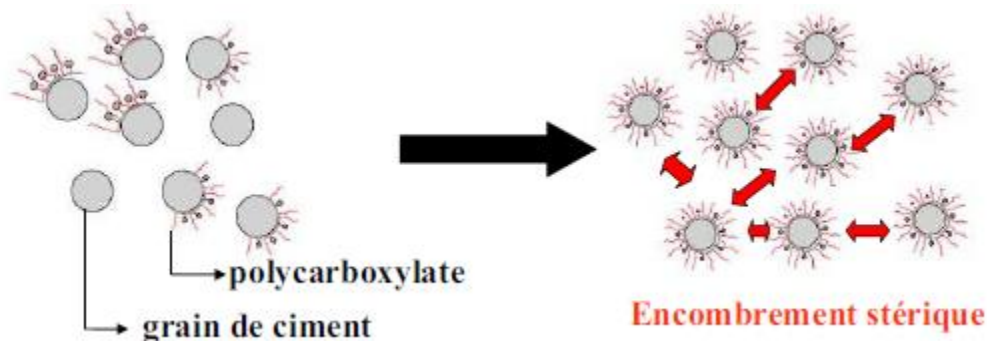


Figure I.4. Mode d'action de polycarboxylate. [14].

L'introduction des polycarboxylates et PNS diminuent le rapport E/C mais de façon différente tel que les polycarboxylates sont plus efficaces que les PNS. Avec un rapport atteignant 0,12.

## I.9. Les propriétés du béton autoplaçant :

L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales :

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams).
- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L).
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis).

✓ **Spécification des BAP à l'état frais :**

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

|   | Cat. 1                           | Cat. 2a            | Cat. 2b            | Cat. 3a            | Cat. 3b            |
|---|----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Valeur maximale au tamis <sup>(1)</sup> | 20 %                             | 20 %               | 15 %               | 15 %               | 10 %               |
| Valeur minimale à la boîte en L         | Pas de prescription particulière | 0,80 avec 2 barres | 0,80 avec 2 barres | 0,80 avec 3 barres | 0,80 avec 3 barres |

**Tableau I.2.** Spécification des BAP. [6].

Deux options sont possibles pour valider la formulation :

- Le BAP répond aux critères du tableau précédent,
- Les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage (Dans le domaine de la FEF (Fourchette d'étalement à la fabrication).

✓ **Contrôles à la réception :**

Les contrôles de réception sont essentiellement basés sur l'essai d'étalement.

La fourchette d'étalement à la réception est définie suite à l'essai de qualification.

Elle peut être définie sur la base d'une valeur cible (et des variations admissibles) ou bien par désignation d'une classe d'étalement selon le tableau suivant :

| Classe | Etalement (mm) |
|--------|----------------|
| SF1    | 550 à 650      |
| SF2    | 660 à 750      |
| SF3    | 760 à 850      |

**Tableau I.3.** Classe d'étalement des BAP. [6].

### I.10. Essais à l'état frais :

#### I.10.1. Essai d'étalement au cône d'Abrams (NF EN 12350-8) :

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, La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 550 et 850 mm La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement.

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. [15]

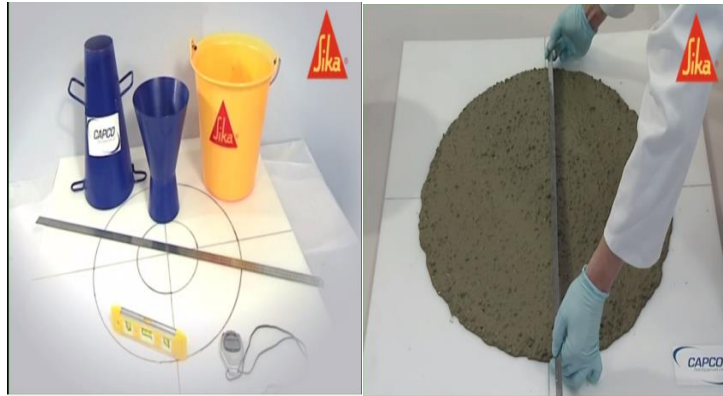


Figure I.5. Essai d'étalement

## I.10.2. Essai de la boîte en L (NF EN 12350-10) :

La boîte en « L » permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage. 13 litres de béton sont mis dans la partie verticale puis on laisse le béton se reposer pendant 1 minute. La trappe est ensuite levée et le béton s'écoule dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage. A la fin de l'écoulement, on mesure les hauteurs  $H_1$ ,  $H_2$  et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage  $H_2/H_1$ . Ce rapport permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. [16]

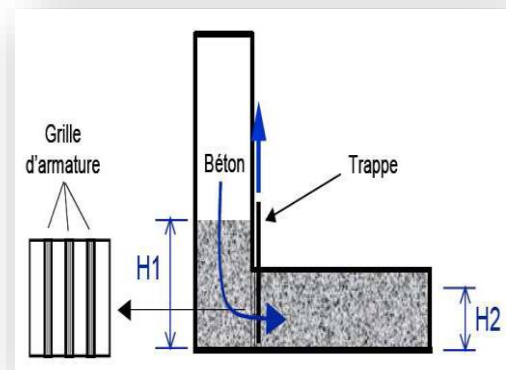


Figure I.6. Essai de la boîte en L.

## I.10.3. Essai stabilité au tamis NF EN 12350-11 :

A la fin du malaxage, dix litres de béton sont versés dans un seau. Après une attente de quinze minutes, une masse 4,8 kg de béton est versée du seau sur un tamis de maille 5mm.



Figure I.7. Essai de stabilité au tamis.

Deux minutes plus tard, on pèse la quantité de pâte (laitance) ayant traversé le tamis. Il consiste à mesurer la proportion  $\pi$  d'éléments fins de béton

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

(laitance) passant au travers le tamis pour qualifier le béton vis-à-vis du risque de ségrégation et de déduire si le béton testé possède une stabilité satisfaisante ou non. Les critères d'acceptabilité d'une formulation de BAP sont divisés en trois classes : [15]

- $0\% < \pi$  (laitance)  $< 15\%$  : stabilité satisfaisante,
- $15\% < \pi$  (laitance)  $< 30\%$  : stabilité critique,
- $\pi$  (laitance)  $> 30\%$  : stabilité très mauvaise (ségrégation systématique, Béton inutilisable).

### I.10.4. Essai d'entonnoir :

La procédure d'essai avec l'entonnoir est la suivante : l'entonnoir dont les dimensions sont définies. La figure est remplie de béton jusqu'en haut. Le clapet de fermeture située sa base est ensuite ouverte, ce qui provoque l'écoulement du béton, dont on mesure le temps nécessaire jusqu'à ce que l'entonnoir se soit entièrement vidé. Dans la littérature scientifique, ce temps d'écoulement est souvent le critère utilisé pour définir la viscosité du béton auto compactant. Plus le



Figure.I.8.Essai d'entonnoir.

béton s'écoule rapidement hors de l'entonnoir, plus sa viscosité est faible. Un temps d'écoulement compris entre 8 et 14 secondes est recommandé pour le BAP. [16].

### I.10.5. Essai d'étalement modifié :

L'essai d'étalement modifié (**J-Ring**) fut développé au Japon et consiste à faire s'écouler le béton au travers de barres d'armature afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage. A cet effet, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique. Sur cet anneau de 300 mm de diamètre sont soudées des barres d'armature  $\varnothing$  16 à 18 mm, espacées régulièrement d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP satisfait pleinement aux performances recherchées de fluidité avec faible tendance à la ségrégation et d'enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière uniforme au travers de cet anneau et lorsque la répartition des granulats paraît homogène, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'anneau. [16]

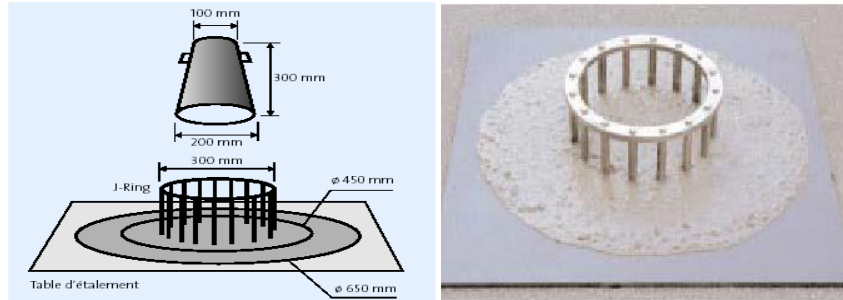


Figure I.9. Essai d'étalement modifié.

### I.10.6. Essais complémentaires sur béton frais :

#### ✓ Mesure de la teneur en air occlus :

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais, on utilise la méthode dite « par pression ». Comme le seul élément compressible dans le béton frais est l'air occlus, la compression de l'air fait chuter la pression appliquée au béton frais. Cette diminution est proportionnelle à la quantité d'air présente dans le béton. Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre selon la norme française

Le pourcentage de l'air occlus dans les bétons autoplaçants n'est pas limité à une valeur fixe, mais, plus il augmente plus il influe négativement sur les performances mécaniques de notre béton. [13]

#### ✓ Les masses volumiques EN 12350-6 :

La masse volumique réelle du béton frais doit être systématiquement mesurée. Cela permet de vérifier le rendement de la composition en comparant la masse volumique déterminée expérimentalement avec la masse volumique théorique. Elle est mesurée par la pesée d'un récipient de 8 litres (fond de l'aéromètre) remplis de béton autoplaçant sans vibrer (*Figure I-12*).

La masse volumique réelle MVR est normalement égale à la masse volumique théorique MV calculée à partir de la formulation théorique du béton avec comme source d'incertitude la quantité d'air occlus. [13]





Figure I.10. Mesure de la masse volumique réelle.

### I.11. Essais à l'état durci :

Les particularités de composition des bétons autoplaçants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons et plus particulièrement les déformations instantanées et différées, supposées différents de celles des bétons vibrés [17]

#### I.11.1. Résistance à la compression :

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. L'utilisation du filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune Age. Les particules fines du filler, l'ors qu'elles sont bien défloculées par les super plastifiants, 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 du BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50% à 80% de celle de référence à 7 jours et 20 à 40% à 28 jours, ils ont expliqué 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 adjuvant dans les formulations de BAP aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. L'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges. [17]

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

### I.11.2. Résistance à la traction :

Gibbs 99 ont contactés qu'il n'y a 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 de références. En comparant des mélanges de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction. [17]

### I.10.3. Le retrait :

Nous distinguons deux types essentiels de retrait : retrait endogène et retrait de dessiccation.

#### ✓ **Retrait endogène :**

En utilisant plusieurs compositions de BAP et une composition traditionnelle, le retrait endogène des BAP était plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50 et 200  $\mu\text{m}$ ) que celui des bétons vibrés.

#### ✓ **Retrait de dessiccation :**

En ce qui concerne le retrait de dessiccation, deux modes opératoires de séchage (mode 1 : séchage immédiat pour se rapprocher des conditions chantier sans cure ; mode 2 conservation dans l'eau pendant 28 jours). pour les conditions les moins favorable(mode1), les déformations de retrait dues au séchage des BAP étaient supérieures de 100  $\mu\text{m}/\text{m}$  à celle du béton traditionnel avec une fourchette de valeurs allant de 450 à 650  $\mu\text{m}/\text{m}$ . pour le mode 2 ,les résultats sont plus mitigés car certaines compositions ont des retraits identiques (entre 350 et 550  $\mu\text{m}/\text{m}$ ), alors que d'autres affichent des retraits supérieurs de 150  $\mu\text{m}/\text{m}$ . il été constaté que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des bétons ordinaires et ceci parce que la quantité de fine qu'ils contiennent est plus importante.

Le retrait de dessiccation est d'autant plus important que le rapport E/C est grand.

L'ajout de filler calcaire ne semble pas avoir un rôle prépondérant.

Ces données contradictoires résultent de la comparaison des BAP et de béton de compositions totalement différentes en termes d'E/C, de volume de pâte, de compacité granulaire etc.

On retiendra, compte tenu des connaissances acquises à ce jour, que :

- Le retrait endogène des BAP est au plus égal à celui du béton ordinaire.
- Le retrait de dessiccation des BAP est supérieur ou égal à celui du béton ordinaire.[17]

---

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

### I.11.4. Module d'élasticité :

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si le BAP contiennent une baisse quantité de gros granulats si on se réfère à la formule réglementaire du module «  $E_{ij}=11000f_c^{1/3}$  », 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. [17]

### I.11.5. Le fluage :

Le fluage peut être défini comme augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieurs à la déformation sous l'application d'une charge, la prise en compte fluage est d'une importance considérable lors de calcul des structures de bétons. Le phénomène de fluage dépend de la distribution des efforts au sein de la structure et aussi de type de matrice de ciment. Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pou BO. Ces résultats sont confirmés par turcry, ou il indique qu'en compression, le fluage total est identique à celui de BO. [17]

### I.12. Formulation des BAP :

La plupart des formules de BAP sont conçues actuellement de manière empirique. La méthode de Dreux-Gorisse n'est pas adaptée, car elle ne prend en compte ni les adjuvants ni les additions, alors que ce sont des composants essentiels d'un BAP. La formulation est donc basée sur l'expérience acquise ces dernières années.

Dans l'industrie du bâtiment, on utilise principalement des bétons de 25 à 35 MPa, et par expérience on sait que ces résistances dites « ordinaires » sont facilement atteintes par les bétons autoplaçants

Avec l'expérience acquise ces dernières années, certains ordres de grandeurs pour les proportions des constituants sont maintenant connus et utilisés :

- Le volume de gravillons est limité en prenant un rapport G/S (masse de gravillons sur masse de sable) proche de 1.
- Le volume de pâte varie entre 330 et 400 l/m<sup>3</sup>.
- La masse du ciment est supérieure ou égale au minimum requis par la norme BPE (P18 305), soit en général de 300 à 350 kg/m<sup>3</sup>. En complément la masse d'addition se situe entre 120 et 200 kg/m<sup>3</sup>.

# Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

- Le dosage en superplastifiants est proche de son dosage à saturation.

La formulation se fait donc par tâtonnement sur la base de ces plages. Après la conception sur le papier, la formule ne peut être optimisée et vérifiée que par des essais effectués la plupart du temps directement sur béton. [18].

## I.12.1. Paramètres pris en compte pour la formulation des bétons ordinaires et autoplaçants :

| Béton autoplaçant (BAP)  | Béton ordinaire (BO)  |
|--|---|
| Priorité donnée au comportement du béton à l'état frais          | Priorité donnée à la résistance mécanique du béton à l'état durci |
| Le rapport E/C correspond à la fluidité                          | Le rapport E/C correspond à la résistance mécanique du béton      |
| La résistance du béton est un paramètre sujet à une vérification | La résistance du béton est un objectif pour sa formulation        |

**Tableau I.4 :** Comparaison BAP-BO au niveau de la formulation. [6].

## I.13. Fabrication, transport et mise en place des BAP :

### I.13.1 Fabrication des BAP :

En principe tous les types de malaxeurs conviennent pour la fabrication des BAP. Lors de l'introduction des différents constituants dans le malaxeur, on appliquera les mêmes consignes que celles recommandées pour les bétons vibrés, en les adaptant aux conditions locales dans chaque cas particulier.

L'intensité et le temps de malaxage ainsi que l'ordre d'introduction des constituants sont des facteurs qui influent fortement sur l'homogénéité du béton, sur l'effet optimal des additions et des adjuvants, c'est la raison pour laquelle on fixe le temps de malaxage à 120 secondes, cette moyenne peut être ajustée selon l'efficacité du malaxeur [5]

### I.13.2. Transport des BAP :

En raison de sa fluidité élevée, le béton autoplaçant doit être transporté en camion malaxeur. Comme dans le cas d'un béton vibré, la fluidité du béton peut se modifier durant le transport, la manière et l'ampleur de cette modification sont fonction de plusieurs paramètres :

Le type d'adjuvant, la durée de transport, le dosage en eau et la température. [5]

## Chapitre I : Les bétons autoplaçants «BAP»

---

Dans une certaine mesure il est possible de corriger ces modifications pour vérifier les exigences d'ouvrabilité souhaitées au moment du déchargement sur chantier.

Dans le cas de rajouts d'adjuvant dans le camion, il est recommandé de respecter impérativement le temps de malaxage minimal recommandé pour assurer la dispersion de l'adjuvant et sa répartition homogène dans l'ensemble du chargement de béton. En revanche tout ajout d'eau est à proscrire. [5]

### **I.13.3.Mise en place des BAP :**

Par rapport au béton vibré la mise en place du béton autoplaçant est grandement facilitée, elle peut être réalisée par une seule personne et selon trois méthodes différentes :

La première méthode est celle utilisée pour les bétons ordinaires vibrés, la mise en place se fait à l'aide d'une goulotte. Pour limiter le phénomène de ségrégation favorisé par ce procédé il convient de fixer la hauteur de chute maximale du béton à 5m.

