

**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 des Matériaux**

**Option : Contrôle Qualité des Matériaux**

## THEME

**Elaboration d'un Mortier Autoplaçant à base du Granulat de Verre Mousse.**

**Réalisées Par :**

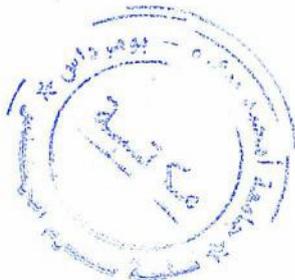
**AROUA Sonia**

**BOUGHERARA Fatma Zohra**

**Devant le jury :**

**Sujet Proposé et suivi par :**

**Dr. SAFI B.**



*Le 17/06/2015*

## Résumé

Ce travail porte sur la formulation et la caractérisation physico-mécanique d'un mortier autoplaçant, élaboré à partir d'un granulat fin (sable) à base de verre mousse. Les granulats fins de verre mousse, seront fabriqués à partir du déchet de verre (calcin), du déchet de brique (chamotte) ou d'argile et calcaire. Trois types de granulat de verre mousse, vont être élaborés à une température 850C°, dont la composition du mélange se défait par le type de déchet utilisé (chamotte, argile et calcaire). Une fois les granulats de verre mousse sont obtenus après le traitement thermique, des mortiers autoplaçants seront fabriqués à base de ces granulats en substituant totalement le sable. Des essais physiques (fluidité, masse volumique, porosité, absorption) et mécaniques (résistance mécanique à la traction et à la compression), seront réalisés sur ces mortiers. Les résultats obtenus seront comparés avec ceux obtenus sur des mortiers autoplaçants à base de sable naturel.

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

## Abstract

This work deals with the formulation physico-mechanical characterization of a lightweight self-compacting mortar made from a fine aggregate (sand) based foam glass. The fine aggregate foam glass will be manufactured from waste glass (cullet), the brick waste (fireclay) or gray clay and limestone. Three types of foam glass granulate; will be developed at a temperature 850C °, the composition of the mixture to discard the type of waste used. Once the foam glass granulate are obtained after the heat treatment, the self-compacting mortar will be made from these aggregates completely substituent sand. Physical tests (flow, density, porosity, absorption) and mechanical (mechanical resistance), will be made on these mortars. The results will be compared with those obtained on compacting mortars based on natural sand.

**Keywords:** waste glass, grog, gray clay lightweight aggregate, self-compacting mortar fluidity, density, mechanical strength.

# Remerciements

*Nous rendons grâce à dieu de nous avoir donné le savoir et la volonté surtout la patience pour réaliser ce modeste travail.*

*Au terme de ce travail, Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promoteur Mr SAFI.B, qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi théorique et pratique de notre projet de fin d'étude.*

*Nous tenons à remercier sincèrement le Centre d'étude et de services Technologiques de l'industrie des Matériaux de constructions « C.E.T.I.M » pour nous avoir acceptées pour effectuer notre stage pratique, qui n'a épargné aucun effort pour que notre stage se déroule dans les meilleures conditions, et bien sur sans oublier toute l'équipe de laboratoire pour leurs aides et la confiance qu'ils nous ont témoigné.*

*Nous profitons de l'occasion pour remercier tous nos enseignants du département « Génie des matériaux ».*

*Enfin, que toutes celles et tous ceux qui, de près ou de loin nous ont généreusement offert leurs encouragements à l'élaboration de ce travail, trouvant ici l'expression de notre profonde sympathie.*

**Merci**

## « Dédicace »

*Je dédie ce modeste travail :*

*A la mémoire de Mon père, et à celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à ma très chère mère, et Merci pour avoir veillé sur moi.*

*A mes frères, à ma sœur, son époux et leur enfants*

*YOUNES et YUCEF*

*Sans oublier mon époux SOUFYANE*

*A mes oncles et tantes sans exception*

*Ainsi qu'à toute ma famille*

*A ma sœur du cœur SONIA et à toute sa famille et*

*Toutes mes amies,*

*Toute la promotion de MCQ13*

*Particulièrement, à tous les gens avec qui j'ai passé du très bon moment.*

*ZOLA*

# *Dédicace*

*C'est avec une immense fierté que je dédie mon projet de fin d'étude  
à :*

*Mon très cher papa merci d'avoir veillé sur moi, à ma très chère  
maman qui n'a pas cessé de prier, pour que je réussisse dans ma vie,  
merci maman.*

*mon cher époux qui m'a tant aidé avec son soutien pour que je termine  
mes études.*

*mes chers frères : Yazid , Idir et Yani.*

*Mes adorables grands parents, j'ai de la chance de vous avoir.*

*Mes tantes et oncles, cousins et cousines et à toute ma famille.  
Sans oublier aussi ma sœur du cœur zola et toute sa famille et mes  
amies : Nadjiba, Faiza , Ghalia, Meriem, Hadjar, Imane .....  
(La liste est longue). Et toute la section Génie des matériaux*

*A tout ceux qui j'ai oubliée de citer leur nom et qu'ils connaissent leur  
importance dans ma vie.*

*SONIA AROUA*

# SOMMAIRE

## PARTIE THEORIQUE

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

### Chapitre I : Les Bétons Autoplaçants (BAP)

I.1) Introduction.....	03
I.2) Définition .....	04
I.3) Classification des BAP .....	05
I.4) Avantages du BAP .....	06
I.5) Les constituants d'un BAP .....	06
I.5.1) Les ciments .....	07
I.5.2) L'eau .....	08
I.5.2) Les granulats .....	08
I.5.4) Les ajouts minéraux .....	09
I.5.5) Filler de calcaires .....	09
I.5.6) Les superplastifiants .....	10
I.6) Les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et l'état durci.....	11
I.6.1) Les propriétés principales d'un BAP à l'état frais .....	11
I.6.2) Caractérisation du béton frais .....	11
I.6.2.a) Essai d'étalement .....	11
I.6.2.b) Essai de la boîte en L.....	12
I.6.2.c) Essai stabilité au tamis .....	13
I.6.2.d) Essai d'entonnoir .....	13
I.6.2.e) Essai de boîte en u ('u-box test).....	14
I.6.2.f) Essai d'étalement modifié .....	14
I.6.3) Les propriétés principales d'un BAP à l'état durci.....	14
I.6.3.a) Résistance à la compression .....	15
I.6.3.b) Résistance à la traction .....	15
I.6.3.c) Module d'élasticité .....	15
I.6.3.d) Le retrait .....	15
I.6.3.e) Le fluage .....	16
I.7) Méthode de formulations des BAP .....	16
I.7.1) Approche du LCPC .....	16
I.7.2) Approche Japonaise .....	18
I.7.3) L'approche basée sur l'utilisation du mortier équivalent MBE.....	18
I.8) Mortier équivalent de BAP .....	19
I.8.1) Méthode de mortier équivalent .....	19
I.8.2) Technique du mortier du béton équivalent « MBE » .....	19
I.8.2.a) But de la technique .....	19
I.8.2.b) Principe de la technique.....	20
I.8.3) Essais réalisables sur mortier du béton équivalent .....	21
I.8.3.a) Essais d'affaissement au mini cône .....	21
I.8.3.b) Essais d'étalement au mini cône .....	22
I.9) Conclusion .....	22

## Chapitre II: Généralités sur les Déchets du Verre et la Mousse de Verre

II.1) Introduction .....	23
II.2) Définition du verre .....	24
II.2.1) Structure du verres .....	25
II.2.2) Transition vitreuse .....	26
II.2.3) Types de verres industriels. ....	26
II.3) Verre issu de recyclage .....	27
II.4) Le déchet du verre (Calcin) .....	27
II.5) Verre mousse .....	28
II.5.1) Définition .....	28
II.6) Granulat de verre mousse .....	29
II.6.1) Les différents agents moussants.....	29
II.6.2) Principe de fabrication .....	30
II.6.3) Les caractéristiques des granulats de verre mousse .....	32
II.6.4) Domaine d'application de granulat de verre mousse. ....	33
II.7) Application du verre mousse dans les bétons en tant que granulats .....	34
II.8) Conclusion.....	38

## PARTIE PRATIQUE

### Chapitre III: Caractérisation des Matériaux Utilisés

III.1) Caractéristiques des constituants .....	39
III.1.1) Ciment.....	39
III.1.1.a) Caractéristiques physiques.....	39
III.1.1.b) Caractéristiques mécaniques .....	40
III.1.1.c) Caractéristiques chimiques .....	40
III.1.1.d) Caractéristiques minéralogiques .....	40
III.1.2) Fillers de calcaire .....	41
III.1.3) Superplastifiant .....	41
III.1.4) Eau de gâchage .....	43
III.1.5) Le sable .....	43
III.1.5.1) Caractéristiques du sable .....	43
III.1.6) Déchets de verre (Calcin) .....	46
III.1.7) Argile grise .....	47
III.1.8) Déchets du briqu (Chamotte) .....	47
III.2) Composition des granulats par un traitement thermique .....	48
III.2.1) Préparation du mélange .....	48
III.2.2) Elaboration des granulats de verre expansé .....	49
III.2.3) Régime thermique choisi .....	51

## Chapitre IV: Formulation des Mortiers Autoplaçants

IV.1) Formulation des bétons autoplaçants .....	53
IV.1.1) Calcul de composition.....	53
IV.1.2) Les données de base .....	54
IV.1.3) Optimisation de la composition du BAP .....	54
IV.1.4) Déterminations de la masse de chaque constituant .....	54
IV.1.5) Dosages des constituants pour 1 m <sup>3</sup> du BAP .....	55
IV.2) Formulation du mortier autoplaçant.....	55
IV.3) Le Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP).....	57

## Chapitre V: Résultats et Interprétations

V.1) Etat frais.....	58
V.1.1) Fluidité (essai de l'étalement) .....	59
V.2) Etat durci .....	60
V.2.1) Propriétés physique .....	61
V.2.1.a) La masse volumique .....	61
V.2.1.b) Porosité .....	62
V.2.1.c) Absorption d'eau .....	64
V.2.2) Propriétés mécaniques .....	65
V.2.2.a) Résistance à la traction .....	66
V.2.2.b) Résistance à la compression.....	67
V.3) Module d'élasticité dynamique .....	69
CONCLUSION.....	71

# Liste des figures

## Chapitre I: Les Bétons Autoplaçants (BAP)

<b>Figure.I.1)</b> Essai d'étalement (SLUMP FLOM) .....	12
<b>Figure.I.2)</b> Essai de boîte en L .....	12
<b>Figure.I.3)</b> Essai de stabilité au tamis .....	13
<b>Figure.I.4)</b> Essai d'entonnoir .....	13
<b>Figure.I.5)</b> Essai de boîte en U .....	14
<b>Figure.I.6)</b> Essai d'étalement modifié .....	14

## Chapitre II: Généralités sur les Déchets du Verre et la Mousse de Verre

<b>Figure II.1)</b> Comparaison entre la silice cristalline et amorphe .....	25
<b>Figure II.2)</b> Diffractogramme de rayons X d'un mélange de deux composés : l'un vitreux et l'autre cristallin .....	26
<b>Figure II.3)</b> Calcin traité .....	27
<b>Figure II.4)</b> Image prise par MEB sur le granulats de verre mousse .....	28
<b>Figure II.5)</b> Granulat à base du verre mousse .....	29
<b>Figure II.6)</b> Processus de fabrication des granulats de verre mousse. ....	31
<b>Figure II.7)</b> Domaine d'application des granulats de verre mousse .....	34
<b>Figure II.8)</b> Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport Eau/ciment .....	35
<b>Figure II.9)</b> Résistance à la compression à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulats traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass).....	35
<b>Figure II.10)</b> Résistance à la traction par flexion à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulats traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass)..	36
<b>Figure II.11)</b> Des images obtenues par MEB des mortiers réalisés avec 30% de granulats de verre mousse (GFG) après 14 jours de durcissement .....	36
<b>Figure II.12)</b> Distribution des pores et la structure des pores de la mousse de verre-céramique avec 8% d'argile comme charge minérale .....	37

## *PARTIE PRATIQUE*

## Chapitre III: Caractérisation des Matériaux Utilisés

<b>FigureIII.1)</b> Filler de calcaire .....	41
<b>FigureIII.2)</b> Superplastifiants .....	41
<b>FigureIII.3)</b> Sable de KEDDARA .....	43
<b>FigureIII.4)</b> Analyse granulométrique de sable de KEDDARA .....	45
<b>FigureIII.5)</b> Poudre de calcin 200 µm .....	46
<b>FigureIII.6)</b> Elaboration de différents types des granulats de verre mousse .....	49
<b>FigureIII.7)</b> Schéma technologique proposé pour la fabrication des granulats .....	50

<b>Figure III.8)</b> Le régime thermique d'élaboration de verre mousse .....	51
<b>Figure III.9)</b> Granulats de verre mousse (a) sans additif (b) avec 10% d'argile (c) avec 10% de chamotte .....	52
<b>Figure III.10)</b> Analyse granulométrique des granulats artificiels .....	52

## Chapitre IV: *Formulation des Mortiers Autoplaçants*

IV.1) Malaxeur pour des mortiers autoplaçants .....	57
---	----

## Chapitre V: *Résultats et Interprétations*

<b>Figure V.1)</b> Essai d'étalement sur le mortier autoplaçant frais .....	59
<b>Figure V.2)</b> Fluidité des mortiers étudiés en fonction des différents types des granulats fins de verre mousse .....	59
<b>Figure V.3)</b> Granulats de verre mousse (a) sans additif (b) avec 10% d'argile et (c) avec 10% de chamotte .....	60
<b>Figure V.4)</b> Eprouvette d'un mortier autoplaçant à l'état frais et durci .....	61
<b>Figure V.5)</b> La masse volumique apparente des MAP en fonction de différentes variantes de MAP à 28 jours de durcissement .....	62
<b>Figure V.6)</b> L'évolution de la porosité des MAP en fonction des différents types des granulats artificiels .....	63
<b>Figure V.7)</b> L'évolution de l'absorption d'eau des MAP en fonction des différents types des granulats artificiels.....	64
<b>Figure V.8)</b> Relation de la porosité et l'absorption d'eau en fonction des différents types des granulats artificiels.....	66
<b>Figure V.09)</b> Essai de traction par flexion.....	66
<b>Figure V.10)</b> L'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés ....	66
<b>Figure V.11)</b> Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés .....	67
<b>Figure V.12)</b> Essai de la compression .....	68
<b>Figure V.13)</b> L'évolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.....	68
<b>Figure V.14)</b> Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.....	68
<b>Figure V.15)</b> Appareil Ultrasonique .....	69
<b>Figure V.16)</b> Module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés à 28 jours .....	70

## Liste des tableaux

### Chapitre II: Généralités sur les Déchets du Verre et la Mousse de Verre

Tableau II.1) Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé .....	33
--	----

### Chapitre III: Caractérisation des Matériaux Utilisés

Tableau III.1) Caractéristiques physiques du ciment.....	39
Tableau III.2) Résistance à la compression et à la flexion du ciment. NF EN 196-1 .....	40
Tableau III.3) Composition chimique du ciment par diffraction des rayons X .....	41
Tableau III.4) Composition minéralogiques du ciment par fluorescence X .....	40
Tableau III.5) Analyse chimique du calcaire par fluorescence X .....	41
Tableau III.6) Analyse minéralogique du calcaire.....	41
Tableau III.7) Propriétés physiques du calcaire .....	41
Tableau III.8) Caractéristiques physiques du sable lavé concassé (0/5) selon la norme NF EN 933-1 .....	43
Tableau III.09) Analyse granulométrique par tamisage du sable lavé (KEDDARA) selon la norme NF EN 933-1 .....	44
Tableau III.10) Analyse minéralogique de sable de KEDDARA .....	45
Tableau III.11) Analyse chimique du calcin par fluorescence X.....	46
Tableau III.12) Propriétés physiques du calcin.....	47
Tableau III.13) Analyse chimique de l'argile grise par fluorescence X.....	47
Tableau III.14) Propriétés physiques du l'argile grise.....	47
Tableau III.15) Analyse chimique de la chamotte par fluorescence X.....	49
Tableau III.16) Propriétés physiques du la chamotte .....	49
Tableau III.17) Analyse chimique des granulats artificiels .....	51

### Chapitre IV: Formulation des Mortiers Autoplaçants

Tableau IV.1) Intervalles pour chaque constituant selon la méthode JAPONAISE .....	53
Tableau IV.2) Composition pour 1 m <sup>3</sup> du BAP.....	55
Tableau IV.3) La composition du MBE dans 1 m <sup>3</sup> .....	56

### Chapitre V: Résultats et Interprétations

Tableau V.1) Essai de l'étalement.....	59
Tableau V.2) Masse volumique apparent des mortiers étudiés .....	61
Tableau V.3) Porosité des éprouvettes .....	63
Tableau V.4) Absorption d'eau des éprouvettes .....	64
Tableau V.5) Résistance à la traction par flexion des MAP étudiés .....	66
Tableau V.6) Résistance à la compression des MAP étudiés .....	67



### **PREAMBULE.**

Le **CETIM** « Centre d'étude et de services Technologiques de l'industrie des Matériaux de construction » est une EPA/SPA créée dans le cadre du redéploiement de l'ENDMC.

Le CETIM a donc l'avantage de pouvoir disposer d'un outil opérationnel et de démarrer sur des bases « humaines », financières et patrimoniales assainies.

Ce potentiel appréciable réuni le minimum de condition et offre une opportunité aux opérateurs de la branche des matériaux de construction de développer à terme un outil collectif pouvant disposer des services technologiques d'appui à la production de forte valeur ajoutée.

Ce centre, comme il existe dans un bon nombre de pays, pourra jouer rôle moteur dans le secteur compte tenu de contexte actuel et en perspective, caractérisé par la libéralisation du commerce et la nécessité de rendre l'outil de production plus performant, pour permettre aux entreprises d'être compétitives et au diapason des exigences de marché.

Le CETIM est appelé à devenir l'outil privilégié de ces opérateurs pour les accompagner dans leurs nécessaires efforts de réhabilitation, rentabilisation et développement.

Ce document renferme une présentation de CETIM, rappelle ses principales missions et énumère les diverses activités pouvant être réalisées en collaboration avec le CETIM.

---

---

## **PRESENTATION DE L'UNITE**

---

---

### **PRESENTATION DU CETIM.**

Un outil collectif pour accompagner les entreprises de production de l'industrie des matériaux de construction dans leurs efforts de mise à niveau de rentabilisation et de développement.

