

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté Des Technologie**

**Département De Génie Mécanique**

**Génie Des Matériaux**

# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

---

**Elaboration D'un Béton Cellulaire et Etude de  
L'influence Des Tailles des Cellules Sur Les  
Performances Physico-Mécanique et Les  
Performances D'isolation Thermiques**

---

**Présenté par :**

**LOUNIS Mohamed**

**KEBOUR Mohamed Nadjib Faouzi**

**Encadré par :**

**Pr.BOUMCHEDDA Khaled**



**PROMOTION 2020/2021**

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord merci au bon dieu le tout puissant, de m'avoir donné la force, la patience et la volonté pour réaliser ce travail dans des meilleures circonstances et en bon état.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement Messieurs BOUMCHEDDA KHALED ET LAIB NADIA pour leurs aides et leurs conseils avisés, tout au long de ce travail.*

*Nous remercions vivement les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail.*

*Je remercie toute l'équipe de centre d'étude et de service technologie de l'industrie des matériaux de construction « CETIM », l'équipe de centre national d'études et de recherche intégrée et de bâtiment « CNERIB », l'équipe de laboratoire national habitant de construction « LNHIC », et l'équipe de centre de recherche scientifique et technique en analyse physico-chimiques « CRAPC ».*

*Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.*

***DÉDICACE***

***Je dédie ce modeste travail,***

***A mes parents***

***A mes profs***

***A mes sœurs et frères***

***A toute la famille***

***A mes amis***

## Sommaire

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Introduction générale.....</b>  | <b>1</b>  |
| <br><b>Chapitre I: Généralité sur les bétons cellulaires</b>                           |           |
| <b>I.1.Introduction.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>I.2.Historique .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>I.3.Qu'est-ce que le béton cellulaire? .....</b>                                    | <b>5</b>  |
| <b>I.3.1. Fabrication du béton cellulaire .....</b>                                    | <b>6</b>  |
| <b>I.4.Généralité sur matières premières .....</b>                                     | <b>7</b>  |
| <b>I.4.1. Le sable.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>I.4.1.1. Introduction .....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>I.4.1.2. Les différents constituants du sable .....</b>                             | <b>8</b>  |
| <b>I.4.1.3. Classification du sable .....</b>  | <b>9</b>  |
| <b>I.4.1.4. Les caractéristiques du sable et ces application.....</b>                  | <b>10</b> |
| <b>I.4.1.5. Les ressources des sable en Algérie.....</b>                               | <b>11</b> |
| <b>I.4.2. Ciment .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>I.4.2.1. Définition .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>I.4.2.2. Classification des ciments .....</b>                                       | <b>12</b> |
| <b>I.4.3.Les agent moussants.....</b>  | <b>14</b> |
| <b>I.5.Les bétons légers .....</b>   | <b>18</b> |
| <b>I.5.1.Les bétons de granulats légers.....</b>                                       | <b>20</b> |
| <b>I.5.2. Les bétons à base de particules végétales .....</b>                          | <b>20</b> |
| <b>I.6.Les bétons cellulaires .....</b>  | <b>21</b> |
| <b>I.6.1.Les types des bétons cellulaires .....</b>                                    | <b>21</b> |
| <b>I.6.2. L'utilisation, Les avantages et l'inconvénient de béton cellulaire .....</b> | <b>23</b> |
| <b>I.6.2.1. L'utilisation de bétons cellulaire .....</b>                               | <b>23</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| I.6.2.2. Les avantages de bétons cellulaires .....  | 24        |
| I.6.2.3. Les inconvénients du béton cellulaire .....  | 26        |
| I.7. Conclusion .....   | 28        |
| <br>  |           |
| <b>Chapitre II: Propriétés des bétons léger et Le domaine d'isolation</b>                         |           |
| <b>II.1. Position structure envers le transfert de chaleur .....</b>                              | <b>29</b> |
| II.1.1. Les modes de transfert de chaleurs .....  | 29        |
| II.1.1.1. La conduction .....   | 29        |
| II.1.1.2. La convection .....   | 29        |
| II.1.1.3. Le rayonnement .....  | 29        |
| II.1.2. Déperdition .....   | 30        |
| II.1.2.1. Méthodes de calcul des déperditions .....   | 30        |
| II.1.2.2. Déperditions de base par transmission .....   | 30        |
| II.1.2.3. Déperditions de base par transmission à travers les parois pour un local<br>donné ..... | 31        |
| II.1.2.4. Coefficients de transmission thermique (u) .....  | 31        |
| II.1.2.5. Déperditions par renouvellement d'air .....   | 31        |
| II.2. Les propriétés des bétons légers .....  | 32        |
| II.2.1. L'isolation thermique .....   | 32        |
| II.2.1.1. isolation rapportée .....   | 32        |
| II.2.1.2. Isolation répartie .....  | 32        |
| II.2.2. La porosité .....   | 32        |
| II.2.3. La légèreté .....   | 33        |
| II.2.4. La sensibilité à l'eau .....  | 33        |
| II.2.5. La résistance à la compression des bétons légers .....                                    | 33        |
| II.2.6. Propriétés élastiques des bétons légers .....   | 33        |

|   |    |
|---|----|
| <b>II.2.7 La masse volumique</b> .....  | 34 |
| <b>II.2.8 La durabilité</b> .....   | 34 |
| <b>II.2.9 La rhéologie a l'état frais</b> .....   | 34 |
| <b>II.3.Conclusion</b> .....  | 35 |
| <br>  |    |
| <b>Chapitre III: Caractérisation Des Matières Premiers</b>                                    |    |
| <b>III.1.Objectif du travail</b> .....  | 36 |
| <b>III.2.Méthodologie pratique</b> .....  | 36 |
| <b>III.3.Première partie</b> .....  | 37 |
| <b>III.3.1. Caractérisation des matériaux</b> .....   | 37 |
| <b>III.3.1.1. Caractéristiques des constituants</b> .....                                     | 37 |
| ❖ <b>Le sable</b> .....   | 37 |
| ❖ <b>Le ciment</b> .....  | 41 |
| ❖ <b>Entraîneur d'air (MEDA-AIR BL)</b> .....   | 47 |
| <b>III.4.Interprétations des résultats</b> .....  | 49 |
| <b>III.5.Deuxième partie</b> .....  | 49 |
| <b>III.5.1.Formulation des bétons cellulaires</b> .....                                       | 49 |
| <br>  |    |
| <b>Chapitre IV: Caractérisation des échantillons</b>  |    |
| <b>IV.1. Caractérisation physico-mécanique des échantillons</b> .....                         | 51 |
| <b>IV.1.1. Résultat des densités et porosités en fonction de la vitesse de malaxage</b> ..... | 51 |
| <b>Interprétation</b> .....   | 56 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>IV.1.2.Résistance à la compression.....</b>  | <b>57</b> |
| <b>Interprétation.....</b>  | <b>58</b> |
| <b>IV.1.3.Résistance à la traction par flexion.....</b>                               | <b>59</b> |
| <b>Interprétation.....</b>  | <b>61</b> |
| <b>IV.2.Caractirisation de performance d’isolation des échantillons.....</b>          | <b>62</b> |
| <b>IV.2.1.Caractirisation thermiques des échantillons.....</b>                        | <b>62</b> |
| <b>Interpolation et discussions.....</b>  | <b>64</b> |
| <b>IV.2.2. Caractérisation de la vitesse de propagation des ondes ultrasons .....</b> | <b>64</b> |
| <b>Interprétations .....</b>  | <b>66</b> |
| <b>Conclusion générale.....</b>   | <b>67</b> |

## **Listes des figures**

### **Chapitre I : Généralité sur les bétons cellulaires**

Figure I.1: chambre autoclavage pour béton cellulaire.

Figure I.2: Les utilisations des super plastifiants, d'après.

Figure I.3 : Le béton cellulaire est parfois utilisé pour la construction d'une maison

Figure I.4 : La brique de béton cellulaire profite d'excellentes capacités isolantes.

### **Chapitre III : Caractérisation Des Matières Premiers**

Figure III.1 : Essais d'équivalente sable et masse volumique.

Figure III.2 : Fuseaux granulaire des différents types de sable.

Figure III.3 : Mesure du coefficient de friabilité de sable.

Figure III.4.essais de mesure consistance normal et temps de prise.

Figure III.5: MEDA-AIR

Figure III.6 : Malaxeur de béton.

### **Chapitre IV : Caractérisation des échantillons**

Figure IV.1. Influence de densité et porosité par rapport la vitesse de malaxage (ep  $64cm^3$ )

Figure IV.2. Influence de l'absorption par rapport la vitesse de malaxage

Figure IV.3. Influence de densité et porosité par rapport la vitesse de malaxage (ep  $200cm^3$ )

Figure IV.4. Influence de l'absorption par rapport la vitesse de malaxage

Figure IV.5.Les tailles des cellules des éprouvettes.

Figure IV.6. structures des éprouvettes.

Figure IV.7.Essais de compression

Figure .IV.8.Essais de résistance a la compression a 7j.

Figure IV.9. Essais de résistance à la compression à 28j.

Figure IV.10. Essai de la résistance à la traction par flexion.

Figure IV.11. Essai de la résistance à la traction par flexion à 7j.

Figure IV.12. Essai de la résistance à la traction par flexion à 28j.

Figure IV.13. Essai de la conductivité thermique et chaleur spécifique.

Figure IV.14. Essai de la conductivité thermique.

Figure IV.15. Chaleur spécifique.

Figure IV.16. application de l'essai d'ultra-son

Figure IV.17. Résultats de mesure de la vitesse de propagation du son.

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre I : Généralité sur les bétons cellulaires**

Tableau I.1: Résistance à la compression des ciments.

Tableau I.2 : Déférénts utilisations de déférénts types d'adjuvants.

Tableau I.3.classification fonctionnelle des bétons léger.

### **Chapitre III : Caractérisation Des Matières Premiers**

Tableau III.1 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable Oued-Souf.

Tableau III.2 : résultats des principales caractéristiques physiques de sable Oued-Souf.

Tableau III.3 : Valeur de module de finesse.

Tableau III.4 : Valeurs de Friabilité.

Tableau III.5: Composition chimique du ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R

Tableau III.6 : Composition minéralogique de ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R.

Tableau III.7: Caractéristiques physiques de ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R.

Tableau III.8: Caractéristiques mécaniques de ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R.

Tableau III.9 : Caractéristiques de l'entraineur d'air

Tableau III.10 : Composition du mélange.

### **Chapitre IV : Caractérisation des échantillons**

Tableau IV.1. Résultat des densités et porosités( $64cm^3$ )

Tableau IV.2. Résultat des densités et porosités( $200cm^3$ )

Tableau IV.3. Résistance à la compression.

Tableau IV.4. Résistance à la traction par flexion.

Tableau IV.5. la conductivité thermique et chaleur spécifique.

Tableau.IV.6. Résultat d'essai ultrasonique.

*Introduction*

*Générale*

## **Introduction générale**

Aujourd'hui le béton occupe une importante place dans le domaine de la construction son intérêt réside de sa grande facilité de mise en œuvre, sa résistance en compression, sa durabilité, son ouvrabilité et son coût acceptable, ont contribué à accroître son utilisation pour tous les ouvrages, comme des immeubles de bureaux ou d'habitation, des ponts, des routes, des tunnels, d'aéroports, des barrages, et des ports...etc.

Le béton est un matériau composite et hétérogène résulte d'un mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et présente des propriétés mécaniques qui peuvent être très supérieures à celles des roches naturelles. Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer.

Les pratiques de l'industrie du béton sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-compactant). En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé.

Malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité se chiffre en milliards de m<sup>3</sup>. Il est disponible dans près de 60% du territoire. Certaines de ses caractéristiques physico-chimiques laissent penser qu'il pourrait être adopté en tant que matériau de construction [1].

L'objectif de ce travail, est la valorisation de sable local dans la formulation de mortier cellulaire. Ont été utilisés le sable d'oued souf.

Pour atteindre ce but, nous avons divisé le présent travail en quatre parties comme il est indiqué ci-dessous :

- ✚ La première partie traite une synthèse bibliographie elle se présente en deux chapitre, un chapitre sur les généralités des bétons cellulaire et l'autre chapitre sur Propriétés des bétons léger et les domaines d'isolations.
- ✚ La deuxième partie concerne la caractérisation des matériaux premier utilisés (sable, ciment, agent moussant) pour la confection d'un béton cellulaire à base d'un agent moussant (MEDA-AIR) et procédures expérimentales de différents dosages.
- ✚ La troisième partie c'est l'exploitation des résultats.
- ✚ En fin une conclusion générale et perspective clôturant notre travail.

*Partie*  
*Bibliographique*

*Chapitre I :*  
*Généralité sur*  
*les bétons*  
*cellulaires*

## **I.1.Introduction**

Depuis 1953 le béton cellulaire est présent sur le marché de la construction en Belgique. Tout au long de ces cinq décennies, son utilisation n'a cessé d'augmenter, et plus particulièrement au cours de la dernière, alors que l'industrie de la construction connaissait une phase de profonde dépression. Ce fut, en effet, au cours de ces temps difficiles que les avantages du matériau ont été appréciés à leur juste valeur.

Le béton cellulaire est, à la fois, un matériau solide et léger qui convient à tous les types de construction, du plancher à la toiture. De par leurs grandes dimensions, les blocs, linteaux et dalles armées contribuent à la rapidité et à la simplicité de la construction, facteurs qui influencent favorablement le coût de celle-ci.

L'utilisation de produits en béton cellulaire se révèle être source de réels avantages à toutes les étapes du projet et de la construction.

L'auteur de projet d'abord, profite de la polyvalence du matériau pour donner libre cours à sa créativité. Sans contrôle particulier il est d'autre part assuré de la répartition judicieuse de l'isolation thermique sur toute la surface et dans toute l'épaisseur des parois. Chaque cm de béton cellulaire est par lui-même un isolant thermique.

De plus, toute extension de hall industriel est largement facilitée par le démontage aisé des dalles de murs et par leur réutilisation dans l'agrandissement.

Le béton cellulaire, dont la fabrication fait appel aux technologies de pointe, est venu à point nommé pour répondre aux exigences toujours accrues des maîtres d'ouvrages et aux techniques de chantier toujours plus performantes.

Aucun bâtiment n'est à nul autre pareil. Chaque construction a sa propre spécificité.

Qu'il s'agisse d'un dépôt dans lequel sont entreposés des produits fragiles ou inflammables, d'un bâtiment industriel dans lequel sont utilisées des méthodes modernes de production ou, encore, d'une habitation dans laquelle "il fait bon vivre", chacune de ces constructions postule un projet qui lui est propre, adapté à sa vocation et répondant aux besoins spécifiques de l'utilisateur.

Un matériau de construction, vraiment moderne, se doit donc de répondre, non seulement aux besoins de son temps, mais encore et surtout à ceux du futur. Le béton cellulaire est apte à répondre à ce défi comme nous le verrons plus loin dans cette brochure [2].

## I.2. Historique

Le béton cellulaire tel que nous le connaissons de nos jours est né de la combinaison de deux inventions antérieures : l'autoclavage du mélange sable/chaux/eau et "l'émulsification" des mélanges de sable, ciment/ chaux et eau.

La première invention est attribuée en 1880 à W. Michaelis. Ce dernier a mis en contact un mélange de chaux, sable et eau avec de la vapeur d'eau saturée sous haute pression et est ainsi parvenu à donner naissance à des silicates de calcium hydratés hydrorésistants. La chaux réagit avec le sable quartzueux et l'eau. Cette invention est encore et toujours à la base de tous les matériaux de construction durcis à la vapeur d'eau saturée sous haute pression.