La deuxième méthode consiste à utiliser un tube plongeur immergé dans le béton frais, dans la partie inférieure du coffrage.

La mise en place des BAP peut se faire par pompage, par cette troisième méthode il y a réduction du bullage et obtention de parements lisses.

Pour réussir les ouvrages en béton autoplaçant il est capital d'appliquer scrupuleusement les recommandations de fabrication, de transport et de mise en œuvre. [5]

### ***Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre***

*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*

#### **II.1. Introduction :**

Le verre est un des plus anciens matériaux connus par l'homme [19]. Dans le temps préhistorique déjà on utilisait les obsidiennes pour la confection des couteaux, pointes de flèches...etc. Ce verre naturel provenant en Europe principalement des îles grecques des mélos et de théra. Le plus ancien objet daté de verre produit par l'homme a été découvert en Égypte, ils remontent à environ 300 ans avant J.C, mais vraisemblablement la matière d'obtenir le verre a été découverte auparavant en Mésopotamie environ 4500 avant J.C. [20]

L'utilisation de verre en tant que matériau en soi a été précédée par celle des émaux sur poteries, dont certaines datent de 12000 ans avant J.C, les origines de cette découverte restent obscures.

Aujourd'hui, le verre est fabriqué industriellement dans des usines verrières. L'automatisation des verres creux et l'avènement de l'obtention du verre plat par flottage « Float » favorisent l'accroissement considérable des quantités de production permettant ainsi aux verres d'occuper une place indispensable dans l'économie moderne « bâtiments, transport, éclairage, industrie chimique, etc... ». Le verre apporte également des solutions originales aux nouvelles technologies « laser, téléphone, fibre optique, conservation d'énergie ». [21]

---

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

Le verre est un corps amorphe qui possède une résistance chimique élevée qui permet de conserver différentes solutions pour des périodes pratiquement illimitées, il peut être coloré en différentes

Couleurs ainsi il satisfait le goût esthétique. Mais le plus important c'est que grâce à la couleur, on peut régler l'absorption partielle du verre et les différents domaines du spectre et protéger le produit emballé contre la lumière et la chaleur. [22]

Ce matériau a l'avantage d'être recyclé à l'infini, chaque année des tonnes de produit verrerie se trouve dans nos poubelles, ces produits issus de notre consommation quotidienne « bouteilles en verre, emballage...etc. ». Ces déchets constituent une menace majeure sur notre environnement car ces produits mettront beaucoup de temps pour se dégrader si on ne les traite pas convenablement. A l'heure actuelle beaucoup d'associations tirent la sonnette d'alarme pour avertir les gouvernements et les citoyens de danger que ces déchets peuvent causer à la nature. Alors les dirigeants des gouvernements n'ont pas hésité à prendre des mesures et mettre des lois pour diminuer le volume de ces déchets qui nuisent à notre environnement.

### **II.2. Définition du verre :**

Les verres sont des solides amorphes, d'habitude des substances inorganiques, formés après solidification sans cristallisation. Ils sont caractérisés par l'absence d'un point de fusion fixe, contrairement à ce que se passe avec les corps cristallisés. Lors du refroidissement, ils traversent une zone de température durant laquelle toutes les propriétés physiques « indice de réfraction, densité, coefficient de dilatation » subissent des variations importantes ; d'où l'appellation de cet intervalle « zone de transformation ». [23]

En générale le verre est un matériau transparent, homogène et fragile. Il résiste au feu et au contact de tous les liquides et solides, c'est un solide non cristallin « amorphe » qui ne présente pas l'ordre à longue distance c'est un état particulier de la matière « état vitreux ».

#### **II.2.1. Structure du verre :**

La structure du verre n'a été élucidée de façon satisfaisante que depuis une cinquantaine 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.

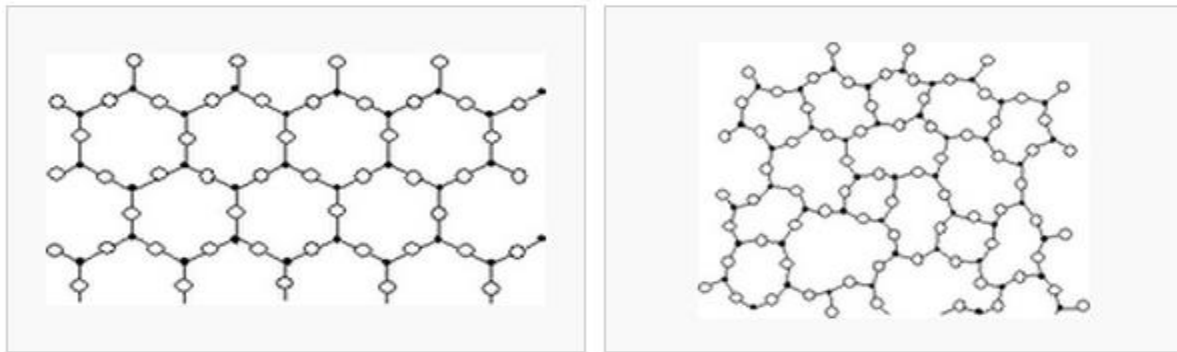
## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

Les travaux de **W.L BRAGG** ont démontré l'existence de tétraèdre de Si constituant l'élément constitutif universel des silicates. [24]

Les idées actuelles sur la structure des verres reposent notamment sur les travaux de **ZACHARIASEN** et de **WAREN** qui voit dans le verre aussi bien fondu que solide un ordre rapproché des tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  formateurs de verre, relie par des ponts d'oxygène.

La différence essentielle entre les verres et les substances cristallines est que dans les cristaux, il existe un ordre plus général en plus de l'ordre rapproché des groupes coordonnés forment un réseau régulier remplissant le volume. Dans les verres ; cet ordre plus général n'existe pas, et les groupes coordonnés constituent un réseau irrégulier « figure 1 ».



La structure de  $\text{SiO}_2$  cristallisée

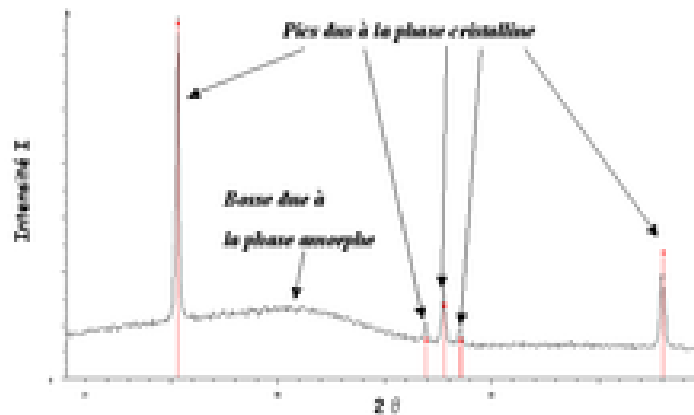
la structure de  $\text{SiO}_2$  vitreux

**Figure II.1).** Structure de  $\text{SiO}_2$ . [25].

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres  $\text{SiO}_4$  (c'est l'ordre à courte distance) ; chaque tétraèdre pouvant être considéré comme une « brique » de l'édifice final. Mais tandis que la cristobalite peut être définie comme un empilement régulier de ces briques  $\text{SiO}_4$  (elle a un ordre à grande distance), la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement anarchique de ces mêmes briques  $\text{SiO}_4$  (elle n'a plus d'ordre à grande distance) [25, 26].

Une approche cinétique consiste à fixer un taux minimal des cristaux en deçà duquel le matériau peut être considéré comme étant un verre homogène, ce taux minimal est souvent exprimé sous forme de pourcentage de transformation « 3% est choisi volontairement faible, il correspond à la quantité minimale de cristaux susceptibles d'être décelée par la diffraction RX. [27]

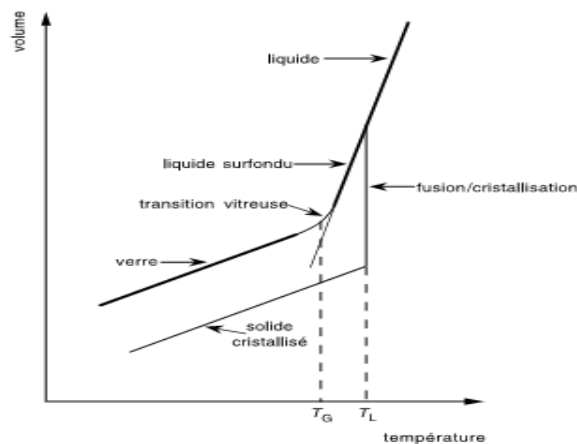




**Figure II.2.** Diffractogramme de rayons X d'un mélange de deux composés : l'un vitreux et l'autre cristallin [27]

### II.2.2. Transition vitreuse :

Le phénomène de la transition vitreuse est bien illustré par l'évolution du volume en fonction de la température. La figure (3) montre schématiquement l'exemple d'un liquide suffisamment visqueux à  $T_L$  pour franchir cette température sans cristalliser. C'est l'étape la plus importante dans la fabrication du verre. La transition vitreuse est le passage du verre de l'état liquide vers l'état solide passant par l'état pâteux. Elle est caractérisée par sa température de **transition vitreuse  $T_g$** . Lors du refroidissement rapide du verre à la sortie du four, le verre passe de l'état liquide à l'état plastique (pâteux) ensuite se transforme en solide c'est le produit du verre.



**Figure II.3.** : la transition vitreuse. [27]

### II.2.3. Type du verre industriel :

1. **Verreplat** : Verre « float » ou verre flotté ; Verre coulé

2. **Verre creux** : Verre moulé : utilisé surtout pour fabriquer des bouteilles ; Verre étiré : produit semi-fini permettant de réaliser des ampoules, des flacons ou de la verrerie de laboratoire.

3. **Verretrempe** : Trempe thermique : Des traitements thermiques permettent d'améliorer la résistance des pièces : les vitres latérales et arrières des automobiles comme certaines pièces d'ameublement sont trempées par un refroidissement rapide et contrôlé, le plus souvent par de l'air. Trempe chimique : Ce type de trempe à lieu en remplaçant par diffusion une partie des ions alcalins par d'autres ions alcalins de plus gros rayon ionique. Par exemple le sodium ou le lithium du verre par des ions potassium [25, 26].

4. **Verre feuilleté** : Composé de couches verre-plastique-verre ou plus. Les pare-brises des automobiles et les vitres blindées sont en verre feuilleté. Ainsi, lors d'un choc, le pare-brise se casse, mais reste en place. Les passagers risquent moins d'être blessés par des bris. Le verre blindé ayant 8 couches de plastique peut résister à 70 coups de hache avant d'être traversé. [25, 26]

### II.3. Verre issu de recyclage :

Le verre usagé peut être traité soit par réemploi direct (système de consigne où les Bouteilles sont récupérées, lavées et réutilisées) soit comme matière première (verre concassé ou « calcin » et fondu) pour la fabrication de nouveaux verres. Ce dernier constitue l'essentiel du recyclage du verre dans le monde.

La réutilisation du verre dans divers domaines s'est accrue. Les déchets de verre sont utilisés comme matières premières pour la production d'abrasifs au jet de sable, comme substitut d'agrégat dans le béton, les chaussées et les parkings. Les déchets de verre sont également employés comme matières premières dans la production des pastilles ou des perles de verre utilisés dans la peinture réfléchissante sur les routes, pour la production des fibres de verre. Quant à la poudre de verre, elle peut être utilisée comme lubrifiant, additifs de base dans la fabrication de fonderie de métaux et dans l'industrie céramique. En agriculture, une incorporation du verre pilé, apporte des modifications chimiques, physiques et biologiques au sol. [28]. *Le verre possède un large domaine d'utilisation et peut être recyclé pour de nouvelles applications.*

### **II.4. Le déchet du verre « calcin » :**

#### **II.4.1. Introduction :**

*On peut définir les déchets comme les résidus des activités de production et de consommation auxquels on n'attache, dans le contexte où ils sont produits, aucune valeur économique soit parce qu'ils ne peuvent plus être employés avec les méthodes de production actuelles, soit parce que le marché n'a pas encore été organisé en vue de les diriger vers une utilisation ultérieure [29].*

Si l'on se rapporte à cette définition, le verre n'est pas à considérer comme un déchet. Ce dernier étant actuellement très largement récupéré par collecte sélective et ensuite presque entièrement recyclé. Le « déchet verre » étant considéré dans l'industrie verrière comme une matière première (groisil ou calcin) qui permet d'ailleurs de nombreuses économies comme nous le verrons plus loin. [30]

Le calcin est du verre de récupération qu'on emploie comme matière première. Le calcin ménager résultant de la collecte des emballages auprès des particuliers est devenu la matière première la plus importante en volume devant le sable et la seconde en coût derrière le carbonate de sodium. En 2003, la France a recyclé 58 % du verre d'emballage et 88 % en Allemagne où le tri du calcin par couleur permet de l'utiliser pour la fabrication du verre blanc. [31]

#### **II.4.2. Définition :**

Le terme « calcin » désigne tous produit verrier qui n'est pas conforme aux normes, c'est-à-dire qu'il n'est pas apte à être utilisé sous forme initiale. Tout déchet de verre. Il peut être considéré comme matière première dans quelque procédé de fabrication des articles verriers comme il peut être introduit dans la charge selon un taux bien défini, car il est connu comme un fondant de premier ordre.

L'utilisation du calcin soit comme matière première, soit comme fondant importante par ce qu'elle permet de réduire les problèmes de pollution de l'environnement et la récupération des produits inutilisables et la réduction des fumées qui provoquent la pollution atmosphérique et permet encore de faire une grande économie d'énergie et de matière première destinée à la fabrication.



**Figure II.4.** Calcin traité du verre. [32]

Le calcin (verre broyé) 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 est 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...etc.

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

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

### **II.5. Verre expansé :**

#### **II.5.1. Introduction :**

En matière d'isolant, faire un choix judicieux relève souvent du parcours du combattant. Il n'est pas facile, en effet, de se retrouver dans la profusion des produits proposés. Entre le prix, les performances thermiques et acoustique, la résistance à l'eau et au feu, la facilité de mise en œuvre, les impacts sur la santé et sur l'environnement..., ou mettre les priorités.

Si certains matériaux sont reconnus sains pour l'environnement et pour la santé, leur production ou leur distribution encore réduite, leur coût et la difficulté de trouver des corps de métier expérimentés pour leur mise en œuvre les rendent encore parfois difficiles d'accès.

---

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

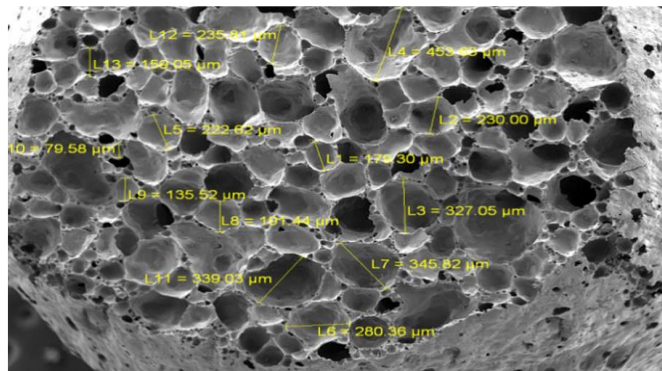
Le choix du matériau d'un isolant est évidemment d'offrir une bonne résistance à la transmission de la chaleur, mais on exige généralement aussi d'un isolant des qualités complémentaires fonctions des impératifs de mise en œuvre.

### II.5.2. Définition :

Le verre mousse ou verre multicellulaire est un matériau de construction avec une porosité dépassant 50%, obtenu par frittage d'un mélange de poudre de verre avec un agent moussant. Ce type de verre est destiné essentiellement pour l'isolation acoustique et thermique.

Le mélange de base est composé de 90 à 99 parties pondérales de verre pulvérisé et de 1 à 10 parties pondérales d'agent moussant « porophore » qui se décompose en libérant un gaz à la température de ramollissement du verre, En qualité d'agent moussant on utilise le coke, le sulfate de magnésium et généralement le carbonate de calcium.

Sa résistance au passage de l'humidité dépasse celle des verres habituels, il est formé d'un nombre incommensurable de petites cellules hermétiques contenant un gaz sec et immobile conservé sous faible pression. [33].



**Figure II.5.** Image prise par MEB sur le granulat de verre mousse [34]

### II.5.3. Composition chimique :

Le verre expansé est un matériau écologique obtenu à partir d'un mélange des matières premières : poudre de verre « calcin », et un agent moussant «  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MnO}_3$  ou  $\text{MgSO}_4$  » et l'argile après un traitement thermique.

La composition chimique du verre expansé est la même que celle du verre de base.

### II.5.4. Principe de fabrication :

Il est fabriqué à partir du verre recyclé « sous forme de poudre » par l'ajout d'un agent moussant que l'on élabore à 850C<sup>0</sup> « frittage ».