### **Le CETIM DISPOSE :**

- De laboratoires d'analyse et d'essais en phase d'accréditation pour tous les produits de l'industrie des matériaux de construction.
- De structures de services spécialistes d'appui à la production.
- D'équipes pluridisciplinaires et de recherches.

### **LE CETIM COMPTE RENFORCER SES MOYEN PAR :**

- Des investissements d'appoints et de mise à niveau de son laboratoire.

L'acquisition des équipements et la mise en place d'un laboratoire de métrologie industrielle.

- La réalisation et la gestion d'un centre technique de documentation et d'information de la branche des matériaux de construction.
- Une implantation régionale pour mieux servir et être à l'écoute de ses clients.
- La recherche de partenariats pour développer des services technologiques de pointe dans les domaines spécifique suivants :
  - la métrologie.
  - Les études d'expertises technologiques.
  - Le management de la qualité.
  - L'exploitation d'un vivier d'expert que peuvent fournir les centres universitaires existants à Boumerdes.

### **LE CETIM COUVRE LES DOMAINES D'ACTIVITE SUIVANTES :**

- Les liants hydrauliques : ciments.
- Les liants aériens : plâtre et chaux.
- Les bétons : bétons lourds, bétons légers et bétons autoclaves.
- Les granulats : légers et lourds.
- Les céramiques : fines réfractaires

## **PRESENTATION DE L'UNITE**

---

- Les terre cuites : briques et les tuiles, hourdis .

### **LE CETIM A POUR MISSION ESSENTIELLE DE :**

- Contribuer pour améliorer la qualité et la productivité dans l'industrie de matériaux de construction.
- Garantir la qualité des produits fabriqués.
- Contribuer a la sauvegarde et à la préservation de l'environnement.
- Contribuer à la définition et à la mise en place des règlements normes régissant les produits, matières des produits de l'industrie des matériaux de construction.
- Assuré les contrôles de conformité des règlements et normes.
- Contribuer a la maîtrise de la consommation de l'énergie.
- Améliorer les produits existants et favoriser l'innovation d'autres produits.
- Contribuer a rassemblé les moyens nécessaires à la conduite de mandats d'études et de recherches dont les résultats profitent à tous
- Collecter l'information technique utile aux industriels et la diffuser par les voies modernes de communication.
- Développer la certification des produits et la gestion industrielle de la qualité.
- Assurée une assistance multiformes aux opérateurs de la branche et leur dispense des services d'appui à la production de haute technicité proposé une grande variété de prestation techniques d'études, l'essai et analyse, d'expertise, de diagnostics de formation spécifique.
- Contribuer à la maîtrise de la technologie, aux transferts des connaissances ainsi qu'à leur diffusion et entretenir le lien avec l'industrie.

### **Contrôles en vue de la certification produit.**

- Essais types selon produit.
- Gestion des étalons de reconnaissance de label CETIM.

### **Métrologie.**

- Mesure et contrôle de la métrologie.
- Gestion des étalons de référence.

## **PRESENTATION DE L'UNITE**

---

---

### **Protection de l'environnement.**

- Contrôle de conformité aux normes et règlement (rejets poussières, gaz, eaux usées)
- Restauration des sites.
- Traitement des déchets et de sous-produit pour les besoin de l'industrie de Matériaux de construction.

### **Economie de l'énergie.**

- Bilans énergétiques.
- Recommandations pour l'utilisation et l'énergie.

### **Etudes et assistance.**

- Etudes prospectives des marchés locaux et extérieurs.
- Contrôle de l'exploitation des carrières.
- Etudes des procédés technologiques.
- Assistance pour la réhabilitation industrielle.
- Assistance pour le management de la qualité

### **Recherche scientifique appliqué.**

- Recherche d'adaptation des caractéristiques des produits à des exigences Particulières.
- Développement de nouveaux produits.
- Etudes de problèmes spécifiques liés à la production.

### **Centre techniques information documentation archives .**

- Recueil, centralisation et diffusion des informations relatives aux activités de la Branches de matériaux de construction.
- Gestion de la documentation.
- Gestion des dossiers technique (plans, notes de calcules).
- Edition et diffusion de bulletin d'information techniques.
- Constitution d'un réseau professionnelle.
- Constitution d'un fichier d'experts locaux et étrangers.
- Mise a disposition d'expert pour des mission ponctuelle.

## **PRESENTATION DE L'UNITE**

---

- Promotion et organisation de la coopération industrielle.
- Participation à la mise en place de normes et règlement.
- Animation de stages de formation et d'information.
- Développement des relations Université /entreprise.

## **Introduction Générale**

Toujours dans le cadre de la valorisation des déchets industriels dans les matériaux de construction, les recherches continuent pour trouver d'autres utilisations adéquates de ces déchets. En particulier, les déchets d'origine minéraux sont actuellement utilisés dans la fabrication des bétons soit en tant qu'ajouts minéraux par substitution partielle du ciment, soit en tant que granulats fins ou granulats grossiers par substitution des granulats traditionnels. A cet égard, notre étude a pour but de valoriser les déchets d'origines minérales en particulier les déchets de verre et de la chamotte pour produire des granulats fins de verre mousse. Ce travail porte sur la formulation et la caractérisation physico-mécanique d'un mortier autoplçant, élaboré à partir d'un granulat fin (en tant que sable) à base du verre mousse. Les granulats fins de verre mousse, seront fabriqués à partir du déchet de verre (calcin), du déchet de la brique (chamotte) ou d'argile et calcaire. Trois types de granulat de verre mousse, vont être élaborés à une température 850°C, dont la composition du mélange se défère par le type de déchet utilisé (chamotte, argile et calcaire). Une fois les granulats de verre mousse sont obtenus après le traitement thermique, des mortiers autoplçants seront fabriqués à base de ces granulats en substituant totalement le sable. Des essais physiques (fluidité, masse volumique, porosité, absorption) et mécaniques (résistance mécanique à la traction et à la compression), seront réalisés sur ces mortiers. Les résultats obtenus seront comparés avec ceux obtenus sur des mortiers autoplçants à base du sable naturel.

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 autoplaçants et les mortiers autoplaçants.
- Le chapitre II décrit des notions générales sur les verres et 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 du verre). Dans le même chapitre, la procédure de fabrication des granulats de verre mousse ainsi que les différentes caractéristiques, ces derniers seront traités.
- Le chapitre IV est consacré à la formulation d'un béton autoplaçant par la méthode japonaise et les mortiers autoplaçants par la méthode des mortiers de béton équivalent (MBE). Les différentes variantes des mortiers étudiés ainsi que leur protocole de mélange sera présenté dans ce chapitre.
- Le chapitre V donnera les résultats des différents essais et leurs interprétations.

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

# Chapitre I. Les Bétons **Autoplaçants (BAP)**

*Le présent chapitre traite des généralités sur les bétons autoplaçants, dont les constituants de ce type des bétons, leurs propriétés essentielles et les méthodes de formulation utilisées dans les BAP. Les connaissances sur ces types des bétons, leurs particularités de point de vue propriétés à l'état frais ainsi que leurs méthodes de formulation seront présentées dans ce chapitre. Egalement, un état de l'art sur les mortiers 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. Ces bétons hyper fluides étaient en même temps stables et connaissaient une bonne résistance à la ségrégation et au ressuage. 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.

Ces bétons contiennent souvent des agents colloïdaux dans le but de résister à la ségrégation des gros granulats et aussi au phénomène de ressuage. 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.

Les bétons autoplaçants offrent des possibilités d'utilisation très intéressantes dans de nombreux domaines : constructions ; renforcement ainsi que la réparation d'ouvrage d'art

(application des couches minces dans des endroits difficiles d'accès) ; construction d'éléments préfabriqués à hautes résistances, moulage et mise au point de béton pour canalisation (béton coulé sous l'eau pour des réparations, béton confiné, pieux...etc.).

Nous citons quelques exemples de réalisations Japonaises :

- Le pont Kiba Park ou 650 m<sup>3</sup> des bétons autoplaçants ont été utilisés avec une résistance à la compression à 28 Jours de l'ordre de 60 Mpa . [1]
- Le pont Akashi Kaikyo, le plus long pont suspendu au monde d'une portée de (3910m) ou 390.000 m<sup>3</sup> des bétons autoplaçants versés dans les coffrages des fondations et des piliers (OKAMURA et Coll (1994). [1]
- Le bâtiment Landmark Tower, où un béton autoplaçant de déformabilité remarquable a été mis en place dans 66 colonnes de 40 m de hauteur chacune (HAYAKAWA et Coll.1995). [1]
- Le stade de Fukaka ou 10.000 m<sup>3</sup> des bétons autoplaçants ont été utilisés pour des sections très ferrillées de forme complexe (IZUMI et Coll.1995). [1]

Nous notons d'autre part que diverses structures (réservoir, murs de soutènement, poteaux... etc.) ont été construites en totalité ou en partie avec des bétons autoplaçants.

## **I.2). Définition**

Le béton autoplaçant (BAP) est un béton qui, à l'état frais est caractérisé par une fluidité tel que, par le seul effet de son poids propre et son énergie de compactage supplémentaire, suffit pour le remplissage des formes les plus complexes : le BAP est un béton qui se compacte de lui-même par effet gravitaire, sans aucun apport d'énergie de compactage (par ex : vibration, damage). Il est capable de remplir complètement le coffrage, même à travers une nappe d'armature dense ou en présence d'autres obstacles, tout en ayant une résistance à la ségrégation suffisante pour rester homogène lors du transport, du pompage, et de la mise en œuvre. [2]

Le béton autoplaçant (BAP) et le béton vibré se différencient par les propriétés du béton frais et le mode de mise en œuvre. Ils sont capables de s'écouler sous leur propre poids, quel que soit le confinement du milieu, et restent homogènes au cours de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique). [2]

Les propriétés caractéristiques de ce béton sont les suivantes :

- Fluidité et viscosité élevées, sans aucune tendance à la ségrégation.
- Désaération du béton pendant son écoulement.
- Excellence aptitude au remplissage des moindres recoins du coffrage par un béton homogène, même en présence de réservations, d'incorporés et de ferrailage dense.

Le dispendieux et fastidieux travail de vibration est ainsi supprimé. [2]

### I.3). Classification des BAP

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

À l'origine, la formulation de BAP, imaginée par les Japonais (et, plus particulièrement, le professeur Okamura à la fin des années 1980), est conçue pour réaliser des ouvrages de génie civil, à forte densité d'armatures, pour lesquels des anomalies de mise en œuvre étaient redoutées. Aujourd'hui, et plus particulièrement en Europe, l'utilisation des BAP se développe dans le domaine de la préfabrication et dans celui du béton de bâtiment coulé en place, nécessitant des formulations de BAP différentes : pour le bâtiment elles doivent être moins performantes techniquement (en termes de caractéristiques mécaniques à 28 jours et de qualités d'ouvrabilité) et plus économiques. [3]

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

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

- **catégorie 1** : il s'agit des ouvrages horizontaux de faible épaisseur (planchers, dalles) pour lesquels le ferrailage est léger et le béton peut être facilement réparti sur toute la surface ;
- **catégorie 2** : elle couvre les ouvrages horizontaux épais pour lesquels les risques de ségrégation statique sont importants, et les ouvrages verticaux courants (on exclut le cas des ouvrages à très forte densité de ferrailage) ;
- **catégorie 3** : ce sont les ouvrages exigus ou très fortement ferrillés (pour lesquels l'écoulement du béton dans le coffrage est le plus difficile). [4]

#### **I.4). Avantages du BAP**

Les Bétons autoplaçants sont hyperfluides et se mettent en place, sans vibration, sous l'effet de leurs propres poids et de leurs caractéristiques d'écoulement. Ils épousent ainsi des formes de coffrage complexes. Ils offrent de nombreux avantages :

- Réduction des délais, gain de productivité, économie de main d'œuvre.
- Amélioration des conditions de travail et de sécurité.
- Qualité des parements accrue.
- Améliorent les conditions de travail sur les chantiers.
- Une diminution de risque de fissuration.

#### **I.5). Les constituants d'un BAP**

La qualité du béton dépend de la qualité de la pâte et du granulat, ainsi que de celle du lien qui les unit. Dans du béton bien constitué, chaque particule de granulat est complètement enrobée de pâte et tous les espaces entre les particules sont complètement remplis de pâte. Pour toute combinaison de matériaux et de conditions de cure, la qualité du béton durci dépend dans une large mesure de la quantité d'eau utilisée par rapport à celle du ciment. Une teneur en eau élevée dilue la pâte (la colle du béton).

La réduction de la quantité d'eau présente les avantages suivants :

- Augmentation de la résistance en compression et en flexion.
- Réduction de la perméabilité, donc augmentation de l'étanchéité et diminution de l'absorption.
- Résistance accrue aux agents atmosphériques.
- Amélioration de l'adhésion entre les couches successives et entre le béton et l'armature.
- Réduction des tendances à la fissuration causée par le retrait.
- Réduction des variations de volume imputables au mouillage et au séchage. [5]

### **I.5.1). Les ciments**

Le ciment est un liant hydrauliques qui durci tant à l'air que sous l'eau. Il est obtenu par broyage fin du clinker avec une quantité nécessaire de gypse et un/ ou ajout (s) minéraux actifs (ciment composé), faite simultanément ou par malaxage minutieux des mêmes matériaux broyés séparément.

Les ciments sont des produits normalisés de fabrication industrielle faisant partie des matériaux de construction courants. Ils sont destinés principalement à la confection des bétons dans lequel ils jouent le rôle de liant. Il existe plusieurs types de ciments. Chaque type de ciment présente des aptitudes à l'emploi pour des applications liées au type d'ouvrage considéré, à son environnement, aux performances requises et à la technique de mise en œuvre retenue.

A travers le monde, l'industrie cimentière met sur le marché de nombreux types de ciments afin de répondre aux différents problèmes rencontrés lors de la construction d'ouvrages, qu'il s'agisse de résister à certaines attaques physiques ou chimiques, de présenter des caractéristiques mécaniques compatibles avec les contraintes appliquées ou pour tenir compte des mises en œuvre particulières.

Les ciments sont essentiellement constitués de clinker auquel on peut ajouter les autres constituants suivants :

- Calcaires.
- Laitiers granulés de haut fourneau.
- Cendres volantes.
- Fines calcaires.
- Pouzzolanes naturelles.
- Schistes calcinés.
- Fumées de silice.

Il existe cinq types de ciments courants qui sont :

- Le ciment portland.
- Le ciment portland composé.
- Le ciment de haut fourneau.
- Le ciment pouzzolanique.

- Le ciment au laitier et aux cendres.

En principe tous ces ciments conviennent pour la fabrication de BAP.

### **I.5.2) L'eau**

Toute eau du réseau public d'eau potable convient à la fabrication de BAP. Les eaux recyclées de gâchage et de lavage ne conviennent que sous certaines conditions restrictives. En raison d'éventuels effets indésirables sur les propriétés du béton. Etant donné que le dosage en eau influence de manière considérable sur la viscosité et la capacité de remplissage du BAP, il est indispensable de s'écarter le moins possible de la valeur planifiée. Il est ainsi très important de mesurer et de prendre en compte l'humidité des granulats et tout spécialement du sable. Cas échéant, on tiendra également compte de la teneur en eau des adjuvants. [6]

### **I.5.3) Les granulats**

Les granulats roulés ou concassés peuvent en principe être utilisés. Les granulats roulés en vrac présentent un plus petit volume de vide inter-granulaire, ce qui nécessite une plus faible quantité de pâte de ciment pour le remplir. La flottabilité des granulats concassés dans la pâte de ciment est cependant meilleure, en raison de leur plus grande surface spécifique à masse identique.

Afin d'empêcher tout risque de blocage du BAP par les barres d'armature lors du coulage, on limite en général le diamètre maximal des granulats à 16 mm. L'expérience a néanmoins montré qu'il était également possible d'utiliser des granulats de diamètre maximal différent. Le mélange pour béton (granularité) est caractérisé par une teneur élevée en sable et en éléments fins. Le passant au tamis de 2 mm devrait être idéalement compris entre 38 et 42%. De même, la proportion de farines (0,125 mm) ne devrait pas être trop faible, l'optimum étant situé entre 4 et 8% .le choix d'une granularité continue appropriée est très important, étant donné la forte incidence du volume des vides sur la quantité nécessaire de pâte de ciment. Afin d'assurer une bonne stabilité du BAP (éviter toute ségrégation), il est recommandé de choisir un sable spécialement optimisé, au besoin recomposé à partir de plusieurs fraction. [6]

#### **I.5.4). 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:

- 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).

L'utilisation croissante d'ajouts cimentaires dans le béton de ciment Portland a entraîné la publication en 1982 d'une nouvelle norme CSA- A23.5, qui fut révisée en 1986. La norme CSA A23.5 reconnaît trois groupes d'ajouts cimentaires : les fumées de silice, les pouzzolanes, les Laitiers granulés. [6]

#### **I.5.5) Filler de calcaire**

Les fillers calcaires sont des produits secs, très fins, issus du broyage, du sciage, de la taille ou du travail de la roche calcaire naturelle. Ils se présentent sous forme de poudres non abrasives, principalement constituées de cristaux rhomboédriques de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), de dolomie ( $(\text{Ca},\text{Mg})_2 \text{CO}_3$ ) et de quartz ( $\text{SiO}_2$ ). Quelques carbonates tels que la sidérite ( $\text{FeCO}_3$ ), l'ankérite ( $\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4$ ) et la magnésite ( $\text{Mg}_2\text{CO}_3$ ) sont communément associés aux gisements, en tant que composants mineurs. La dimension maximale des grains, déterminée conformément à la norme EN933-10 doit être inférieure à 2 mm. Le passant au tamis de 63  $\mu\text{m}$  doit, pour sa part, être supérieur à 70 %. Leur surface spécifique est généralement proche de celle du ciment. Les fillers calcaires ne réagissent pas ou peu chimiquement avec les composants du ciment ou l'eau de gâchage. Quand ils sont ajoutés aux matériaux cimentaires, ils constituent un lieu de nucléation et de germination pour les hydrates. En France, ces fillers calcaires sont beaucoup utilisés dans la fabrication des ciments composés (CEMII/A ou B – L), mais ils peuvent aussi être directement incorporés lors de la fabrication des bétons, notamment des bétons autoplaçants.