La seconde invention concerne l'émulsifiassions des mortiers. En 1889, cette invention a été octroyée à E. Hoffmann. Il a utilisé de la pierre à chaux finement broyée et de l'acide sulfurique pour émulsionner des mortiers à base de ciment et de gypse. En 1914, J.W. Aylsworth et F.A. Drey ont breveté un procédé utilisant de la poudre d'aluminium ou de zinc comme émulsifiant. Ces poudres de métal réagissent en milieu alcalin (chaux ou ciment) en dégageant de l'hydrogène. Cette formation de gaz fait lever la masse de béton frais à l'instar de ce qui se produit, lors de la fabrication du pain.

En 1924, le Suédois J.A. Eriksson débute la production de béton cellulaire à base d'un mélange de sable fin, de chaux et d'eau, auquel il ajoute une petite quantité de poudre de métal. Trois ans plus tard, il combine ce processus à l'autoclavage, tel que décrit dans le brevet de Michaelis. Après avoir levé et s'être solidifié dans un autoclave à une température d'environ 180°C avec de la vapeur d'eau saturée, sous haute pression, le mélange émulsionné durcit. Parallèlement, un processus à base de sable fin, de ciment et d'eau avec adjonction d'une petite quantité de poudre de métal est développé au début des années trente. K.I.A. Eklund a fait breveter ce procédé en 1939.

La principale avancée par rapport au béton cellulaire de la période antérieure est le durcissement à la vapeur d'eau saturée sous haute pression permettant de réduire très nettement le retrait dû au séchage.

Enfin, une troisième étape s'imposait pour arriver au béton cellulaire, tel que nous le connaissons aujourd'hui : la fabrication en série de petits et de grands formats, d'éléments armés ou non avec un degré de précision suffisant. Pour ce faire, une méthode de production a été développée après 1945. Les produits sont découpés aux dimensions souhaitées au moyen de fins fils d'acier très tendus ce qui permet d'obtenir des produits finis de grande précision. C'est en 1953 que la Belgique a commencé à produire des blocs de béton cellulaire. Le marché y a

vu un intéressant complément aux produits de construction traditionnels. Suite au franc succès du produit, la production a été étendue, dès 1957, à celle d'éléments armés en béton cellulaire. Un développement important car des éléments de grandes dimensions pouvaient désormais être réalisés. Ces éléments sont principalement utilisés dans la construction industrielle.

C'est en Suède, patrie d'Eriksson, que les premières usines ont vu le jour. C'est également de ce pays que le matériau a été diffusé et produit dans le monde entier. De nos jours le processus de production du béton cellulaire est le plus novateur dans le domaine des matériaux de construction pierreux. Il est entièrement automatisé [1].

### **I.3. Qu'est-ce que le béton cellulaire?**

L'air pétrifié, Sable, chaux et ciment constituent les matières premières de base. Celles-ci sont intimement mélangées dans des proportions bien déterminées, après quoi on y ajoute de l'eau.

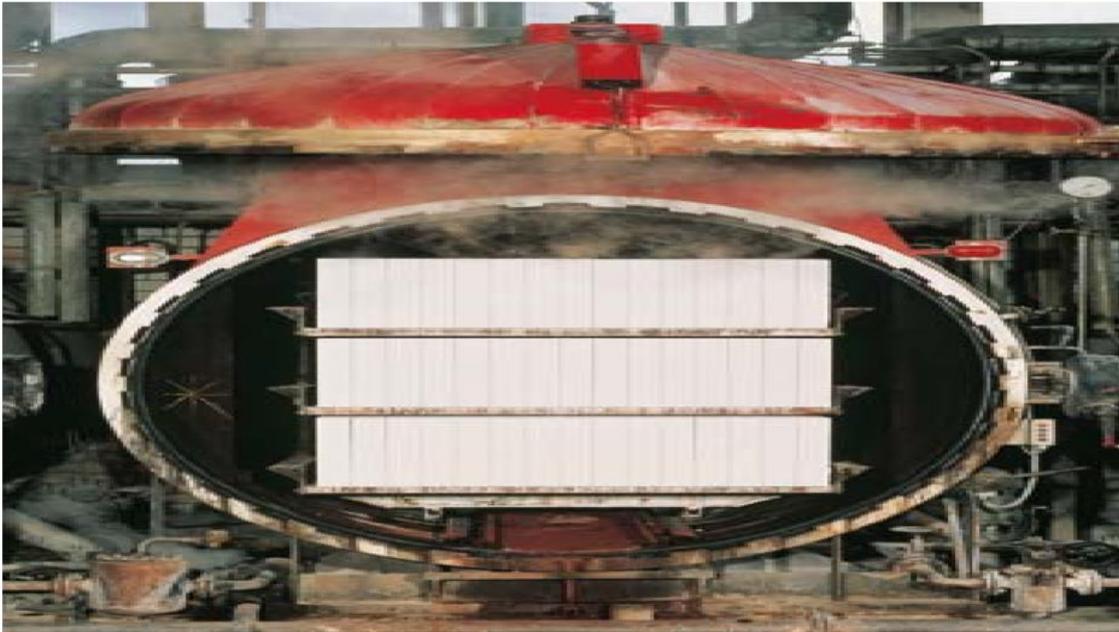
L'adjonction d'une petite quantité de poudre d'aluminium aura pour effet de faire lever la pâte.

La pâte est ensuite coulée dans des moules qui ne sont que partiellement remplis pour éviter tout débordement de la pâte lors de la levée. Dans les moules, destinés à la production d'éléments isolants, sont disposées les armatures, calculées en fonction de la vocation des éléments. Ces armatures, préalablement coupées aux dimensions requises, sont soudées automatiquement et sont traitées contre la corrosion.

L'adjonction de l'agent moussant pour effet de libérer de l'hydrogène qui fait lever la pâte et donne naissance à des myriades de cellules gorgées d'hydrogène, rapidement chassé sous la pression de l'air ambiant.

C'est ce qui fait précisément la particularité la plus remarquable du béton cellulaire. Il s'agit, en effet, d'un matériau gorgé d'air. De là, l'expression "d'air pétrifié". Il n'en est pas moins solide, léger et thermiquement très isolant.

Après dé moulage, la masse est découpée à dimension suivant le type de produit : a Caro, rectangle, cubique. Le produit passe ensuite à l'autoclave où il est soumis à une température de 110°C et à une pression de l'atmosphère. C'est à l'issue de l'autoclavage que le matériau acquiert définitivement les propriétés qui lui sont propres.



**Figure I.1: chambre autoclavage pour béton cellulaire.**

Un procédé ultramoderne de fabrication et le strict respect des normes qualitatives permettent d'offrir un matériau d'exception dont les avantages sont très appréciés dans la construction.

De par le peu de matière première nécessaire à sa production, le béton cellulaire participe à la sauvegarde des ressources naturelles.

La fabrication ne dégage aucun gaz toxique et ne pollue absolument pas l'eau.

### **I.3.1. Fabrication du béton cellulaire**

Les produits en béton cellulaire sont fabriqués dans des unités de production hautement industrialisées. L'emploi de matières premières stables, l'automatisation de la fabrication ainsi que le contrôle permanent, tant interne qu'externe, sont les garants d'une qualité de produits constante et de haut niveau. Les phases importantes de la fabrication sont :

- la préparation, le dosage et le malaxage des matières premières
- la préparation des moules (acier, bois).
- la coulée, la levée et le durcissement de la pâte
- le découpage et le profilage des produits

Le béton cellulaire appartient au groupe des bétons légers. Les matières premières entrant dans sa préparation sont le ciment, le sable pur (95% de silice), l'agent moussant et l'eau.

Le sable est broyé finement soit à sec, soit en présence d'eau. On y ajoute ensuite le ciment, l'agent moussant et l'eau. Le produit obtenu, après mélange intime des constituants, est coulé dans des moules d'une capacité de 40 et 64 cm<sup>3</sup> que l'on remplit à mi-hauteur environ.

Pour la production, avant remplissage des moules.

Pour la production de cubique et Caro, les moules sont remplis uniquement du mélange.

L'agent moussant réagit avec les constituants, réaction qui produit un dégagement d'hydrogène permettant la formation des cellules sphériques et fermées qui caractérisent le béton cellulaire.

Après quelques heures, la masse cellulaire a acquis une dureté telle (on parle à juste titre d'un "gâteau") qu'elle peut être démoulée.

Bien que les composants soient les mêmes, le béton cellulaire est un matériau entièrement différent du béton dans lequel, on le sait, le sable ne participe pas à la réaction chimique et donc à la formation des cristaux.

Chaque catégorie massive, possédant ses caractéristiques spécifiques, répond aux exigences des normes NBN B 21-002 et EN 771-4 (blocs) ou NBN B 21-004 et EN 12602 (éléments armés).

#### **I.4.Généralités sur matières premières**

Les matières premières nécessaires à la fabrication du béton cellulaire sont :

- Du sable jaune très pur (95% de silice) **d'Oued Souf**
- Du ciment
- De l'agent moussant
- De l'eau

A noter qu'il s'agit uniquement de matières minérales présentes en abondance dans la nature.

C'est l'hydrogène ainsi libéré qui crée les cellules. En cours de durcissement de la pâte, l'hydrogène se libère et les cellules se remplissent d'air.

En moyenne, la proportion de matières premières utilisées lors de la fabrication est la suivante :

- Sable pure                    +/-    58.5%
- Ciment                        +/-    29.3 %
- L'agent moussant           +/-    0.5%
- Eau                             +/-    11.7 %

Les pourcentages varient légèrement, mais de façon précise, en fonction de la masse volumique souhaitée

#### **I.4.1. Le sable**

##### **I.4.1.1. Introduction**

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton. Son utilisation permet d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton. La demande sans cesse croissante sur les granulats a provoqué un épuisement rapide des sabliers et une exploitation anarchique des sables de mer causant ainsi un grave préjudice à l'équilibre de l'environnement à proximité des plages en ayant des répercussions directes sur les ressources naturelles, l'érosion des berges d'oued et l'avancée de mer[2] .

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable.

Le sable peut avoir une origine naturelle ou artificielle ; d'origine naturelle, il provient de la désagrégation naturelle de roches au cours de leur processus d'érosion, artificiel, il est obtenu par broyage de roches massives après des opérations de concassage et de criblage, il est appelé aussi sable de carrière, il est caractérisé par des grains aux aspérités marquées. La composition du sable varie d'un endroit à l'autre selon la nature des roches. Dans l'industrie du verre, de la fonderie et d'autres domaines, le sable recherché est celui qui a une grande teneur en silice un bon classement et des grains arrondis ou subarrondis : sont appelés sables siliceux ou sables industriels.

##### **I.4.1.2. Les différents constituants du sable**

Le sable comporte différentes variétés de minéraux qui sont dérivés de l'élément de base le silicium (Si). Ces principaux minéraux sont classés comme suit : silice, silicates (famille la plus abondante dans la nature, plus de 90 % du poids de l'écorce terrestre), argiles et carbonates. Ces dernières se trouvent généralement sous forme de trace dans le sable [1].

### **I.4.1.3. Classification du sable**

On peut classer les sables selon dont [2] :

#### **I.4.1.3.1. La granularité**

Permet de séparer les sable en trois catégories sont:

- Sables fins ; Sables moyens ; Sables grossiers.

#### **I.4.1.3.2. La propreté et la teneur en fines**

Elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

#### **IV.1.3.3. La nature minéralogique**

En général, les sables peuvent être classés comme suit:

Sables siliceux ; Sables silico-calcaires ; Sables calcaires.

#### **I.4.1.3.4. Leurs provenances**

Selon leurs provenances [3], les sables peuvent être classés comme suit :

- **Sable de rivière**

Il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.

- **Sable de mer**

Il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.

- **Sable de carrière**

Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.

- **Sable artificiel**

Il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.

- **Sable de dune**

C'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dune se trouvent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne.

Les sables retenus sont ceux issus des dunes continentales. Ces dunes sont constituées des nombreux amas de sables fins accumulés dans certaines régions spécifiques du Sahara.

### **I.4.1.4. Les caractéristiques du sable et ces applications**

#### **I.4.1.4.1. Les caractéristiques du sable**

Les principaux critères utilisés pour caractériser un sable sont sa courbe granulométrique et sa rondeur. D'autres caractéristiques sont la teneur en matières argileuses, en coquillages et chlorures [4].

➤ **La courbe granulométrique**

La granulométrie mesure la dispersion de la taille des grains. Elle est décrite par un intervalle  $0/X$  où  $X$  donne la valeur en millimètre pour laquelle 85% des grains ont un diamètre inférieur ou égal à  $X$ . Plus  $X$  est petit plus le sable est considéré comme fin. La teneur en « fines » d'un sable est aussi prise en compte. Il s'agit de la proportion de grains dont la taille est inférieure à 0,063mm. La teneur en fines affecte la manière dont le sable absorbe l'eau par capillarité. Les sables de concassage, à moins d'être lavés, ont une teneur en fines élevée. À l'inverse, les sables extraits de la mer ou de rivières ou les sables lavés en général ont une teneur en fines plus faible car les fines sont entraînées avec l'eau.

➤ **La forme du grain**

Suivant l'origine du sable, la forme du grain est différente. Ainsi, un grain rond améliore la fluidité du sable et des mélanges auxquels il participe. À l'inverse, un grain anguleux favorise la résistance du matériau dont il fait partie. Les sables marins ou naturels sont plus ronds. Suivant leur origine les sables de rivière sont plus ou moins ronds. Les sables de concassage sont anguleux.

➤ **Autres caractéristiques techniques**

Outre la granularité et la forme des grains, le taux de chlorures, les teneurs en argile et en coquillages sont d'autres paramètres importants de la qualité du sable. Une teneur en chlorure trop élevée n'est pas souhaitable dans des applications liées au fer telles que les bétons armés puisqu'ils oxydent le fer et provoquent la rouille de la structure métallique. La présence de sels dans les mortiers ou les matériaux de construction provoque des phénomènes d'efflorescence.

L'argile étant rétenteur d'eau, une présence importante dans le sable affecte les dosages d'eau dans des applications comme le béton ou le mortier. L'argile apporte aussi un composant « gras » qui affecte, par exemple, la plasticité du sable.

#### **I.4.1.5. Les ressources des sables en Algérie**

Les pratiques de l'industrie en du béton en Algérie sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus

performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto compactant)[2] . Dans notre pays, s'ajoute un bouleversement supplémentaire : l'emploi d'un nouveau type de sable. Trois familles de sables se distinguent :

#### **I.4.1.5.1. Les sables rous siliceux**

Dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.

#### **I.4.1.5.2. Les sables de concassage calcaires**

Sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.

#### **I.4.1.5.3. Le sable de dune**

Le sable de dune de l'erg occidental occupe 6% de la surface du Sahara Algérien. La figure I.34, présente la situation géographique des ergs de l'Algérie.

#### **I.4.1.6. Utilisation de sable locale dans le béton en Algérie**

En Algérie, la plupart des bétons courants sont actuellement fabriqués avec des granulats siliceux alluvionnaires. Face à une demande fort croissante, les ressources potentielles en alluvions, bien qu'importantes, sont épuisables et les gisements sont soumis à des contraintes environnementales de plus en plus rigides faisant croître leur coût d'exploitation déjà élevé [2]. Dans notre pays, malgré l'abondance de sable de dune dans le sud, ce matériau reste inconnu. Sa quantité se chiffre en milliards de m<sup>3</sup>. Il est disponible dans près de 60% du territoire.