On distingue deux procédés de fabrication :

#### II.5.4.1. Procédé discontinu :

Consiste à introduire le mélange « calcin et agent moussant » dans un moule fermé et lui appliquer un cycle thermique soigneusement établi de façon à permettre :

- Au verre de se ramollir avant que l'agent moussant ne soit décomposé par l'élévation de température.
- A l'agent de provoquer un bullage fin et régulier au sein du verre en cours de frittage.
- Au produit formé de pouvoir être démoulé avant sa recuisson.

Le procédé discontinu a l'avantage, surtout lorsqu'il s'agit d'un produit d'environ de 0.4 de densité de permettre la fabrication de nécessiter des moules en métal inoxydable dont l'amortissement et l'entretien entraînent des frais importants. [35].

#### II.5.4.2. Procédé continu :

On a cherché à pallier les défauts de procédé discontinu en utilisant le procédé continu :

1. Pour l'intermédiaire des boulettes pré moussées au cours d'une chute entre des brûleurs, les boulettes étant ensuite agglomérées par un frittage approprié ou par collage.
2. Par un procédé direct, par exemple à partir d'un lit de poudre de verre déposé sur un ruban de verre plat en fin de laminage. [35]

#### II.5.4.3. Frittage :

C'est un procédé qui a pour but l'élaboration d'objet et qui consiste à agglomérer sous l'action de la chaleur des particules de verre, préalablement réunies en vue d'obtenir un solide sans atteindre nécessairement le point de fusion de ses constituants.

Donc on peut dire que le frittage est un processus faisant évoluer par traitement thermique un système constitué de particules, en l'absence de pression externe exercée ou

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

sous l'effet d'une telle pression, de ce fait il y'a réduction de l'énergie libre globale du système.

➤ **Processus physique de frittage :**

Le processus de frittage qui peut être facilement simulé en une densification de la matière s'effectue en trois stades :

- **Formation des ponts :**

C'est un commencement du processus de frittage qui s'illustre par une union des particules entre elles due à la formation des ponts.

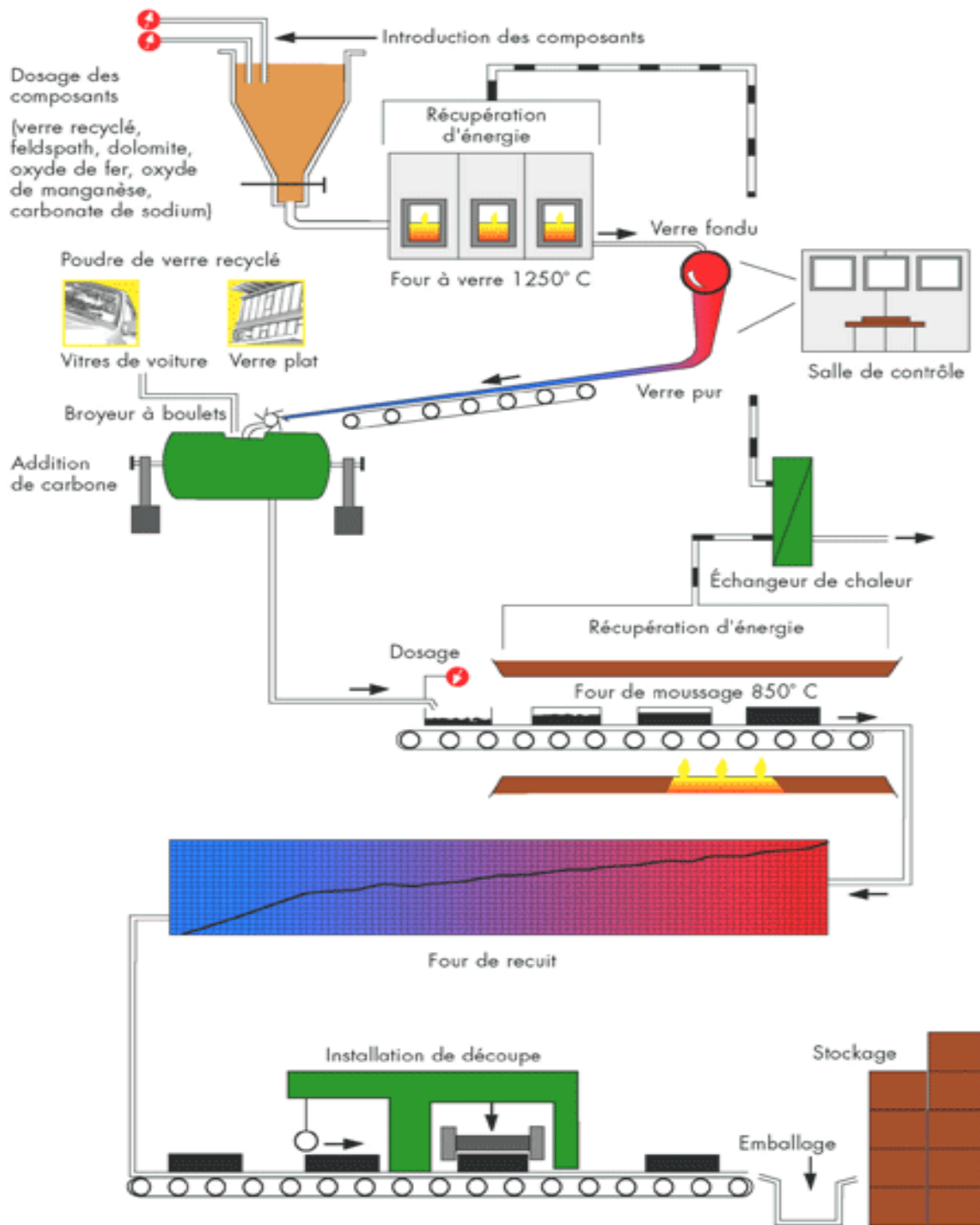
- **Densification d'une phase vitreuse et croissance des grains :**

Le frittage continu, on peut alors observer une croissance des grains ; la formation des ponts progresse et on peut alors parler d'une structure tridimensionnelle dans laquelle la tension superficielle qui tendra à diminuer la surface de contact en faisant de telle sorte à obtenir la forme la plus sphérique possible permet l'arrondissement des arêtes vives et la formation d'une structure poreuse.

- **Formation de la porosité fermée :**

Par élévation de la température les pores ont tendance à prendre des formes sphériques et à cause de la croissance des grains à rester isolés dans la masse du produit. [36]

### II.5.5. Fabrication industrielle :



**Figure II.6.** Procédé de fabrication de verre mousse Certifié ISO 9002. [37]



### II.5.6. Caractéristique du verre mousse :

- ✓ Composition chimique : verre chimiquement pur, totalement inorganique sans addition de liant.
- ✓ Résistance aux acides : résiste à tous les acides communément employés ainsi qu'à leurs vapeurs, à l'exception de l'acide fluorhydrique.
- ✓ L'hygroscopicité : pas d'augmentation de poids, après exposition pendant 246 jours à l'air à 90% d'humidité relative.
- ✓ Température d'emploi : de 260C<sup>0</sup> à 850C<sup>0</sup>.
- ✓ Point de fusion : 900C<sup>0</sup>.
- ✓ Point de ramollissement : 750C<sup>0</sup>.
- ✓ Incombustibilité : total « essai de C.S.T.B. Paris ». Cet essai consiste à chauffer un échantillon à 760C<sup>0</sup> pendant 2 heures dans une enceinte fermée : On n'observe pas d'émission de vapeurs inflammables.
- ✓ Résistance à la traction : 4.6 kgf/cm<sup>2</sup>.
- ✓ Résistance à la flexion : 5.3 kgf/cm<sup>2</sup>.
- ✓ Résistance au cisaillement : 2.8 kgf/cm<sup>2</sup>.
- ✓ Isolement acoustique « phonique » brut : 28Db pour une épaisseur de 10 cm.

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

➤ **Caractéristique technique du verre cellulaire « foamglass » :**

| Caractéristiques techniques   | <b>T<sub>4</sub></b>              | <b>S<sub>3</sub></b>       | <b>F</b>                   |
|---|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Conductivité thermique W/m.C <sup>0</sup>                                       | <b>0.042</b>                      | <b>0.044</b>               | <b>0.048</b>               |
| Résistance a la compression kg/cm <sup>2</sup>                                  | <b>7</b>                          | <b>9</b>                   | <b>16</b>                  |
| Absorption d'eau par immersion  | <b>Nulle</b>                      | <b>Nulle</b>               | <b>Nulle</b>               |
| Perméabilité a la vapeur d'eau suivant Norme AFNOR NFX 41.001 « essai du CSTB » | <b>Nulle</b>                      | <b>Nulle</b>               | <b>Nulle</b>               |
| Résistance a la diffusion de vapeur d'eau μ                                     | <b>Infinie</b>                    | <b>Infinie</b>             | <b>Infinie</b>             |
| Classement au feu PV n <sup>0</sup> 87.13991 sans limitation de durée           | <b>M0</b>                         | <b>M0</b>                  | <b>MO</b>                  |
| Masse volumique kg/m <sup>3</sup> ±10%  | <b>120</b>                        | <b>135</b>                 | <b>180</b>                 |
| Coefficient de dilatation linéaire /C <sup>0</sup>                              | <b>8.5×10<sup>-6</sup></b>        | <b>8.5×10<sup>-6</sup></b> | <b>8.5×10<sup>-6</sup></b> |
| Stabilité dimensionnelle  | <b>Parfaite</b>                   | <b>Parfaite</b>            | <b>Parfaite</b>            |
| Résistance aux agents chimiques   | <b>Tous acides et leur vapeur</b> |                            |                            |
| Module d'élasticité a la flexion kg/cm <sup>2</sup>                             | <b>8000</b>                       | <b>12000</b>               | <b>15000</b>               |
| <b>Caractéristiques du produit</b>  |                                   |                            |                            |

Composition : l'isolant en verre cellulaire Foamglass T4, S3 et F est un produit 100% verrier « verre alumino-silicaté » totalement inorganique sans liant.

- Dimensions : 60×45 cm
- Epaisseur : 4 à 16 cm
- L'exception de l'acide fluorhydrique

**Tableau II.1 : Caractéristiques techniques des plaques en verre cellulaire Foamglass. [38]**

### II.5.7. Domaine d'application des verres expansé :

#### ❖ Applications industrielles :

Dans les applications industrielles, nous classons l'isolation des réservoirs et tuyauteries a haute et a base températures, y compris les températures cryogéniques « inférieur a  $-150C^0$  », l'isolation des tuyauteries enterrés, celle des cheminées industrielles et les isolations effectuées à bord des navires. [38].

#### ❖ Bâtiments :

Dans le domaine, nous exigeons essentiellement les bâtiments importants tels que les centres administratifs, centres d'achats, écoles, hôpitaux...etc.

Les principales applications sont :

- Sous forme des panneaux : utilisé pour les toitures plates et inclinées.
- Sous forme des blocs : ils sont placés sous la maçonnerie et préviennent ainsi les ponts thermiques.
- Les parkings terrasses et terrasses accessibles.
- Les doubles murs.
- Les revêtements muraux.
- Les panneaux d'allégés.
- L'isolation des plafonds.
- L'isolation péri métrique : horizontale et verticale.
- Les cheminées. [38].

### II.6. Granulats de verre mousse :

#### II.6.1. Définition :

Le granulat de verre cellulaire est un nouveau matériau minéral de construction et d'isolation avec un large éventuel de domaines d'applications. Produit à partir de 100% de verre recyclé trié, la matière première est broyée et chauffée après adjonction d'un produit naturel d'expansion [39]. 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 emplis d'un gaz incolore et non toxique. [40].



**Figure II.7.** Granulat à base du verre mousse [41].

#### II.6.2. Principe de fabrication :

La fabrication des granulats de verre mousse s'effectue en cinq temps :

- ✓ Préparation de la composition.
- ✓ Mise en forme des granulats.
- ✓ Séchage et préchauffage des granulats.
- ✓ Traitement thermique « expansion ».
- ✓ Refroidissement.

Les produits obtenus sont repartis en trois classes granulométriques :

« 3 à 8 mm, 8 à 16 mm et 16 à 25 mm ».[40].

### II.6.3. Agents moussants :

La relation entre la viscosité et la température de moussage est très sensible à tous changements dans la composition des matières premières.

Une importance particulière est donnée aux agents moussants. Plusieurs d'entre eux laissent un résidu après leurs décompositions ou leurs réactions, ces produits de réaction finement distribués peuvent changer quelques propriétés du verre tel que la viscosité ou la tendance à la cristallisation.

Par conséquent, chaque agent moussant est à étudier pour son influence sur ces propriétés et en respectant leur concentration optimale.

Le même agent moussant peut se comporter différemment dans des verres différents le même verre peut donner différentes structures selon qu'on utilise tel ou tel agent.

Le comportement physique et les réactions chimiques des agents moussants dans la production des matériaux légers à partir de poudre de verre sont un peu complexes et non entièrement élucidés.

Pour la fabrication de verre mousse certaines précautions doivent être prises en considération :

- ✓ La poudre de verre ne doit se cristalliser durant le chauffage et le refroidissement.
  - ✓ Les réactions de moussage doivent être spontanées.
- Ce deuxième point limite :
- ✓ Le nombre des agents moussants qui peuvent être utilisés.
  - ✓ L'intervalle de température. [41]

#### II.6.3.1. Classification des agents moussants :

En générale, les agents moussants peuvent être classés en deux groupes.

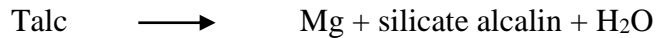
##### ➤ Le groupe 1 :

Les agents moussants qui se décomposent au-dessus du point de ramollissement du verre avec dégagement de gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ).

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

Quelques exemples de réactions :



La concentration efficace de ces oxydes varie entre 1 et 1.5%.

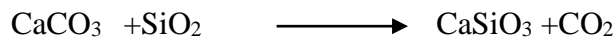
### ➤ Le groupe 2 :

Les agents moussants qui réagissent avec l'atmosphère et le verre au-dessus du point ramollissement, les plus utilisés sont le carbone et composés de carbone comme sucre l'amidon et des déchets organiques.

En fonction de la composition du verre « présence des sulfates » et le type de carbone « cokes, graphite » le moussage peut être réalisé dans différentes atmosphères « air, nitrogène, réductrice de 0.2 à 2% ».

Les gaz produits sont dus à l'oxydation du carbone par l'atmosphère mais aussi à la réaction du carbone avec quelques constituants du verre tel que  $\text{H}_2\text{O}$ , alcalins, sulfates, le produit mousse a une structure à pores fins et les gaz emprisonnés sont principalement du  $\text{CO}_2$  ou un mélange  $\text{CO}_2/\text{CO}$ .

**Exemple :**  $\text{CaCO}_3$



### II.7. Les caractéristiques des granulats de verre mousse :

- **Résistance aux agents chimiques**

Les granulats 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.

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

- **Résistance aux agents biologiques**

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

- **Comportement au feu**

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

- **Grande 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.

- **Mise en œuvre simple**

Son faible poids assure une mise en œuvre rapide sure chantier livraison de la matière en vrac par camion sur chantier.

- **Leger**

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

- **Economisez 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 couts 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, dalla de sol en béton peut être écoulee.
- ❖ Economie grâce à une réduction durable des couts de chauffage.

## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

**Tableau II.2.** Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé [40] :

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

### **II.8. Domaine d'application de granulat de verre mousse :**

Le granulat de verre mousse est le plus souvent utilisé sous la dalle de sol. Il existe beaucoup de possibilités d'utilisation comme :

- ❖ Isolation latérale de l'extérieur du mur de la cave
- ❖ Constructions industrielles et commerciales.
- ❖ Constructions de plafonds à grande charge admissible.
- ❖ Isolation de piscines.
- ❖ Rénovation du bâti existant.

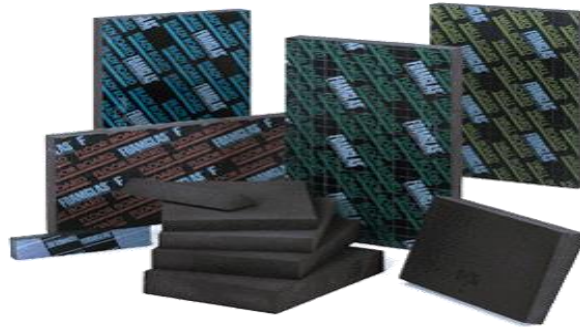


## Chapitre II. Généralité sur les déchets du verre

---

Grace à ses excellentes caractéristiques, le granulat e verre cellulaire s'emploie également pour le génie civil ainsi pour des constructions spéciales :

- ❖ Routes.
- ❖ Fondations hors gel d'infrastructures et de places.
- ❖ Stabilisation des pentes.
- ❖ Drainage/ conduites d'eau.
- ❖ Terrains de sport.