Zhu et Gibbs [168] ont étudié l'influence de différents types de filler calcaire. Dans le cas des pâtes de ciment, le type de filler utilisé ne semble pas avoir d'influence sur l'étalement. Par contre, si on s'intéresse au béton, ils montrent que le type de filler a une forte incidence sur la quantité de superplastifiant pour un étalement donnée. En effet, le filler à base de craie demande plus d'adjuvantation que le filler calcaire. La différence intervient dans la présence d'impuretés, la compacité et le processus d'absorption. Malgré cela, quel que soit le type de filler utilisé, leurs résultats montrent que plus il y a de filler en remplacement du ciment, moins il faut de superplastifiant pour atteindre un étalement donnée.

### **I.5.6). Les Superplastifiants**

Afin d'obtenir la très grande fluidité requise d'un béton autoplaçant, on utilise généralement un adjuvant fluidifiant de la dernière génération, à base de polycarboxylate.

Ces adjuvants permettent de réduire de manière importante le dosage en eau tout en ayant également un effet sur la viscosité. L'efficacité d'un adjuvant peut être plus ou moins prononcée selon le ciment et les additions utilisés (compatibilité). De plus, un dosage élevé en adjuvant retarde généralement le début de prise. L'utilisation d'un adjuvant stabilisateur permet de réduire le risque de ségrégation du BAP (ressuage, granulats grossiers coulant vers le bas), qui devient ainsi plus stable et moins sensible aux variations du rapport E/C.

Les superplastifiants interagissent avec les particules du ciment et celles des fines en s'adsorbant à leur surface pour diminuer le phénomène de floculation. La grande fluidité des bétons autoplaçants est assurée par des dosages relativement important en superplastifiants. Ainsi, les particules sont dispersées par combinaison d'effets électrostatiques et stériques et la proportion d'eau libre est plus importante. [6]

La capacité de remplissage d'un BAP croît avec le dosage en fluidifiant jusqu'à un maximum au-delà duquel le phénomène de ségrégation apparaît. Selon [Okamura et al 1994] rapporté par [Trudel 1996], l'utilisation d'un superplastifiant à faible perte d'étalement est essentielle pour la confection des bétons autoplaçants. Certains fluidifiants comme le FPC (fluidifiant constitué d'un mélange de deux polymères de structure très complexe [Mivra 1998] permettent d'atteindre des étalements de 250 mm sans ségrégation, ce qui n'est pas le cas avec PC (polymère de type polycarboxylate) et NC (naphtalène sulfonate) par exemple [Hasni 1999].

## **I.6). Les propriétés du béton autoplaçant à l'état frais et l'état durci**

### **I.6.1). Les propriétés principales d'un BAP à l'état frais**

Les BAP se distinguent des bétons ordinaires principalement par leurs propriétés à l'état frais. Les critères caractérisant un béton autoplaçant sont :

1. Les valeurs cibles d'étalement au cône d'Abrams sont généralement fixés dans la Fourchette 60 cm à 75 cm (et pas de ségrégation visible en fin d'essai : auréole de Laitance ou amoncellement de gros granulats au centre).
2. Le taux de passage à la boîte en L doit être supérieur à 0,8.
3. Le béton doit être stable sous l'effet de la gravité (pas de ségrégation) et présenter une capacité de ressuage limitée. L'absence de ségrégation visuelle lors de l'essai d'étalement au cône d'Abrams n'est pas suffisante. [4]

### **I.6.2). Caractérisation du béton frais**

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

- mobilité en milieu non confiné (essai d'étalement) ;
- mobilité en milieu confiné (essai boîte en L) ;
- stabilité (résistance à la ségrégation et au ressuage).

#### **I.6.2.a). Essai d'étalement**

Pour la détermination de l'étalement (Slump Flow) on utilise le même cône que celui normalement utilisé pour l'essai d'affaissement. Ce cône est placé sur une plaque d'étalement, à surface propre et humidifiée et de dimension suffisante, puis il est rempli de béton BAP. Le cône est ensuite soulevé et le BAP en sort en formant une galette qui s'élargit sous sa propre énergie, sans qu'il soit nécessaire de soulever et de laisser retomber la plaque, comme dans l'essai classique d'étalement. La valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette de béton ainsi obtenue, qui devrait être comprise entre 600 et 800mm. La tendance à la ségrégation peut être évaluée qualitativement. Les granulats grossiers devraient être répartis uniformément et aucune concentration ou séparation de fines ne devrait apparaître sur les bords de la galette. Il est utile de documenter le résultat de cet essai au moyen de photographies. La façon de disposer le cône n'est pas réglementée en Suisse par une norme. L'important est de procéder toujours de la même manière.

Lorsque la petite ouverture se trouve en bas, le remplissage du cône avec le BAP est facilité et son soulèvement est empêché. Dans ce cas il en résulte une valeur d'étalement plus élevée de 20 à 40 mm, par rapport à celle obtenue avec le cône disposé en sens contraire pour le même béton [4]

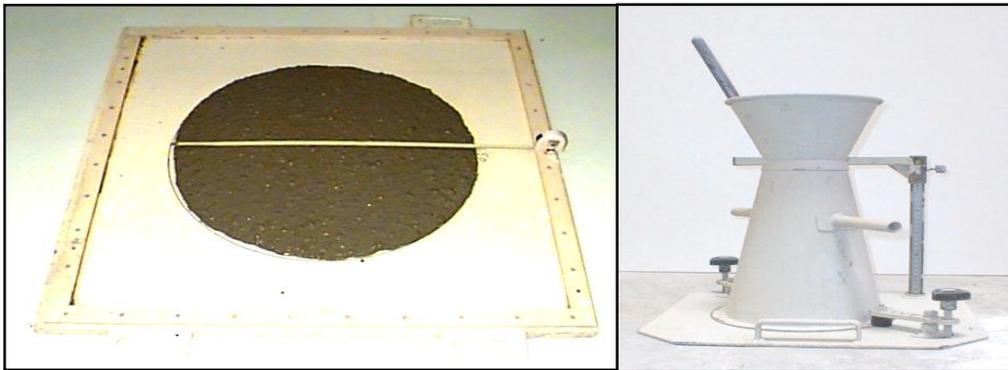


Figure.I.1). Essai d'étalement (SLUMP FLOM).

En 2002, les recommandations en termes d'étalement admissible définissaient la fourchette : 600-750 mm. Depuis, différentes classes de BAP ont été désignées en fonction du type d'application. Ainsi, différentes classes d'étalement ont été définies :

- Classe SF1 : étalement compris entre 550 et 650 mm.
- Classe SF2 : étalement compris entre 660 et 750 mm.
- Classe SF3 : étalement compris entre 760 et 850 mm. [4]

### I.6.2.b). Essai de la boîte en L

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 H1, H2 et le résultat est exprimé en termes de taux de remplissage  $H2/H1$ .

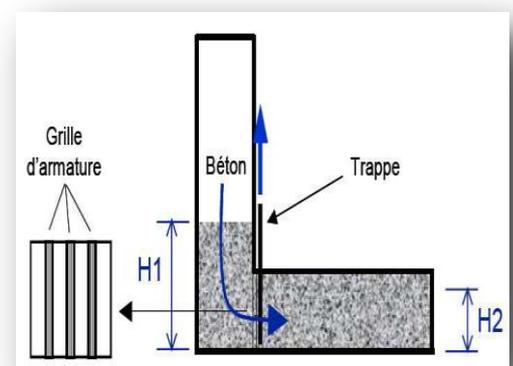


Figure.I.2). Essai de boîte en L.

Ce rapport permet de caractériser la dénivellation et doit être supérieur à 0,8. [8]

### I.6.2.c). Essai stabilité au tamis

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 5 mm.

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 (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 : [4]

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

### I.6.2.d). 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 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. [8]



Figure I.3). Essai de stabilité au tamis.



Figure I.4). Essai d'entonnoir.

### I.6.2.e). Essai de boîte en u ('u-box test')

L'essai de la boîte en U permet de caractériser la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocages inacceptables. [9]



Figure.I.5). Essai de boîte en U.

### I.6.2.f). 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. [8]

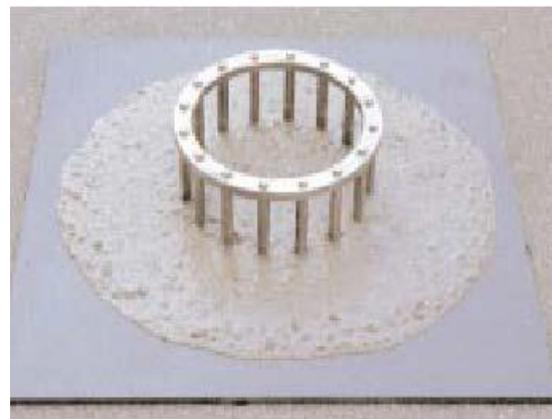
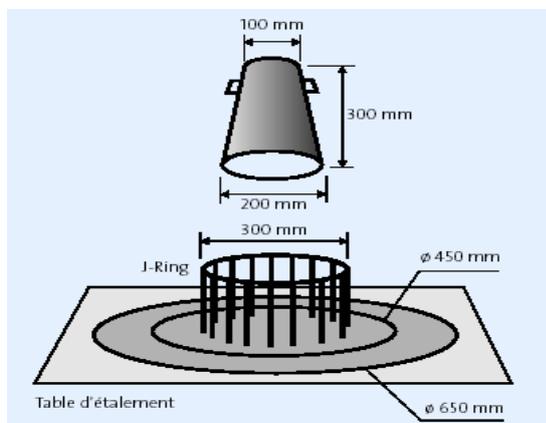


Figure.I.6). Essai d'étalement modifié.

### I.6.3). Les propriétés principales d'un BAP à l'état durci

La caractérisation du béton autoplaçant à l'état durci est basée sur les résistances à la compression et à la traction par comparaison avec celles du béton ordinaire. Nous constatons que ces valeurs de résistances des bétons autoplaçants sont supérieures à celles des bétons ordinaires de l'ordre de, respectivement, 36% et 48 % à 28 jours [7].

### **I.6.3.a). Résistance à la compression**

Les BAP se caractérisent par un rapport E/C bas, ce qui amène à des bonnes résistances mécaniques. L'utilisation de filler dans une formulation de béton génère une accélération de sa résistance mécanique au jeune âge. Les particules fines du filler, lorsqu'elles sont bien défloculées par les superplastifiants, favorisent l'hydratation du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Ces effets ont une influence sensible sur la résistance mécanique jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Zhu et Gibbs ont montré que la résistance de BAP utilisant la poudre de pierre à chaux augmente de 50 à 80 % de celle de référence à 7j et 20 à 40 % à 28 j, 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 adjuvants dans les formulations de BAP peut aussi avoir une influence sur l'évolution de la résistance mécanique du béton. Ainsi, l'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [7].

### **I.6.3.b). Résistance à la traction**

Gibbs 99 ont constatés 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 références. En comparant des mélange de BAP ont le même E/C on trouve que le type et la finesse de poudre affecte peu la résistance en traction [7].

### **I.6.3.c). Module d'élasticité**

Les différents matériaux de BAP peuvent montrer un différent comportement de relation contrainte-déformation si les BAP contiennent une basse quantité de gros granulats si on se réfère à la formule réglementaire du module ( $E_{ij} = 11000 f_{cj}^{1/3}$ ), celui-ci ne dépend que de la résistance du béton. Ainsi, à résistance égale, un béton autoplaçant aurait donc le même module qu'un béton vibré [7].

### **I.6.3.d). Le retrait**

Le retrait endogène des BAP est plus faible (les valeurs s'échelonnent entre 50-2005(um/m) que celui des BV. Le retrait endogène est similaire pour BAP et BV, présentant le même rapport E/C, la présence de l'addition n'a en général pas d'effet significatif ; au moins à long terme ;

Sur la déformation chimique. Les données sur le retrait de séchage sont très partagées d'un côté le retrait total est trouvé équivalent pour BAP et BV et de l'autre, il est partagé d'un sensiblement supérieur dans le cas des BAP. Ogawa et Al, constatent que le retrait de séchage des BAP est supérieur à celui des BV est ceci parce que la quantité de fine qu'ils contiennent est plus importante [7].

### **I.6.3.e). Le fluage**

Le peut être défini comme une augmentation de la déformation sous une contrainte constante. Comme cette augmentation de la déformation peut être plusieurs fois supérieure 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 du ciment. Proust trouve des valeurs de même ordre de grandeur de BAP et pour BV. Ces résultats sont confirmés par Turcry, ou il indique qu'en compression, le fluage total du BAP est identique à celui de BV. [7]

### **I.7). Méthode de formulations des BAP**

Il existe plusieurs méthodes de formulation des BAP par parmi ces méthodes :

- Approche du LCPC.
- Approche japonaise.
- L'approche basée sur l'utilisation du mortier du béton équivalent MBE [1].

#### **I.7.1). Approche du LCPC**

T.SEDRAN et F.LARRARD ont réussi à mettre au point un modèle mathématique développé d'un modèle de suspension solide, il est basé sur les interactions granulaires entre les différents composants du mélange. Ce modèle peut prévoir la compacité d'un mélange granulaire sec avec une précision qui est intérieure à 1% en se basant sur :

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

L'effet de confinement exerce par les armatures et le coffrage sur la compacité du squelette d'un béton, est pris en compte par ce modèle. Le succès de l'utilisation de ce modèle pour prévoir l'évolution de l'ouvrabilité des bétons à hautes performances et des bétons compactés au rouleau en fonction de leur compositions [1].

L'intérêt particulier de ce modèle mathématique est :

- La compréhension et l'évaluation de l'influence des composants sur les propriétés des bétons.
- Le bon choix des matériaux pour les propriétés des bétons frais telles que l'ouvrabilité et la résistance à la ségrégation ou l'état durci à savoir la résistance à la compression, la traction et le retrait.
- La nature et le caractère spécifique d'un projet sont pris en compte lors de la formulation de béton (béton pompé, coulage en zone d'armatures très denses).

Cette approche adopte la procédure ci-après pour la détermination des divers constituants :

1. La proportion du liant est fixée à priori (70% de liant et 30% de filler). Les fillers seront choisis selon la disponibilité des matériaux locaux.
2. La détermination du dosage de saturation en superplastifiant.
3. Détermination du dosage en eau en présence du superplastifiant, ce qui indique indirectement la mesure de la compacité, cette dernière permet l'entrée dans le programme du modèle.
4. Un logiciel spécial va effectuer les calculs en tenant compte du confinement, la viscosité est fixée arbitrairement à  $5.10^4$  Pas qui est une valeur correspondante aux bétons autoplaçants selon l'expérience du LCPC. En conséquence, la quantité d'eau est réduite et la proportion du liant reste constante, tout en optimisant les proportions granulats /pâte liant.
5. On ajoute le dosage en ajout chimique pour l'obtention de l'étalement ciblé, ce qui donne un béton répondant aux critères rhéologiques.

Malgré les programmes de travaux intenses réalisés au LCPC, la nécessité de l'étendue des modèles reliant la composition des mélanges et leur comportement rhéologique est encore exigée. Par ailleurs, les formulations proposées devront être sujettes à des expérimentations en vraie grandeur pour appréhender les problèmes de ségrégation.

### I.7.2). Approche Japonaise

La formulation des BAP par l'approche développée à l'Université de Kochi (1990), se fait de manière sécuritaire, en privilégiant le volume de pâte au détriment des granulats. Les bétons obtenus sont sous dosés en granulats et par conséquent loin d'un optimum économique. Les principes de formulation et leurs applications sont les suivants : [7]

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

### I.7.3). L'approche basée sur l'utilisation du mortier équivalent MBE

L'approche du Mortier de béton Equivalent (MBE) a été initialement développé au CTG (Guerville, France) pour faciliter la sélection des adjuvants de la formulation d'un béton, en utilisant des tests sur mortier au lieu de teste sur béton. En fonction des essais préalable réalisés, les résultats obtenus peuvent être utilisés de façon qualitative ou quantitative. L'expérience accumulée au cours des dernières années dans de nombreuses applications industrielles a confirmé la validité de cette méthode. Cependant, l'ensemble de ces exemples concernait des bétons d'ouvrabilités classiques. [7]

## **I.8). Mortier équivalent de BAP**

### **I.8.1). Méthode de mortier équivalent**

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

#### **Caractéristiques du béton :**

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

#### **Ses constituants :**

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

#### **Sa mise en œuvre :**

- température de béton frais et extérieur ;
- condition de coulage de serrage ;
- durée et conditions de transport.

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

### **I.8.2). Technique du mortier du béton équivalent « MBE »**

#### **I.8.2.a). But de la technique**

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

En ce sens, elle constitue une méthode rapide et faible pour la mise au point des bétons adjuvants et permet de détecter les éventuels incidents rhéologique pouvant survenir sur chantier [1].

### **I.8.2.b). Principe de la technique**

Pour éviter la difficulté à reproduire en laboratoire en utilisant des conditions exacte du malaxage du béton en centrale et pour limité la lourdeur des études sur le béton, il est avéré nécessaire d'utiliser une technique d'essai rapide et capable de fournir des résultats pouvant être reliés avec ceux qui seraient obtenue sur le béton. La méthode retenue consiste à travailler sur la phase mortier du béton avec prise en compte de la surface développée des gravillons écartés. Pour cette raison, la technique a été appelée technique du mortier de béton équivalent (MBE) [1].

Pour utiliser cette technique, il convient de connaitre au préalable les éléments d'identifications des constituants et les bases de composition suivants :

- la granulométrie de chaque classe de granulats ;
- leur masse volumique ;
- leurs taux d'absorption d'eau ;
- leurs teneurs en eau totales ;
- la nature et le dosage de ciment (ou en liant équivalent) ;
- les caractéristiques des adjuvants ;
- la composition granulaire du mélange ;
- le ou les rapports eau efficace-liant (ciment ou liant équivalent) fixés par le chantier.

Ces éléments préalables peuvent être complétés par la connaissance des contraintes particulières imposées par le chantier (durées de transport, variation de température, condition de coulage,...) [1].

Les différents essais rhéologiques qui seront appliqués sur le mortier restent du même type que ceux appliqués sur le béton correspondant. Ainsi, les essais d'affaissement et d'étalement au cône d'abrams du béton correspondant les essais d'affaissement et d'étalement au cône d'abrams du mortier de béton équivalent [1].