De nombreux chercheurs, dans des thématiques scientifiques diverses, cherchent à exploiter ce type de sable, propre et présent à l'abondance. Son utilisation pourrait être liée à sa très forte teneur en silice, matériau à la base d'applications dans l'électronique et l'optique, ce sable présente aussi un grand intérêt économique et environnemental pour l'Algérie. En effet, la hausse de la demande du sable de construction en Algérie, l'incapacité des carrières algériennes à fournir du sable fin et l'arrêt programmé de l'utilisation du sable de plage, qui conduit à un grand problème écologique et touristique pour l'Algérie [5].

## I.4.2. Ciment

### I.4.2.1. Définition

C'est un liant minéral obtenu par décarbonatation d'un calcaire et décomposition d'une argile à une température avoisinant, les 1450 °C. Broyés sous forme d'une poudre fine souvent d'une couleur grise, en contact avec l'eau forment des minéraux hydratés très stables. Les travaux effectués [6] ont montré que les principaux composés du ciment portland sont :

- Le Silicate Tricalcique (Alite) :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ).
- Le Silicate Bicalcique (Belite) :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ).
- L'Aluminate Tricalcique :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ).
- L'Alumino-Ferrite Tétracalcique :  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_4\text{AF}$ ).

Et d'autres éléments tels que les sulfates, les alcalins ... etc.

La pâte du ciment est le constituant à l'origine de la cohésion du béton, elle représente 20% à 50% du volume total, se caractérise par sa capacité à s'hydrater et à former une matrice solide qui lie les granulats entre eux.

La pâte du ciment se constitue du ciment anhydre, d'eau et d'éventuels adjuvants additifs [7]. Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

### I.4.2.2. Classification des ciments

- Classification suivant la composition

La norme européenne [8] donne 27 ciments courants, qui sont regroupés en cinq principaux types à savoir :

- CEM I: Ciment Portland Artificiel.
- CEM II : Ciment Portland Composé.
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau.
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique.
- CEM V : Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments sont différents par le type d'ajout, on trouve :

#### ► Laitier Granulé De Haut Fourneau

Obtenu par refroidissement rapide du laitier fondu provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau ; il contient au moins deux tiers en masse de laitier vitreuse et présente des propriétés hydrauliques, après avoir subi une activation convenable.

#### ► Matériaux Pouzzolaniques

Sont des substances naturelles ou artificielles siliceuses ou silico alumineuses, ou une combinaison de celles – ci contenant de l'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) et d'autres oxydes mais la teneur en ( $\text{SiO}_2$ ) réactif doit être au moins égale à 25 % en masse.

#### ► Cendres Volantes

Produits pulvérulents de grande finesse proviennent du dépoussiérage des gaz des chaudières des centrales thermiques. On distingue deux familles [9] :

##### ✓ Cendres Volantes Siliceuses

Sont principalement des particules sphériques ayant des propriétés pouzzolaniques, constituées essentiellement de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

##### ✓ Cendres Volantes Calcique

Présentent des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolanique, contenant une teneur en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ) réactif >10% en masse, le reste était de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

#### ► Filler Calcaire

Est un matériau très finement broyé, il a pour rôle de remplir les vides entre les sables et les graviers, tout en présentant une certaine activité physico- chimique en favorisant l'hydratation des silicates tricalciques [10].

#### ► Fumée De Silice :

Provient de la réduction de quartz de grande pureté par du charbon dans des fours. Elle est formée de particules sphériques contenant au moins 85 % en masse en silice amorphe [11].

#### ➤ Classification suivant les résistances à la compression :

La norme européenne [12] classes les ciments courant d'après leur résistance à la compression voir (Tableau I.1)

Tableau I.1: Résistance à la compression des ciments[12].

| Classe de résistance | Résistance à la compression (MPa) |             |                     |             |
|----------------------|-----------------------------------|-------------|---------------------|-------------|
|                      | Résistance à court terme          |             | Résistance courante |             |
|                      | 2 jours                           | 7 jours     | 28 jours            |             |
| <b>23.5N</b>         | -                                 | $\geq 16.0$ | $\geq 32.5$         | $\leq 52.5$ |
| <b>32.5R</b>         | $\geq 10.0$                       | —           |                     |             |
| <b>42.5 N</b>        | $\geq 10.0$                       | —           | $\geq 42.5$         | $\leq 62.5$ |
| <b>42.5 R</b>        | $\geq 20.0$                       | —           |                     |             |
| <b>52.5 N</b>        | $\geq 20.0$                       | —           | $\geq 52.5$         | —           |
| <b>52.5 R</b>        | $\geq 30.0$                       | —           |                     |             |

#### I.4.3. Les agents moussants

Des agents moussants synthétiques ou à base de protéines (tensioactifs) peuvent être utilisés pour produire de la mousse. En raison de la possibilité de dégradation par les bactéries et d'autres organismes, les agents naturels à base de protéines (savons d'acides gras) sont rarement utilisés pour produire béton expansé pour travaux de génie civil. Cependant, des recherches sont en cours sur l'utilisation d'agents à base de protéines pour le développement de béton mousse à haute résistance, c'est-à-dire de qualité structurelles. La composition chimique d'un surfactant doit être stable dans l'environnement alcalin du béton.

Les agents moussants à base de protéines résultent en une structure de bulles à cellules plus fortes et plus morcelées qui permet l'inclusion de quantités plus importantes d'air et fournit également un réseau de vide d'air plus stable, les agents synthétiques générant une plus grande expansion et une densité plus faible [13, 14,15].

- **Les agents moussant sont classés en deux catégories**

- **Les agents moussant protéiques**

Sont fabriqués à partir de produits raffinés d'origine animale tels que les sabots, les cornes et la peau [16], leur couleur brunâtre et leur odeur particulière les rendent très reconnaissables.

- **Les agents moussant synthétiques**

Sont fabriqués à partir de divers produits chimiques dans la majorité des cas des détergents (de couleur jaune clair et transparent). Ils se présentent le plus souvent sous forme aqueuse constituée d'une part de tensioactifs pour 5 à 40 parts d'eau [17].

Le protocole de mélange (type de mixer, temps de mélange, vitesse de mélange, volume mélangé va conditionner la quantité d'air, le nombre de bulles. L'énergie totale apportée est à rapprocher de la quantité d'énergie libre associée à la formation de la surface des bulles [18].

- ❖ **Adjuvants**

- **Définition**

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci [19].

Un adjuvant n'est pas un palliatif. Il n'a ni pour mission ni pour effet de faire un bon béton à partir d'un mauvais dosage ou d'une mise en œuvre défectueuse. Ce n'est pas un produit capable de se substituer aux règles de la bonne technique [20].

- **Classification des adjuvants**

La norme [21] classe les adjuvants pour bétons, mortiers et coulis, suivant leur fonction principale. On peut distinguer trois grandes catégories d'adjuvants :

A. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton : Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, mortiers et coulis à l'état frais, avant le début de prise. Ils abaissent le seuil de cisaillement de la pâte et en modifient la viscosité [22].

- **Plastifiants - Réducteurs d'eau**

Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois [23].

➤ **Super plastifiants - Haut réducteurs d'eau**

Ce sont des produits qui, sans modifier la consistance, permettent de réduire fortement la teneur en eau du béton donné, ou qui, sans modifier la teneur en eau, en augmentent considérablement l'affaissement (ou l'étalement), ou qui produisent les deux effets à la fois [24].

**A. Adjuvants modifiant la prise et le durcissement**

Ces adjuvants modifient les solubilités des différents constituants des ciments et surtout leur vitesse de dissolution. Leur action se traduit par une évolution différente de la résistance d'un béton, mortier ou coulis adjuvanté comparée à celle du témoin [22]. On peut distinguer deux types d'adjuvants :

✓ **Accélérateurs de prise et durcissement**

Les premiers diminuent le temps de début de transition du mélange pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont utilisés souvent en préfabrication et les derniers augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise. Ils sont préférentiellement utilisés par temps froid.

✓ **Retardateurs de prise :**

Ces adjuvants augmentent le temps de début de transition du mélange, pour passer de l'état plastique à l'état rigide. Ils sont généralement utilisés par temps chaud [25].

**B. Adjuvants modifiant certaines propriétés du béton On peut distinguer deux types d'adjuvants**

✓ **Entraîneurs d'air**

Ces adjuvants permettent d'incorporer pendant le malaxage une quantité contrôlée de fines bulles d'air entraîné uniformément réparties et qui subsistent après durcissement. Ils sont utilisés pour protéger les bétons du gel [26].

✓ **Hydrofuges de masse**

Ces adjuvants permettent de limiter la pénétration de l'eau dans les pores et les capillaires du béton, sans altérer ses qualités plastiques et esthétiques [27].

- Utilisations des différents types des adjuvants

**Tableau I.2 : Différentes utilisations de différents types d'adjuvants [20].**

| Adjuvants          | Utilisation  |
|--------------------|--|
| plastifiants       | Béton pour dallages (béton pompé).<br>Béton maigre (blocs manufacturés)<br>Béton très ferrailé.  |
| super plastifiants | Bétons à compacité, et donc durabilité.<br>Bétons à haute performance.<br>Bétons autoplaçants.   |
| accélérateurs      | Décoffrage rapide (réduction du temps de prise).<br>Bétonnage par temps froid.<br>Mise du béton hors- gel.<br>En préfabrication : augmentation de la rotation des coffrages.<br>Travaux d'étanchement, travaux à la mer (entre deux marées).<br>Réparations rapides, remise en circulation rapide des routes |
| Retardateurs       | Les bétons mis en place sur de fortes épaisseurs (ouvrages d'art, barrages..).<br>Tout bétonnage par temps chaud.<br>Transports de béton sur de longues distances.<br>Bétons injectés en continu.<br>Mortiers stabilisés utilisables plusieurs jours sur chantier.   |
| entraîneurs d'air  | Les barrages, Les routes, Les ponts..<br>Les travaux maritimes.<br>Les travaux en montagne.<br>Les ouvrages exposés au gel et à l'action des eaux agressives.  |

On distingue essentiellement l'adjuvant haut réducteur d'eau (super plastifiant). Le dosage en adjuvant n'excède pas 5 % de la masse du ciment. Il a pour rôle de maintenir une maniabilité donnée tout en diminuant la quantité d'eau dans le béton. Ils permettent ainsi d'obtenir un béton plus résistant en raison de la réduction de l'eau. A titre indicatif, le super plastifiant permettent de réduire la teneur en eau de 25 à 35 % tout en gardant une même maniabilité [28]. Parmi les super plastifiants les plus connus on citera : les poly naphthalènes sulfonés (PNS), les sulfonâtes de mélamine (MS), les polymères carboxyliques d'éther (PCE).

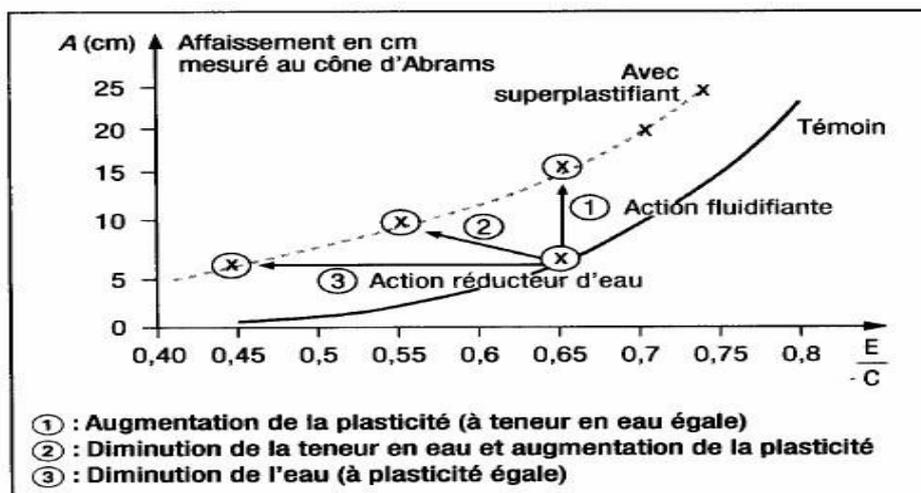


Figure I.2: Les utilisations des super plastifiants, d'après [20].

### I.5. Les bétons légers

Un béton léger est un béton dont la masse volumique est nettement plus faible que celle d'un béton fait de gravier ou de pierre concassée. Sa masse volumique sèche après passage à l'étuve peut varier de 240 à 1850 kg/m<sup>3</sup> et sa résistance en compression de 0,7 MPa à 40 MPa et plus. La norme CSA A23.1 définit un béton structural léger comme étant un béton ayant une résistance en compression à 28 jours supérieure à 20 MPa et e masse volumique séchée à l'air de moins de 1850 kg/m<sup>3</sup>.

Bien que connus depuis plus d'un demi-siècle, les bétons légers ont été relativement peu employés en Algérie pendant cette période. Toutefois, la crise du logement liée au manque considérable en matières premières ainsi que la facture de plus en plus élevée de la consommation d'énergie de chauffage et de rafraichissement des locaux ont provoqué un regain d'intérêt pour l'utilisation des matériaux locaux. Leur transformation en bétons légers demeure l'une des solutions les plus économiques pour faire face aux problèmes.

L'utilisation de bétons légers en construction signifie en effet par-delà une amélioration des performances thermiques, une manutention plus aisée, un gain de temps et de matériel et donc un positionnement plus intéressant par rapport à la compétitivité économique.

Il est très important de définir ce qu'est un béton léger. La commission [42] des bétons légers propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800 kg/m. Cependant, d'autres auteurs adoptent des définitions

un peu différentes l'American Concrete Institute(1970) limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800 kg/m<sup>3</sup> après séchage à l'air pendant 28 jours. En Allemagne, la norme DIN 1042 parue en 1972. Limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Enfin, dans l'objectif d'aider à déterminer la nature des essais à effectuer ainsi qu'à évaluer et interpréter les résultats et programmer la recherche [29] de l'institut de génie civil de l'université de Sydney en Australie ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leurs utilisation dans la construction (Tableau 1.3). Cette classification a été recommandée par la suite par la commission RIMEM.

**Tableau I.3.classification fonctionnelle des bétons léger [29].**

| Classe                               | I                           | II   | III                     |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|-------------------------|
| Type de béton léger                  | Béton léger de construction | Béton léger de construction et d'isolation | Béton léger d'isolation |
| Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | <1800                       | Non pressée                                | Non pressée             |
| Résistance à la compression (MPa)    | >15                         | >3,5                                       | >0,5                    |
| Conductivité thermique (W/m.K)       | -                           | <0,75                                      | <0,30                   |

Dans la grande famille des bétons légers ainsi définis on peut distinguer le béton colloïdal léger de conception plus récente, des deux catégories principales : Les bétons de granulats légers, le béton à base de particules végétales et les bétons légers as où ce dernier présente le sujet de notre travail.

### **I.5.1.Les bétons de granulats légers**

Ils sont composés de pâte de ciment et de granulats légers comme leur nom l'indique. Il existe en effet de nombreuses variétés de bétons de granulats légers que l'on peut classer de différentes façons. Cormon P (1973) propose dans son livre une classification basée sur l'origine des granulats.

On a assisté ces dernières années à une évolution du marché des granulats liée à résolution de marché de construction développement de la maison individuelle, réhabilitation de habitat existant, économie d'énergie etc. à de nouveaux types de granulats légers sont utilisés Le verre expansé (meilleure résistance, faible absorption d'eau) [30], le polystyrène (possibilité de mise en œuvre par pompage) [31,32], les granulats de bords [33,34].