**Figure II.8.**Domaine d'application des granulats de verre mousse. [42]

### Chapitre III. Matériaux utilisés

Notre travail pratique a pour objectif de caractériser trois matériaux composites élaborés à base des granulats légers (granulats de verre mousse). Les trois matériaux composites sont élaborés à base de trois liants différents : Béton à base de liant hydraulique qui est le ciment, de liant aérien qui est le plâtre et en fin un béton résineux à base de liant organique. Pour réaliser ce travail, la méthodologie suivie et les différentes caractéristiques des constituants entrant dans la composition des matériaux d'études, seront présentées dans ce chapitre

#### III.1. Caractéristique des constituants :

##### III.1.1. Ciment :

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment composé de type CEM II/B 42.5N de classe de résistance 42.5, produit par la cimenterie de **LAFARGE**, les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques et mécaniques sont données dans les tableaux suivants :

##### III.1.1.a. Caractéristiques physiques :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques du ciment.

| Caractéristiques   | Résultats | Unités               | Norme       |
|--------------------|-----------|----------------------|-------------|
| Consistance normal | 28        | (%)                  | NF EN 196-3 |
| Début de prise     | 150       | (min)                | NF EN 196-3 |
| Fin de prise       | 188       | (min)                | NF EN 196-3 |
| SSB                | 3750-5250 | (Cm <sup>2</sup> /g) | NF EN 196-6 |
| Expansion          | 0.3-2.5   | (g/cm <sup>3</sup> ) | NF EN 196-5 |
| Retrait à 28 jours | <100      | (µm/mm)              | NF EN 197-7 |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

### III.1.1.b. Caractéristiques mécaniques :

**Tableau III.2 :** Résistance à la compression et à la flexion pour prisme du ciment « 40×40×160 »mm » :

| Résistance «Mpa » | 1J     | 2J     | 7J     | 28J    |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Compression       | 11.444 | 20.447 | 35.906 | 45.057 |
| Flexion           | 1.902  | 4.278  | 5.912  | 6.876  |

### III.1.1.c. Caractéristiques chimiques :

**Tableau III.3 :** Composition chimique du ciment.

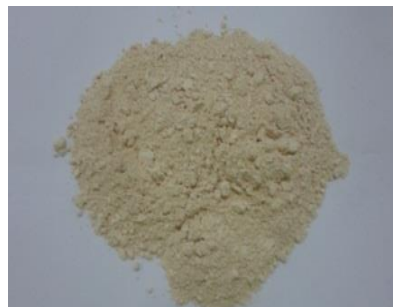
| CaO   | SiO2  | AL2O3 | Fe2O3 | SO3  | Na2O | K2O  | MgO  | Chlorures | PAF  | insoluble |
|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----------|------|-----------|
| 61.90 | 15.80 | 4.15  | 2.31  | 2.80 | 0.06 | 0.69 | 2.39 | 0.023     | 9.59 | 0.7-2     |

**Tableau III.4 :** Composition minéralogique du ciment.

| Éléments | C <sub>3</sub> S | C <sub>2</sub> S | C <sub>3</sub> A | C <sub>4</sub> AF | CaO | gypse | calcaire | pouzzolane |
|----------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-----|-------|----------|------------|
| %        | 58               | 16               | 7                | 12                | 01  | 06    | 17       | -          |

### III.1.2. Fillers du calcaire :

C'est un calcaire issu du gisement El-khroub qui occupe la partie sud-ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.



**Figure III.1.** Fillers du calcaire.

## Chapitre III. Matériaux utilisés

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

| Eléments | CaO    | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | MgO   | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | PAF |
|----------|--------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|------------------|-------|-------------------------------|------------------|-----|
| %        | 65.03% | 0.04%            | 0.03%                          | 0.02%                          | 0.05%             | 0.02%            | 0.17% | 0.008%                        | 0.009%           | 43% |

|  |         |
|--|---------|
| Chlorure                                 | 0.0033% |
| SO <sub>3</sub> « soluble dans l'eau »   | 0.0021% |
| SO <sub>3</sub> « soluble dans l'acide » | 0.19%   |
| Soufre total                             | 0.0137% |
| Résidu insoluble                         | 1.15%   |
| Solubilité dans l'eau « W <sub>s</sub> » | 0.24%   |
| Ph                                       | 9%      |

**Tableau III.6.** Propriétés physiques du calcaire.

|                                   |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Masse volumique réelle            | 2.7 gr/cm <sup>3</sup>  |
| Masse volumique en vrac           | 1.11 gr/cm <sup>3</sup> |
| Valeur de bleu de méthylène MB    | 1.67 gr/kg              |
| Finesse suivant la méthode Blaine | 8379 gr/cm <sup>2</sup> |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

### III.1.3. Sable :

Les sables utilisés sont le sable grossier de **Sétif** et le sable fin roulé de **Boussaâda**. Après traitement du sable, on a obtenu les résultats des essais physiques et l'analyse granulométrique comme indique les tableaux ci-dessous.



Figure III.2.Sable de Setif et de Boussaâda.

#### III.1.3.1. Caractéristiques du sable :

Tableau III.7 : Caractéristiques physiques du sable concassé (0/5) selon la norme NF EN 933-1 :

| Caractéristiques          | Résultats | Unité             |
|---------------------------|-----------|-------------------|
| Masse volumique apparente | 1.19      | g/cm <sup>3</sup> |
| Masse volumique absolue   | 2.43      | g/cm <sup>3</sup> |
| Absorption                | 0.61      | %                 |
| EVS                       | 89        | %                 |
| ESP                       | 89        | %                 |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

**Tableau.III.8** : Analyse granulométrique par tamisage du sable concassé (0/ 5) de **Setif** selon la norme NF EN 933-1 :

| Ouverture des tamis<br>« mm » | Poids en « g » | Teneur « % » |                | Mf          |
|-------------------------------|----------------|--------------|----------------|-------------|
|                               | Refus cumulé   | RC « % »     | Tamisat cumulé |             |
| <b>6.3</b>                    | <b>5</b>       | <b>0.33</b>  | <b>99.76</b>   | <b>3.43</b> |
| <b>4</b>                      | <b>40</b>      | <b>2.67</b>  | <b>97.33</b>   |             |
| <b>2</b>                      | <b>460</b>     | <b>30.66</b> | <b>69.34</b>   |             |
| <b>1</b>                      | <b>855</b>     | <b>57</b>    | <b>43</b>      |             |
| <b>0.5</b>                    | <b>1145</b>    | <b>67.33</b> | <b>23.67</b>   |             |
| <b>0.25</b>                   | <b>1265</b>    | <b>84.33</b> | <b>15.67</b>   |             |
| <b>0.125</b>                  | <b>1385</b>    | <b>92.33</b> | <b>7.67</b>    |             |
| <b>0.063</b>                  | <b>1435</b>    | <b>95.66</b> | <b>4.34</b>    |             |

Le module de finesse :

$$Mf = \frac{\sum \text{refus des tamis } 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5}{100} = 3.43$$

On remarque que le sable de **Setif** a un module de finesse élevé « 3.43 », d'où la nécessité d'ajouter un sable de correction. **Sable de Boussaâda**

**Tableau III.9** : Caractéristiques physiques du sable de **Boussaâda** selon la norme

NF EN 933-1

| Caractéristiques                 | Résultats   | Unité                   |
|----------------------------------|-------------|-------------------------|
| <b>Masse volumique apparente</b> | <b>1.19</b> | <b>g/cm<sup>3</sup></b> |
| <b>Masse volumique absolue</b>   | <b>2.45</b> | <b>g/cm<sup>3</sup></b> |
| <b>Absorption</b>                | <b>0.68</b> | <b>%</b>                |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

**Tableau III.10** : Analyse granulométrique par tamisage du sable de **Boussaâda** selon la norme NF EN 933-1 :

| Ouverture des tamis<br>« mm » | Poids en « g » | Teneur « % » |               | Mf          |
|-------------------------------|----------------|--------------|---------------|-------------|
|                               | Refus cumulé   | RC « % »     | Tamisé cumulé |             |
| <b>1</b>                      | <b>855</b>     | <b>57</b>    | <b>43</b>     | <b>1.15</b> |
| <b>0.5</b>                    | <b>1145</b>    | <b>67.33</b> | <b>23.67</b>  |             |
| <b>0.25</b>                   | <b>1265</b>    | <b>84.33</b> | <b>15.67</b>  |             |
| <b>0.125</b>                  | <b>1385</b>    | <b>92.33</b> | <b>7.67</b>   |             |
| <b>0.063</b>                  | <b>1435</b>    | <b>95.66</b> | <b>4.34</b>   |             |

On fait la correction de sable (0/5) par le sable fin « sable de BOUSSAADA » selon la méthode d'Abrams, pour le module de finesse désiré est 2,9, selon les relations suivantes :

$$S1 = \frac{Mf_x - Mf_2}{Mf_1 - Mf_2} \times 100 \quad \longrightarrow \quad S1 = \frac{2.9 - 1.15}{3.43 - 1.15} \times 100 = 77\%$$

$$S2 = \frac{Mf_1 - Mf_x}{Mf_1 - Mf_2} \times 100 \quad \longrightarrow \quad S2 = \frac{3.43 - 2.9}{3.43 - 1.15} \times 100 = 23\%$$

## Chapitre III. Matériaux utilisés

### 1. Analyse granulométrique du sable corrigé :

**Tableau III.11** : Analyse granulométrique par tamisage du sable corrigé selon la norme

NF EN 933-1 :

| Ouverture des tamis<br>« mm » | Poids en « g » | Teneur « % » |                | Mf  |
|-------------------------------|----------------|--------------|----------------|-----|
|                               | Refus cumulé   | RC « % »     | Tamisât cumulé |     |
| 6.3                           | 0              | 0            | 100            | 2.9 |
| 4                             | 25             | 0.25         | 99.75          |     |
| 2                             | 275            | 27.5         | 72.5           |     |
| 1                             | 440            | 44           | 56             |     |
| 0.5                           | 530            | 53           | 47             |     |
| 0.25                          | 615            | 61.5         | 38.5           |     |
| 0.125                         | 905            | 90.5         | 9.5            |     |
| 0.063                         | 980            | 98           | 2              |     |

### III.1.4. Gravier :

#### III.1.4.1. Caractéristiques physiques :

**Tableau III.12** : Caractéristiques physiques du gravier 3/8 de setif :

| Caractéristiques          | Résultats | Unité             |
|---------------------------|-----------|-------------------|
| Masse volumique apparente | 1.36      | g/cm <sup>3</sup> |
| Masse volumique absolue   | 2.48      | g/cm <sup>3</sup> |
| Teneur en eau             | -         | %                 |
| Absorption                | 3.33      | %                 |



## Chapitre III. Matériaux utilisés

### 2. Analyse granulométrique de gravier 3/8 :

**Tableau III.13 :** Analyse granulométrique par tamisage du gravier 3/8 selon la norme NF EN 933-1 :

| Tamis « mm » | Refus « g » | Refus « % » | Tamisat « % » |
|--------------|-------------|-------------|---------------|
| 8            | 40          | 1.33        | 98.67         |
| 6.3          | 485         | 16.1        | 83.9          |
| 4            | 2240        | 74.66       | 25.34         |
| 2            | 2915        | 97.16       | 2.84          |

**Tableau III.14 :** Caractéristiques physiques du gravier 8/15 de Sétif :

| Caractéristiques          | Résultats | Unité             |
|---------------------------|-----------|-------------------|
| Masse volumique apparente | 1.42      | g/cm <sup>3</sup> |
| Masse volumique absolue   | 2.5       | g/cm <sup>3</sup> |
| Teneur en eau             | -         | %                 |
| Absorption                | 1.38      | %                 |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

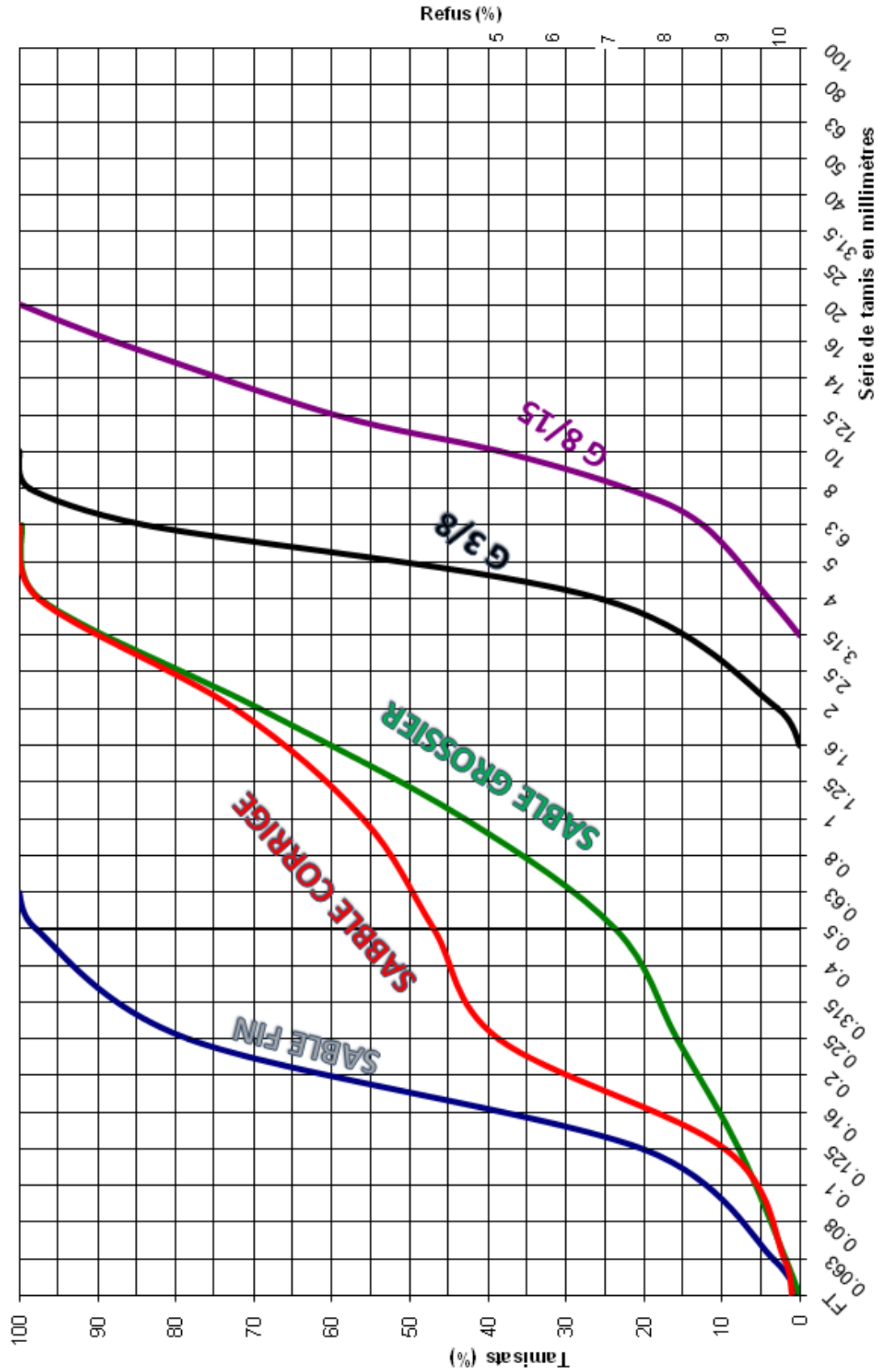
---

3. Analyse granulométrique de gravier 8/15 :

4. **Tableau III.15** : Analyse granulométrique par tamisage du gravier 8/15 selon la norme NF EN 933-1 :

| Tamis « mm » | Refus « g » | Refus « % » | Tamisat « % » |
|--------------|-------------|-------------|---------------|
| 16           | 620         | 12.4        | 87.6          |
| 12.5         | 2016        | 40.3        | 59.7          |
| 10           | 3070        | 61.4        | 38.6          |
| 8            | 3895        | 77.9        | 22.1          |
| 6.3          | 4380        | 87.6        | 12.4          |
| 4            | 4805        | 96.1        | 3.9           |

## Chapitre III. Matériaux utilisés



**Figure III.3.** Courbe granulométrique du mélange.

## Chapitre III. Matériaux utilisés

---

### III.1.5. Déchets de verre (calcin) :

#### a) Récupération de calcin :

C'est le déchet de verre plat récupéré au niveau de l'unité de RABRAB (chutes de float-glass).

#### b) Triage :

Pour obtenir un moussage bien régulier, il faut utiliser une même composition chimique de calcin. Dans cette optique on fait un triage selon la couleur et la composition chimique de verre.

#### c) Concassage et broyage :

Le concassage c'est la désagrégation des plaques de verre pour faciliter le broyage. Afin de réduire sa dimension, et pour obtenir une poudre de granulométrie adéquate, le calcin doit subir une opération de broyage jusqu'à l'obtention d'une poudre fine.