### **I.8.3). Essais réalisables sur mortier du béton équivalent**

Le principe de la méthode MBE est basé sur le fait qu'il existe une corrélation simple reliant les propriétés rhéologique d'un béton au mortier qui le compose. Cependant, le mortier qui joue un rôle sur la rhéologie du béton n'est pas directement le mortier déduit du béton. En effet, dans un béton, une partie de la pâte et des grains de sable adhère aux gravillons et ne participe pas à la rhéologie. Le MBE, pour un mortier de béton équivalent, est le nom donné au mortier qui participe à la rhéologie [1].

Il peut être obtenu expérimentalement en tamisant le béton frais au tamis 5 mm. La composition de MBE qui conduit aux mêmes propriétés rhéologiques que celle du mortier tamisé est déduite de celle du mortier du béton en corrigeant la quantité du sable de manière à ce que la surface granulaire du MBE soit la même que celle du béton [1].

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

L'avantage de mesurer sur MBE à la fois l'affaissement et l'étalement permet de balayer une large plage de consistance [1].

#### **I.8.3.a). Essais d'affaissement au mini cône**

Utiliser un mini cône dont la paroi intérieure est propre et légèrement humidifié. La surface d'étalement sur la plaque de base doit également être propre et légèrement humidifier (sans qu'il ne subsiste de l'eau résiduelle sur la plaque) [1].

Pendant le remplissage, le moule est appuyé fermement sur la plaque de base. Au moyen d'une pelle creuse, introduire le mortier dans le moule en trois couches d'épaisseurs équivalentes. Pour chacune des couches, piquer 15 fois le mortier (sauf dans le cas de mortier autoplaçant ou fluide) à l'aide de la tige de piquage métallique, en répartissant les enfoncements sur la surface du mortier et en faisant pénétrer la tige dans la couche sous-jacente s'il y a lieu [1].

Araser en roulant la tige de piquage sur le bord supérieur du moule. Eviter pendant cette opération un compactage supplémentaire du béton. Puis soulever le cône le plus verticalement possible en deux secondes, avec précaution, lentement et sans secousses. Après démoulage, procéder dans la minute à la lecture de l'affaissement au centre de la partie supérieure du mortier à l'aide d'un réglelet métallique gradué en mm [1].

### **I.8.3.b). Essais d'étalement au mini cône**

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

Ces procédures sont valables à toutes les échéances retenues. Pour les suivis rhéologiques dans le temps, remettre après essai un maximum de mortier dans le bol du malaxeur et le couvrir d'une ligne humide ou d'un film plastique en attendant l'échéance suivante. Il est important de bien malaxer 15 secondes à petite vitesse avant chaque nouvel essai [1].

### **I.9). Conclusion**

Selon ce chapitre, les bétons autoplaçants sont des bétons très fluides qui nécessitent un dosage très élevé du mélange liant (ciment + ajout) afin d'assurer cette fluidité et aussi d'éviter le phénomène de ségrégation (séparation des phases). Néanmoins, travaux réalisés sur ce type des bétons sont à la base des granulats classiques ou des granulats obtenus à partir des déchets ou des sous-produits. Cependant, il existe d'autre type des granulats ayant des caractéristiques très intéressants pour les bétons autoplaçants, comme les cas des granulats légers à base du verre mousse. Dans la littérature, aucun travail n'a été réalisé sur les bétons autoplaçants contenant des granulats du verre mousse. Il existe que des travaux de recherche effectuer en utilisant les granulats de verre mousse dans les bétons traditionnels. Pour cela, notre étude a pour objectif d'utiliser ce type de granulats dans les BAP. Le second chapitre sera consacré à présenter des généralités sur les déchets de verre et les granulats de verre mousse.

## **Chapitre II. Généralités** **sur les Déchets du verre** **et la Mousse de verre**

*Notre étude est consacrée à l'utilisation des granulats à base de verre mousse dans la formulation des bétons autoplaçants. Donc il est nécessaire de présenter des connaissances sur le verre mousse ainsi que les déchets du verre. Le présent chapitre vient à apporter ces connaissances. Des généralités sur le verre en tant que matériau, les déchets du verre et le verre mousse, seront données dans ce chapitre. A la fin de ce chapitre, une étude bibliographique sera présentée sur l'utilisation des granulats à base de verre mousse comme granulats légers dans la formulation des bétons ainsi que des travaux essentiels et récents réalisés dans le recyclage du déchets de verre dans le matériau béton.*

### **II.1). Introduction**

Le verre est un des plus anciens matériaux connus par l'homme ; les plus anciens objets datés en verre ont été découverts en Egypte. Ils remontent à environ 300 ans avant J-C, mais vraisemblablement les manières d'obtenir le verre ont été découvertes auparavant en Mésopotamie environ 4500 avant J-C. on peut dire qu'actuellement 95 % des objets de verre sont faits mécaniquement. La première société de technologie du verre fut établie à Sheffield en 1916.

Le verre est obtenu par fusion à haute température aux environs de 1500 C°, d'un mélange du sable et de carbonates de soude ou de potasse additionnés de faibles quantités de carbonate de chaux , de magnésie ,ainsi que d'alumine et de quelques composé mineurs.

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.

Le verre offre des possibilités au bouclage hermétique ceci est une nécessité de base pour la conservation des médicaments, produit alimentaires ...etc.). En ce qui concerne la forme de verre ce dernier a une surface absolument lisse qui ne retient pas d'impuretés, et qui peut être nettoyé facilement par voie mécanique ou chimique et stérilisé aux hautes températures, ceci permet le recyclage multiple de l'emballage en verre.

## **II.2). Définition du verre**

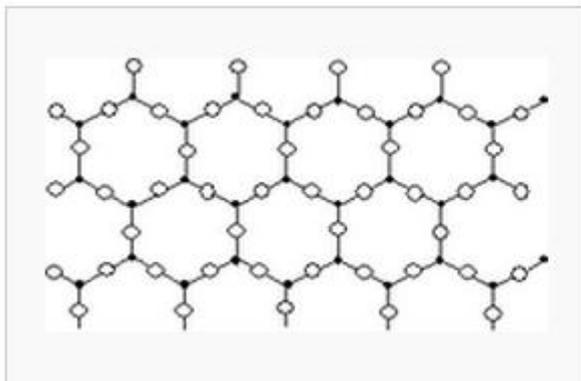
Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile (cassant) et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice  $\text{SiO}_2$ , le constituant principal du sable) et de fondants, c'est le cas du verre sodocalcique utilisé pour les vitrages. Les verres les plus produits actuellement restent des verres silicatés transparents (fenêtres, vaisselles, verrerie de laboratoire...). Cette définition persiste. Néanmoins, le développement de nouveaux matériaux transparents, depuis un siècle, a rendu cette définition désuète et source de confusion (particulièrement parce qu'il est difficile pour le tout de s'assurer qu'un matériau fragile et transparent est bien d'une part réellement dur et d'autre part réellement fait de silice) [10].

À l'inverse, certains matériaux correspondent parfaitement à la définition commune du verre: le quartz cristallin ou certaines céramiques sont des matériaux silicatés, durs, fragiles, transparents dans le visible... mais ce ne sont pas des verres [10].

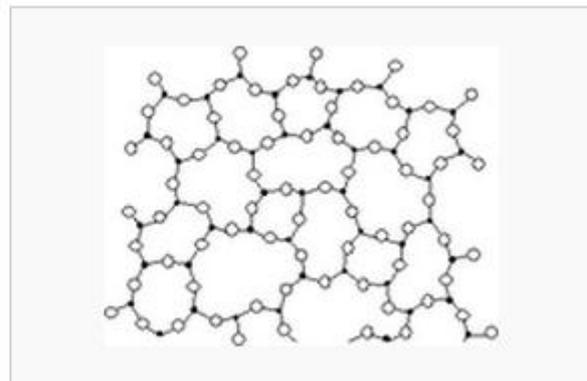
Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition vitreuse, qui varie fortement avec la composition du verre (plus de  $1000^\circ\text{C}$  pour la silice vitreuse, moins de  $40^\circ\text{C}$  pour le sélénium amorphe), le verre se présente à l'état vitreux. Aujourd'hui, un grand nombre de solides amorphes sont regroupés sous le nom de verre. Ainsi, on fabrique non seulement des verres minéraux, mais aussi des verres organiques et même des verres métalliques [10, 11].

### II.2.1). Structure du verre

Le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance dans un verre. Un verre peut même être vu comme un « réseau » tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé [10]. Comparons, par exemple, la structure de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice vitreuse :



La silice cristalline (cristobalite).

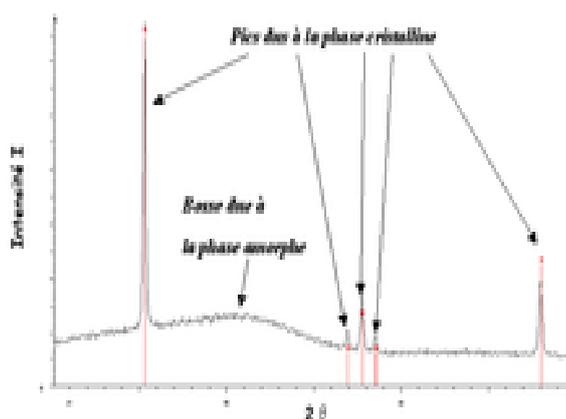


La silice vitreuse (amorphe)

**Figure II.1).** Comparaison entre la silice cristalline et amorphe [10].

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) [10, 11].

En raison de sa structure amorphe, les verres produisent, en diffraction des rayons X (DRX), un halo de diffusion, contrairement aux cristaux qui donnent des pics étroits et intenses.



**Figure II.2).** Diffractogramme de rayons X d'un mélange de deux composés : l'un vitreux et l'autre cristallin [10, 11].

### II.2.2). Transition vitreuse

D'un point de vue thermodynamique, le verre est obtenu à partir d'une phase liquide surfondue solidifiée au point de transition vitreuse,  $T_g$ . Le passage continu de l'état liquide à l'état vitreux se fait dans une plage de température délimitée par la température de fusion ( $T_f$ ) et la température de transition vitreuse ( $T_g$ ). La zone de transition vitreuse encadre  $T_g$ . En dessous de  $T_g$ , le verre devient "hors équilibre": il s'éloigne de son équilibre thermodynamique, puisque les mobilités atomiques ne sont plus suffisantes (la viscosité augmentant) pour que l'équilibre soit atteint (il s'éloigne donc d'autant plus de l'équilibre que la vitesse de refroidissement est élevée) [10, 12,13].

### II.2.3). Types de verres industriels

On peut citer les différents types des verres industriels, comme suit [10]:

1. **Verre plat** : 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. **Verre trempé** : 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 [10, 11].

**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 [10, 11].

### **II.3). Verre issu de recyclage**

Le verre trié (Tri sélectif) peut être recyclé indéfiniment sans perdre ses qualités. Dans certains pays tels que l'Allemagne, la Belgique, la Suisse ou les pays nordiques, le tri peut différencier le verre blanc, vert et brun pour un recyclage plus performant, et les bouteilles consignées puis réutilisées sont plus fréquemment choisies par les producteurs et consommateurs. Les bouteilles de verre usagées peuvent être fondues. La matière ainsi récupérée permet de fabriquer de nouvelles bouteilles. Le verre peut également être produit à partir de calcin (verre broyé) de récupération. La fabrication du verre à partir de calcin de récupération économise des matières premières et de l'énergie. Avant d'être refondu, le verre subit différents traitements : broyage, lavage, élimination des colles, étiquettes, capsules, séparation du verre et des métaux et élimination des rebuts (porcelaine, cailloux...) [14].

### **II.4). Le déchet du verre (Calcin)**

Calcin c'est le déchet du verre qui ne se conforme pas aux normes, et qui sera récupéré par la suite dans le but de son recyclage. Le calcin est considéré comme matière inéluctable pour l'élaboration du verre mousse. Il est introduit dans la charge avec une proportion définie, c'est un fondant du premier ordre.



**Figure II.3).** Calcin traité.

Le calcin (verre broyé), libéré de corps étrangers, est une matière première qui peut être utilisé pour fabriquer du verre. Il est calibré puis envoyé aux industries verrières pour être refondu. Certains fours utilisent plus de 70% de calcin dans leur production. Les débouchés du verre recyclé sont divers : le verre produit 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, ... .

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

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

## II.5). Verre mousse

Verre expansé est un matériau isolant industriel hautement efficace et polyvalent fait principalement à partir de verre recyclé. Verre cellulaire est fabriqué selon un procédé qui emprisonne des bulles de gaz dans le verre, la création d'un matériau expansé avec une consistance spongieuse [15]. Aussi connu comme le grain de verre expansé ou verre cellulaire, verre cellulaire est léger et fines, les pores étanches qui en font une barrière exceptionnelle contre l'humidité. Matériaux pour la fabrication du verre expansé peuvent être obtenus auprès des sociétés de fabrication de verre et d'approvisionnement en mousse.

### II.5.1). Définition

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

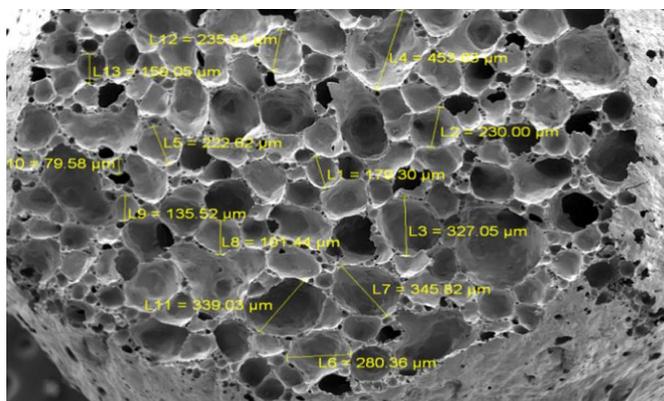


Figure II.4). Image prise par MEB sur le granulat de verre mousse [16].

## II.6). Granulat de verre mousse

Le granulat de verre cellulaire est un nouveau matériau minéral de construction et d'isolation avec un large éventuel de domaines d'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 [18]. La fabrication de granulés de verre expansé a commencé en Allemagne dans les années 60 et a débuté en France en 1973. Les granulés de verre produits en France sont d'une composition entièrement minérale, de forme sphérique presque régulière, avec une structure cellulaire à pores fermés remplis d'un gaz incolore et non toxique. [19]



**Figure II.5) :** Granulat à base du verre mousse [17].

### II.6.1). Les différents agents moussants

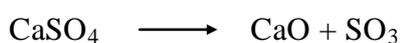
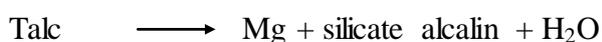
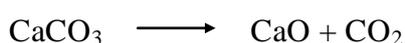
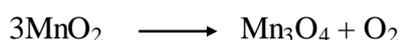
Le comportement physique et les réactions chimiques des agents moussants dans la production des matériaux légers à partir de poudre de verre sont un peu complexes et non entièrement élucidés

Pour la fabrication des granulats 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. En général les agents moussants peuvent être classés en deux groupes

#### Groupe 1

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



## **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. Les gaz produits sont dues à l'oxydation du carbone par l'atmosphère mais aussi à la réaction du carbone avec quelque constituants du verre tel que H<sub>2</sub>O, alcalins, sulfates, le produit mousse a une structure a pore fines et les gaz emprisonnés sont principalement du CO<sub>2</sub> ou un mélange CO<sub>2</sub>/ CO.

**Exemple** : CaCO<sub>3</sub>



### **II.6.2). Principe de fabrication**

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

1. Préparation de la composition ;
2. Mise en forme des granulats ;
3. Séchage et préchauffage des granulats ;
4. Traitement thermique (expansion) ;
5. Refroidissement.

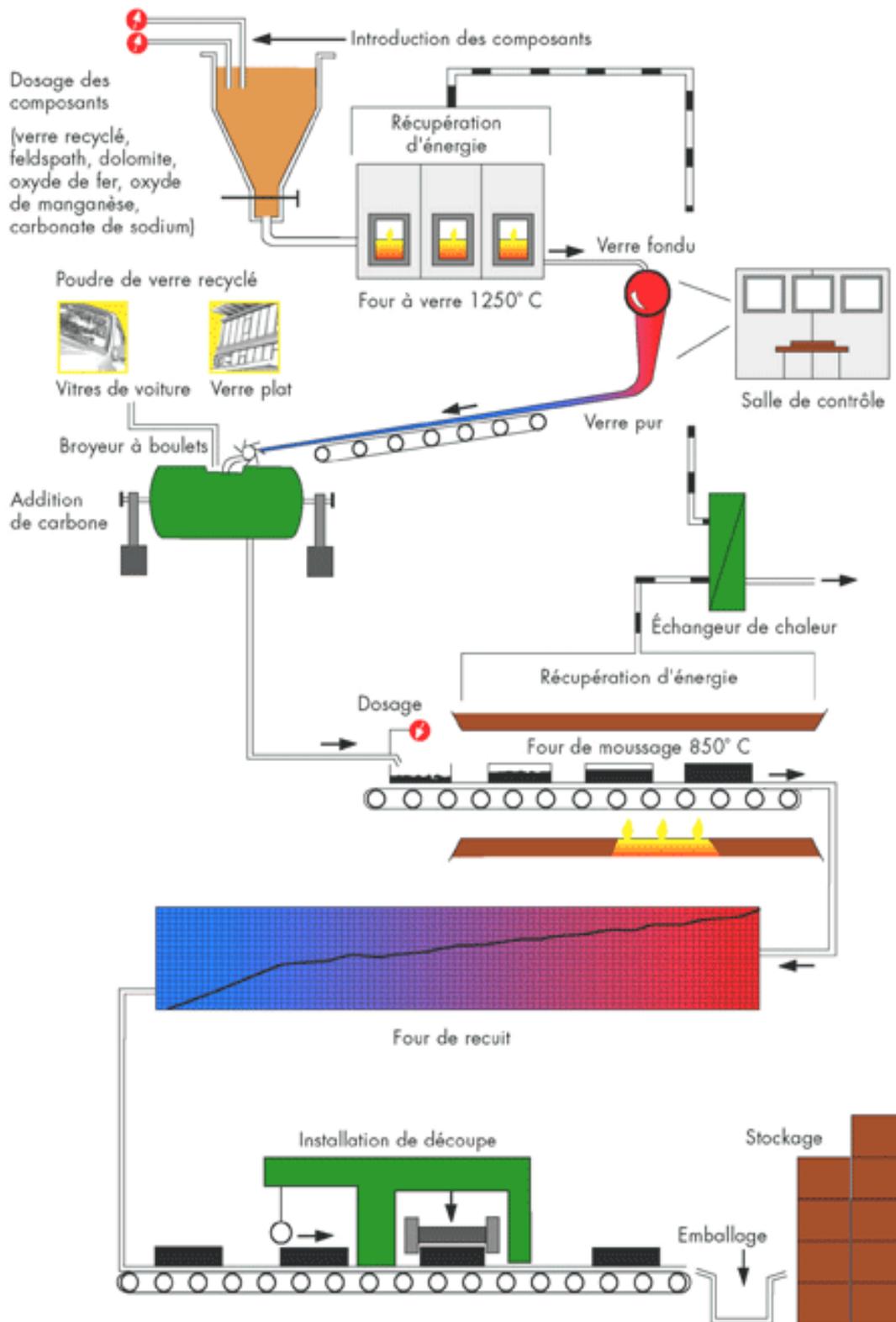


Figure II.6) : Processus de fabrication des granulats de verre mousse. [21]

### II.6.3). 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.

- **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.