### I.5.2. Les bétons à base de particules végétales

Parmi les granulats d'origine minérale naturellement poreux, les plus fréquemment rencontrés sont les ponces ou les roches sédimentaires comme les calcaires, les autres granulats naturellement poreux sont d'origine végétale. Il s'agit pour la plupart des déchets organiques

que trouvent dans la construction in moyen de valorisation [35] On peut citer le bois, la tige de mats, la cour de noix de coco [36] le bambou [37]. Ce type de produit représente une production de quelques dizaines de milliers de m<sup>3</sup> par an, ce qui reste encore très faible. Ces granulats contiennent de nombreux... Capillaires, entraînant une porosité  $\phi_g$  élevée. Cependant, ils contiennent également des matières organiques à base de cellulose qui les rendent réactifs vis à vis de certains constituants présents dans les liants hydrauliques. Un traitement préalable est donc indispensable afin de les rendre inertes. Trois méthodes sont employées [38] :

- Les traitements physiques : les composés organiques (type hémicellulose) contenus dans le granulat sont isolés du milieu extérieur, soit en imprégnant le granulat de résine ou de paraffine (imprégnation à cœur), soit en enrobant la particule. Les fibres de celluloses peuvent également être détruites par un sel de calcium d'un acide fort, créant d'innombrables microcavités dans le granulat.
- Les traitements thermiques : ils détruisent les constituants cellulosiques à une température de l'ordre de 280°C et limitent en même temps l'hygroscopicité du Granulat.
- les traitements chimiques : ils remplacent les groupes hydroxyle (-OH) par des groupements hydrophobes dans le même but que les traitements thermiques

Actuellement, la stabilisation des particules végétales s'effectue plutôt par un traitement chimique suivi d'un traitement thermique. Cependant, des recherches récentes réalisées par l'E.S.S.T.I.B. (Ecole Supérieure des Sciences et Technologie de l'Industrie du Bois) s'orientent préférentiellement vers un traitement physique d'imprégnation plus aisé et plus économique à mettre en œuvre que les traitements thermiques ou chimiques.

D'autres granulats légers sont obtenus par un procédé chimique appelé expansion (argile expansée...). A une température de l'ordre de 1000°C, la paroi des granulats devient plastique et gonfle sous l'effet de dégagements gazeux [CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>...] générés par la cuisson. Ceci les rend beaucoup plus légers que les granulats classiques avec une masse volumique sèche  $\rho_{\text{granulat}}$  comprise entre 800 et 1200 kg/m<sup>3</sup>. La gamme de variation de la masse volumique sèche s'explique par une expansion plus ou moins poussée du granulat (durée de chauffe, température de cuisson 1000 et 1250 °C) et par une composition chimique variable qui prédispose à ce phénomène, enfin, plus l'expansion sera poussée et plus les matériaux deviendra couteux à fabriquer compte tenu de l'énergie consommée dans les fours de cuisson et du temps de la réaction chimique.

## I.6. Les bétons cellulaires

### I.6.1. Les types des bétons cellulaires

#### I.6.1.1 Le béton cellulaire à agent moussant

Les bétons mousses sont des bétons dans lesquels des bulles d'air sont introduites par l'intermédiaire d'une mousse. Ils présentent des propriétés d'isolation thermique et acoustique ainsi qu'une bonne résistance au feu et au gel.

Il est important de savoir que le béton mousse possède un degré d'isolation plus élevé. Le ciment mousse est fabriqué à base de sable, de ciment, d'eau et de bulles d'air. Le béton mousse ne contient quant à lui pas de sable, mais bien 30 % de ciment en plus, de l'eau et 20 % de bulles d'air supplémentaires.

Dans le cas d'une expansion chimique [39] [40], de la poudre d'aluminium introduite dans le mélange s'oxyde en milieu basique (chaux) et libère de l'hydrogène à l'origine d'un réseau dense de bulles dans le matériau encore à l'état visqueux. Dans le cas d'une expansion mécanique, un agent saponifiant est intégré au mortier initial et au contact de l'eau, il se forme une mousse qui génère des bulles d'air. Cette méthode permet de gérer le processus de formation des pores en dosant correctement l'agent moussant [41] et de répartir les pores de manière régulière dans la matrice. Lorsque le matériau a atteint sa taille finale. Une étape de cuisson par autoclavage finit de cristalliser le béton cellulaire. On obtient un produit manufacturé de structure connue et contrôlée donc de qualité constante malgré un coût énergétique élevé (fours de cuisson).

Dans le cas d'une expansion mécanique, un agent saponifiant est intégré au mortier initial et au contact de l'eau, il se forme une mousse qui génère des bulles d'air. Cette méthode permet de gérer le processus de formation des pores en dosant correctement l'agent moussant [41] et de répartir les pores de manière régulière dans la matrice.

La résistance à la compression du ciment mousse et du béton mousse est égale, mais comme le béton mousse contient plus d'air, il offre de meilleures propriétés d'isolation. En effet, plus le volume d'air immobile contenu dans un produit est élevé, plus son degré d'isolation est élevé.

Au moment de sa préparation, le béton mousse est un mélange liquide de coulis de ciment et d'une sorte de mousse blanche spéciale (un entraîneur d'air à base de latex). Un générateur de mousse transforme le mélange eau/entraîneur d'air en concentré de mousse. L'air contenu dans ce matériau apporte une isolation acoustique et thermique.

Des travaux récents portant sur la caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques de bétons mousses (Baux et al. 2011) montrent que certaines techniques d'élaboration de mousse permettent d'atteindre les ordres de grandeurs des performances du béton cellulaire. L'optimisation de tels produits passe par une diminution de la taille des alvéoles (et la multiplication de leur nombre) ainsi qu'une réduction de l'épaisseur des parois. Le contrôle de ces paramètres est directement lié au comportement rhéologique de la matrice minérale et du comportement des interfaces air-fluide (tensions de surface). En parallèle, le mélange doit être caractérisé par une rigidification suffisamment rapide (par exemple par effet de prise hydraulique) pour stabiliser la mousse dans la configuration choisie.

Les mousses fabriquées présentent une large gamme de structures. Différents paramètres permettent de décrire cette structure, tels que le nombre et la distribution de la taille des bulles, la présence de connectivités, et dans le cas contraire, la distance les séparant. Le lien entre cette structure et les propriétés thermiques et mécaniques des mousses est finalement recherché [43].

## I.6.2. L'utilisation, Les avantages et l'inconvénient de béton cellulaire

### I.6.2.1. L'utilisation de bétons cellulaire

Le béton cellulaire est un matériau présent sous forme de briques ou parpaings assez épais, mais léger. C'est un matériau de construction notamment réputé pour ses capacités isolantes.

Le conditionnement du béton cellulaire Par ailleurs, le béton cellulaire peut se présenter sous plusieurs formes qui sont :

- Les panneaux,
- Les carreaux,
- Les blocs.

Les briques de béton cellulaire peuvent aller de 5 à 30 mm d'épaisseur, et sont très faciles à mettre en œuvre.

#### ❖ Comment est utilisé le béton cellulaire ?

Les briques de béton cellulaire sont utilisées dans le milieu du bâtiment, pour construire une maison, voire des cloisons.

Les panneaux ou blocs de béton cellulaires sont scellés entre eux grâce à un mortier ou une colle spéciale. Certains peuvent même se clipser entre eux. Pour renforcer le béton cellulaire, on utilise souvent une ossature métallique, pour faire du béton armé.

Contrairement à la brique normale, son utilisation est plus variée. En effet, le béton cellulaire peut être utilisé pour :

- Des travaux de maçonnerie
- Des cloisons
- Un plafond
- Des travaux d'aménagement intérieur ou extérieur.

En utilisation extérieure, il est nécessaire d'utiliser un enduit de façade, afin que ces différents supports acceptent tout type de revêtement (peinture ou carrelage).



**Figure I.3 : Le béton cellulaire est parfois utilisé pour la construction d'une maison.**

- **Caractéristiques du béton cellulaire**

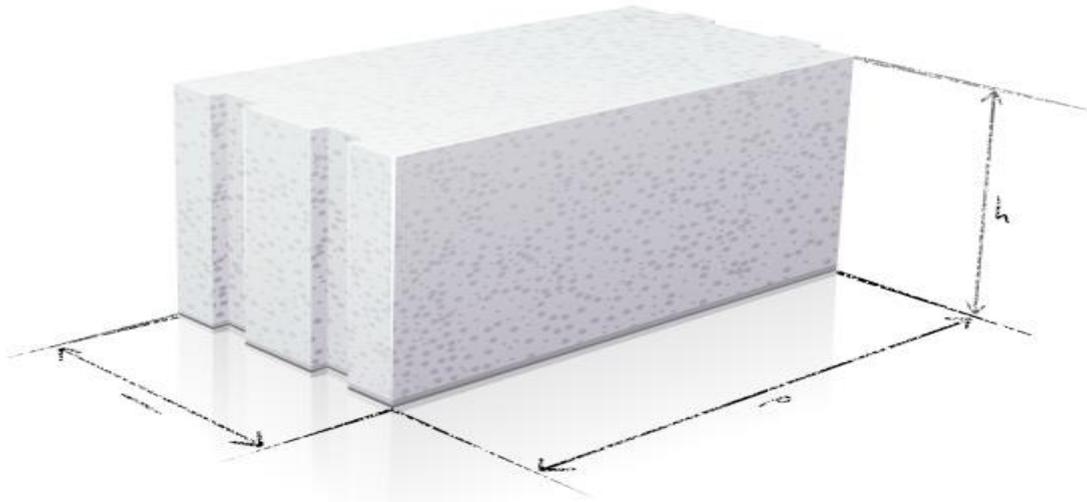
Le parpaing cellulaire possède ses propres caractéristiques, et c'est ce qui le différencie des autres matériaux de construction. Il est très avantageux pour la construction de gros œuvre, mais comporte toutefois certains inconvénients qu'il est bon de connaître.

#### **I.6.2.2. Les avantages de bétons cellulaires**

Si le béton cellulaire est autant prisé, c'est qu'il dispose de nombreux atouts :

- Le béton cellulaire est avant tout un matériau très léger de par sa composition. Il est nettement plus léger que les parpaings, ce qui est un atout considérable sur un chantier de construction.
- En conséquence du point précédent, la manipulation du béton cellulaire est facile tout au long du processus : fabrication, transport ou mise en œuvre.
- En outre, il est un excellent isolant phonique, mais aussi thermique. Il fait office d'isolant, car il minimise l'impact des variations de température. On peut ainsi notamment l'utiliser pour la construction d'une maison passive.
- Par ailleurs, le béton cellulaire est non combustible et donc 100 % incombustible.

Au global, le béton cellulaire est donc un matériau de construction solide, isolant et facile à utiliser. On comprend donc son intérêt pour un constructeur.



**Figure I.4 : La brique de béton cellulaire profite d'excellentes capacités isolantes thermiques et acoustiques.**

- C'est un produit que l'on classe dans la catégorie des matériaux de construction dits «propres», dans la mesure où 100 kg de matière suffisent à produire 1 m<sup>2</sup> de maçonnerie de 25 cm d'épaisseur conforme aux réglementations en vigueur pour la construction de maisons individuelles.
- La fabrication de 1 m<sup>3</sup> de béton cellulaire ne nécessite que 250 kWh.
- C'est un matériau non polluant : la fabrication du béton cellulaire ne libère aucun produit polluant, que ce soit dans l'air, dans l'eau ou dans la terre. De plus, grâce à un recyclage à chaque phase de la fabrication, il n'y a pas de gaspillage de ressources (matières premières, eau, énergie).
- C'est un matériau moderne : la fabrication du béton cellulaire est industrialisée et permet la production d'un matériau de construction fini aux dimensions précises, aisé à mettre en œuvre.
- C'est un matériau léger, solide et isolant : le béton cellulaire est rempli d'une multitude de bulles d'air emprisonnées dans des cellules qui lui confèrent légèreté, pouvoir d'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une solidité permettant la réalisation de constructions d'une grande diversité.

- C'est un matériau isotrope : les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont conservées quelles que soient l'orientation ou les découpes faites sur le produit. Ainsi l'homogénéité de la structure est parfaite.
- Ce matériau, à la fois traditionnel et moderne, est adapté à la majorité des constructions, aussi bien pour l'habitat individuel ou collectif que pour les bâtiments industriels.
- Le volume d'air représente 80% du volume total du béton cellulaire, tandis que la masse solide est de 20%. 1 m<sup>3</sup> de matières premières permet donc de produire 5 m<sup>3</sup> de matériau de maçonnerie en béton cellulaire. Cette très grande économie de matières premières est l'un des aspects écologiques du béton cellulaire.
- A titre d'information, la surface des cellules dans 1kg de béton cellulaire est de 20m<sup>2</sup> ; reportée au m<sup>3</sup>. [44].

### I.6.2.3. Les inconvénients du béton cellulaire

Néanmoins, aucun matériau de construction n'est parfait. Ce n'est pas forcément un hasard si le béton cellulaire n'est, aujourd'hui encore, pas le matériau de construction le plus populaire.

Voici les principales limites des briques en béton cellulaire :

- Bien que sa légèreté soit un atout considérable, cela demeure sa première faille. À cause de cette caractéristique, le béton cellulaire est assez fragile et friable. Sa pose devient alors très délicate. Afin de ne pas le dégrader, il est nécessaire d'utiliser des chevilles de fixation et de scellement pour éviter qu'il se casse.
- Par ailleurs, et contrairement à ce que l'on entend parfois à tort, le béton cellulaire n'est pas respectueux de l'environnement. C'est un matériau polluant et non naturel, qui ne va pas de mise avec l'éco construction. Ceci est en partie dû à l'utilisation de poudre d'aluminium dans sa fabrication.
- En conséquence du point précédent, le béton cellulaire est soupçonné d'être mauvais pour la santé. Certaines études tendent à penser que la poudre d'aluminium peut être responsable de cancer, voire de la maladie d'Alzheimer. Le béton cellulaire pourrait donc être dangereux, en particulier pour les ouvriers qui le manient régulièrement.
- Enfin, le béton cellulaire est 3 fois plus cher qu'un parpaing classique. Ce n'est donc pas un matériau de construction pas cher. Néanmoins, il peut permettre de faire des économies sur l'achat d'isolant.

Au global, le béton cellulaire est un matériau de construction isolant. S'il est plus coûteux que le parpaing, il permet souvent de faire des économies grâce à ses capacités isolantes et à sa facilité de pose. Son caractère isolant peut ainsi permettre la construction d'une maison passive.

Néanmoins, le béton cellulaire n'est pas un matériau de construction écologique ni naturel. Si vous visez une éco construction, méfiez-vous de ses prétendues qualités écologiques.

## **I.7.Conclusion**

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord des problèmes liés aux choix du matériau utilisés et aux méthodes d'alléger le béton. Nous précisons que:

Sous l'appellation "Béton léger" il existe une grande famille de matériaux très différents.

D'un point de vue générale et simple, le béton léger est réalisé en diminuant la masse volumique par le remplacement d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits:

- Dans les granulats.
- Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.
- Dans la pâte de ciment.

On s'intéresse par la méthode de l'incorporation des vides d'air dans la pâte de ciment, dans ce but il convient de compléter notre bibliographie centrée sur les bétons légers pour bien définir et caractériser un des types du béton cellulaire qui durcit à l'air libre (non traité à l'autoclave) dit : (béton mousse).