#### d) Tamisage :

C'est un procédé qui permet la ségrégation des grains non voulus, cela peut s'effectuer dans des tamis vibrants. Dans notre cas on a utilisé le tamis de 200 $\mu$ m.



Figure III.4. Poudre de calcin 200 $\mu$ m.

Tableau. III.16. Analyse chimique du calcin par fluorescence X

| éléments | 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> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | PAF  |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|------|
| « % »    | 72.65            | 0.94                           | 0.44                           | 10.83 | 0.24            | 1.90 | 0.53             | 11.34             | 0.01                          | 0.02             | 1.09 |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

Tableau.III.17. Propriétés physiques du calcin

| Caractéristiques                  | Résultats                 |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Masse volumique absolue           | 2.50 (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Finesse suivant la méthode Blaine | 2139 (g/cm <sup>2</sup> ) |

### III.1.6. Déchets de la brique (Chamotte)

Le déchet de brique a été récupéré de l'unité briquetterie de **Bouzegza**, la chamotte doit subir une opération de broyage jusqu'à l'obtention d'une poudre fine de 200µm.



Figure III.5. Déchet de brique « chamotte » 200µm.

Tableau.III.18. Analyse chimique de la chamotte par fluorescence X.

| Éléments | 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> | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | PAF  |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------|------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|------|
| « % »    | 54.61            | 14.40                          | 6.22                           | 16.06 | 0.66            | 2.09 | 1.95             | 0.77              | 0.24                          | 0.68             | 2.32 |

## Chapitre III. Matériaux utilisés

Tableau.III.19. Propriétés physiques du la chamotte

| Caractéristiques                  | Résultats                 |
|-----------------------------------|---------------------------|
| Masse volumique absolue           | 2.81 (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Finesse suivant la méthode Blaine | 5908 (g/cm <sup>2</sup> ) |

### III.1.7. Superplastifiants :

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant haute réducteur d'eau dit « **VISCOCRETE TEMPO 544** » fabriqué par **SIKA**.

Le « **VISCOCRETE TEMPO 544** » est un superplastifiant haute réducteur d'eau de nouvelle génération non chloré à base de polycarboxylates modifiés qui améliorent Considérablement les propriétés des bétons, il permet d'obtenir des bétons et des mortiers de très haute qualité.

La notice technique de produit donne les propriétés suivantes :

#### III.1.7.1. Caractéristiques :

1. Aspect.....Liquide.
2. Couleur.....Marron.
3. PH..... 5±1.
4. Densité..... 1.07±0.01
5. Teneur en ions cl<sup>-</sup>..... ≤ 0.1%
6. Teneur en Na<sub>2</sub>O Eq.....≤1%
7. Extrait sec..... 32±1.2%

#### III.1.7.2. Domaine d'utilisation :

1. **Sika VISCOCRETE TEMPO 544** permet la fabrication de béton plastiques a autoplaçant transporté sur de longues distances et pompés.
2. Dans les bétons autoplaçant Sika VISCOCRETE TEMPO 544 améliore la stabilité, limite la ségrégation du béton et rend les formules moins susceptibles aux variations d'eau et des constituants.
3. Bétons avec granulats concassés « même avec taux d'absorption très élevée ».

## Chapitre III. Matériaux utilisés

---

### III.1.7.3. Dosage :

1. Plage d'utilisation recommandé 0.5 à 3% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.
2. Plage d'utilisation usuelle 0.6 à 1.5% du poids du ciment ou du liant.

### III.1.7.4. Caractères généraux :

Sika VISCOCRETE TEMPO 544 est un superplastifiant très puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

1. Longue rhéologie « >2h30 ».
2. Robustesse a la ségrégation.
3. Qualité de parement.

### III.1.7.5. Mise en œuvre :

Sika VISCOCRETE TEMPO 544 est ajouté, soit en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.

### III.1.7.6. Conditionnement :

Le Sika VISCOCRETE TEMPO 544 est conditionné en futs de 200kg, CP de 1000L et en vrac.

### III.1.7.7. Stockage :

Dans un local fermé, a labri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30C<sup>0</sup>.

Sika VISCOCRETE TEMPO 544 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine.

### III.1.7.8. Conservation :

1ans en emballage intact.

### III.1.9. La Résine :

La résine utilisé est une résine époxydique a deux composants polyvalente et a base viscosité dite « **sikafloor-156** ».

Le **sikafloor-156** satisfait aux exigences des normes NF EN 13813 « matériaux chapes » et NF EN 1504-2 « systèmes de protection des surfaces pour béton ».

## Chapitre III. Matériaux utilisés

---

### III.1.9.1. Utilisation :

1. Comme primaire pour les résines et mortiers époxydiques et les chapes hydrauliques.
2. Primaire pour support ou poreux.
3. Primaire pour les systèmes SIKA époxydiques ou polyuréthanes.
4. Liant pour confectionner un coulis époxydique et un mortier époxydiques.
5. Pour un usage intérieur ou extérieur.

### III.1.9.2. Caractéristiques :

1. Basse viscosité.
2. Bon pouvoir mouillant.
3. Excellente adhérence.
4. Facilité d'application.
5. Faible temps d'attente.
6. Polyvalent.

### III.1.9.3. Couleur :

1. **Composant A** : liquide transparent
2. **Composant B** : liquide brunâtre.

### III.1.9.4. Caractéristiques techniques :

1. **Nature chimique** : résine époxydique.
2. **Densité** : composant A : ~ 1.1kg/L  
Composant B : ~1.2 kg/L  
Mélange A+B : ~1.1 kg/L
3. **Extrait sec** : ~100% de volume/ ~100% « en poids » ~

### III.1.9.5. Caractéristiques mécaniques :

4. **Résistance à la compression** : ~95N/mm<sup>2</sup>
5. **Résistance à la flexion** : ~30N/mm<sup>2</sup>
6. **Adhérence** : >1.5N/mm<sup>2</sup> « rupture dans le béton »
7. **Dureté** : ~83 « 7jours »



## Chapitre III. Matériaux utilisés

---

### III.1.9.6. Conditionnement :

1. Kit pré-dosé de 10kg
2. Gross emballage : kit de 240kg  
Composant A : 180kg  
Composant B : 60kg

### III.1.10. Le plâtre :

Le plâtre est un liant aérien qui durci uniquement à l'air, sa qualité dépend de sa finesse de mouture, des impuretés contenues dans le gypse, des délais de prise et de sa résistance. Du fait de sa faible coefficient de conductivité thermique( $\gamma$ ), le plâtre s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois.

**Tableau.III.20.** Caractéristiques physiques du plâtre :

| Caractéristiques    | Résultats | Unités            |
|---------------------|-----------|-------------------|
| Finesse de mouture  | 24        | %                 |
| Consistance normale | 64        | %                 |
| Début de prise      | 4         | min               |
| Fin de prise        | 40        | min               |
| Masse volumique     | 1.8       | g/cm <sup>3</sup> |
| Masse spécifique    | 2.6       | g/cm <sup>3</sup> |

### III.1.11. Eau de gâchage :

L'eau utilisée pour le gâchage de béton est une eau potable du réseau public de la ville d'Eucalyptus.

## Chapitre III. Matériaux utilisés

---

### III.2. Composition des granulats par un traitement thermique :

Nos granulats sont élaborés à partir d'un mélange de calcin, calcaire et de la chamotte.

Les granulats ont été fabriqués par un traitement thermique.

**GVM** : mélange « % calcin + % calcaire+ % chamotte ».

#### III.2.1.Préparation du mélange :

1. **Dosage** : C'est une opération qui consiste à une alimentation du mélange avec les quantités désirées.
2. **Homogénéisation** : Elle a pour but d'obtenir une répartition bien régulière et constante des grains dans toute la masse du mélange.

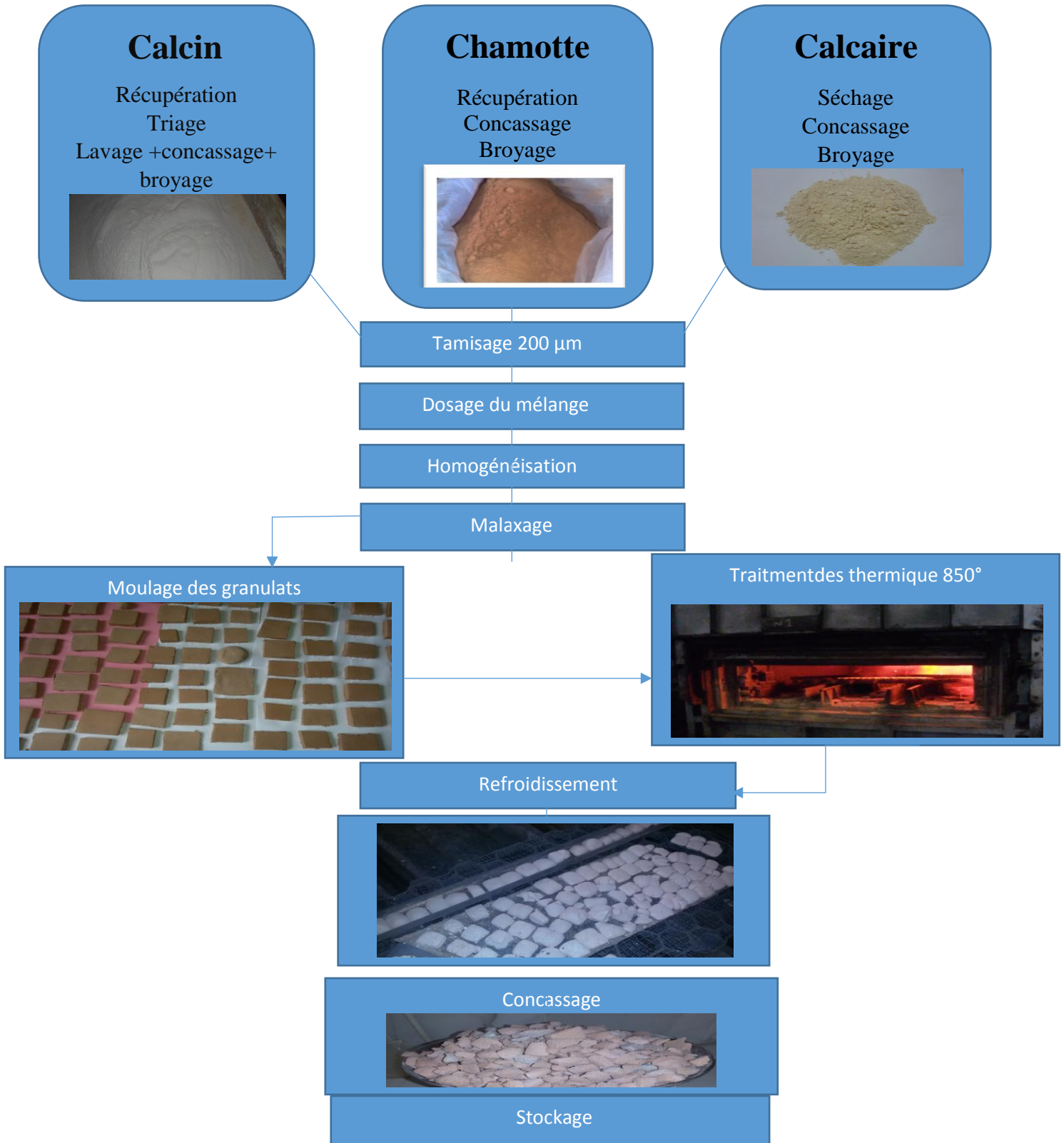
#### 3. **Elaboration des granulats de verre expansé :**

L'élaboration des granulats est faite par la voie humide c.-à-d. une quantité d'eau est ajoutée au mélange des granulats artificiels jusqu'à l'obtention d'une pâte modelable. En laisse la pâte se reposer pendant 24 heures. Les granulats de différentes formes sont fabriqués manuellement.



**Figure III.6.** Elaboration des granulats de verre mousse.

### Chapitre III. Matériaux utilisés



**Figure III.7.** Schéma technologique proposé pour la fabrication des granulats du verre expansé

## Chapitre III. Matériaux utilisés

### III.2.2. Régime thermique choisi :

Le régime de frittage est entre 750 et 900 °C, pour notre cas on a choisi un régime thermique de 850 °C. La température de chauffage augmente linéairement avec une vitesse de 10C<sup>0</sup>/min jusqu'à 850 °C, on fixe la température pendant un palier de 10minutes, enfin on laisse refroidir à l'intérieur du four pour permettre au matériau d'acquérir une bonne résistance mécanique. [43.44.45]

**Tableau.III.21.** Analyse chimique des granulats artificiels avant frittage.

| Éléments | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | PAF  |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|------|
| %        | 71.72            | 1.6                            | 0.71                           | 10.20 | 1.89 | 0.24            | 0.63             | 11.47             | 0.01                          | 0.05             | 1.48 |

**Tableau.III.22.** Analyse chimique des granulats artificiels après frittage.

| Éléments | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | SO <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | TiO <sub>2</sub> | PAF  |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|------|
| %        | 71.44            | 2.40                           | 0.41                           | 9.96 | 1.94 | 0.21            | 0.53             | 11.47             | 0.01                          | 0.01             | 1.63 |



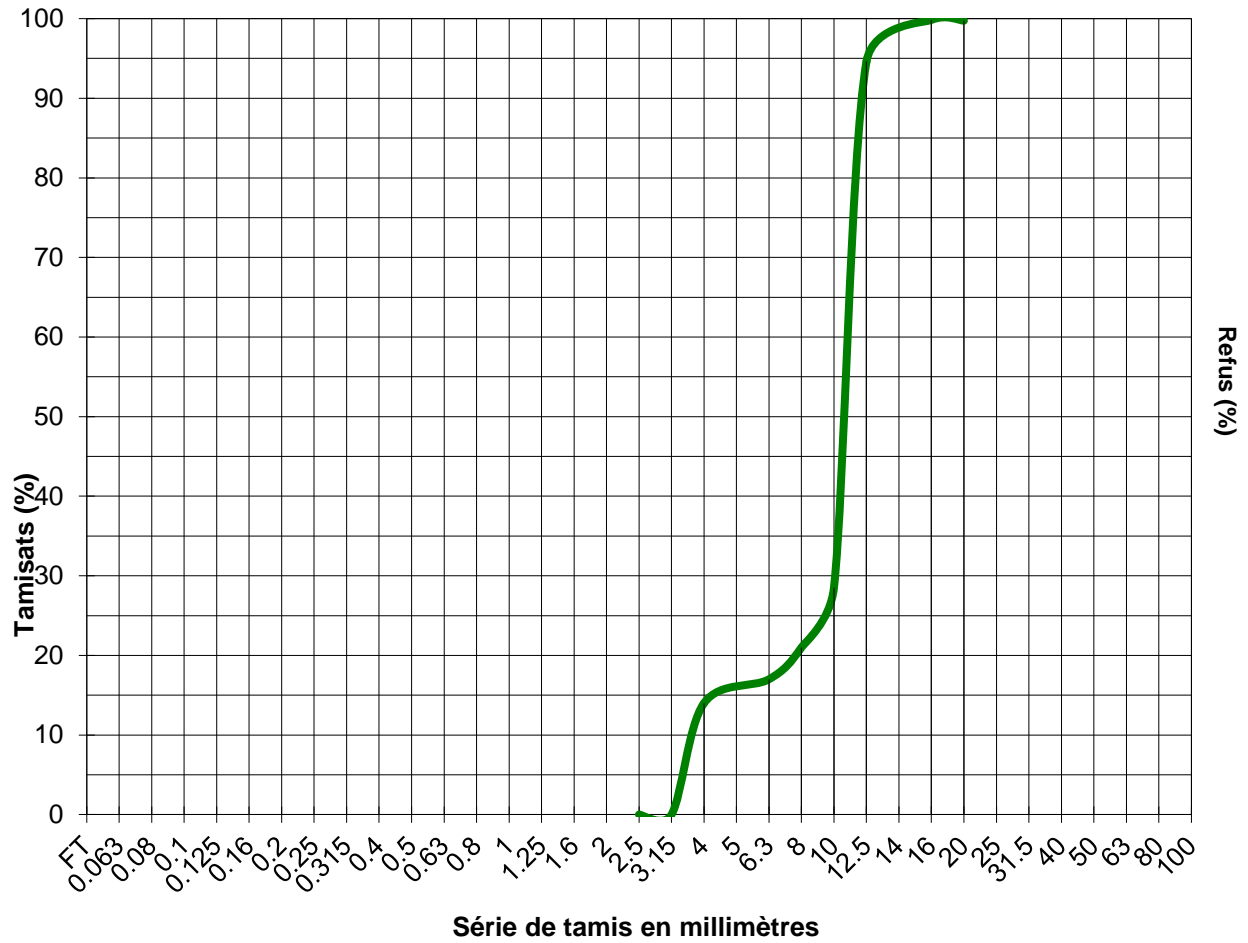
**Fig III.8.** Granulats de verre avant concassage



**Fig III.9.** Granulats de verre après concassage.

## Chapitre III. Matériaux utilisés

### III.2.3. La distribution granulométrique des granulats de verre mousse :



**Figure III.23.** La distribution granulométrique des granulats de verre mousse.

### *Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études*

*Dans ce chapitre, nous avons procédé à la formulation de trois composites à base de trois liants (hydraulique, aérien et organique). Ces matériaux ont été choisis selon le liant utilisé ainsi que le domaine d'application des matériaux isolants. Pour cela, le béton autoplaçant à base des granulats de verre mousse, le matériau plâtre à base le même type des granulats et en fin un béton résineux à base de granulats de verre mousse.*



#### **Le but de travail :**

La présente étude a pour but d'élaborer trois matériaux composites à différentes matrices « ciment, plâtre et résine » pour la confection des panneaux légers et isolants, dont la matière de base d'élaboration est les granulats de verre mousse.

## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

### IV.1. Confection d'un matériau composite à base de liant hydraulique et de granulats de verre mousse « BAP » :

Dans cette formulation on à utiliser le ciment comme liants hydraulique avec un ajout qui est le filler de calcaire selon la méthode *JAPONAISE*.

#### IV.1.1. Formulation d'un BAP par la méthode japonaise :

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

| Constituants                  | BAP 0 Masse « kg/m <sup>3</sup> » |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Ciment                        | 400                               |
| Eau                           | 178.73                            |
| Ajout « filler de calcaire »  | 56                                |
| Adjuvant « superplastifiant » | 5.47                              |
| Sable « 0/5 »                 | 612.5                             |
| Sable « 0/1 »                 | 185.73                            |
| Gravier « 3/8 »               | 420.14                            |
| Gravier « 8/15 »              | 419.3                             |

#### IV.1.2 .Résistance à la compression et caractéristique à l'état frais :

**Etalement :** 640 (mm)

**Masse volumique réelle à l'état frais :** 2310 kg/m

**Stabilité au tamis  $\pi$  :** 0.26%

Tableau IV.2. essai de la résistance à la compression du BAP

| Jour | Résistance à la compression (MPa) |
|------|-----------------------------------|
| 1    | 2.89                              |
| 7    | 41.04                             |
| 28   | 49                                |

## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

### IV.1.3. Formulation du béton :

Tableau IV.3. Composition des différentes formulations d'un m<sup>3</sup>.

| Constituants               | BAP 0       | BAP            | BAP MV         |
|----------------------------|-------------|----------------|----------------|
| Ciments [kg]               | 400         | 200            | 200            |
| Eau [kg]                   | 178.73      | 195            | 195            |
| Ajout [kg]                 | 56 (14%)    | 255 kg (56%)   | 255 kg (56%)   |
| Adjuvant [kg]              | 5.47 (1.2%) | 6.82 kg (1.5%) | 6.82 kg (1.5%) |
| Sable (0/5) [kg]           | 612.5       | 0              | 0              |
| Sable (0/1) [kg]           | 185.73      | 775.42         | 775.42         |
| Gravier (3/8) [kg]         | 420.14      | 387.7          | 0              |
| Gravier (8/15) [kg]        | 419.3       | 395.6          | 0              |
| Granulas verre mousse [kg] | 0           | 0              | 6.2            |
| E/L                        | 0.39        | 0.42           | 0.42           |
| G/S                        | 1.05        | 1              | 1              |

#### BAP :

Formuler avec 56% ajout pour réduire la masse volumique vu que le filler de calcaire a une masse volumique réduit par rapport au ciment et en a utiliser que le sable 0/1 pour avoir une certaine ouvrabilité (les résistances mécaniques ne sont pas recherchées dans cette formulation).

#### BAP MV :

Dans une deuxième étape en a procédé à la substitution totale des gravillons (3/8,8/15) avec le verre mousse de fraction (3/8,8/15) pour procédés à la comparaison.



## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

---

### IV.1.4. Protocole de mélange de béton avec granulats de verre mousse :

La procédure suivit pour le mélange de béton auto plaçant avec granulats de verre mousse, est donnée comme suit :

Mettre le mélange de liant « ciment + fines » dans le récipient.

Mélanger vitesse lente pendant 1min 30sec.

Mettre le sable et les granulats de verre mousse dans le récipient et en mélange à vitesse lente pendant 1min 30sec.

Verser l'eau et 1/3 de superplastifiant dans le récipient.

Mélanger à vitesse lente pendant 1min.

Rajouter le reste de superplastifiant et mélanger 30sec à vitesse rapide.



**FigureIV.1** : Composition du BAP



**.FigureIV.2** : Éprouvettes BAP.



**FigureIV.3** : Composition du BAP MV.



**FigureIV.4** : Éprouvettes BAP MV.

## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

### IV.2. Confection d'un matériau composite à base de liant aérien « plâtre » et de granulats de verre mousse :

Dans cette formulation on a procédé deux formulations :

**La première :** Plâtre sans granulats.

**La deuxième :** Plâtre avec granulats de verre mousse.

#### IV.2.1. Formulation du composite :

Tableau IV.4. Composition des différentes formulations

| Constituants                      | Plâtre s      | Plâtre avec GVM |
|-----------------------------------|---------------|-----------------|
| Plâtre                            | 4kg           | 2kg             |
| Eau                               | 2.4kg « 60% » | 1.2kg « 60% »   |
| Adjuvant                          | 4g « 1% »     | 2g « 1% »       |
| Granulats de verre mousse « GVM » | 0             | 590g            |

Éprouvettes confectionnés : (200mm×200mm×50mm) 2L.



Figure IV.5 : Plaque de plâtre.

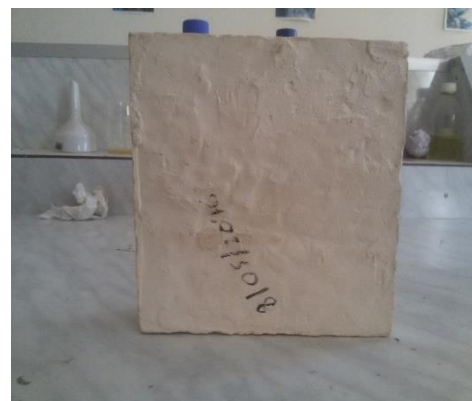


Figure IV.6 : Plaque de plâtre avec GVM.

## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

### IV.3.Confection d'un matériau composite à base de liant organique « résine » et de granulats de verre mousse :

Dans cette formulation on a procédé deux formulations :(méthode empirique).

**La première** : Résine époxy avec sable.

**La deuxième** : Résine époxy avec granulat verre de mousse.

#### IV.3.1.Formulation du composite :

**Tableau IV.5** .Composition des différentes formulations

| Composition  | Résine époxyde avec sable<br>BR | Résine époxyde avec GVM<br>BR MV |
|--------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Résine époxy | 900g                            | 900g                             |
| Sable (0/1)  | 2.8kg                           | 0                                |
| GVM          | 0                               | 330g                             |

**Éprouvettes confectionnées** : (200mm×200mm×50mm) = 2L.



**FigureIV.7** : Béton résineux avec granulat mousse. **Figure IV.8** : Béton résineux avec sable.

## Chapitre IV : Elaboration des matériaux d'études

---

### **Abréviations :**

BAP : Béton autoplaçant (Granulats classiques)

BAP MV : Béton autoplaçant avec granulats de verres mousses (par substitution du gravillon)

P : Plâtre.

P MV : Plâtre avec granulats de verres mousses.

BR : Béton résineux.

BR MV : Béton résineux avec granulats de verres mousses.

### *Chapitre V : Résultats et interprétations*

*Ce chapitre présente les différents résultats des essais physiques, thermiques et mécaniques sur les matériaux élaborés. Des interprétations de ces résultats seront également présentées dans le même chapitre. Les essais physico-mécaniques effectués sur les composites étudiés, ont été réalisés selon les normes en vigueur (ENV).*

#### **V.1. Etat frais :**

Trois matériaux composites ont été élaborés à base de différents liants et de granulats. Ces matériaux sont un béton autoplaçant, matériau plâtre et un béton résineux. Dans ces matériaux, nous avons substitué les granulats classiques (gravillon) par les granulats légers à base de verre mousse. Etant donné que notre étude est réalisée sur le béton autoplaçant, il est nécessaire de vérifier les propriétés rhéologiques de ce matériau. En plus, le béton autoplaçant doit être très fluide avec une bonne mise en œuvre de matériau « sans secousse ou vibration » et aussi ce béton doit être stable « ne présente pas de ségrégation ». Toutes ces propriétés rhéologiques sont les principales propriétés du béton autoplaçant. Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation à l'état frais de béton autoplaçant étudié. Ce dernier a été élaboré en substituant totalement le gravier « 3/8 et 8/15 » par les granulats de verre mousse. Après la préparation du béton à base des granulats de verre mousse, 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 granulats de verre mousse sur les propriétés à l'état frais de béton.

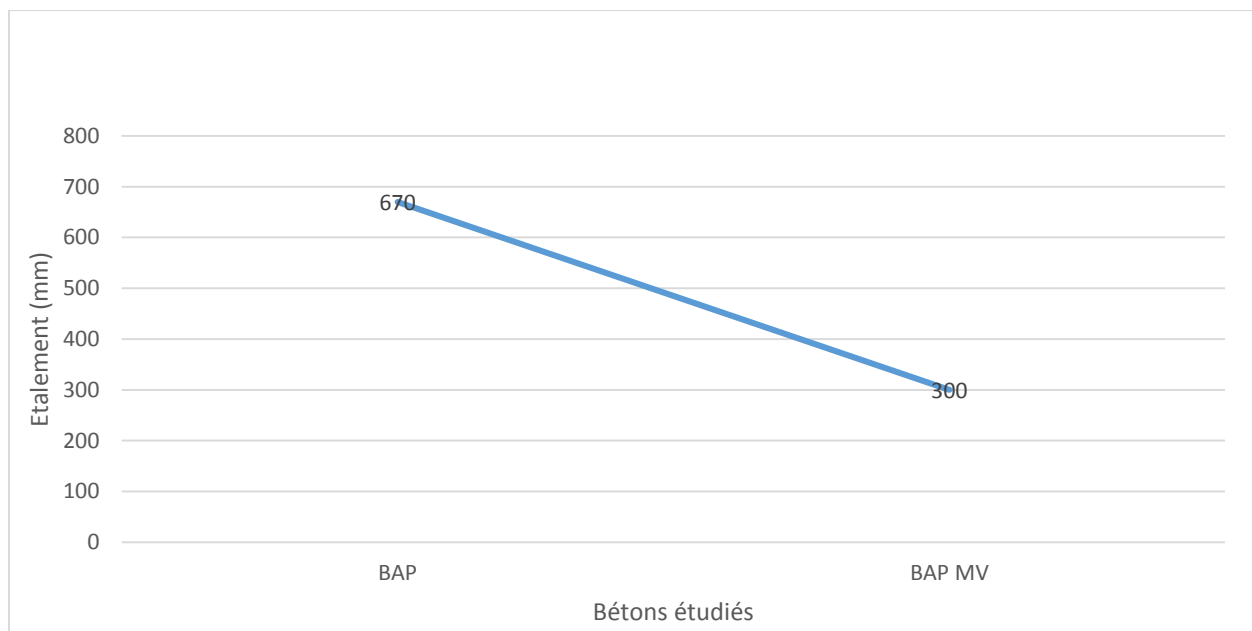
#### **V.1.1. Fluidité « Essai de l'étalement » :**

La fluidité de béton étudié, a été effectuée par le test d'étalement cône d'Abrams selon la norme préconisée au béton fluide. Les résultats sont donnés dans le tableau V.1. ces résultats sont aussi présentés dans la figure V.1.

## Chapitre V : Résultats et interprétations

**Tableau V.1.** Essai de l'étalement

| Type   | Étalement au cône d'Abrams (mm) |
|--------|---------------------------------|
| BAP    | 670                             |
| BAP MV | 300                             |



**Figure V.1 :** La fluidité des bétons élaborés

La figure V.1 présente la fluidité des bétons élaborés avec des granulats classique et de verre mousse. Les résultats montre qu'une diminution de la fluidise du béton élaboré à base de granulats de verre mousse .La diminution de la fluidité est observée par la réduction de 56% de l'étalement mesuré sur les bétons étudiés en fonction de la substitution des granulats cella et due à la grande absorption d'eau des granulats de mousse de verre du moment que ces derniers sont très poreux.

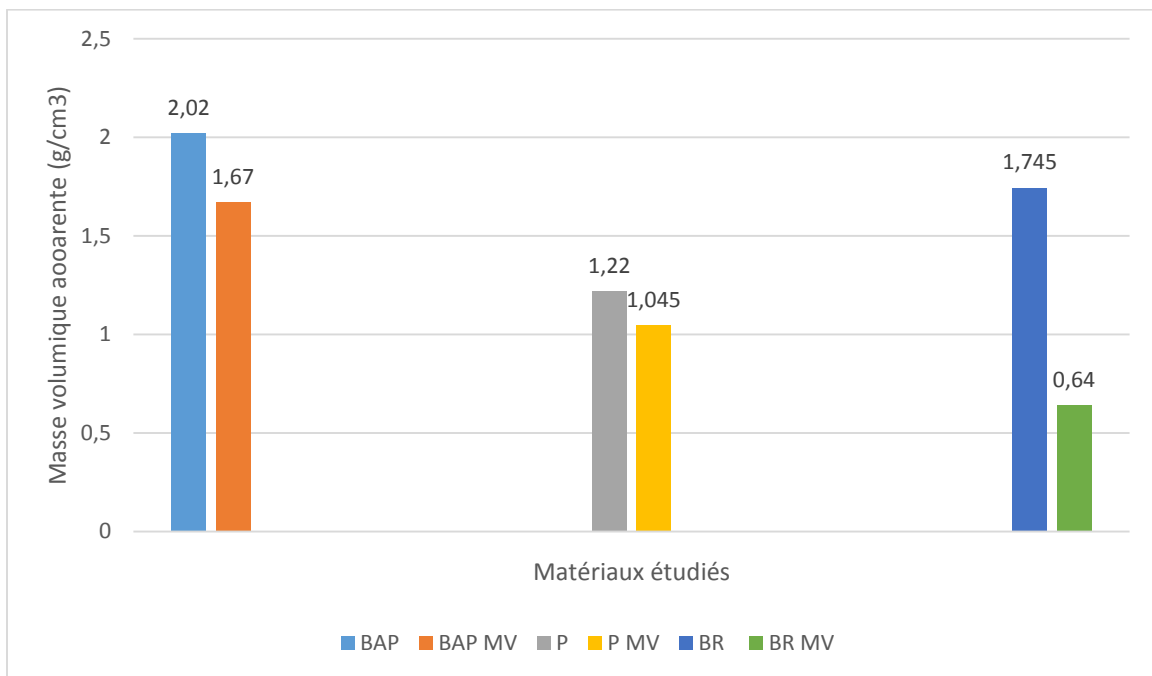
## Chapitre V : Résultats et interprétations

### V.2. Propriétés physiques :

#### V.2.1. La masse volumique :

Tableau V.2. Masse volumique apparente des composites étudiés

| Variante | Masse volumique apparente « g/cm <sup>3</sup> » à 28 jours |
|----------|--|
| BAP      | 2.02   |
| BAP MV   | 1.67   |
| P        | 1.22   |
| P MV     | 1.045  |
| BR       | 1.745  |
| BR MV    | 0.64   |



**Figure V.2 :** Masse volumique apparente des différents composites mesurée après 28 jours de durcissement.

Les résultats des mesures de la masse volumique apparente des différents composites étudiés à l'âge de 28 jours, sont représentés dans la figure V.2. Nous remarquons que la masse volumique diminue en fonction de la substitution par les granulats de verre mousse. Cette diminution est de

## Chapitre V : Résultats et interprétations

l'ordre de 17.4 % dans les BAP et de 14.34 % dans le matériau plâtre et 63% pour le béton résineux. Cela est dû probablement à la masse volumique des granulats de verre mousse qui est très faible par rapport à celles de gravier et du sable.