- **Grand charge admissible**

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

- **Mise en œuvre simple**

Son faible poids assure une mise en œuvre rapide sur 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, dalle de sol en béton peut être écoulee.
- ❖ Economie grâce à une réduction durable des couts de chauffage.

**Tableau II.1).** Quelques caractéristiques des granulats de verre expansé [19]

<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	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.6.4). 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.

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

- ❖ Routes.
- ❖ Fondations hors gel d'infrastructures et de places.

- ❖ Stabilisation des pentes.
- ❖ Drainage/ conduites d'eau.
- ❖ Terrains de sport. [18]



**Figure II.7)** Domaine d'application des granulats de verre mousse [22].

### **II.7). Application du verre mousse dans les bétons en tant que granulats**

Récemment, les travaux de Mukesh Limbachiya et al, ont été menées sur l'utilisation de verre mousse granulé par substitut en volume des granulats naturels pour produire du béton. Ce travail a pour objectif d'élaborer du béton léger à base des granulats de verre mousse. Ces derniers utilisés dans cette étude ont été produites à partir de déchet de verre de bouteilles de couleurs différents. Les auteurs ont étudiés l'effet de diverses proportions de granulats de verre mousse grossier (30%, 40%, 50%, 60% et 100%) et granulats fins (5%, 10% et 15%) sur les propriétés du béton à l'état frais et durcie. Une série de mélanges de béton ont été dosées avec des rapports eau-ciment (E/C) de 0,40, 0,55, 0,62 et 0,76 [23].

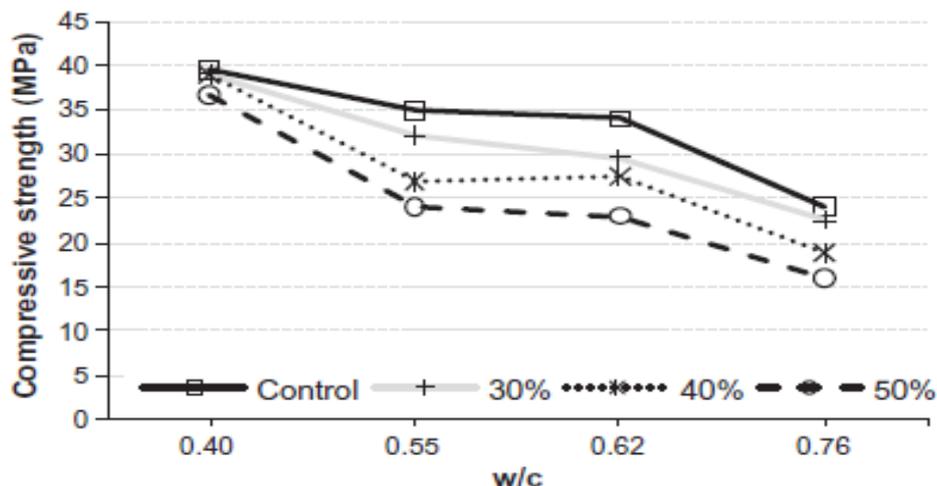


Figure II.8). Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport Eau/ciment [23].

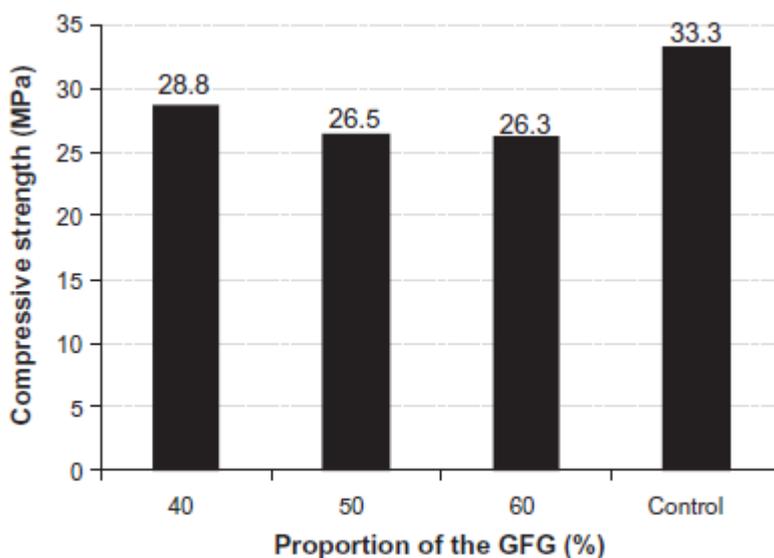
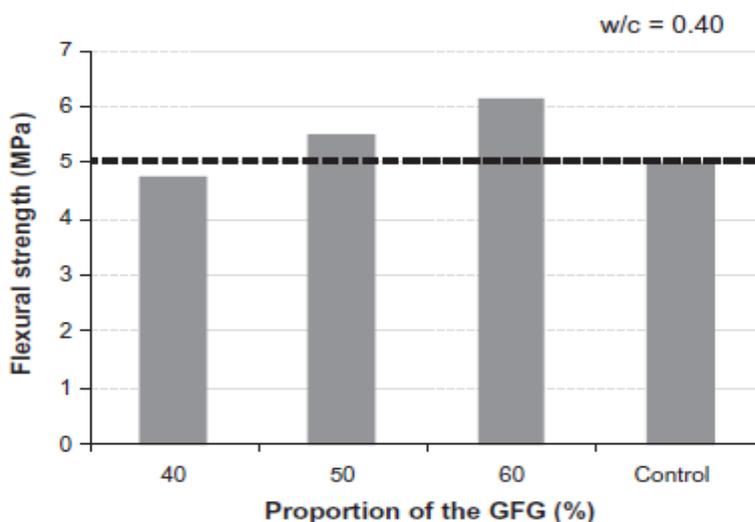


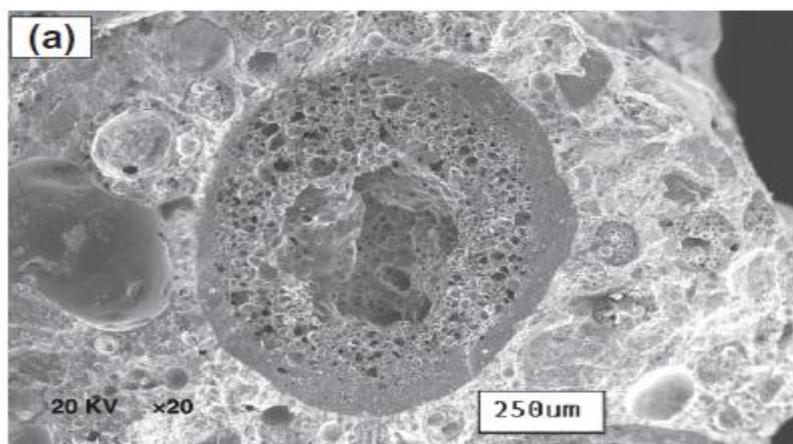
Figure II.9). Résistance à la compression à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulat traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass) [23].

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



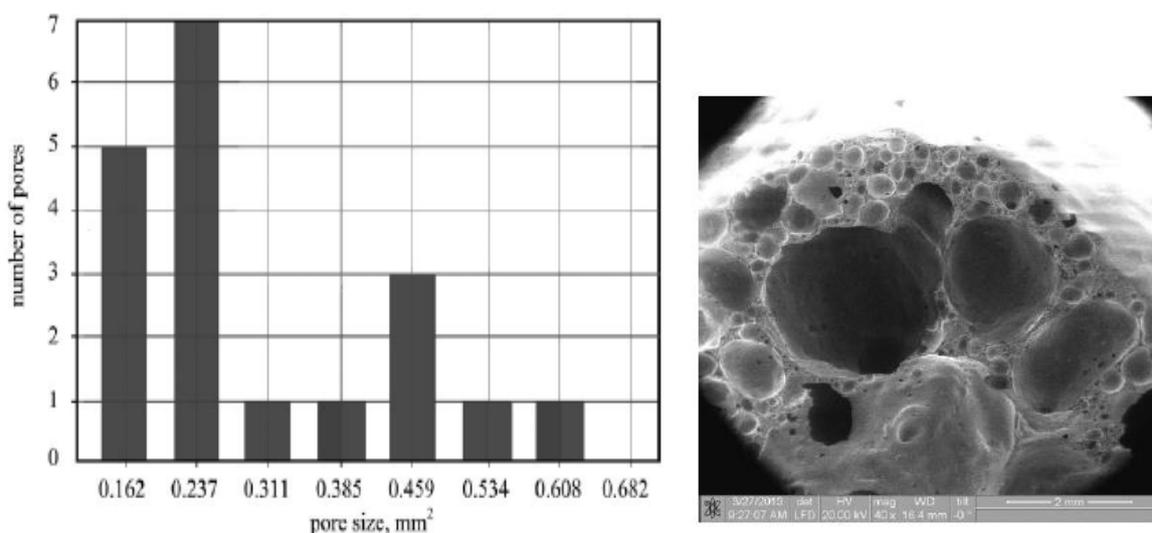
**Figure II.10).** Résistance à la traction par flexion à 28 jours en fonction de taux de substitution du granulat traditionnel par les granulats de verre mousse (GFG : Granulat Foam Glass) [23].

En outre, à 3 jours de durcissement les bétons contenant 30% granulats de verre mousse grossiers atteints en moyenne 70% de leur résistance à la compression à 28 jours. Une étude de la microstructure de la pâte de ciment a été réalisée par les mêmes auteurs, à l'aide de microscope électronique à balayage (MEB) sur des échantillons de béton contenant des granulats de verre mousse, Cette étude a montré des images de granulats de verre mousse dans la matrice cimentaire du béton. Dans l'ensemble, les auteurs ont constaté que l'étendue potentielle à laquelle granulats grossier / fin à base du verre mousse, peut être utilisé comme substituant des granulats naturels (En volume).



**Figure II.11).** Des images obtenues par MEB des mortiers réalisés avec 30% de granulats de verre mousse (GFG) après 14 jours de durcissement [23].

La technologie de fabrication de matériau d'isolation thermique à base des granulats de verre-céramique par addition de l'argile et d'additifs organiques, a été récemment développée. Une étude a été menée par les auteurs Apkaryan et al, sur l'effet des caractéristiques physiques de base des composantes de la charge minérale sur le processus de formation de pores dans les granulats de verre mousse. Selon les résultats obtenus par ces chercheurs, les paramètres de base qui affectent la durabilité du verre expansé sont spécifiés [24].



**Figure II.12).** Distribution des pores et la structure des pores de la mousse de verre-céramique avec 8% d'argile comme charge minérale [24].

La composition de charge minérale argile, le mode de synthèse thermique et du gaz sont choisies de telle sorte que la pression partielle du gaz est inférieure à la tension superficielle de la masse fondue. Cela permet la formation de granulats avec de petits pores fermés et une surface vitrifiée. Les régularités de l'effet de la composition et la température de cuisson sur les propriétés des granules sont déterminés. Le matériau thermo-isolant granulé résultant est produit avec une densité apparente de 260 à 280 kg / m<sup>3</sup>, et la force de pastilles de 1,74 MPa, la conductivité thermique de 0,075 W / m ° C, et l'absorption d'eau de 2,6% en poids. Les résultats sont donnés de l'étude de la dépendance du coefficient de conductivité thermique et la résistance mécanique des granules sur la masse volumique apparente [24].

Ils ont constaté que les granulats de mousse de verre-céramique avec une densité de 260 kg/m<sup>3</sup> ont une faible conductivité thermique et l'absorption de l'eau, et de haute résistance à la compression. La technologie développée offre la possibilité de produire des granulats mousse de verre-céramique de différentes formes géométriques qui leur permet d'être recommandé

comme un matériau d'isolation thermique efficace non seulement dans la construction, mais aussi dans l'ingénierie thermique [24, 25, 26].

## **II.8). Conclusion**

L'étude bibliographique menée sur les verres mousses et les granulats de mousse de verre, nous a permis de conclure que ces granulats peuvent être utilisés dans la formulation des bétons légers ayant des propriétés très exceptionnelles et très intéressantes dans le domaine des bétons spéciaux à savoir les bétons dites cellulaires. Cependant, selon cette étude les bétons réalisés sont des bétons classiques. Il est très intéressant d'utiliser les granulats de verre mousse dans d'autres types de bétons comme les cas des bétons auto-plaçants pour produire les éléments en bétons légers ou cellulaires.

## Chapitre III. Caractérisation Des Matériaux Utilisés

*Les différentes caractéristiques des constituants ainsi que la méthodologie suivie pour réaliser ce travail, seront présentées dans ce chapitre. Les matériaux utilisés dans cette étude, sont d'origine locale. Il est connu que la connaissance des caractéristiques de ces matériaux, est impérative à toute recherche, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation de chaque constituant du béton.*

### III.1). Caractéristiques des Constituants

#### III.1.1). Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail, est un ciment composé de type CEM II de classe de résistance 42.5, il provient de la cimenterie de LAFARGE. Les caractéristiques de ce ciment sont comme suit :

#### III.1.1.a). Caractéristiques physiques

Tableau III.1). Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Résultats	Unités	Norme
Consistance normal	30.0	(%)	NF EN 196-3
Début de prise	215	(min)	NF EN 196-3
Fin de prise	330	(min)	NF EN 196-3
SSB	4134	(Cm <sup>2</sup> /g)	NF EN 196-6
Masse spécifique	3.03	(g/cm <sup>3</sup> )	NF EN 196-5
Retrait à 28 jours	641	(µm/mm)	NF EN 197-7

Les valeurs des résultats obtenus sont compatibles avec les exigences de normes correspondantes.

### III.1.1.b). Caractéristiques mécaniques

Tableau III.2). Résistance à la compression et à la flexion du ciment. NF EN 196-1

Essais	Age [Jour]		
	2 jours	7 jours	28 jours
Résistance à la compression (MPa)	21.3	35.7	45.5
Résistance à la flexion (MPa)	4.3	6.3	7.8

### III.1.1.c). Caractéristiques chimiques

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

Élément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	CaO <sub>1</sub>	Cl	PAF	Résidus insolubles
(%)	24.13	6.46	3.42	55.18	1.62	1.10	0.55	2.59	0.753	0.015	4.550	9.81

### III.1.1.d). Caractéristiques minéralogiques

Tableau III.4). Composition minéralogiques du ciment par fluorescence X

Phase	Constituants minéraux du clinker	Teneur rapportée au clinker (%)
Clinker	C <sub>3</sub> S	55
	C <sub>2</sub> S	21
	C <sub>3</sub> A	06
	C <sub>4</sub> AF	12
	CaO <sub>1</sub>	01
Régulateur de prise	Gypse	05
Ajouts	Tufs (Z)	10
	Calcaire (L)	08

### III.1.2). Fillers de calcaire

Le calcaire est une poudre finement broyée qui a été récupéré au niveau de centre de recherche CETIM (centre d'étude de service technique de l'industrie de matériaux de construction).



Figure III.1). Filler de calcaire.

Tableau III.5). Analyse chimique du calcaire par fluorescence X

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PAF	Résidus insolubles
(%)	3.95	0.20	0.35	51.85	1.22	0.01	0.25	0.02	0.03	4.550	9.81

Tableau III.6). Analyse minéralogique du calcaire

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

Tableau III.7). Propriétés physiques du calcaire

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.81 (g/cm <sup>3</sup> )
Finesse suivant la méthode Blaine	4797 (g/cm <sup>2</sup> )

### III.1.3). Super plastifiant

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



Figure III.2). Superplastifiants

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer la teneur en eau du béton d'une façon remarquable. Le MEDAFLOW 30 ne présente pas d'effet retardateur.

### III.1.3.a). Domaine d'utilisation

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

### III.1.3.b). Caractéristiques

- Aspect.....Liquide.
- Couleur..... Brun clair.
- PH..... 6 – 6.5.
- Densité.....  $1.07 \pm 0.01$ .
- Teneur en chlorure.....  $< 0.1 \text{ g/l}$ .
- Extrait sec..... 30 %.

### III.1.3.c). Propriétés

#### A). Sur béton frais

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

#### B). Sur béton durci

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

### III.1.3.d). Mode d'emploi

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

### III.1.3.e). Dosage

Plage de dosage recommandée : 0.5 à 02 % du poids du ciment soit 0.46 à 1.85 litres pour 100 kg de ciment, le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

### III.1.3.f). Conditionnement et stockage

Le MEDAFLOW 30 est conditionné en bidons de 11 kg, futs de 210 kg et 240kg, cubiténaire 1100 kg.