*Chapitre II :*  
*Propriétés des*  
*bétons léger et*  
*Les domaines*  
*d'isolations*  
*thermiques*

## **II.1.Position structure envers le transfert de chaleur**

Une structure est soumise aux trois modes de transfert de chaleur connues qui sont: la conduction, la convection et le rayonnement. En réalité ces trois modes se produisent ensemble avec des proportions relatives. Mais par difficulté de traiter ces trois modes ensemble, surtout en domaine tridimensionnel et en régime stationnaire en construction et régime forcé en convection et en introduisant l'effet de rayonnement. Cette étude est loin de tenir compte de tous ces paramètres, mais son but essentiel est la mise au point de l'effet d'un seul mode, la conduction dans le mur associé avec l'effet de convection en régime stationnaire.[45][47]

### **II.1.1.Les modes de transfert de chaleurs**

#### **II.1.1.1. La conduction**

Dans ce type, la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines.

Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones froides. La vitesse de progression du flux de chaleur à travers un corps, sa conductivité thermique, dépend de l'aptitude de ses molécules et de ses électrons à recevoir et à transmettre la chaleur [46].

#### **II.1.1.2. La convection**

C'est un échange de chaleur entre une surface et un fluide mobile à son contact, caractérisé par le déplacement de la chaleur au sein d'un fluide par le mouvement d'ensemble de ses molécules d'un point à un autre. Lorsque les molécules d'un fluide froid, tel que l'eau ou l'air, viennent au contact d'une paroi chaude, une partie de l'énergie de vibration animant les molécules superficielles du solide se communique aux molécules voisines du fluide.

Ce mode est un phénomène complexe car il dépend de plusieurs paramètres multidisciplinaires dans leurs natures 'propriétés thermodynamique du fluide, nature et forme des éléments solides qui entourent le fluide et les conditions atmosphériques [47].

#### **II.1.1.3. Le rayonnement**

Tous les matériaux rayonnent sans arrêt de l'énergie dans toutes les directions, à la suite du mouvement continu de vibration de leurs molécules situées en surface. Alors que le rayonnement solaire comporte essentiellement des radiations de courtes longueurs d'onde

émises à très hautes températures, le rayonnement thermique terrestre que nous ressentons comme échange radiatif de chaleur est principalement constitué de grandes longueurs d'onde et de l'infrarouge lointain, émises à une température bien inférieure. L'intensité du rayonnement thermique d'un corps dépend de la température de sa surface rayonnante et de son émissivité. Cependant, tous les matériaux n'absorbent pas le rayonnement thermique; certains le réfléchissent et/ou le transmettent. Cette capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement thermique dépend davantage de la densité et de la composition du corps que de sa teinte [48].

## II.1.2. Déperdition thermique

Le terme "déperdition de chaleur" signifie la perte (diminution, l'affaiblissement, la dégradation progressive de chaleur, d'un point, d'une pièce ou d'un local vers un autre). On retrouve principalement les déperditions de chaleur à travers tout objet capable de véhiculer et de transmettre de la chaleur, tel que le métal, le corps humain et bon nombres de choses qui entourent notre quotidien.

Dans l'habitat ou plus globalement dans la construction, on observe des déperditions de chaleur sur certains murs, fenêtres, portes, combles, toitures, sols, plafonds, ventilation, cheminée, etc.[49][50].

### II.1.2.1. Méthodes de calcul des déperditions

Déperditions de base: Les déperditions de base sont calculées en régime continu et indépendamment du système de chauffage. Les déperditions de base d'un local comprennent:

- Les déperditions de base par transmission de chaleur à travers les parois, DBP
- Les déperditions de base par renouvellement d'air, DBR en W/°C

$$DB = DBP + DBR \quad (\text{eq 1})$$

### II.1.2.2. Déperditions de base par transmission

Les déperditions par transmission à travers une paroi, pour une différence de température de 1 °C entre les ambiances que sépare cette paroi, sont données par la formule suivante:

$$DP = \sum(U.A) + \sum(Y.L) \quad (\text{W/°C}) \quad (\text{eq 2})$$

- U :(anciennement K) : Coefficient de transmission surfacique en W/m<sup>2</sup>°C défini par le ThK-77;

- A : Surface intérieure de chaque élément de paroi; si la paroi est composée d'un seul élément, S (U A) s'écrit U A ; U est exprimé en W/m<sup>2</sup>.K et A en m<sup>2</sup> ;

- $Y$  : Coefficient de transmission linéique en W/m °C des liaisons d'éléments de parois donnant sur l'extérieur;
- $L$  : Longueur intérieure de chaque liaison en m.

**II.1.2.3. Déperditions de base par transmission à travers les parois pour un local donné**

Les déperditions de base d'un local par transmission à travers les parois sont calculées par la formule suivante:

$$DBP = \sum DP \times (t_i - t_e) \tag{eq 3}$$

Où,  $t_i$  : est la température intérieure de base exprimée en °C;  $t_e$ , est la température extérieure exprimée en °C.

- S'il s'agit d'une paroi extérieure, d'une paroi en contact avec le sol ou d'une paroi donnant sur un espace non chauffé,  $t_e$  est la température extérieure de base; et s'il s'agit d'une paroi donnant sur un local non résidentiel dont le programme de chauffage est connu,  $t_e$  est la température intérieure minimale de ce local. Si une telle température minimale n'est pas définie, le local est considéré comme non chauffé [45].

**II.1.2.4. Coefficients de transmission thermique (u)**

Le mur est constitué généralement de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs et de conductivités thermiques différentes, l'équation de calcul devient:

$$\frac{1}{K} = \sum \frac{e}{\lambda} + \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right) \tag{eq 4}$$

Où,  $(U$  ou  $K)$  : Coefficient de transmission thermique (W/m<sup>2</sup> °C);  $\frac{e}{\lambda}$ , représente la somme des rapports des différentes couches;

$e$  : Epaisseur du ou de chaque matériau (m);

$\lambda$  : Conductivités thermiques utiles du ou de chaque matériau de construction

(W/m.°C);  $1/h_i$ ,  $1/h_e$ , Résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs et extérieurs (m<sup>2</sup>C/W);

**II.1.2.5. Déperditions par renouvellement d'air**

Les déperditions de base par renouvellement d'air d'un logement ont pour expression:

$$DBR = 0.34 (\beta \times D_v + a \times Q_s) \times (t_i - t_e) \text{ en W/°C} \tag{eq 5}$$

Où,  $t_e$ , Température extérieure de base définie;  $t_i$ , Température intérieure; 0.34, chaleur volumique de l'air, exprimée en Wh/m<sup>3</sup>.°C;  $Q_v$ , Débit spécifique de ventilation, exprimé en

$m^3/h$ ; c'est le débit d'air dû au fonctionnement des dispositifs de ventilation, amenées et extractions mécaniques, conduits à tirage naturel;  $Q_s$ , Débit supplémentaire de ventilation dû à l'effet du vent, exprimé en  $m^3/h$ ; a et b, sont des coefficients de majoration.

## **II.2. Les propriétés des bétons légers**

### **II.2.1. L'isolation thermique**

#### **II.2.1.1. isolation rapportée**

Pour réaliser une isolation thermique, différentes solutions et matériaux sont disponibles, tant pour la construction neuve que pour la rénovation. Lorsque l'isolation est réalisée indépendamment de la structure, elle est dite « rapportée ».

Les matériaux isolants peuvent se classer dans différentes catégories en fonction de leur Origine :

Synthétique, minérale, végétale, animale [51].

#### **II.2.1.2 Isolation répartie**

Pour s'affranchir de problèmes en lien avec l'utilisation d'une isolation rapportée et pour simplifier les phases de construction il peut être intéressant de travailler avec des matériaux assurant à la fois le maintien de la structure, mais aussi son isolation. Ce type d'isolation est dit « répartir ». Dans cet esprit, les blocs constructifs permettent de créer la structure sans qu'il soit nécessaire d'ajouter une isolation rapportée pour garantir ses performances thermiques [52]. Le développement de tels matériaux découle à la fois de la nécessité de diminuer la masse des éléments porteurs, mais également d'accéder à des performances thermiques supérieures à celle du béton classique [53].

## **II.2.2 La porosité**

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom (A) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque due à la présence de l'air intra particule compte de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de  $\mu m$ ), la porosité au granulat sera qualifiée de porosité microscopique [54].

### II.2.3 La légèreté

L'emploi de granulats légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique de bétons. A titre de comparaison, la masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m<sup>3</sup> alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m<sup>3</sup> pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m<sup>3</sup> pour un béton de bois et qu'elle varie entre 350 et 650 kg/m<sup>3</sup> pour un béton cellulaire (norme NF P 14-306). L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manu facturés sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction [54].

### II.2.4 La sensibilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméable, permettant les transferts sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle desorption-désorption.

La perméabilité représente la faculté qu'a un matériau de laisser un fluide s'écouler en son sein, sous l'effet d'un gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc que si le matériau possède une porosité non négligeable et que celle-ci est connectée. En revanche, un matériau peut être très poreux (le béton cellulaire) et peu perméable car les pores, non reliés entre eux, ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. Porosité et perméabilité sont donc liées mais la première n'implique pas forcément la deuxième [54].

### II.2.5 La résistance à la compression des bétons légers

A la différence du béton traditionnel, la rupture en compression d'un béton léger se produit en général par cassure des granulats légers, dans des plans qui coupent le plus grand nombre possible de granulats légers la rupture des éprouvettes est ainsi caractérisée par un ou plusieurs plans parallèles au chargement et par le fendage des granulats. Les principaux facteurs ayant une influence sur la résistance en compression des bétons de granulats légers sont des caractéristiques des granulats et la composition du béton [54].

### II.2.6 Propriétés élastiques des bétons légers

Le module d'Young d'un béton léger est évidemment inférieur à celui du béton traditionnel en raison de sa faible masse volumique. Généralement Le module d'Young d'un béton léger est

considère comme valant 0.5 à 0.75 de celui d'un béton traditionnel de même résistance. Une plus faible ou rigidité peut être parfois souhaitable pour les structures soumises à une sollicitation dynamique ou Pour des structures en coques. Un faible module d'Young peut être à l'origine de désordre dans les Structures en béton précontraint suite à une relaxation des câbles de précontrainte et à la chute de Tension qui en découle [54].

### **II.2.7 La masse volumique**

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans Cadre de la présente recherche. La réduction de la masse volumique est rendue possible en Changeant le type de granulat et en faisant varier les proportions des différents constituants [54].

### **II.2.8 La durabilité**

Les conditions d'exposition conditionnent souvent la conception du béton. En effet, les cycles de Gel-dégel en présence ou non des sels fondants représentent un aspect critique de la durabilité des Bétons légers exposés aux intempéries. Il est important de faire la distinction entre les deux types D'attaque par le gel, avec ou sans sels fondants, puisque les mécanismes de détériorations sont Différents [55].

### **II.2.9 La rhéologie a l'état frais**

La rhéologie du béton à l'état Frais définit la relation contrainte déformation du matériau en référence à ses propriétés d'élasticité, de plasticité et de viscosité.

On qualifie la rhéologie du béton à l'état frais en fonction de l'énergie nécessaire à la mise en place par rapport à la qualité recherchée du fini. En conséquence, les paramètres dont on doit tenir compte lors du dosage relativement a la rhéologie du béton léger à l'état frais sont : les Méthodes de moulage et de mise en place, la qualité de la finition et la dimension des granulats et Des coffrages [55].

### **II.3.Conclusion**

Le béton mousse possède plusieurs avantages dont la facilité de mise en œuvre ainsi l'isolation thermique. Le processus de fabrication doit être bien étudié et contrôlé afin d'obtenir un matériau performant.

*Partie*

*Expérimentale*

*Chapitre III :*  
*Caractérisation*  
*Des Matières*  
*Premières*

### III.1.Objectif du travail

Les bétons cellulaire ou bien les mortiers cellulaire ont fait leur apparition au siècle dernier et ils se développent jour après jour car ils se trouvent dans différents domaines.

Ce type de matériaux possède des caractéristiques bien précises telles que la légèreté, la porosité .... Etc. Le but de ce travail est d'élaborer un mortier cellulaire ou de développer une technique qui nous permet de maîtriser la distribution et la taille des pores dans laquelle ce mortier possède une résistance mécanique acceptable.

### III.2.Méthodologie pratique

Dans cette partie, nous avons étudié les caractéristiques du béton cellulaire (BC) en utilisant un agent moussant (MEDA-AIR) faisant varier la vitesse de malaxage. Les BC sont confectionnées avec des matériaux locaux : ciment CEM II 32.5R, sable normale et d'adjuvant .

Après formulation, les bétons élaborés sont caractérisés par des essais recommandés par la normalisation en vigueur ;

- ✓ masse volumique apparente absolue, équivalent de sable, module de finesse, friabilité,
- ✓ résistances mécaniques à la compression, traction par flexion, masse volumique, essais thermiques, essais chimiques

Pour réaliser notre objectif, nous avons passé par les étapes suivantes :

#### III.2.1.Etape 1

Analyses physico-chimiques et mécaniques des différents constituants.

Nous avons procédé à la caractérisation de toutes les matières utilisées à savoir :

- ✓ Le sable (OUED SOUF) ;
- ✓ Le ciment (LAFRAGE) ;
- ✓ L'agent moussant (MEDA-AIR) ;
- ✓ Eau de gâchage;

#### III.2.2.Etape 2

Formulation des différents bétons.

Consacrée à la formulation de cinq (5) compositions en utilisant la méthode: malaxage.

- ✓ Béton cellulaire de référence .

- ✓ Un BC avec vitesse de 1000 tr/min.
- ✓ Un BC avec vitesse de 1200 tr/min.
- ✓ Un BC avec vitesse de 1400 tr/min.
- ✓ Un BC avec vitesse de 1600 tr/min.

### **III.2.3.Etape 3**

Préparation des gâchages.

### **III.2.4.Etape 4**

Interprétation des résultats et conclusion.

## **III.3.Première partie**

### **III.3.1. Caractérisation des matériaux**

Dans ce chapitre, nous exposons les différentes caractéristiques des constituants ainsi que les étapes que nous avons suivies pour la détermination de la composition d'un BC. Les matières premières utilisées sont d'origine locale.

#### **III.3.1.1. Caractéristiques des constituants**

La connaissance des caractéristiques des différents constituants entrant dans la composition du béton est impérative à toute recherche ou étude d'investigation, puisque chacune pourrait influencer considérablement sur les résultats d'étude. C'est pour cette raison qu'on procède à la caractérisation de chaque constituant de béton.

#### **❖ Le sable**

##### **1. Analyses sur le sable**

- ✓ Analyse granulométrique,
- ✓ Equivalent de sable (ESP),
- ✓ Masse volumique absolue,
- ✓ Module de finesse.
- ✓ Friabilité de sable

Dans notre travaille, on a utilisé le sable **d'Oued Souf** :

- **Caractéristiques Granulométrique**

D'après l'analyse faite au laboratoire central de l'ENGOA, on a obtenu les résultats des passants cumulés sable d'Oued-Souf, représentés dans le tableau (III.1).