### V.2.2. Porosité :

La porosité de béton a été déterminée en utilisant la relation ci-dessous, après les mesures des masses des éprouvettes.

$$P (\%) = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{totale}}} * 100 \quad , \quad V_{\text{vide}} = M_h - M_s$$

D'où :

**P (%)** : la porosité d'éprouvette en pourcentage (%).

**M<sub>h</sub>** : la masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau jusqu'à saturation.

**M<sub>s</sub>** : la masse de l'éprouvette sèche.

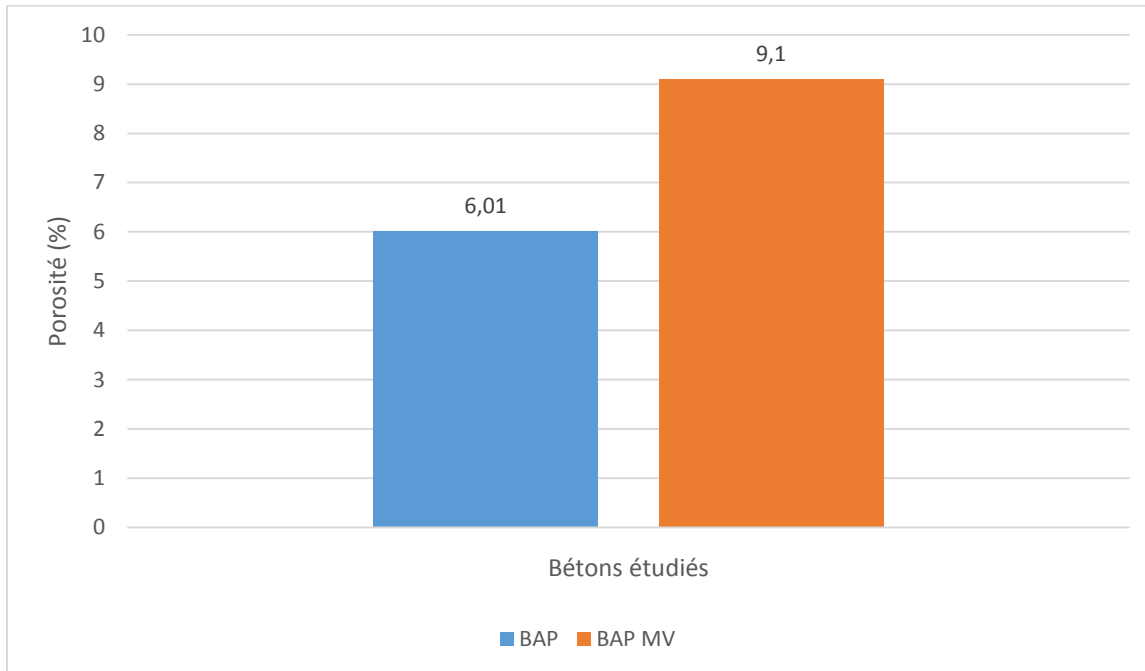
**V totale** : le volume total de l'éprouvette.

Les résultats obtenus de la porosité des mortiers sont présentés dans le tableau (V.3)

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

| Échantillons | Porosité « % » |
|--------------|----------------|
| BAP          | 6.01           |
| BAP MV       | 9.1            |





**Figure V.3 :** L'évolution de la porosité des BAP en fonction de la substitution des granulats de verres mousses.

### V.2.3. Absorption d'eau :

On utilise les pesées des masses réalisées dans l'essai de la porosité de béton pour calculer l'absorption d'eau par la relation suivante

$$Ab\% = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100$$

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

**M<sub>h</sub>** : La masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau jusqu'à saturation.

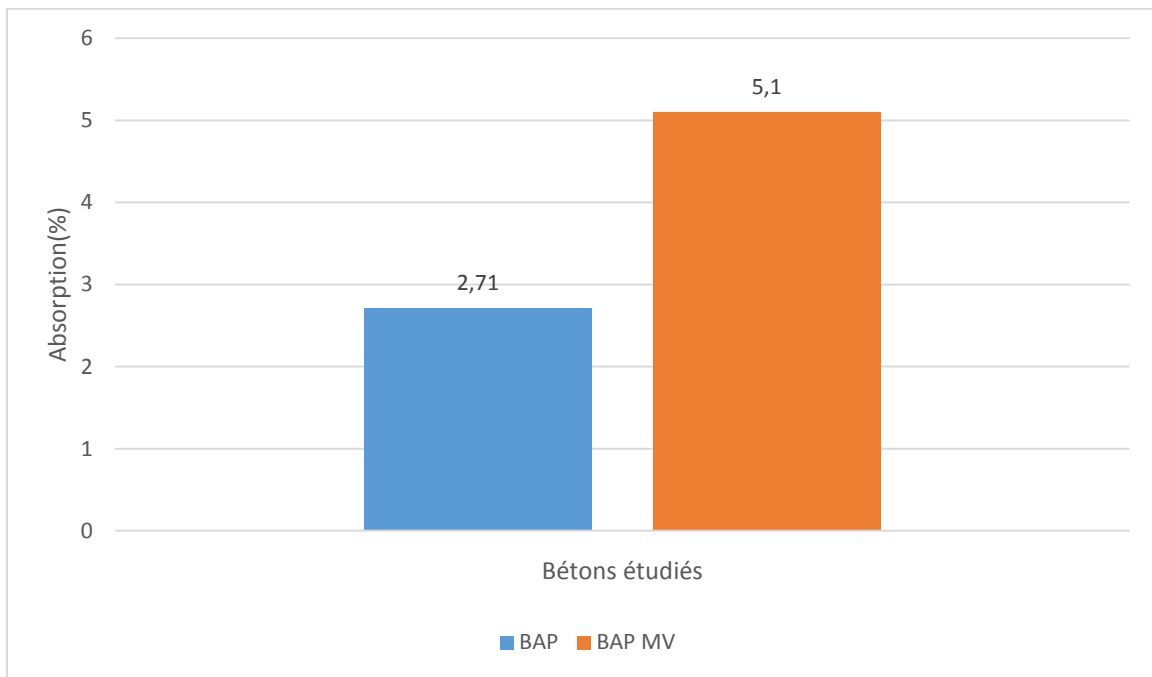
**M<sub>s</sub>** : La masse de l'éprouvette sèche.

Les résultats obtenus de l'absorption d'eau de béton sont présentés dans le tableau (V.4)

## Chapitre V : Résultats et interprétations

Tableau V.4.Absorption d'eau des éprouvettes

| Échantillons | Absorption « % » |
|--------------|------------------|
| BAP          | 2.71             |
| BAP MV       | 5.1              |



**Figure V.4 :**L'évolution de l'absorption d'eau du BAP en fonction de la substitution des granulats de verres mousse.

D'après les résultats en remarque augmentation de l'absorption et de la porosité en fonction de la substitution des granulats de mousse de verres. Cela peut être expliqué par la légèreté des granulats de verre mousse et leur grande porosité.

## Chapitre V : Résultats et interprétations

### V.3. Contrôle non destructif par ultrason :

Ces essais permettent de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à travers un élément en béton.

Pour déterminer la vitesse longitudinale, ont utilisé Appareil de test ultrasonique - Pundit Lab (PROCEQ)



FigureV.5 : L'appareil d'ultrason



FigureV.6 : Etalonnage de l'appareil

L'appareil elle est munie de deux palpeurs de fréquence 54KHz destinés pour le contrôle du béton. Cet appareil nous indique le temps (T) de propagation des ondes à travers l'éprouvette de longueur (L) et donne la vitesse de propagation (V) selon l'équation suivant :

$$V=S/T*10^6$$

V : vitesse de propagation.

S : distance entre les têtes en mètre.

T : temps en microseconde.

Cette méthode consiste à presser les deux têtes sur les faces de l'éprouvette nettoyées, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transition du son, Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes l'appareil PROCEQ doit être étalonné avec l'étalon montré ci-dessus.

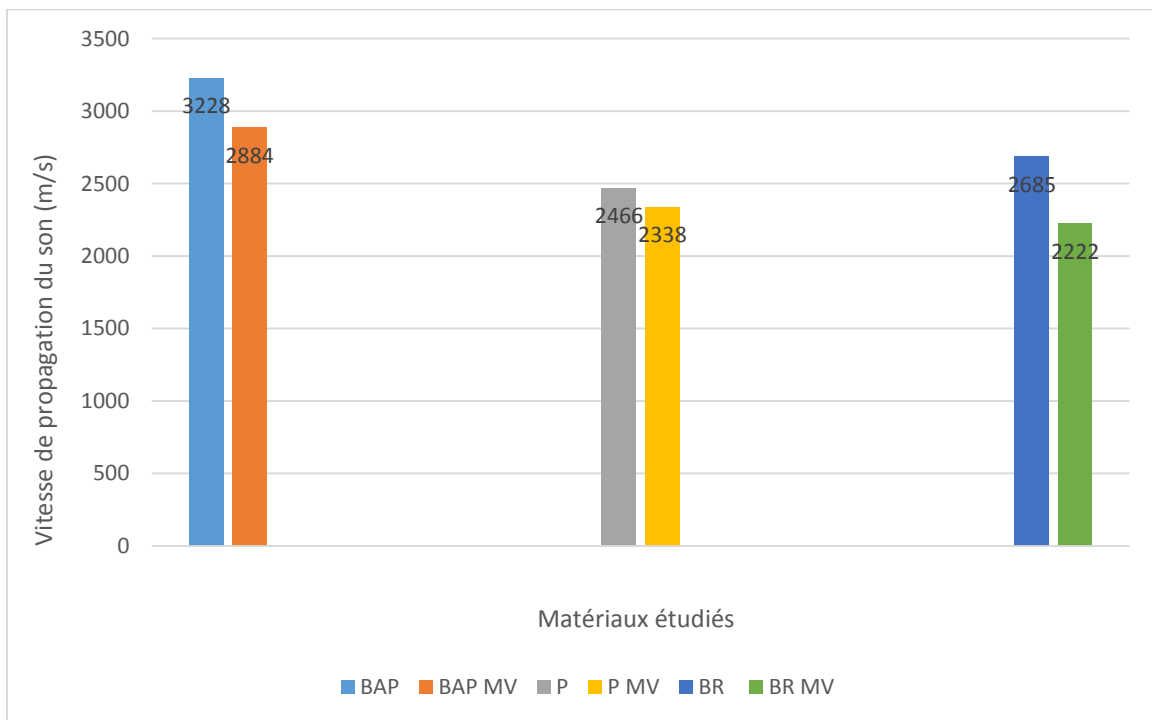


FigureV.7 : Essai non destructif ultrason

## Chapitre V : Résultats et interprétations

**Tableau V.5** Vitesse de propagation du son des composite

| Variante | Distance « mm » | Temps « $\mu$ s » | Vitesse « m/s » |
|----------|-----------------|-------------------|-----------------|
| BAP      | 200mm           | 50.2              | 3884            |
| BAP MV   | 200mm           | 94.6              | 2981            |
| P        | 200mm           | 79.9              | 2466            |
| P MV     | 200mm           | 83.4              | 2338            |
| BR       | 200mm           | 73                | 2685            |
| BR MV    | 200mm           | 86                | 2222            |



**Figure.V.8 :** Vitesse de propagation du son des composite étudiés à 28 jours.

La figure V.5 illustre les résultats de mesure de la vitesse de propagation du son à travers les trois matériaux élaborés. Nous observons que quel que soit la nature du matériau étudié, les granulats verre mousse ont diminués significativement les vitesses de propagation du son cela est dû à la grande porosité des verres mousse qui gêne la progression du son d'où la diminution de la

## Chapitre V : Résultats et interprétations

---

vitesse. Toutefois, le pâtre à base de verre mousse béton résineux à base de verre mousse présente des vitesses faibles de propagation du son. Cela veut que ces matériaux présentent une bonne isolation phonique.

### V.4. Module d'élasticité dynamique :

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par la méthode ultrasonore sur des éprouvettes étudiés à l'âge 28 jours. Après de la détermination de la vitesse de propagation de son à travers l'éprouvette, on calcule le module d'élasticité dynamique en utilisant la formule suivante

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

Tel que :

$E_d$  : module d'élasticité dynamique en **GPa**

$\rho$  : masse volumique de l'éprouvette en **kg/m<sup>3</sup>**

$V$  : vitesse de son en **m/s**

**Tableau V.6.**Module d'élasticité dynamique

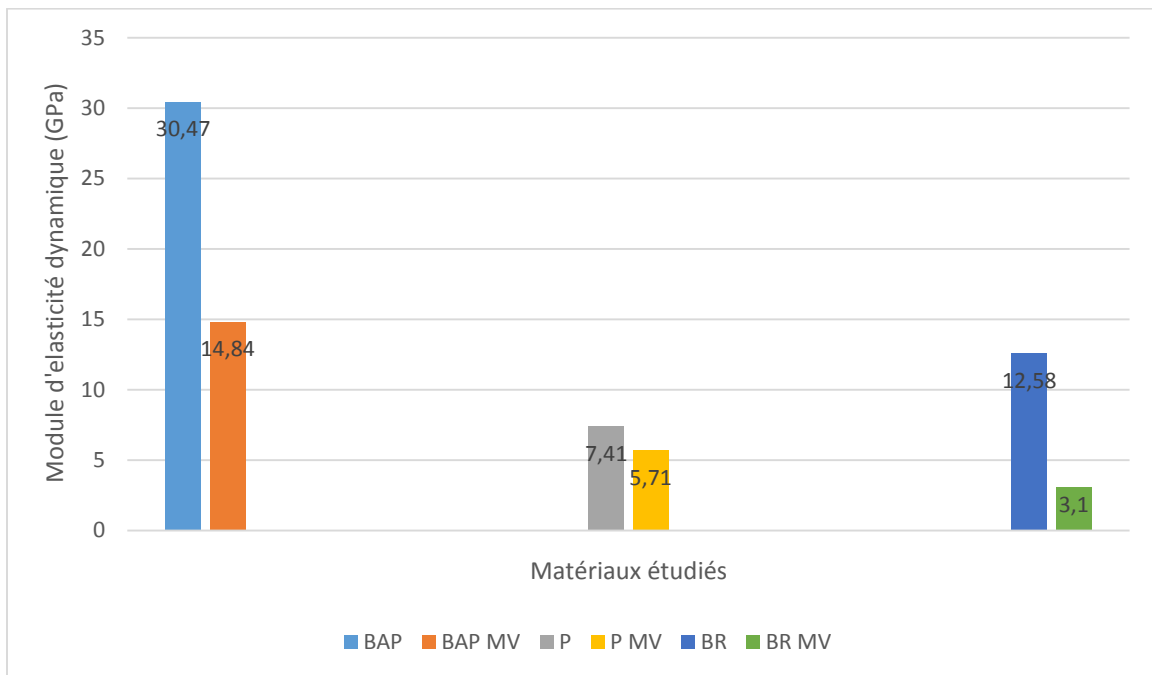
| Variante | Module d'élasticité dynamique « GPa » |
|----------|---------------------------------------|
| BAP      | 30.47                                 |
| BAP MV   | 14.84                                 |
| P        | 7.41                                  |
| P MV     | 5.71                                  |
| BR       | 12.58                                 |
| BR MV    | 3.15                                  |

### V.4.1 La résistance à la compression et flexion du BAP MV :

$f_{c28}$  =11.84 MPa

$f_{f28}$  =2.51 MPa

## Chapitre V : Résultats et interprétations



**Figure.V.9** : Module d'élasticité dynamique des matériaux étudiés à 28 jours.

Le Tableau V.6 donne les résultats de calcul du module d'élasticité dynamique des trois composites étudiés. Nous remarquons que le matériau plâtre et le béton résineux à base de granulats de verre mousse, présentent des valeurs faibles de modules d'élasticité dynamique. Par rapport au béton témoins, le béton à base de verre mousse donne un module d'élasticité dynamique plus cela est dû à la nature de granulats utilisés. Une diminution remarquable du module pour le béton résineux à base de granulats de verre mousse.

## Chapitre V : Résultats et interprétations

---

### V.5. Essai de l'isolation thermique des matériaux :

Les essais de la conductivité thermique ont été réalisés au Centre National d'Etude et de la Recherche Intégrées du Bâtiment « CNERIB » à l'aide de CT-METRE selon la norme ISO8301.

#### Présentation du CT-METRE :



**Figure V.10** : Appareil CT-METRE



**Figure V.11** : Essais de la conductivité thermique

Un nouvel appareil de mesure rapide de caractéristiques thermiques des matériaux homogène et isotrope.

#### Principe de fonctionnement :

Le principe de mesure consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température « tous deux associés dans la même sonde », à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et de type de sonde utilisée.

#### Le CT-METRE se compose de deux éléments :

**L'organe de command** : chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester.

**La sonde anneau** : chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite

## Chapitre V : Résultats et interprétations

Circuit soude « épaisseur 0.2mm- dimension 60×90mm », destiné à s'insérer entre deux paires planes de l'échantillon à mesurer « dont la surface a été préalablement rectifiée ».