### III.1.3.g). Délai de conservation

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

### III.1.4). Eau de gâchage

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

### III.1.5). Le sable

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



Figure III.3) Le sable de KEDDARA

#### III.1.5.1). Caractéristiques du sable

Tableau III.8). Caractéristiques physiques du sable lavé concassé (0/5) selon la Norme NF EN 933-1

Caractéristiques	Résultats	Unité
Masse volumiques réelle	2.53	(g/cm <sup>3</sup> )
Masse volumique imbibée	2.58	(g/cm <sup>3</sup> )
Masse spécifique	2.81	(g/cm <sup>3</sup> )
Absorption	1.97	(%)
EVS	74	(%)
La teneur en bleu	0.8	(%)

❖ Analyse granulométrique et classe granulaire

**Tableau III.09).** Analyse granulométrique par tamisage du sable lavé (KEDDARA) selon la Norme NF EN 933-1 :

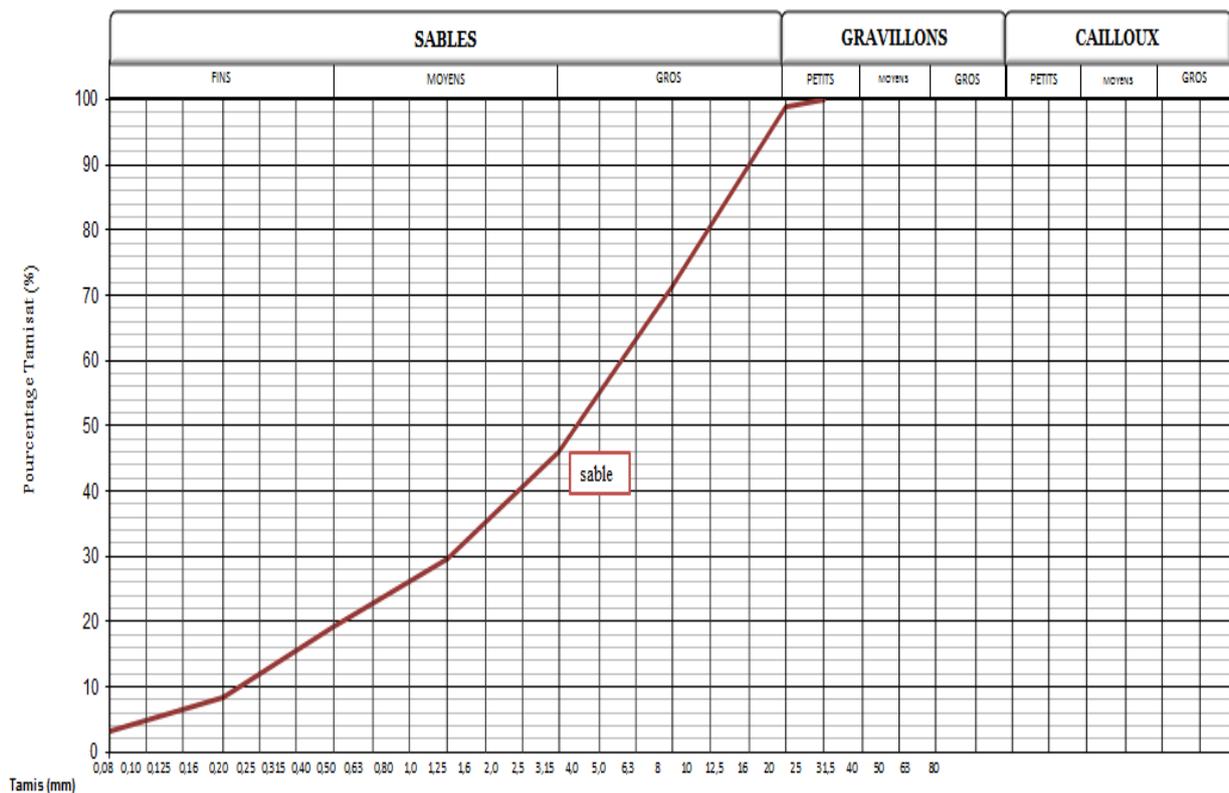
Masse sèche totale : $M_1 = 1459g$		Masse sèche des fines retirées par lavage :	
Masse sèche après lavage $M_2 = 1416g$		$M_1 - M_2 = 43g$	
6,3	0	0,0	100,0
5	14	1,0	99,0
4	153	10,5	89,5
3,15	248	17,0	83,0
2,5	418	28,6	71,4
2	519	35,6	64,4
1,25	790	54,1	45,9
1	865	59,3	40,7
0,63	1026	70,3	29,7
0,5	1085	74,4	25,6
0,315	1177	80,7	19,3
0,25	1217	83,4	16,6
0,125	1335	91,5	8,5
0,08	1404	96,2	3,8
0,063	1414	96,9	3,1
Fond de tamis :	1416	97,1	2,9
Matériaux resté au fond P= 2		<b>Observation :</b>  * % de tamisât de fines sur tamis de 63 $\mu m$ : $f = 3,1$  *Module de finesse du sable: $Mf = 3,55$	
$\sum R_i + P = 1416$			
$100(M_2 - (\sum R_i + P)) / M_2 = 0$			

On remarque que le sable lavé concassé a un module de finesse  $MF=3.55$  élevé

**Tableau III.10).** Analyse minéralogique de sable de KEDDARA

Eléments	(%)
Quartz $\text{SiO}_2$	63
Calcite $\text{CaCO}_3$	20
Albite ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ )	04
Illite ( $2\text{K}_2\text{O Al}_2\text{O}_3 24\text{SiO}_2 2\text{H}_2\text{O}$ )	03
Kaolinite ( $\text{Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ )	06
Minéraux ferrugineux +autres	04

**Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1 ENR.N° 0213/14**



**Figure III.4).** Analyse granulométrique de sable de KEDDARA 0/5

### III.1.6). 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.5) Poudre de calcin 200 $\mu$ m

Tableau III.11). Analyse chimique du calcin par fluorescence X

Elément	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>
(%)	72.65	0.94	0.44	10.83	0.24

MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
1.90	0.53	11.34	0.01	0.02	1.09

**Tableau III.12).** 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.1.7). Argile grise

L'argile grise est une poudre finement broyée (200µm) qui a été récupéré au niveau de centre de recherche CETIM (centre d'étude de service technique de l'industrie de matériaux de construction).

**Tableau III.13).** Analyse chimique du l'argile grise par fluorescence X

Elément	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>
(%)	44.44	13.09	5.62	14.85	0.49

MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
2.06	1.80	0.67	0.21	0.63	16.14

**Tableau III.14).** Propriétés physiques du l'argile grise

Caractéristiques	Résultats
Masse volumique absolue	2.70 (g/cm <sup>3</sup> )
Finesse suivant la méthode Blaine	7544 (g/cm <sup>2</sup> )

### III.1.8). Déchets du brique (Chamotte)

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

**Tableau III.15).** Analyse chimique du la chamotte par fluorescence X

<b>Elément</b>	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>
(%)	54.61	14.40	6.22	16.06	0.66

MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	PAF
2.09	1.95	0.77	0.24	0.68	2.32

**Tableau III.16).** Propriétés physiques du la chamotte

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

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

**GV :** mélange (77% calcin + 3% calcaire+ 20% l'eau).

**GA :** mélange (67% calcin + 3% calcaire + 10% argile+ 20% l'eau).

**GC:** mélange (67% calcin + 3% calcaire + 10% chamotte+ 20% l'eau).

#### III.2.1). Préparation du mélange

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

### III.2.2). 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 différentes variantes de granulats artificielles, cette quantité est optimisée à 20 %, jusqu'à l'obtention d'une pâte modelable. En laisse la pâte se reposer pendant 24 heures. Les granulats de forme sphérique et de différents diamètres sont fabriqués manuellement.



**Figure III.6).** Elaboration de différents types des granulats de verre mousse

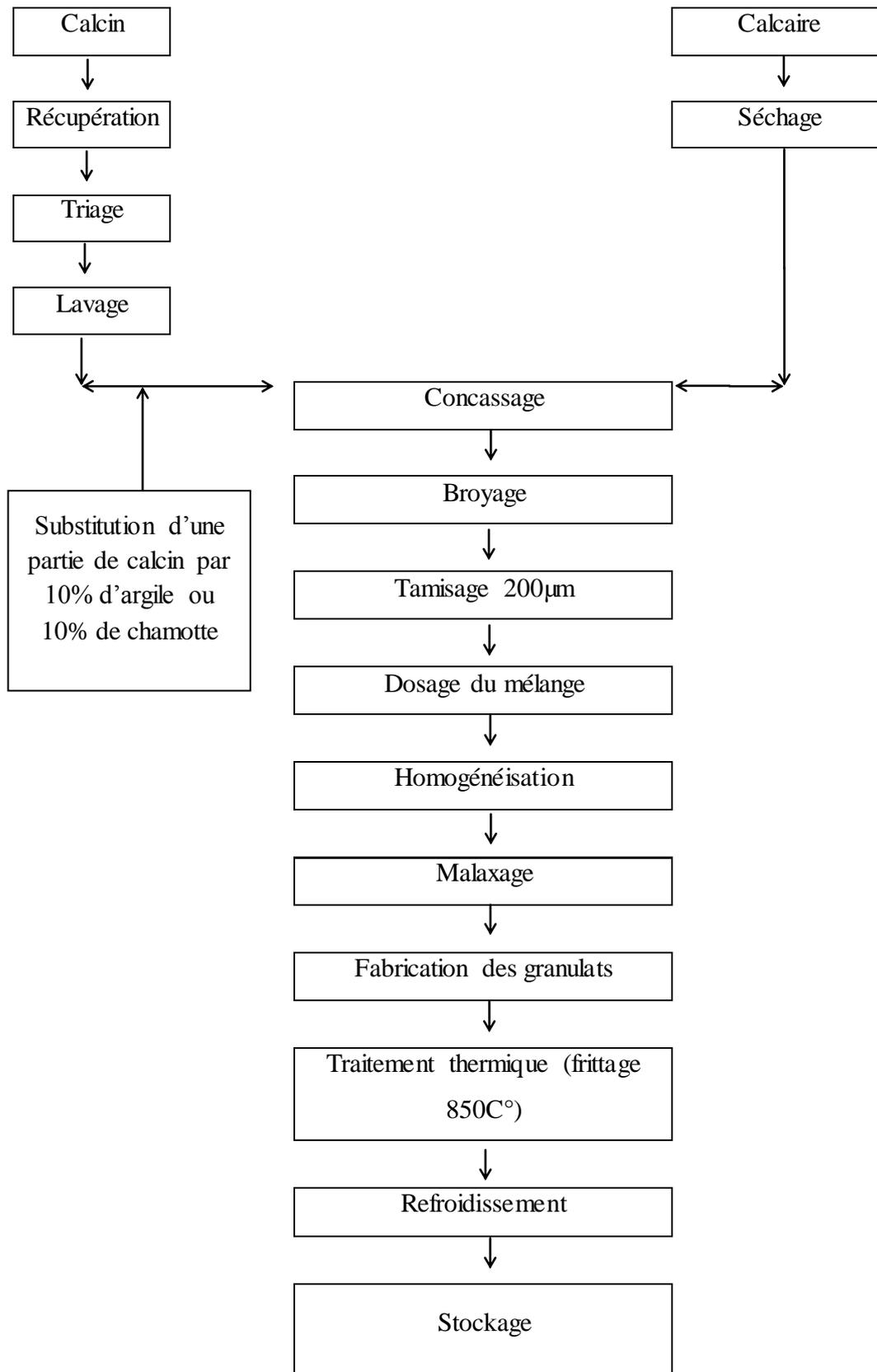
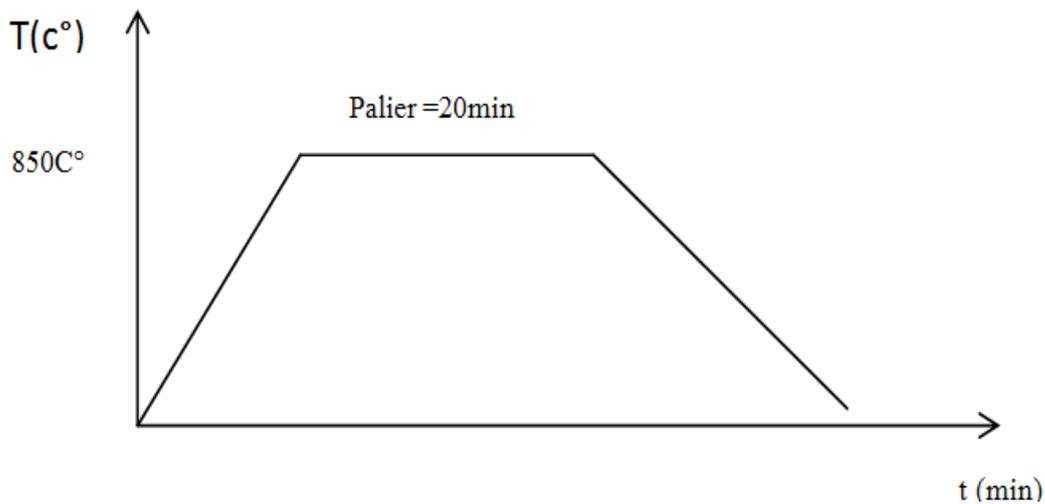


Figure III.7). Schéma technologique proposé pour la fabrication des granulats

### III.2.3). 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. L'augmentation de température est réalisée par une vitesse de 07°C/min, la durée du palier est 20 min. enfin le refroidissement se fait à l'intérieur du four jusqu'à une température ambiante.



**Figure III.8).** Le régime thermique d'élaboration de verre mousse

**Tableau III.17).** Analyse chimique des granulats artificiels

Eléments (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	PAF
<b>GV</b>	72.15	1,01	0,39	11.72	0,24	0,53	1,82	0,01	11,51	0.02	0,60
<b>GA</b>	669.66	2.48	1.11	12.28	0.28	0.72	1.89	0.04	10.46	0.11	0.96
<b>GC</b>	69.21	2.58	1.11	12.43	0.29	0.73	1.86	0.05	10.44	0.11	1.2



Figure III.9) Granulats de verre mousse (a) sans additif (b) avec 10% d'argile (c) avec 10% de chamotte

Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1 ENR.N° 0213/14

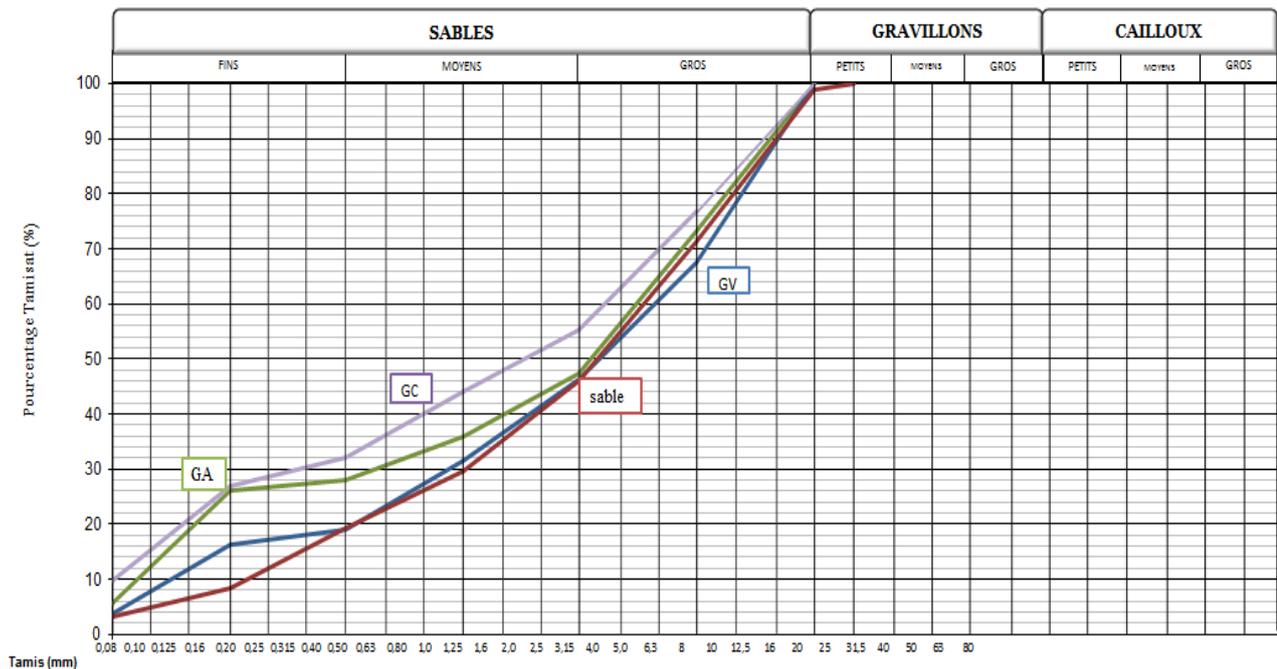


Figure III.10). Analyse granulométrique des granulats artificiels.

La figure III.10, donne la distribution granulométrique du sable, granulats fin artificiels (Granulat de verre mousse sans additif, granulat verre mousse avec argile et granulat verre mousse avec chamotte). On observe que tous les quatre types des sables, présentent presque la même distribution granulométrique.

## Chapitre IV. Formulation **des Mortiers Autoplaçants**

*Nous avons procédé à la formulation d'un béton autoplaçant selon la méthode Japonaise qui est une méthode forfaitaire. A partir de la composition du béton autoplaçant, nous avons déterminé ensuite la composition du mortier autoplaçant témoin en utilisant la méthode du mortier équivalent du béton connue par son nom MBE (Mortier du Béton Equivalent).*

### **IV.1). Formulation des bétons autoplaçants**

#### **IV.1.1). Calcul de composition**

Cette partie est consacrée à la formulation d'un BAP selon deux méthodes (JAPONAISE) qui définit des intervalles pour chaque constituant donnés. Ces intervalles sont donnés par le tableau suivant :

**Tableau IV.1).** Intervalles pour chaque constituant selon la méthode JAPONAISE

<b>Constituants</b>	<b>Intervalle préconisé</b>
Volume de la pate	330 à 400 l /m <sup>3</sup> (C+ F).
La masse de ciment	300 à 450 Kg/m <sup>3</sup>
Le dosage de calcaire	10% de poids du ciment
Le volume de gravillons	proche de 1
Le dosage en superplastifiant	proche de son dosage de saturation

#### IV.1.2). Les données de base

- $G/S = 1,1$
- On fixe le rapport  $E/(C+F) = 0,38$
- Le dosage en superplastifiant est donné par l'essai de la rhéologie (point de saturation).