**Tableau III.1 : Résultat de l'analyse granulométrique de sable Oued-Souf.**

| Tamis (mm) | Sable d'Oued-Souf |           |             | Module de finesse |
|------------|-------------------|-----------|-------------|-------------------|
|            | Poids Refus (g)   | Refus (%) | Passant (%) |                   |
| 5          | 0                 | 0         | 100         | 2.24              |
| 4          | 78.5              | 3.92      | 96.08       |                   |
| 2.5        | 124.5             | 6.22      | 93.78       |                   |
| 1.25       | 272.5             | 13.62     | 86.38       |                   |
| 0.63       | 641.5             | 32.07     | 67.93       |                   |
| 0.315      | 1469.5            | 73.47     | 26.53       |                   |
| 0.16       | 1893.5            | 94.67     | 5.33        |                   |
| 0.063      | 1984              | 99.2      | 0.8         |                   |
| F.T        | 1984              | 99.2      | -           |                   |

- **Caractéristiques physiques**

Les différents résultats obtenus lors des essais de principales caractéristiques physiques de sable Oued-Souf, sont présentées dans le tableau (III.2).

**Tableau III.2 : résultats des principales caractéristiques physiques de sable Oued-Souf.**

| Caractéristiques physiques | Equivalent de sable (%) | Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> ) | Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------|-------------------------|--|--|
| Sable d'Oued-Souf          | 80.34                   | 1.69   | 2.66   |

Les résultats obtenus sur le tableau (III.2) montrent que :

Les essais nous ont donné, un équivalent de sable de 80.34 %. Le sable d'Oued-Souf est un sable très propre, l'absence presque totale de fines argileuses. Qui répond aux exigences de la norme française [XP P 18-598].



Figure III.1 : Essais d'équivalente sable et masse volumique.

- **Module de finesse MF :**

Les sables doivent présentés une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis de modules 23, 26, 29, 32, 35, 38. Ce paramètre est en particulier utilisé pour caractériser la finesse des sables à bétons.

$$\sum \frac{\text{refus cumulés}(0.16+0.315+0.63+1.25+2.5+4)}{100}$$

Tableau III.3 : Valeur de module de finesse.

| Classe          | Module de Finesse | Valeur spécifiée |
|-----------------|-------------------|------------------|
| Granulaire      | MF                |                  |
| SABLE OUED SOUF | 2.24              | 2.2 < MF < 2.8   |

$$MF = (94.67+73.47+32.07+13.62+6.22+3.92)/100 = 2,24 \text{ (Sable normal)}$$

Selon la norme précédente le module de finesse est indiqué comme de suit :

Sable Grossier(C) :  $2.8 < MF < 3.2$

Sable préférentiel (A) :  $2.2 < MF < 2.8$

Sable fin (B):  $1.8 < MF < 2.2$

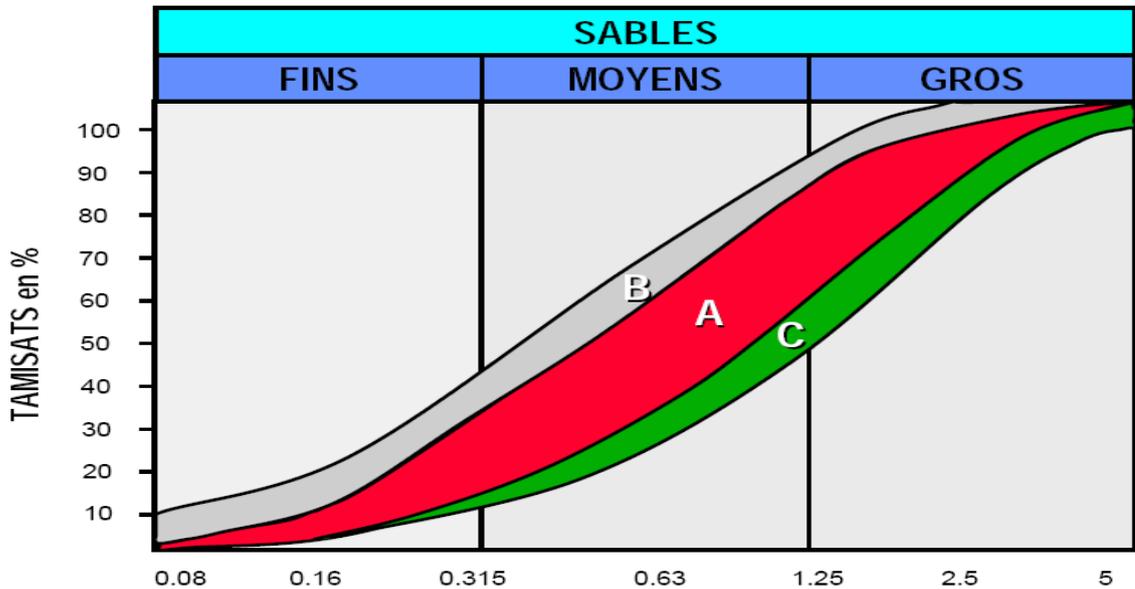


Figure III.2 : Fuseaux granulaire des différents types de sable.

- **Résistance à la fragmentation de sable (Friabilité) (P 18-576)**

L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai. Si M est la masse de matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai le coefficient de friabilité du sable est :

$$Fs = 100 \frac{m}{M}$$

Tableau III.4 : Valeurs de Friabilité.

| Classe Granulaire | FS    | VSS                  | Catégorie       |
|-------------------|-------|----------------------|-----------------|
| Sable D'OUED SOUF | 46.44 | <60<br>(Catégorie B) | FS <sub>B</sub> |

$$F_s = 100 \frac{232.2}{500} = 46.44$$



Figure III.3 : Mesure du coefficient de friabilité de sable.

❖ **Le ciment**

Le ciment utilise dans notre étude est un ciment portland composé, dont les caractéristiques physico mécaniques et chimiques satisfont aux exigences des ciments CPJ CEM II/A-L 32.5 R selon la norme français [NF P 15-301].

• **Caractéristiques chimique du ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R**

L’analyse chimique des ciments déterminés selon la norme français [EN 196-2].  
Le tableau (III.5), résumées Les compositions chimiques du ciment utilisé.

Tableau III.5: Composition chimique du ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R

| Composition Chimique           | Teneur % R |
|--------------------------------|------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 17,33      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,27       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,52       |
| CaO                            | 62,54      |
| MgO                            | 1,47       |

|                   |       |
|-------------------|-------|
| K <sub>2</sub> O  | 0,43  |
| Na <sub>2</sub> O | 0,08  |
| SO <sub>3</sub>   | 1,44  |
| CaO libre         | 1,246 |
| Cl-               | 0,011 |
| Ins.              | 0,45  |
| P.F               | 9,570 |

L'analyse chimique de ciment montre que la prédominance d'oxyde de calcium 62.54% présence de la silice de l'ordre 17,33 %, et d'autres constituants à faible pourcentage peut être classée avec les impuretés, comme des oxydes (d'aluminium, fer, magnésium, potassium).

Donc la perte au feu est faible.

- **Caractéristiques minéralogique du ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R**

Les caractéristiques minéralogiques du ciment utilisé sont résumées dans le tableau (III.6).

**Tableau III.6 : Composition minéralogique de ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R.**

| Phase               | Constituants minéraux du Clinker | Teneur rapporté au Clinker (%) |
|---------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Clinker             | C <sub>3</sub> S                 | 55                             |
|                     | C <sub>2</sub> S                 | 21                             |
|                     | C <sub>3</sub> A                 | 04                             |
|                     | C <sub>4</sub> AF                | 14                             |
|                     | CaO <sub>1</sub>                 | <02                            |
| Régulateur de prise | Gypse                            | 05                             |
| Ajout               | Calcaire                         | 18                             |

- **Caractéristiques physiques du ciment CPJ CEM II/A-L 32.5**

L'analyse physique des ciments déterminés selon la norme [EN 196-3].

Le tableau (III.7), résumées les caractéristiques physiques du ciment utilisé.

**Tableau III.7: Caractéristiques physiques de ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R.**

|  |                  | Résultats |
|--|------------------|-----------|
| Consistance normalisé (%)                              | H <sub>2</sub> O | 26.9      |
| Temps de prise (mn)                                    | Début            | 155       |
|  | Fine             | 260       |
| Stabilité (mm)   | Froid            | -         |
|  | Chaud            | 0.0       |
| Essai de gonflement (µm/m)                             | 03jours          | 0         |
|  | 07 jours         | 0         |
|  | 28jours          | 0         |
| Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )           |                  | 3.06      |
| Finesse suivant la méthode Blaine (cm <sup>2</sup> /g) |                  | 4126      |

La consistance obtenue est conforme à la norme [EN 196-3] où les valeurs sont généralement comprises entre 26 et 33%. De même, un temps de prise est stabilisé sur ciment son réalisées la norme [EN 196-3] pour les ciments de classe 32,5.

Les masses volumiques absolue du ciment utilisé, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme Algérienne [NA 231], compris entre 2900 – 3150 kg/m<sup>3</sup>.



**Figure III.4.essais de mesure consistance normal et temps de prise.**

- **Caractéristiques mécanique du ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R**

La Détermination des résistances mécaniques des ciments selon la norme [EN 196-1].

Les caractéristiques mécaniques du ciment utilisé sont résumées dans le tableau III.8.

**Tableau III.8: Caractéristiques mécaniques de ciment CPJ CEM II/A-L 32.5 R.**

| Masse totale au démoulage des 06 Eprouvettes (g) |                              | 3495.2                           |
|--|------------------------------|----------------------------------|
| Echéances en jours                               | Flexion (N/mm <sup>2</sup> ) | Compression (N/mm <sup>2</sup> ) |
| 02   | 4.0                          | 20.9                             |
| 28   | 7.0                          | 47.8                             |

- **Perméabilité (SSB)**

- ❖ **Définition**

Aire massique (ou surface spécifique) : total des aires de tous les grains par unité de masse.

- Plus les grains sont fins. plus air massique est grand.

- ❖ **Détermination du volume de ciment et de la masse volumique absolue du ciment**

- ✓ Détermination de la masse volumique absolue du ciment :

$\rho_{abs-ciment}$  Doit être déterminée à l'aide d'un pycnomètre avec un liquide non réactif, la mesure doit avoir une précision de  $0.01g/cm^3$ .

- ✓ Détermination du volume de ciment :

La norme NF EN 196-6 donne dimensions intérieur d la cellule (ainsi que celles de tous les autres constituants de l'appareil de Blaine). Le volume de ciment est donc facilement calculable :

$$m = (1-n) \times \rho \times V$$

$$V = \pi \times \frac{G^2}{4} \times H$$

Avec :

$$G = 12.7^{\pm}mm$$

$$H = 15^{\pm}mm$$

$$\text{Prise d'essais} = \rho \times 0.5 \times V$$

La surface massique est donnée par la formule suivante :

$$S = \frac{K \times \sqrt{n^3} \times \sqrt{t}}{\rho \times (1-n) \times \sqrt{0.1\eta}}$$

$$K = S_0 \times \rho_0 \times \frac{(1-e)\sqrt{0.1 \times \eta_0}}{\sqrt{e^3} \times \sqrt{t_0}}$$

Avec :

$\eta$ : viscosité de l'air a la température de l'essai en pascals  $\times$  secondes (Pa. s).

t: temps de passage de l'air au travers de la couche de ciment en secondes.

$\rho$ : Masse volumique absolue du ciment en  $g/cm^3$ .

n : porosité du ciment tasse dans la cellule, cette valeur étant constante et considérée comme égale à 0.5, l'expression  $\frac{\sqrt{n^3}}{1-n}$  est égale dans ce cas a 0.708.

K : constante de l'appareil à déterminer à partir d'un échantillon de ciment étalon (masse volumique absolue et surface spécifique connues).

En prend :

$$\rho = 3.1 \text{ g/cm}^3$$

$$V = 1.8595 \text{ cm}^3$$

$$n = 0.5$$

$$m = 3.1 \times 0.5 \times 1.8595 = 2.78 \text{ g}$$

$$t = 94\text{s}$$

$$\text{avec température de } 24 \text{ }^\circ\text{C} \leftrightarrow \sqrt{0.1\eta} = 0.001356$$

$$K = 2.431$$

$$S = \frac{2.431 \times 0.708 \times \sqrt{94}}{3.1 \times 0.001356}$$

$$S = 3969.72 \text{ g/cm}^2$$

$$2500 < 3969.72 < 4500$$

La surface massique est comprise entre 2500 et 4500  $g/cm^2$  selon la nature des ciments

### ❖ Entraineur d'air (MEDA-AIR BL)

Conforme à la norme EN 934-2 et tab I et 5 et NA 17052-2

- Description

Le MEDA-AIR BL est un adjuvant synthétique destiné à la confection de béton ou mortier léger.

Il permet d'obtenir des bétons de densités variables.



Figure III.5 : MEDA-AIR

- **Domaines d'application**

1- densité élevée (800 al 800 KG/m3)

-Eléments de construction préfabriqués.

-Béton manufacturé.

-Béton non arme.

2- densité faible (200a 800 KG/m) :

-Forme de pente.

-Isolation thermique.

-Isolation de toiture.

-Béton de remplissage.

-Eléments de construction.

Figure I-2 Le MEDA-AIR BL

- **Propriétés et effets**

#### **Sur béton frais**

Les bulles d'air formées à l'intérieur de la masse du béton le rendent léger et très maniable. Sa mise en place est facile grâce à sa maniabilité.

#### **Sur le béton durci**

-Isolation thermique et phonique parfaite

-Régulateur hygrométrique

#### **Caractéristiques**

**Tableau III.9 : Caractéristiques de l'entraineur d'air**

|         |                      |
|---------|----------------------|
| Couleur | Jaunâtre             |
| Densité | 1,04 ( $\pm 0; 02$ ) |
| PH      | 7- 8                 |

### III.4. Interprétations des résultats

En règle générale les caractéristiques des granulats utilisée pour la fabrication des produits en béton doivent répondre aux spécifications des normes NFP 18-560EN 933-1 et 2 complétée par NF P18-597.

Un granulat est désigné par le code A, B, C et D lorsque toutes ses caractéristiques sont de Code indicé A, B, C et D. La catégorie A correspond à des spécifications plus serrées sur Certaines caractéristiques.

A la lumière des résultats des essais réalisés sur les fractions des agrégats de provenances D'OUED SOUF il ressort que :

- ✓ Le sable de provenance D'OUED SOUF est un granulat (densité de  $2.66 \text{ g/dm}^3$ ) de granularité, un module de finesse ( $MF = 2.24$ ) ce qui correspond à un sable normal.

D'après la figure N° fig.III.3 de l'analyse granulométrique se montre une bonne continuité de tous les types des granulats utilisés pour notre étude.

### III.5. Deuxième partie

#### III.5.1. Formulation des bétons cellulaires

La deuxième partie de notre travail est consacré la formulation de béton cellulaire par la variation de la vitesse (1000, 1200, 1400, 1600) tr/min ainsi sa caractérisation masse volumique et la résistance à la compression, à la flexion, en fin les essais thermiques.

Pour réaliser tout ça nous avons résumé, l'application du malaxeur aux différentes vitesses indiquées dans les tableaux suivant qui représente la composition pour  $64 \text{ cm}^3$  et  $40 \text{ cm}^3$  de béton.