### Résultats de la conductivité thermique des composés élaborés.

Tableau V.7 : Les résultats d'essai de conductivité thermique.

| Échantillons | Conductivité thermique $\lambda$ « w/m°C » |
|--------------|--|
| BAP          | 1.787                                      |
| BAP MV       | 1.501                                      |
| P            | 0.444                                      |
| P MV         | 0.346                                      |
| BR           | 1.136                                      |
| BR MV        | 0.505                                      |

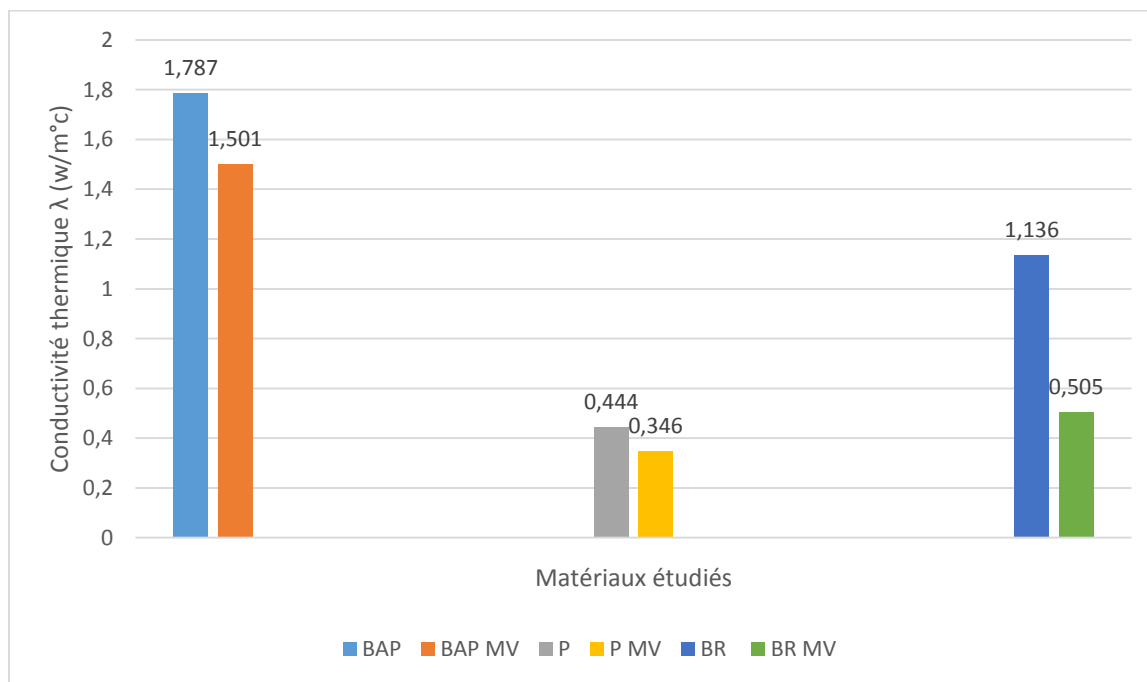


Figure V.12. Conductivité thermique des matériaux étudiés mesurée à 28 jours.



## Chapitre V : Résultats et interprétations

---

Les résultats de la conductivité thermique des matériaux élaborés sont représentés dans la figure V.7. Il est remarquable que la conductivité thermique aussi diminue significativement pour tous les matériaux étudiés. Cela veut dire que les granulats de verre mousse ont rendu nos matériaux plus isolants avec une conductivité la plus moindre. Cependant, par rapport au béton à base des verres mousse, le matériau plâtre et le béton résineux présente une très bonne isolation thermique avec un coefficient de conductivité thermique le plus faible et il est de l'ordre de respectivement 0,346 et 0,50 w/m°C.

## Chapitre V : Résultats et interprétations

### V.6. Etude microscopique des bétons élaborés :

Afin de mieux examiner l'effet de l'incorporation des granulats de verre mousse les bétons en tant que gros granulats, nous avons procédé à l'analyse macroscopique de la structure des bétons durcis après 28 jours. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un microscope optique.

Selon les images de la (figure 14), il est clair que les granulats de verre mousse sont bien adhérents à la matrice cimentaire. Ce type de granulat présente une bonne porosité et aussi que la taille des pores est presque la même dans tout le grain (Figure 13), ce qui favorise l'adhésion de la matrice cimentaire.

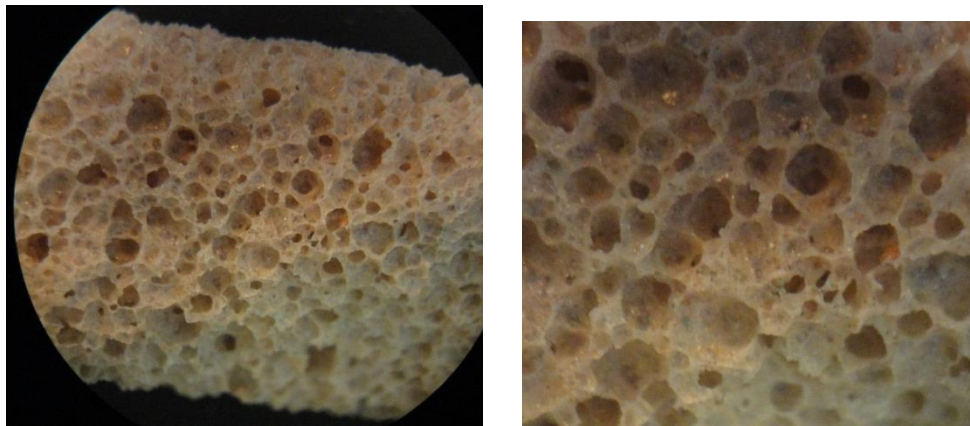


Figure 13 Granulats de verre mousse

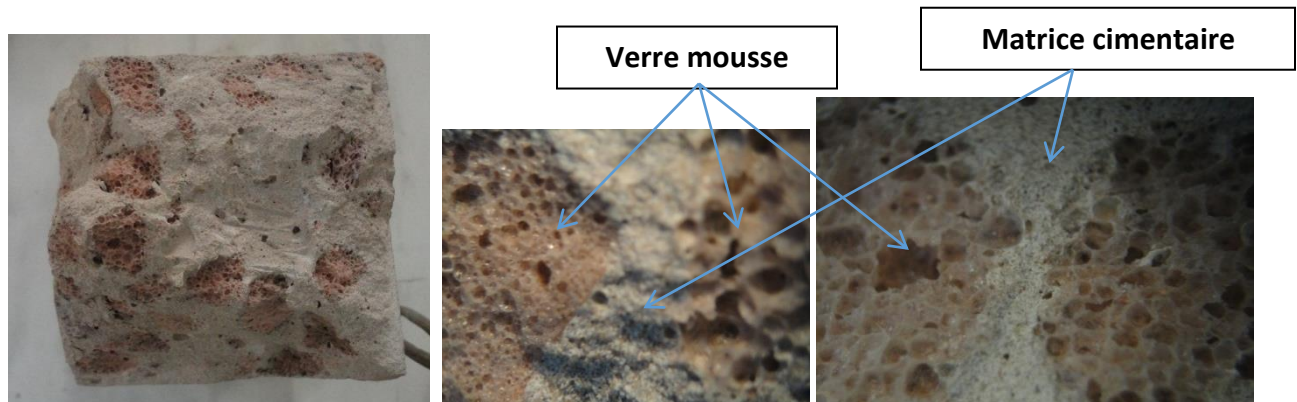


Figure 14 Interface Granulats de verre mousse/Matrice cimentaire

### *Conclusion générale*

L'objectif de ce travail, était le recyclage des déchets de verre dans la production des granulats légers (granulats de verre mousse). Ces granulats ont été utilisés par substitution des granulats classiques (gravillon) dans le béton et aussi pour fabriquer des matériaux isolants (plâtre et béton résineux). Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés physiques, thermiques et mécaniques de ces matériaux. A travers de l'étude expérimentale effectuée, on peut conclure que ;

- Les granulats de verre mousse peuvent être utilisés dans la formulation des bétons autoplacants légers (de faible dosage en ciment). Il a été observé que la fluidité du béton autoplacant a diminuée en fonction de la substitution totale du gravillon par les granulats de verre mousse ;
- La légèreté des matériaux élaborés (Béton, plâtre et béton résineux) a été nettement améliorée par l'utilisation des granulats de verre mousse. Cependant, la masse volumique enregistrée respectivement : béton léger = 1600 Kg/m<sup>3</sup> ; Matériau Plâtre = 1050 Kg/m<sup>3</sup> et béton résineux = 640 Kg/m<sup>3</sup>.
- Les résultats de la conductivité thermique des matériaux élaborés sont satisfaisants et que la conductivité thermique a aussi diminuée significativement pour tous les matériaux étudiés. Cela veut dire que

## CONCLUSION GENERALE

---

les granulats de verre mousse ont rendu nos matériaux plus isolants avec une faible conductivité.

- Par rapport au béton à base des verres mousse, le matériau plâtre et le béton résineux présente une très bonne isolation thermique et phonique avec un coefficient de conductivité thermique le plus faible et il est de l'ordre de respectivement 0,346 et 0,50 w/m°C.
- Le module d'élasticité dynamique calculé pour les trois types des matériaux, était de faible valeur et que ces matériaux présentent de faibles résistances. Selon le domaine d'application de ces matériaux qui ne nécessite pas des résistances plus élevées.
- Les trois types des matériaux élaborés à base de granulats de verre mousse, peuvent être utilisés comme des éléments d'isolation thermique et phonique dans le bâtiment ou dans les ouvrages spéciaux.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1]. BELGHIT Chahine, CONTRIBUTION A LA FORMULATION D'UN BETON AUTOPLAÇANT A BASE DE MATERIAUX LOCAUX Effet du laitier granulé micronisé sur l'ouvrabilité, diplôme de MAGISTER Année 2009
- [2]. K.H.KHAYAT, « Colloques sur les bétons autonivelants » Centre de Recherche Interuniversitaire sur le béton (CRIB) Université de SHERBROOKE, Université LAVAL Québec 1<sup>er</sup> Novembre 1996
- [3]. OKAMURA. H., OZAWA, K. (1994), "Self-compactable high performance concrete in Japan" ACI International Workshop on high Performance Concrete, Bangkok, Thailand,;
- [4]. IZUMI, I., YONEZAWA, T ., IKEDA, Y., MUTA, A. (1995) "Placing 10 000 m<sup>3</sup> super workable concrete for guide track structure of retractable roof of Fukuoka Dome, Supplementary", 2nd CANMET \ ACI International Symposium on Advances In Concrete Technology, Las Vegas,;
- [5]. Ir C. Ployaert, bulletin est publié par : FEBELCEM - Fédération de l'Industrie Cimentière Belge rue Volta 8 1050 Bruxelles, Dépôt légal : D/2005/0280/06 [www.febelcem.be/info@febelcem.be](http://www.febelcem.be/info@febelcem.be)
- [6]. F.CUSSIGH et groupe de rédaction, Recommandation pour l'emploi des bétons autoplaçants, AFGC/PNB@P Janvier 2008. Présent document a été élaboré à partir du document AFGC « Bétons Autoplaçants- Recommandations provisoires » (juillet 2000)
- [7]. Turcry PH, « Retrait et fissuration des BAP : influence de la formulation » thèse doctorat, février 2004
- [8] SAFI Brahim, « Formulation et Caractérisation rhéologique et physico-mécanique des pâtes cimentaire et mortiers autoplaçants »
- [9] NEHDI M, "Why some carbonate fillers cause rapid increases of viscosity in dispersed cement-based materials", Cement and Concrete Research, Vol 30 pp 1603-1669, june 2000.
- [10] MENAI KH, "Etude de l'Effet d'Ajouts Chimiques et Minéraux sur la Maniabilité, la Stabilité et les Performances des Bétons Autonivelants", Mémoire de Maîtrise ès Sciences Appliquées.  
Spécialité : Génie Civil, Université de Sherbrooke, CANADA, Septembre 1995.
- [11] OKAMURA H, OUCHI M, "Self-Compacting Concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol, 1, No. 1, 5-15, April 2003.
- [12] SEDRAN T, "Rhéologie et Rhéométrie des Bétons. Application aux Bétons Autonivelants", Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, mars 1999.
- [13] Mohammed Rissel KHELIFA. « Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplaçants » Thèse Doctorat, Université de constantine et d'Orléans, soutenue le 20 juin 2009

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [14]. Edwinge Nicolas, « compatibilité et incompatibilité liants cimentaires/superplastifiants » thèse doctorat université Luxembourg 21/06/2010.
- [15]. Sandrine Bethmont « mécanisme de ségrégation dans les bétons autoplaçants » Thèse doctorat. Laboratoire central des ponts et chaussées. 58 Bd Lefebvre 75015 Paris. Soutenue le 15 décembre 2005.
- [16]. Stéphan ASSIE « Durabilité des bétons autoplaçants ». Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. Octobre 2004
- [17] CELBI Hamidat, BENMANSOUR Nacereddine. « Recyclage des Coquilles de mer dans les bétons autoplaçants en tant qu'ajout cimentaire et granulats fin.
- [18] Philippe Turcry d (Retrait et Fissuration des Bétons autoplaçants influence de la Formulation) Thèse de doctorat. L'université de Nantes Année 2004
- [19]. E. Lepine, et al, Optical microfabrication of tapers in low-loss chalcogenide fibre. Optical Society of America, 2010. 27(5) : p.966.
- [20]. I. Helsoëit. Synthèse, caractérisation et optimisation de verres optiques pour des applications infrarouges dans la fenêtre 8-10 $\mu$ m. Thèse de l'Université Rennes 1, France 2000.
- [21]. F. CELARIE. Dynamique de fissuration à basse vitesse des matériaux vitreux. Thèse, Montpellier II « 2014 ».
- [22]. Aroua Sonia et Bouherrara Fatma Zohra, « Elaboration d'un mortier autoplaçant a base des granulats de verre mousse » Mémoire de fin d'étude. FSI.boumerdes.2015.
- [23]. JEANS L. Barton : composition verrière, l'évolution des verres industriels, revue verre vol7.N<sup>0</sup>2. Institut de verre 2001.
- [24]. K. WINNACKER : technologie minérale 3<sup>ème</sup> partie. Edition Eynolle.1965.
- [25]. Wilfried KUZZ, Jean-Pierre Mercier et Gerald Zambelli, traité des matériaux-volume 1- Introduction à la science des matériaux -PPUR-1999.
- [26]. Rossington, D.R, Surface chemistry of glass in introduction to glass science, Springer. Usa. Springer US, P.513-543, 1972.
- [27]. J. ZARZCKI, les verres à l'état vitreux « Ed Masson 1982 ».
- [28]. N. de Louvigny, « Conséquence de l'apport de verre pilé a la surface du champ et de son incorporation dans la couche travaillée ». Thèse de doctorat. Université Montpellier II.2001.
- [29]. Définition issue de « Une autre regard sur nos déchets » S.P.I.E province de liege-1993.
- [30]. Travail effectué dans le cadre du cours sur les déchets pour l'institut de technologie de liège 2009/2010.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [31]. J. Barton et C.Guillemet. Livre, « science et technologie des verres »EDPS sciences 2005
- [32]. Attalah Abdelhak, « Elaboration et caractérisation d'un granulat léger en verre mousse pour la confection d'un béton léger et isolant » Mémoire fin d'étude,FSI boumerdes 1997
- [33]. S. SIVKOV « Travaux pratiques de la technologie générale des silicates » Boumerdes 1987« INMC ».
- [34]. G, BUMANIS. D, Bajare. J, Locs. A, Korjakins. « Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of light weight concrete, construction and building materials Vol: 47 p: 274-281; « 2013 »
- [35]. Aliouane Djamel, thèse ; « élaboration de nouveau matériau isolant à base de calcin ». FSI. Boumerdes.2005
- [36]. G. Cizeron, “Le frittage sous son aspect physico-chimique” paru dans : Extrait de l'industrie céramique.1972.
- [37]. M.L.WELTER, isolation en verre cellulaire isolé de manière économique et écologique.
- [38]. Dali Mohamed. Mémoire fin d'étude « élaboration et caractérisation des granulats de mousse de verre a base de calcin destinés a l'isolation thermique et phonique du toit et du sol dans le bâtiment » Université de boumerdes .FSI.2012
- [39]. Chahbouni Ouarda, mémoire fin d'étude, « élaboration et caractérisation des granulats de verre expansé destinés a la confection d'un matériau composite isolant » FSI. boumerdes. 2008
- [40]. Guide pratique d'isolation thermique des bâtiments. Paris, eyrolle.1977
- [41]. Rapport TECHNOpor, granulats de mousse de verre catalogue du TECHNOpor, janvier 2012. PHOTO ISO 900/ Markus WELTER, Lucerne, isolation en verre cellulaire isolé de manière économique et écologique.
- [42]. Druskininkai Lithuania, Foamglass granulate PENOSTEK™, STIKLOPoras Invent compagny, www.stikloporas.lt, 2004.
- [43]. STITI Nacira, « Elaboration et caractérisation d'un matériau isolant à base de déchets de verre ».Thèse doctorat, 2011/2012 FSI Boumerdes.
- [44]. DALI Mohamed, « Elaboration et caractérisation des granulats de verre mousse a base de calcin destiné a l'isolation thermique et phonique du toit et du sol dans le batiments »mémoire fin d'étude. FSI Boumerdes. 2012
- [45]. LERARI Youcef, « Elaboration et caractérisation d'un béton isolant léger à base de granulat de verre expansé » thèse. FSI, Boumerdes. 2009