#### IV.1.3). Optimisation de la composition du BAP

Le volume de la pâte pour  $1\text{ m}^3$  du BAP égale à  $340\text{ (l / m}^3\text{)}$

- $C = 430\text{ kg/ m}^3$
- $F = 43\text{ kg/ m}^3$  filler de calcaire (10% du poids de ciment).
- $E/(C+F) = 0,38$
- $G/S = 1,1$

#### IV.1.4). Déterminations de la masse de chaque constituant : On a

- $C = 430\text{ kg/ m}^3$
- $F = 43\text{ kg/ m}^3$
- $E/(C+F) = 0,38$  donc  $E = 0,38 * (430 + 43) \implies E = 179,74\text{ L / m}^3$
- Volume de la pâte  $340\text{ L / m}^3$
- Volume de granulats =  $660\text{ L / m}^3$
- $G/S = 1,1$

$$G + S = 660$$

$$G = 660 - S$$

$$S = 660 / 2,1 \implies S = 314,28\text{ L / m}^3$$

$$G = 660 - 314,28 \implies G = 345,72\text{ L / m}^3$$

- Le dosage de superplastifiant est 2% de la masse de ciment et filler.

$$SP = 0,02 * (430 + 43)$$

$$SP = 9,46\text{ kg/ m}^3$$

L'extrait sec du superplastifiant (polycarboxylate) est de  $30\% \pm 1,5\%$

Donc la quantité d'eau provient de superplastifiant est de  $0,7 \cdot 9,46 = 6,62$  L.

Donc la quantité d'eau utilisé pour  $1\text{ m}^3$  est de  $173,12$  L/  $\text{m}^3$ .

#### IV.1.5). Dosages des constituants pour $1\text{ m}^3$ du BAP

- Eau = 173,12 l
- Ciment = 430 kg
- Filler = 43 kg
- Sable =  $820,27\text{ kg/m}^3$
- Gravier= $914,42\text{ kg/m}^3$ 
  1. Classe 3/8=  $457,21\text{ kg/m}^3$
  2. Classe 8/15= $457,21\text{ kg/m}^3$
- SP= $2\%=9,46$  Kg.

Tableau IV.2). Composition pour  $1\text{ m}^3$  du BAP

Constituants		Masse (Kg/m <sup>3</sup> )
Ciment		430
Filler calcaire		43
Sable		820.27
Eau		173
Superplastifiant		9.46
Graviers	G <sub>(3/5)</sub>	457.21
	G <sub>(8/15)</sub>	457.21

#### IV.2). Formulation du mortier autoplaçant

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

**Tableau IV.3).** La composition du MBE dans 1 m<sup>3</sup>

Constituants	Dosage (Kg/m <sup>3</sup> )	Rapport	Calculer
<b>Ciment</b>	664.1	F/C	0.10
<b>Filler</b>	66.41	E/C	0.38
<b>Sable</b>	1372.38	E/L	0.34
<b>Eau</b>	250	S/L	1.88
<b>SP</b>	12.17	S/C	2.06

Les mortiers autoplaçants étudiés ont été élaborés en substituant totalement le sable par les granulats de mousse de verre de différents types qui sont nommés comme suit :

**MT** : Mortiers Témoin.

**MGV** : Mortier contenant des Granulats de Verre mousse.

**MGA** : Mortier contenant des Granulats de verre mousse à base d'Argile.

**MGC** : Mortier contenant des Granulats de verre mousse à base de Chamotte.

### IV.3). Le Protocole de mélange des mortiers autoplaçants (MAP)

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

La procédure suivit le mélange des mortiers autoplaçants, est donnée comme suit :

- Mettre l'eau et 2/3 de superplastifiant dans le récipient.
- Mettre le mélange de liant (Ciment+ fines).
- Mélanger à vitesse lente pendant 1mn 30sec ensuite racler le bord et mélangé 1mn30sec.
- Verser le 1/2 de 1/3 de superplastifiant et le 1/3 de sable.
- Mélanger à vitesse lente pendant 1mn.
- Rajouter encore le reste de 1/3 superplastifiant et le 2ème 1/3 de sable.
- Mélanger à Vitesse lente pendant 1mn.
- Rajouter le reste de sable (1/3) et ménager pendant 30 secs à Vitesse lente.



**Figure IV.1).** Malaxeur pour des mortiers autoplaçants.

# Chapitre V. Résultats et Interprétations

*Ce chapitre présente les différents résultats des essais physico-mécaniques des mortiers autoplacants à base des granulats artificiels par substitution totale du sable . Des interprétations de ces résultats seront également présentées dans le même chapitre. Les essais physico-mécaniques effectués sur des mortiers autoplacants étudiés, ont été réalisés selon les normes en vigueur (ENV).*

## **V.1). Etat frais**

Notre étude est réalisée sur des mortiers autoplacant donc il est nécessaire de vérifier les propriétés à l'état frais de ces mortiers en particulier la fluidité. En plus, les mortiers autoplacants doivent être très fluides avec une bonne mise en œuvre du matériau (sans secousse ou vibration) et aussi ces mortiers doivent être stables (ne présentent pas de ségrégation). Toutes ces propriétés rhéologiques sont les principales propriétés des bétons autoplacants. Pour cela, nous avons procédé à la caractérisation à l'état frais des mortiers autoplacants étudiés. Ces derniers ont été élaborés en substituant totalement le sable par les granulats de mousse de verre de différents types. Après chaque préparation du mélange du mortier, des essais à l'état frais ont été effectués, à savoir la fluidité (test d'étalement) et la mise en œuvre. Et cela, pour voir l'effet des granulats de mousse de verre de différents types concassés sur les propriétés à l'état frais des mortiers étudiés.

**V.1.1). Fluidité (essai de l'étalement)**

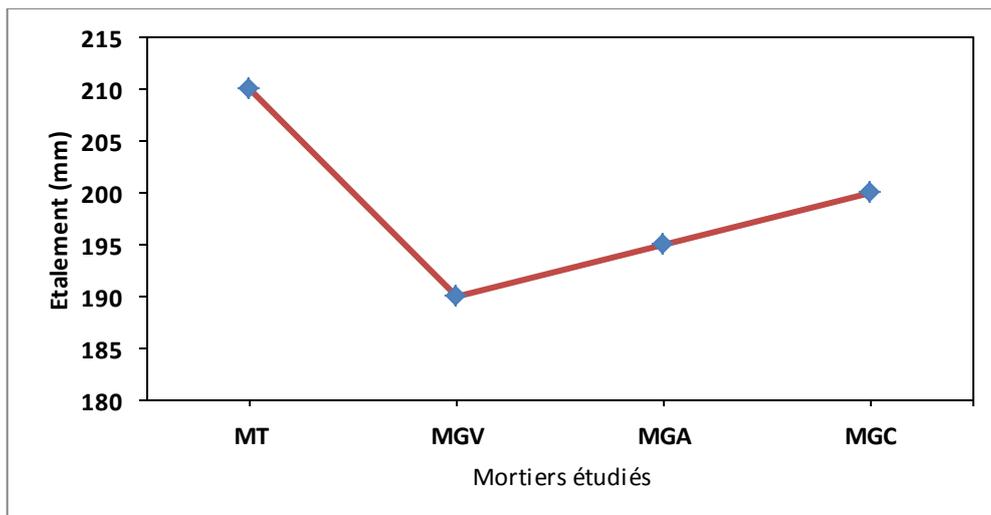
La fluidité des mortiers étudiés a été effectuée par le test d'étalement à l'aide du mini cône selon la norme préconisée aux mortiers fluides. Les résultats sont donnés dans le tableau(V.1). Ces résultats sont aussi présentés dans la Figure (V.1).



**Figure.V.1).**Essai d'étalement sur le mortier autoplaçant frais.

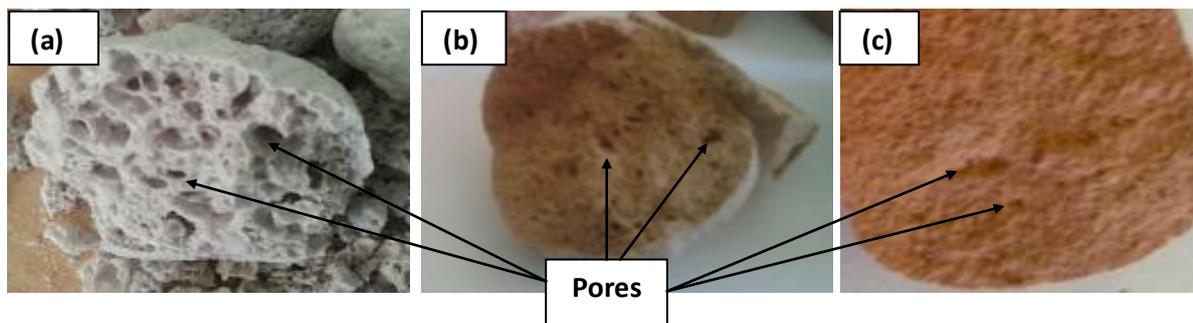
**Tableau V.1).** Essai de l'étalement

Mortier	Etalement diamètre (mm)	Mise en œuvre
MT	220	Bonne
MGV	190	Acceptable
MGA	195	Acceptable
MGC	200	Bonne



**Figure.V.2).** Fluidité des mortiers étudiés en fonction des différents types des granulats fins de verre mousse.

Les résultats donnés dans la Figure(V.2) montrent une légère diminution de la fluidité des mortiers en fonction de la substitution de sable par les types des granulats artificiels utilisés. Tel qu'on observe une légère augmentation de la fluidité de différentes variantes des granulats artificiels. La diminution de la fluidité des mortiers MGCV par rapport au mortier témoin, est due la nature du granulat fin (MGCV) qui présente une porosité élevée par rapport au sable naturel, ce qui absorbe une quantité d'eau de gâchage. Tandis que l'augmentation de la fluidité des mortiers MGA et MGC par rapport aux mortiers MGCV (verre mousse sans additif), est due au % et diamètre des pores présentés dans les granulats de mousse de verre (voir figure). En effet, les granulats à base d'argile et ceux à base de la chamotte, ont une structure poreuse ayant du diamètre des pores inférieurs à ceux du verre mousse sans additif (calcin+calcaire).



**Figure V.3).** Granulats de verre mousse (a) sans additif (b) avec 10% d'argile et (c) avec 10% de chamotte.

## V.2). Etat durci

Pour réaliser cette étude, des éprouvettes prismatiques  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  ont été fabriquées pour chaque mélange des mortiers MAP. Un jour après de la coulée, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre, divers tests et mesures ont été effectués afin d'étudier les propriétés physiques (Masse volumique apparente, porosité et absorption d'eau) et mécaniques (résistance à la traction par flexion et à la compression uni-axiale) et module de Young qui a été déterminé par la méthode ultrasonore.



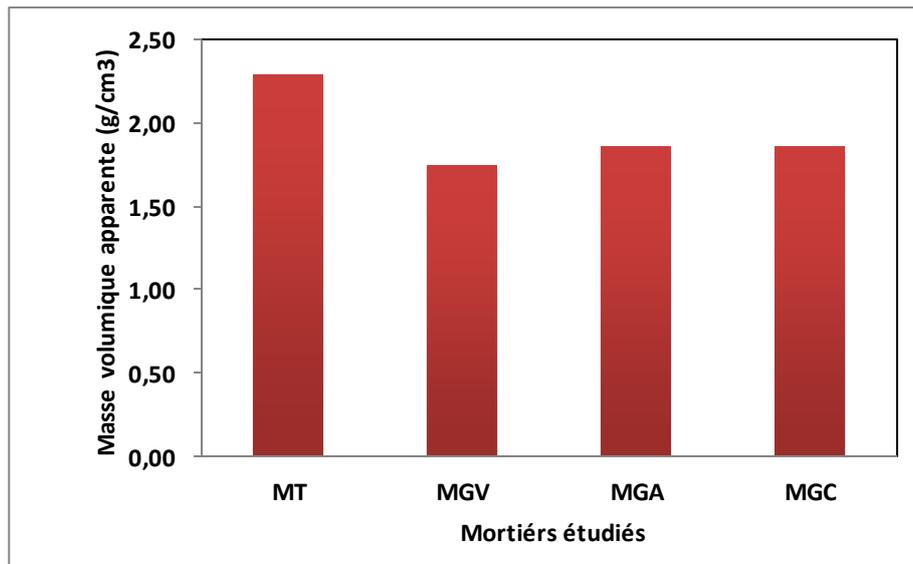
Figure V.4). Epreuve d'un mortier autoplaçant à l'état frais et durci.

### V.2.1) Propriétés physiques

#### V.2.1.a).La masse volumique

Tableau V.2). Masse volumique apparente des mortiers étudiés

Variantes	Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	
	2 jours	28 jours
MT	2.31	2.29
MGV	1.90	1.75
MGA	1.94	1.86
MGC	1.96	1.86



**Figure V.5).** La masse volumique apparente des MAP en fonction de différentes variantes de MAP à 28 jours de durcissement.

D'après les résultats des mesures de la masse volumique apparente des mortiers étudiés à l'âge de 28 jours représenté dans la Figure (V.5) nous remarquons que la masse volumique diminue en fonction de la substitution du sable par différents types des granulats artificiels utilisés. En effet, le remplacement du sable par les types des granulats artificiels à provoquer une diminution de la masse volumique, cela est dû probablement à la masse volumique des granulats de verre mousse qui est très faible par rapport à celle du sable naturel.

#### V.2.1.b) Porosité

La porosité des mortiers a été déterminée en utilisant la relation ci-dessous

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

#### Tel que :

**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.

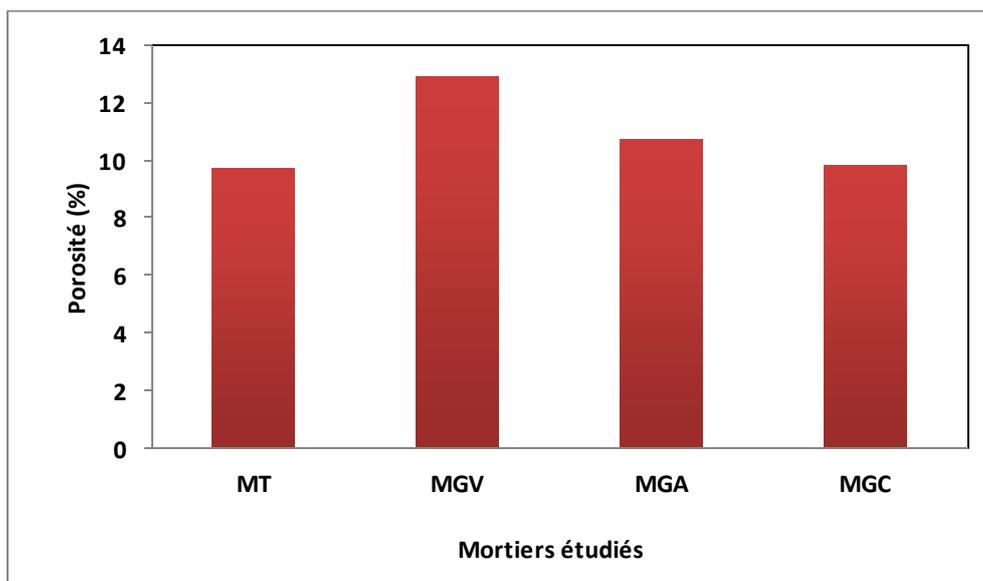
**M<sub>s</sub> :** la masse de l'éprouvette sèche.

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

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

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

<b>Variante</b>	<b>Porosité (%)</b>
<b>MT</b>	9.72
<b>MGV</b>	12.91
<b>MGA</b>	10.74
<b>MGC</b>	9.84



**Figure V.6).** L'évolution de la porosité des MAP en fonction des différents types des granulats artificiels.

La Figure (V.6), présente l'évolution de la porosité des mortiers étudiés en fonction de la substitution de sable par les types des granulats artificiels utilisés. D'après les résultats obtenus, une augmentation de la porosité des mortiers MGV par rapport au mortier témoin, ensuite on observe une légère diminution de la porosité pour les mortiers MGA et MGC par rapport aux mortiers MGV. Cela peut être expliqué par la légèreté des granulats de verre mousse. Par rapport aux granulats de verre mousse sans additifs, les deux types des granulats présentent une structure contenant une phase cristalline provenant de l'argile ou de la chamotte.

### V.2.1.c). Absorption d'eau

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

$$Ab\% = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

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

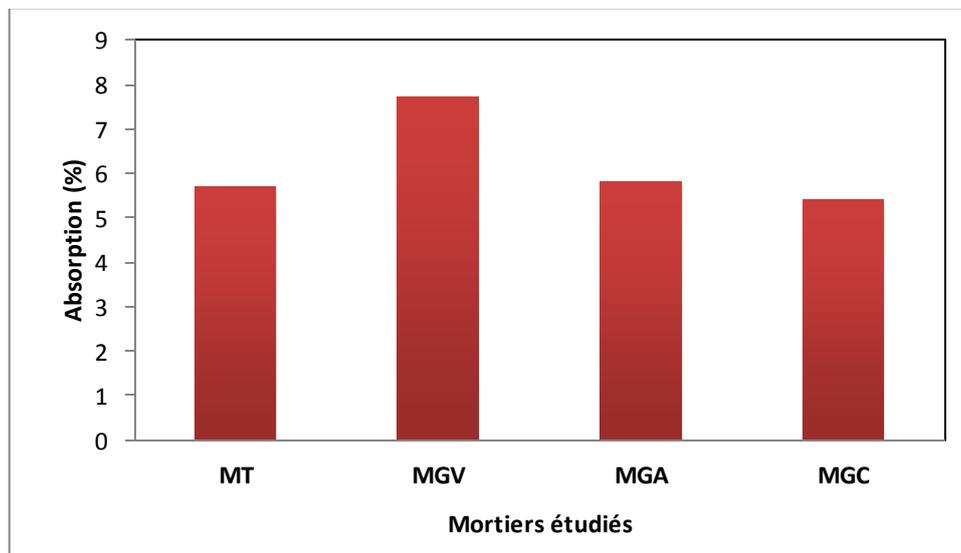
**M<sub>h</sub>** : La masse de l'éprouvette après l'immersion dans l'eau jusqu'à saturation.