**Tableau III.10 : Composition du mélange.**

| CONSTITUANT  | PROVENANCE        | QUANTITE EN G/CM <sup>3</sup> |
|--------------|-------------------|-------------------------------|
| SABLE        | OUED SOUF         | 250                           |
| CIMENT: 32.5 | LAFRAGE           | 125                           |
| Eau          | Potable BOUMERDES | 50 EC (0.4)                   |
| Adjuvant     | MEDA-AIR BL       | 5(%) (2.5g)                   |



**Figure III.6 : Malaxeur de béton utilisé.**

*Chapitre IV:*

*Caractérisation  
des  
échantillons*

**IV.1. Caractérisation physico-mécanique des échantillons**

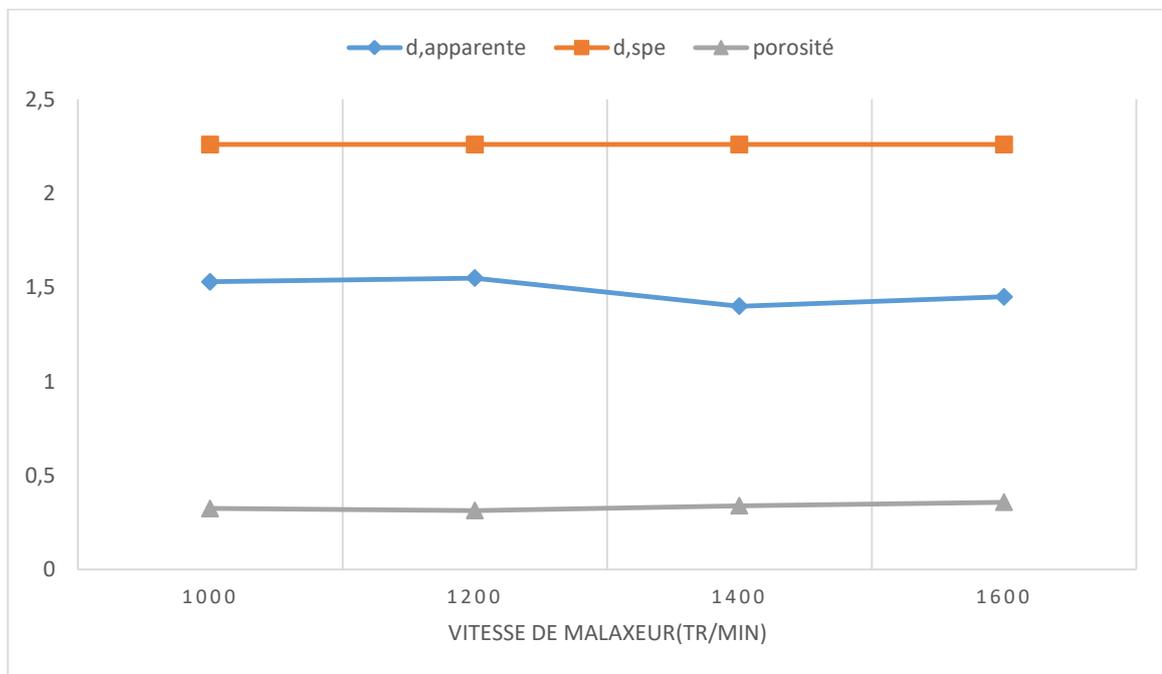
**IV.1.1. Résultat des densités et porosités en fonction de la vitesse de malaxage**

$$\%P = \left(1 - \frac{d_{ap}}{d_{sp}}\right) \times 100$$

- Pour éprouvette de (64cm<sup>3</sup>)

**Tableau IV.1. Résultat des densités et porosités(64cm<sup>3</sup>)**

| Eprouvette | Ms    | Mh     | Meau  | Densité apparante | Densité spésiphique | Porosité (%) | Abs (%) | Taille des cellule (µm) |
|------------|-------|--------|-------|-------------------|---------------------|--------------|---------|-------------------------|
| 1000       | 98.41 | 117.46 | 54.21 | 1.53              | 2.26                | 32.5         | 19.35   | 486.5                   |
| 1200       | 99.49 | 121.4  | 57.4  | 1.55              | 2.26                | 31.4         | 22      | 75.57                   |
| 1400       | 117.4 | 53.7   | 63.7  | 1.4               | 2.26                | 34           | 22.34   | 154.7                   |
| 1600       | 113.5 | 50.73  | 62.77 | 1.45              | 2.26                | 35.8         | 21.8    | 349.9                   |



**Figure IV.1. Influence de densité et porosité par rapport la vitesse de malaxage (ep 64cm<sup>3</sup>)**

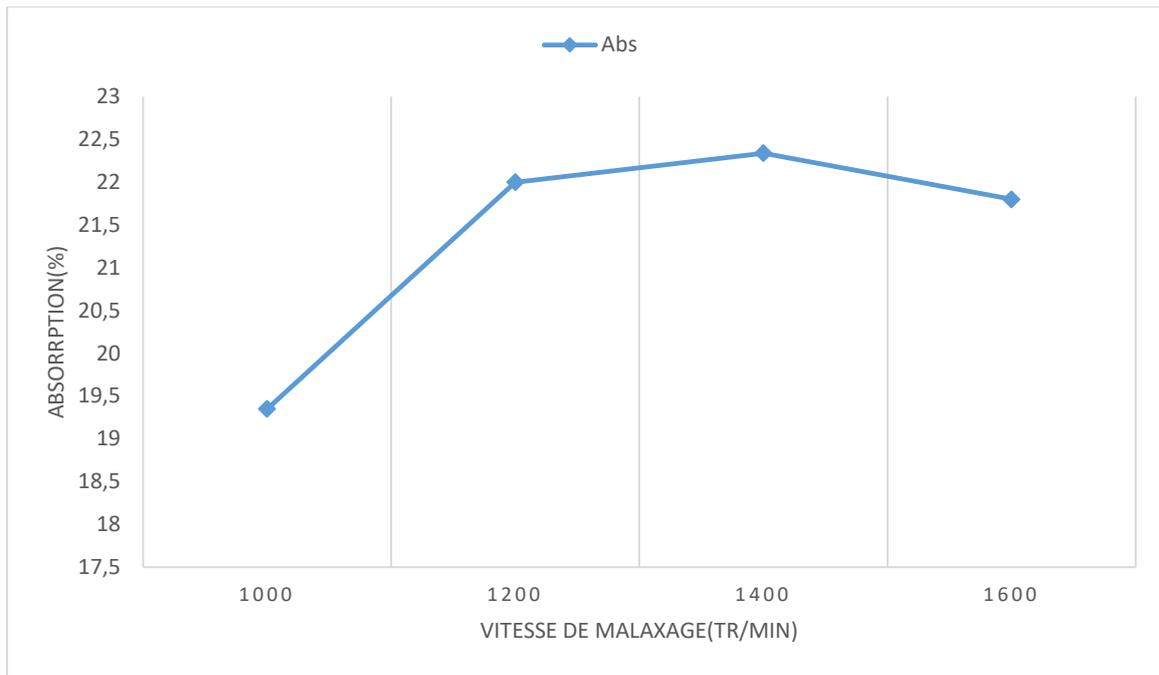
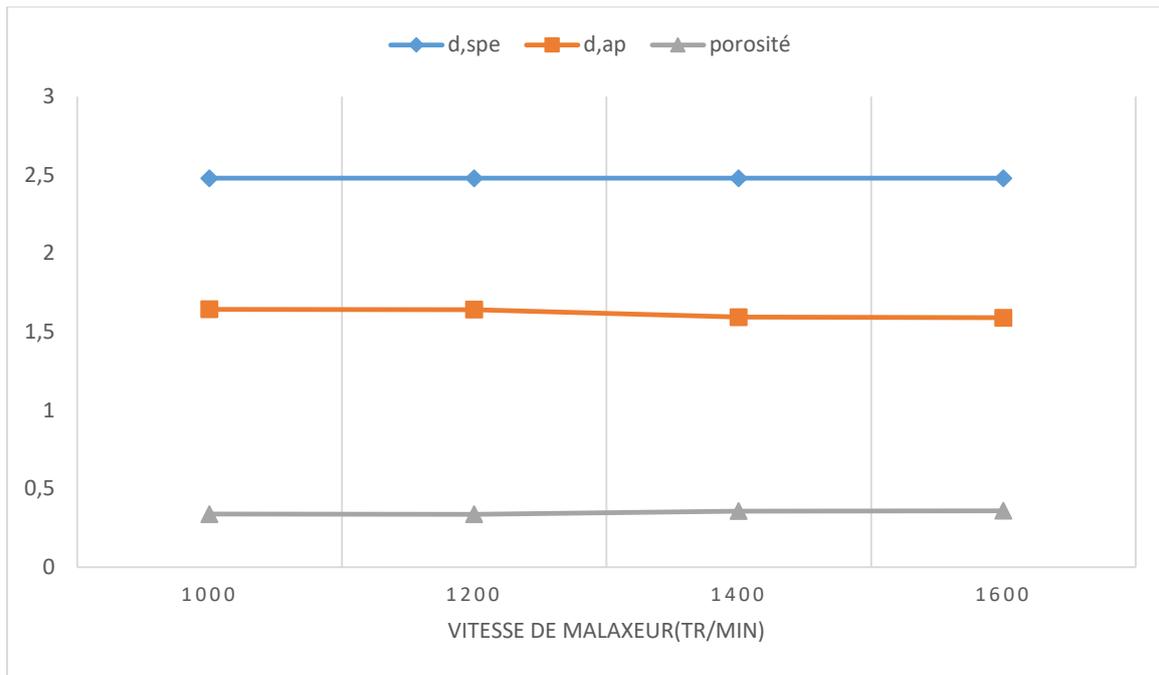


Figure IV.2. Influence de l'absorption par rapport la vitesse de malaxage

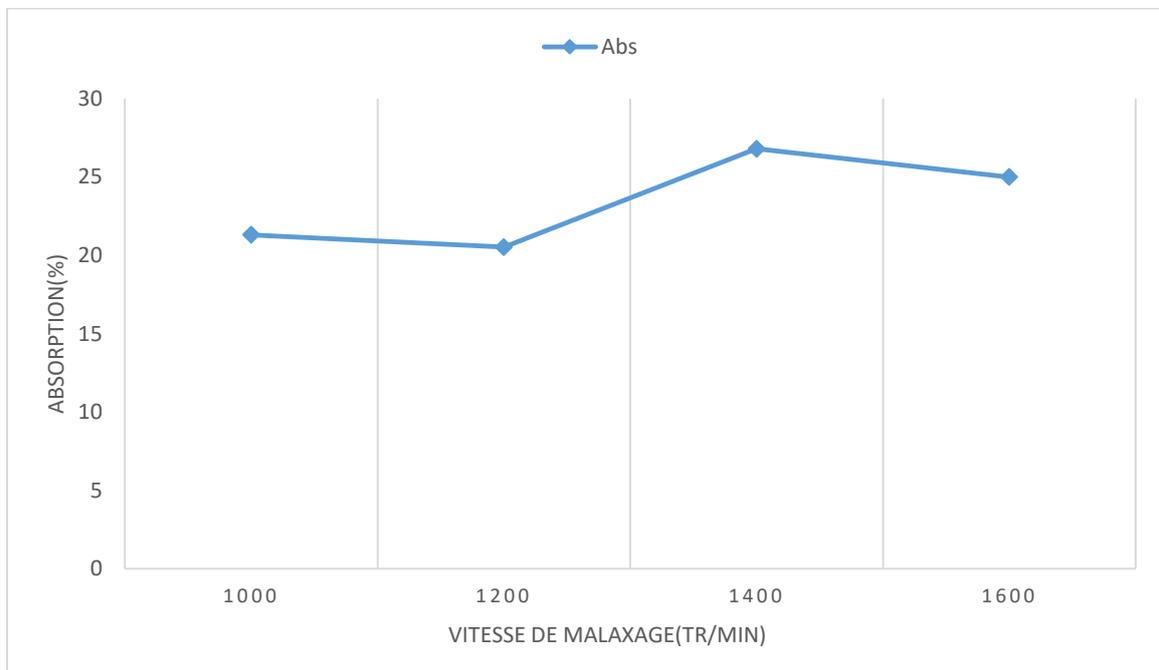
- Pour éprouvette de (200cm<sup>3</sup>)

Tableau IV.2. Résultat des densités et porosités(200cm<sup>3</sup>)

| Eprouvette | Ms     | Mh    | Meau   | Densité apparante | Densité spésiphique | Porosité (%) | Abs   |
|------------|--------|-------|--------|-------------------|---------------------|--------------|-------|
| 1000       | 328.75 | 398.8 | 194    | 1.644             | 2.48                | 33.8         | 21.3  |
| 1200       | 328.48 | 395.9 | 186.5  | 1.642             | 2.48                | 33.7         | 20.52 |
| 1400       | 318.96 | 405   | 200    | 1.594             | 2.48                | 35.7         | 26.79 |
| 1600       | 318.09 | 397.6 | 191.05 | 1.59              | 2.48                | 35.9         | 24.99 |



**Figure IV.3. Influence de densité et porosité par rapport la vitesse de malaxage (ep 200cm<sup>3</sup>)**



**Figure IV.4. Influence de l'absorption par rapport la vitesse de malaxage**

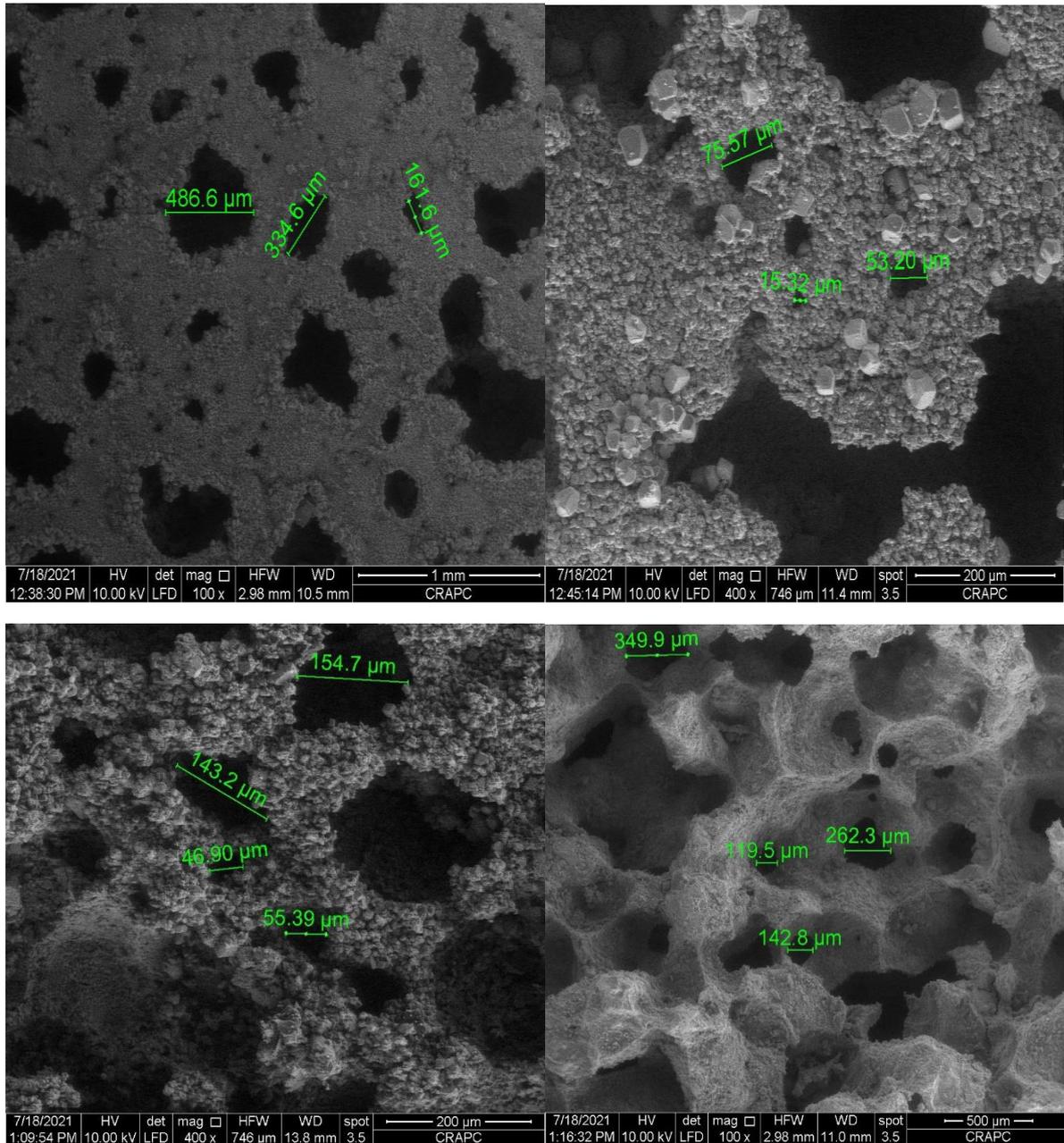


Figure IV.5. Les tailles des cellules des éprouvettes.