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

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

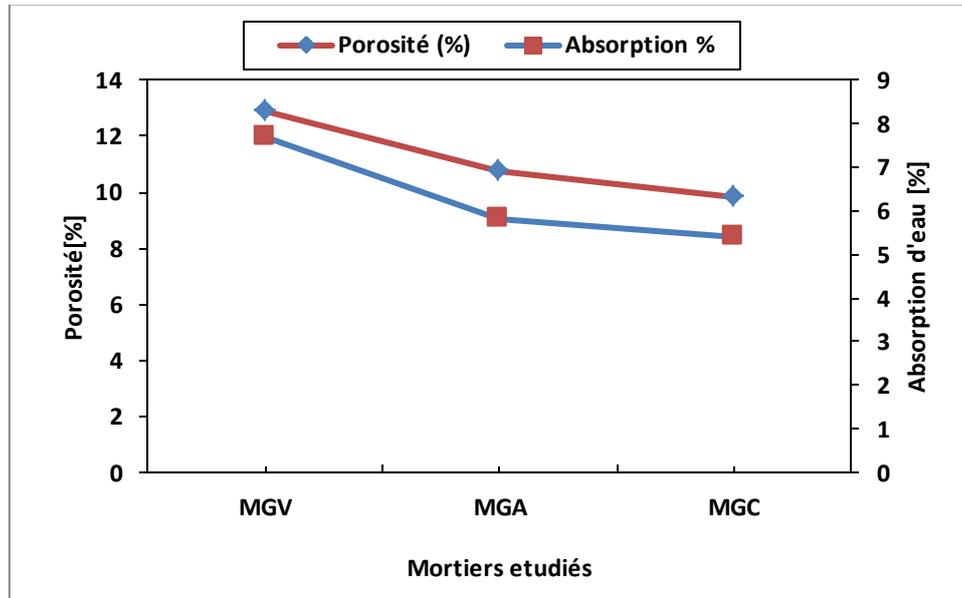
**Tableau V.4).** Absorption d'eau des éprouvettes

Variantes (MAP)	Absorption (%)
MT	5.7
MGV	7.7
MGA	5.8
MGC	5.4



**Figure V.7).** L'évolution de l'absorption d'eau des MAP en fonction des différents types des granulats artificiels.

L'évolution de l'absorption d'eau des mortiers en fonction de substitution du sable par les types des granulats artificiels utilisés. D'après les résultats obtenus, nous remarquons le même phénomène que celui observé par la porosité. En effet, une augmentation de l'absorption d'eau des mortiers MGV a été enregistrée par rapport aux mortiers témoins, ensuite on observe une légère diminution de l'absorption d'eau.



**Figure V.8).** Relation de la porosité et l'absorption d'eau en fonction des différents types des granulats artificiels.

La Figure (V.8) présente l'évolution de la porosité et l'absorption d'eau à différentes variantes des mortiers étudiés. L'analyse de la porosité montre que la valeur la plus élevée est obtenue pour le MGV, nous remarquons aussi que les deux mortiers MGA et MGC ont presque la même valeur de porosité et d'absorption d'eau.

### V.2.2). Propriétés mécaniques

Pour réaliser cette étude, des éprouvettes prismatiques  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  ont été fabriqués pour chaque mélange des mortiers MAP.

Les essais mécaniques effectués sur les éprouvettes des mortiers autoplaçants étudiés, ont été réalisés selon les normes préconisées pour les mortiers. La résistance à la traction par flexion Figure(V.09) sur les éprouvettes prismatiques (3 éprouvettes) et après l'essai de flexion, les demis de chaque éprouvette (06 demis éprouvette) ont été utilisés pour la détermination de la résistance à la compression Figure(V.11).

V.2.2.a). Résistance à la traction : NF-EN 196-1

Tableau V.5). Résistance à la traction par flexion des MAP étudiés

Variantes (MAP)	Résistance à la traction par flexion (MPa)	
	2 jours	28 jours
MT	5.06	8.92
MGV	5.89	7.03
MGA	6.77	9.33
MGC	5.58	8.88



Figure V.09). Essai de traction par flexion.

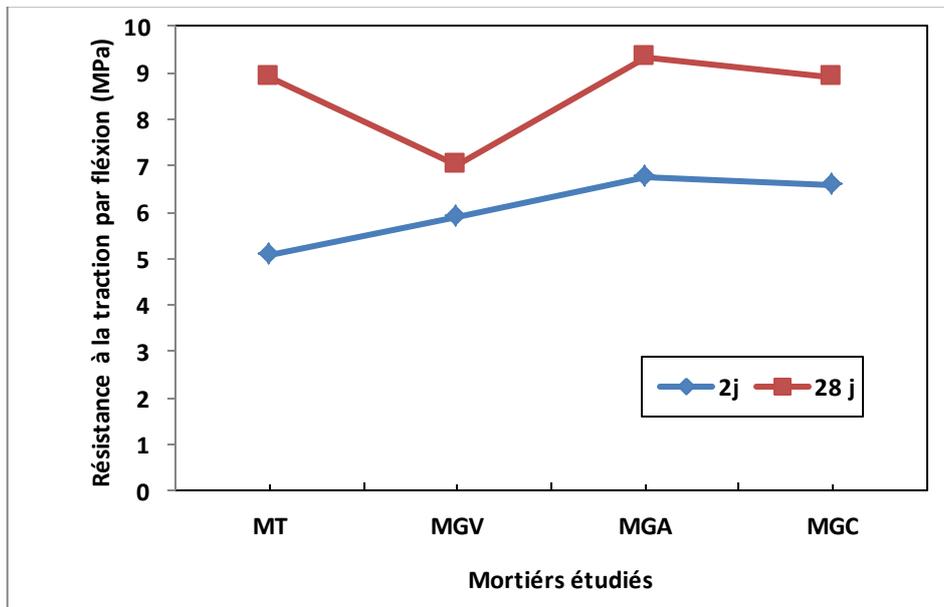
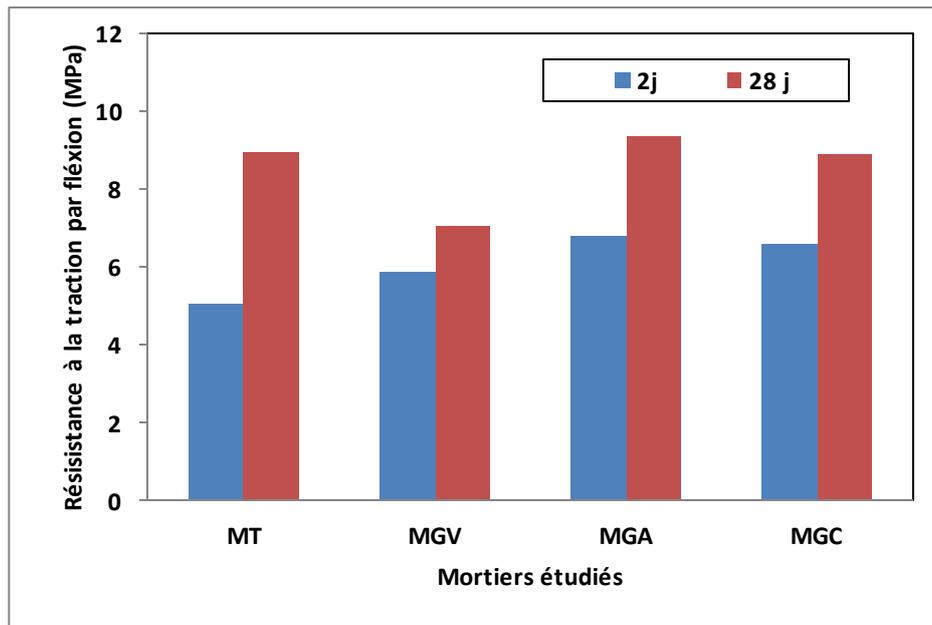


Figure V.10). L'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés.



**Figure V.11).** Evolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers étudiés.

Les Figures (V.10 et V.11) présentent l'évolution de la résistance à la traction par flexion en fonction d'âge pour les mélanges des mortiers étudiés. D'après les résultats obtenus, il est évident que la résistance à la traction par flexion augmente en fonction de l'âge pour tous les mortiers élaborés, cela est dû à l'effet de l'hydratation des minéraux du clinker.

Cependant, une diminution de la résistance à la traction par flexion à 28 jours des mortiers MGV par rapport au mortier témoin, MGA et MGC. Cette diminution est de l'ordre de 2MPa. En effet, cette diminution est expliquée par l'absorption d'eau ou la porosité pour les mortiers MGV.

#### V.2.2.b). Résistance à la compression : NF-EN 196-1

**Tableau V.6).** Résistance à la compression des MAP étudiés.

Variantes (MAP)	Résistance à la compression (MPa)	
	2 jours	28 jours
MT	30.58	53.37
MGV	25.53	38.35
MGA	39.12	56.37
MGC	36.35	51.13

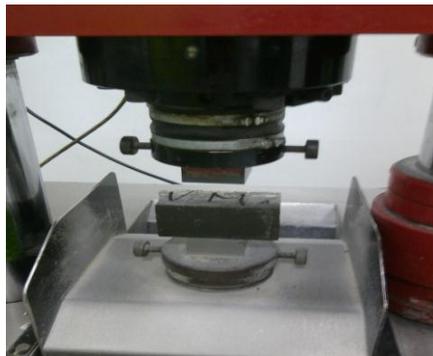


Figure V.12). Essai de la compression.

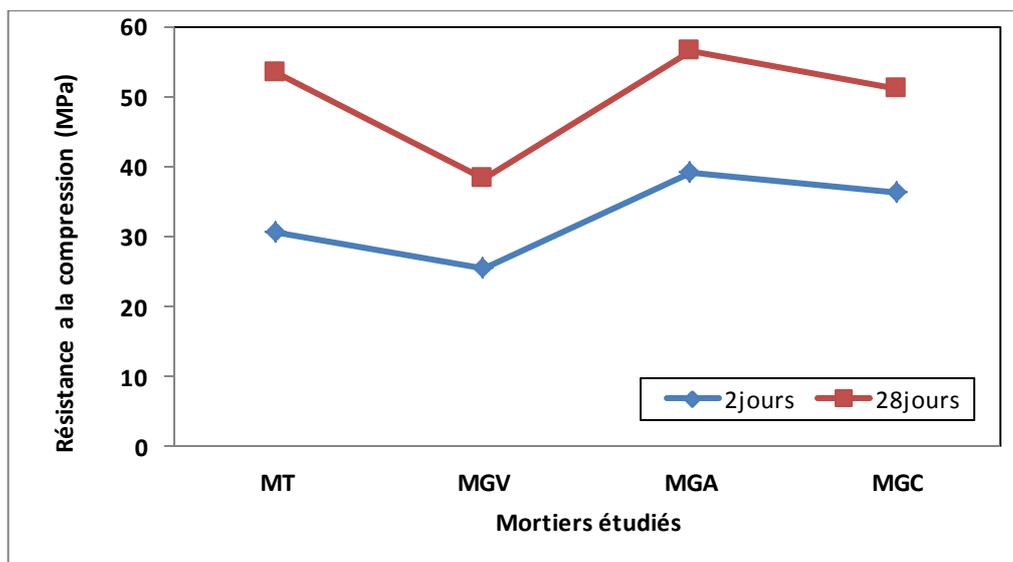


Figure V.13). L'évolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.

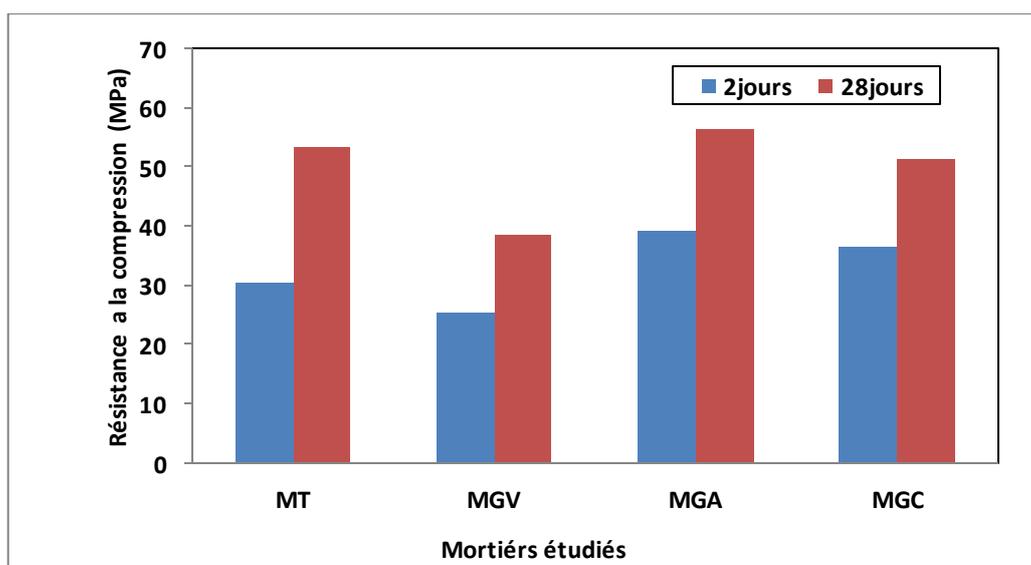


Figure V.14). Evolution de la résistance à la compression des mortiers étudiés.

Les Figures (V.13 et V.14) donnent l'évolution de la résistance à la compression en fonction d'âge pour les mélanges des mortiers à base des types de granulats artificiels. D'après les résultats obtenus, la résistance à la compression varie de la même manière que celle de la traction par flexion en fonction de l'âge de conservation des éprouvettes. En effet, elle augmente en fonction d'âge de durcissement pour tous les mélanges des mortiers. Aussi, les mortiers à base des granulats verre mousse sans addition, présentent une résistance à la compression la plus faible par rapport aux autres mélanges. Cela est dû à la structure des granulats du verre mousse sans additif qui est une structure amorphe. Tandis que, les granulats du verre mousse avec additif (argile ou chamotte) ont une structure contenant de la phase cristalline due à la présence de ces deux additions.

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

Le module d'élasticité dynamique a été déterminé par la méthode ultrasonore sur des éprouvettes des mortiers autoplaçants 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**.

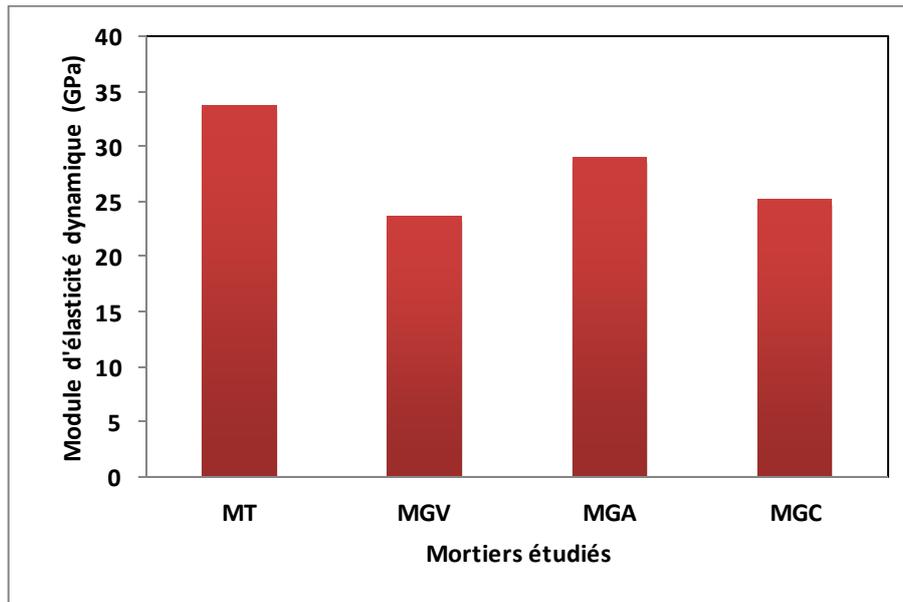
$\rho$  : masse volumique de l'éprouvette en **kg/m<sup>3</sup>**

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



**Figure.V.15).** Appareil Ultrasonique.

Les résultats obtenus sont représentés dans la Figure (V.16)



**Figure V.16).** Module d'élasticité dynamique des mortiers étudiés à 28 jours.

D'après les résultats obtenus, le module d'élasticité dynamique suit la même tendance que celle de la résistance à la compression, une légère diminution du module d'élasticité des mortiers étudiés en fonction de la substitution du sable par différents types des granulats artificiels utilisés.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de cette étude était le recyclage des déchets d'origine minérale, à savoir les déchets du verre et les déchets de la brique (chamotte) pour produire des granulats fins en tant que sable dans la formulation des mortiers autoplaçants. Une étude expérimentale a été menée pour évaluer les propriétés à l'état frais et durcis des mortiers autoplaçants avec substitution totale du sable par trois types des granulats à base du verre mousse à différent composition chimique (**GV** : granulats de verre mousse sans additif, **GA** : granulats de verre mousse avec 10% d'argile et **GC** : granulats de verre mousse avec 10% de chamotte). A travers de l'étude expérimentale effectuée, on peut conclure que ;

- La substitution totale du sable par les granulats de verre mousse quelque soit la nature, a légèrement diminuée la fluidité des mortiers autoplaçants. Cependant, la fluidité enregistrée pour les mortiers contenant 100% des granulats de verre mousse, est à la moyenne de 190 mm qui est une fluidité acceptable.
- La substitution totale du sable par les granulats de verre mousse quelque soit la nature, a diminué considérablement la densité en vrac de tous les mélanges des mortiers élaborés. La densité des mortiers à base des granulats de verre mousse, enregistrée est de l'ordre 1.75 g/cm<sup>3</sup> pour les mortiers MG<sub>V</sub>, 1.86 g/cm<sup>3</sup> pour les mortiers MG<sub>A</sub> et 1.86 g/cm<sup>3</sup> pour mortiers MG<sub>C</sub>.
- La résistance à la traction par flexion augmente en fonction de l'âge pour tous les mortiers élaborés. Cependant, une diminution de la résistance à la traction par flexion à 28 jours des mortiers MG<sub>V</sub> par rapport au mortier témoin, MG<sub>A</sub> et MG<sub>C</sub>. Cette diminution est de l'ordre de 2MPa.

- Le remplacement du sable par les granulats de verre mousse, à provoquer aussi une réduction de la résistance à la compression des mortiers autoplaçants étudiés. Par rapport au mortier de référence, Cette réduction est de l'ordre 9.35 % pour les mortiers MG<sub>V</sub>, 5.62 % pour les mortiers MG<sub>A</sub> et 4.19 % pour mortiers MG<sub>C</sub>.
  
- Le module d'élasticité dynamique suit la même tendance que la résistance à la compression. La valeur du module obtenue est de l'ordre de 23.7 GPa pour les mortiers MG<sub>V</sub>, 29.1 GPa pour les mortiers MG<sub>A</sub> et 25.30 GPa pour mortiers MG<sub>C</sub>.

# BIBLIOGRAPHIE

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

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

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