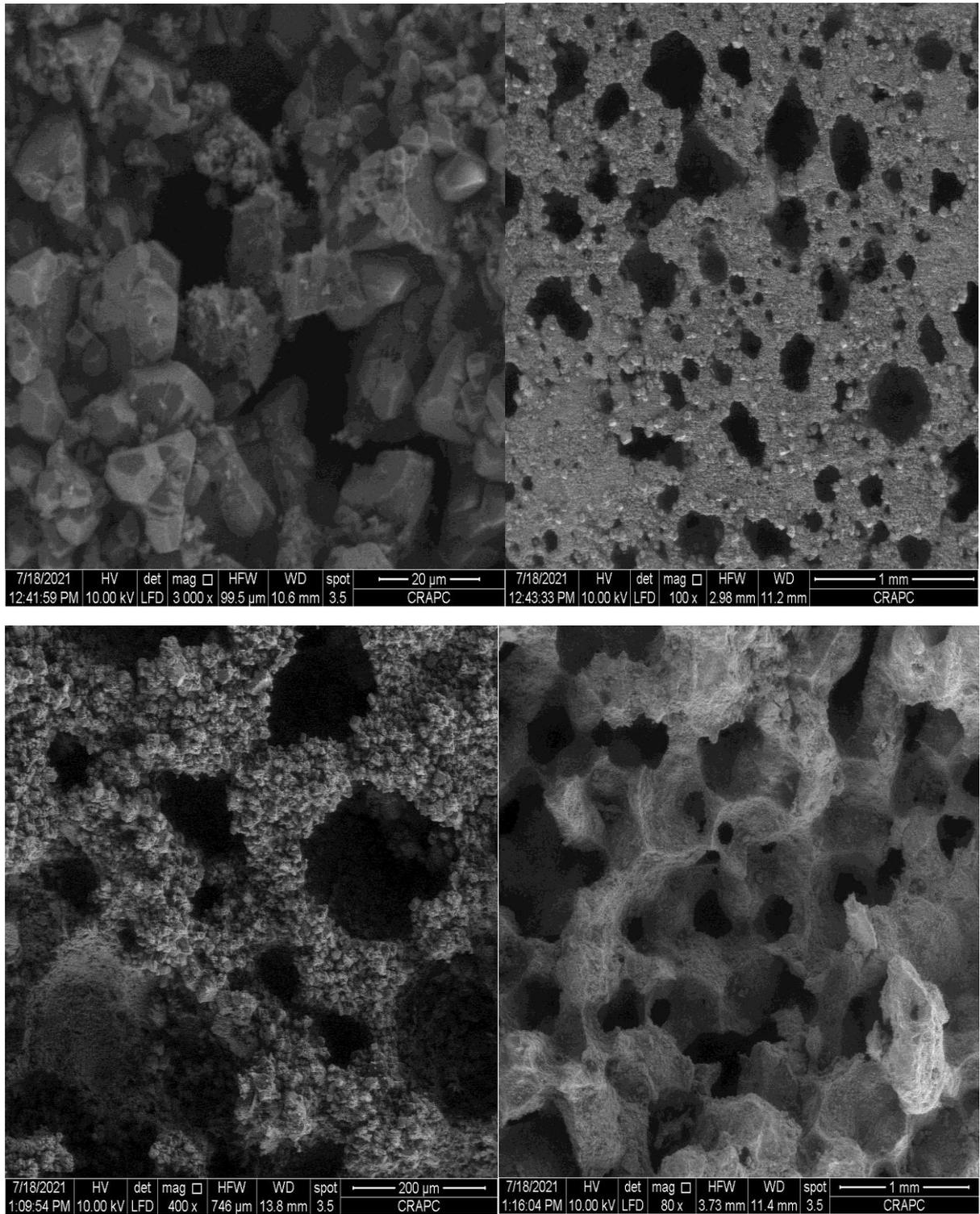


Figure IV.6. Structures des éprouvettes.

### Interprétation

D'après la figure IV.1, IV.2, IV.3, IV.4 on constate :

- on remarque que la porosité augmente avec l'augmentation de la vitesse de malaxage.
- Une relation entre la porosité et la densité (densité apparente).les deux sont inversement proportionnel c'est à dire la porosité augmente avec la diminution de la densité.
- Augmentation de l'absorption de l'eau surtout à la vitesse de malaxage (1400 tr/min) qui se prouve l'augmentation de la porosité qui expliqué par la variation du nombre et dimensions des pores.

D'après la figure IV.5, IV.6 on constate que :

- L'augmentation de la vitesse de malaxage provoque la diminution de la taille des pores. En parallèle l'augmentation de nombre de ces pores.
- C'expliqué l'éclatement des pores grâce la variation de la vitesse.

**IV.1.2. Résistance à la compression**

Le but de l'essai de la résistance à la compression pour connaître la capacité du béton à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par écrasement.



**Figure IV.7. Essais de compression**

**Tableau IV.3. Résistance à la compression.**

| caractéristique             | Vitesse<br>jour | 1000 tr/min |         | 1200 tr/min |         | 1400 tr/min |         | 1600 tr/min |         |
|-----------------------------|-----------------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|                             |                 | Témoïn      | Ep 1000 | Témoïn      | Ep 1200 | Témoïn      | Ep 1400 | Témoïn      | Ep 1600 |
| /                           | /               |             |         |             |         |             |         |             |         |
| Résistance à la Compression | 7               | 42.5        | 7.3     | 40.1        | 6.7     | 36.5        | 5.1     | 32.5        | 4.7     |
| KN                          | 28              | 55.5        | 12      | 53.2        | 10.28   | 49.6        | 7.28    | 46.6        | 6.9     |

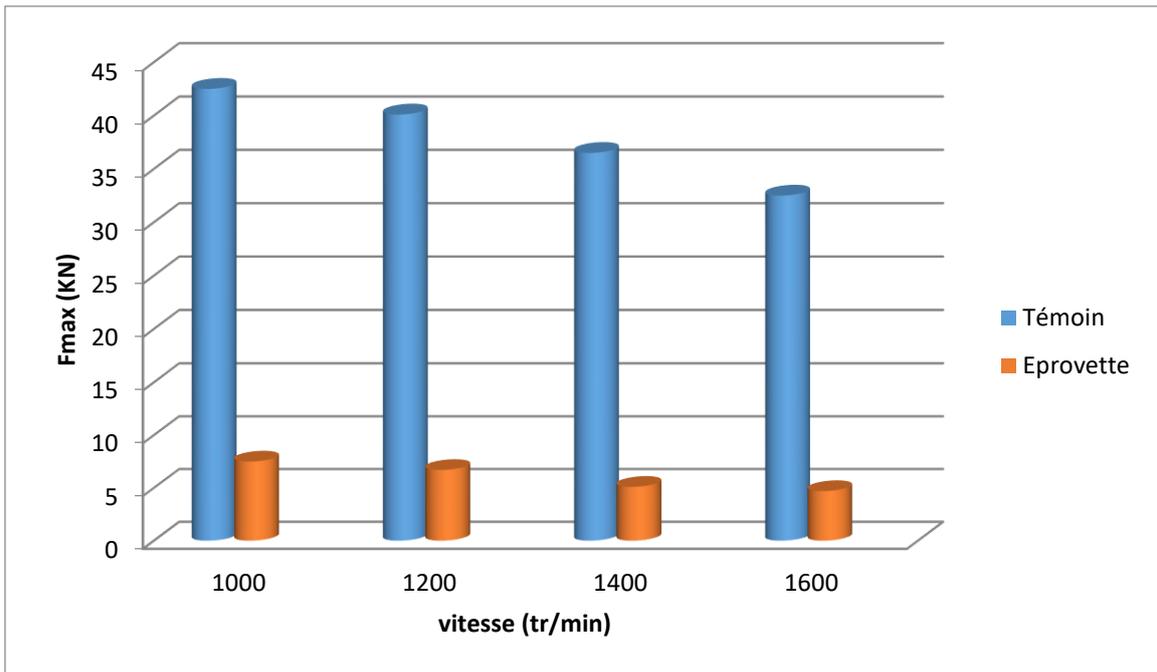


Figure .IV.8.Essais de résistance a la compression a 7j.

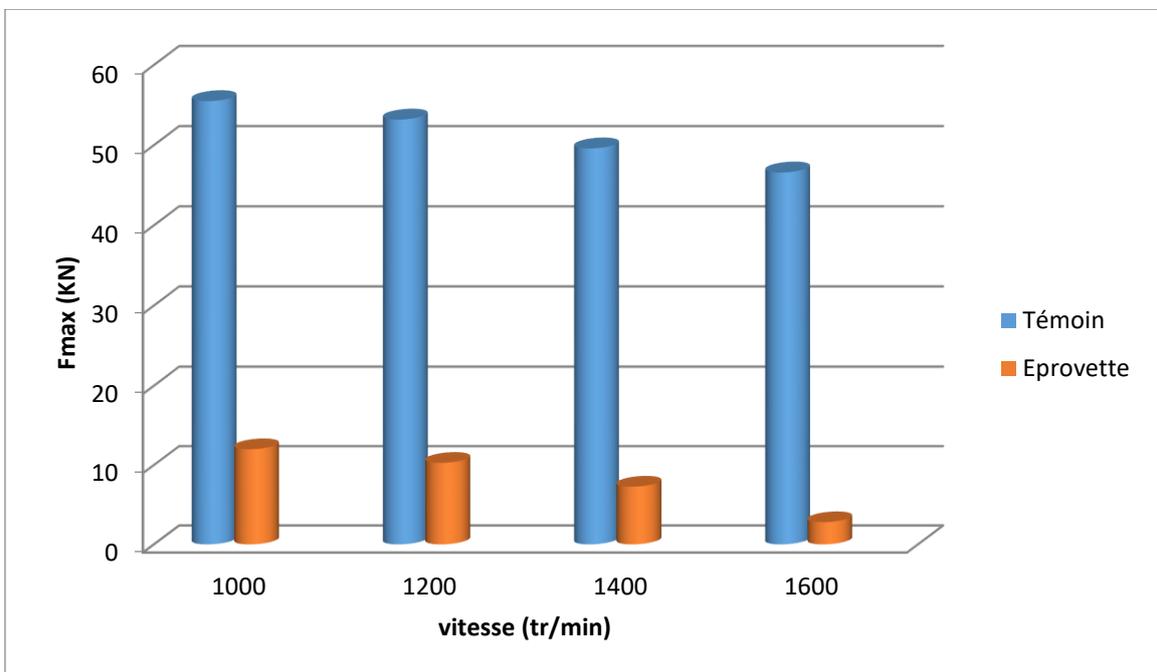


Figure IV.9. Essais de résistance à la compression à 28j.

**Interprétation**

L'augmentation de la vitesse (1000, 1200, 1400 ,1600) par rapport au témoin de 7 jour et 28 jours provoque une diminution a la résistance de compression.

Dans les travaux de plusieurs chercheurs ; tel que Skripkiuna il rapporte une diminution de la résistance a la compression du béton.

L'association canadienne du ciment portland (ACCP) définit le béton léger structural comme un béton ayant une résistance à la compression à 28 jours supérieur à 15MPa.

#### IV.1.3.Résistance à la traction par flexion

Les éprouvettes prismatiques sont soumises jusqu'à la rupture à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. la charge maximale atteinte au cours de l'essai est enregistrée, et la résistance à la flexion est calculée.



Figure IV.10.Essai de la résistance à la traction par flexion.

Tableau IV.4. Résistance à la traction par flexion.

| caractéristique                           | Vitesse | 1000 tr/min |         | 1200 tr/min |         | 1400 tr/min |         | 1600 tr/min |         |
|---|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
|   | jour    | Témoïn      | Ep 1000 | Témoïn      | Ep 1200 | Témoïn      | Ep 1400 | Témoïn      | Ep 1600 |
| /   | /       |             |         |             |         |             |         |             |         |
| Résistance à la traction par flexion<br>N | 7       | 238         | 188     | 214.12      | 164     | 193.82      | 157     | 183         | 147     |
|   | 28      | 273.63      | 201.2   | 259.62      | 193.82  | 224.09      | 161.33  | 211.58      | 116.1   |

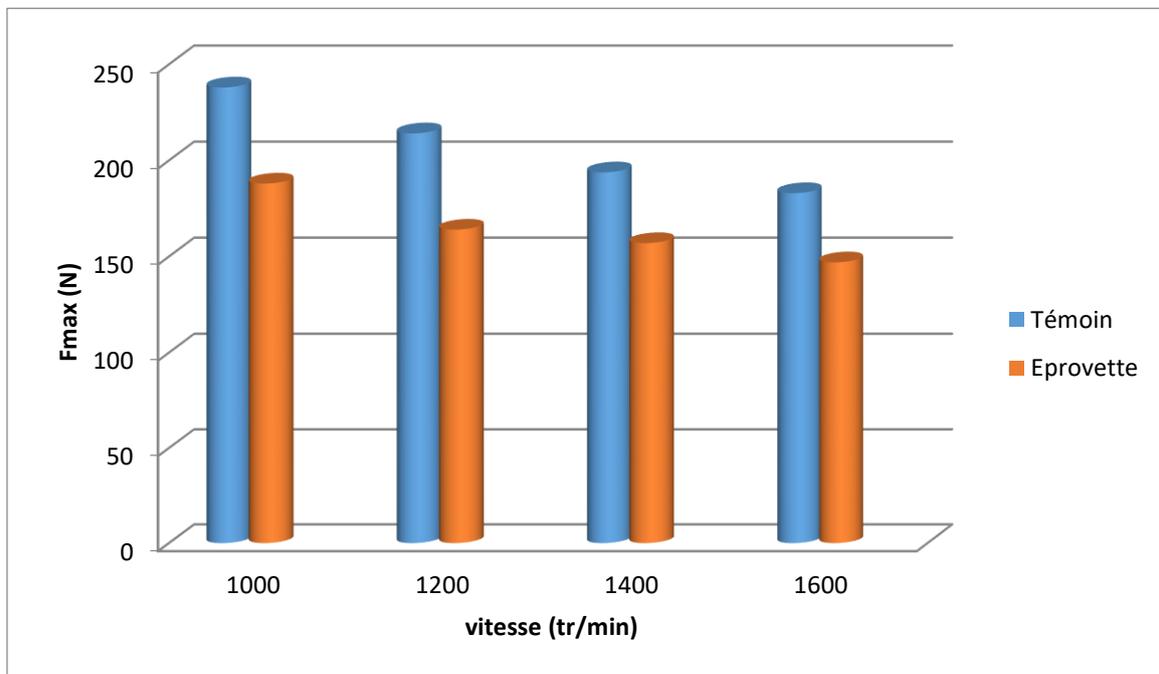
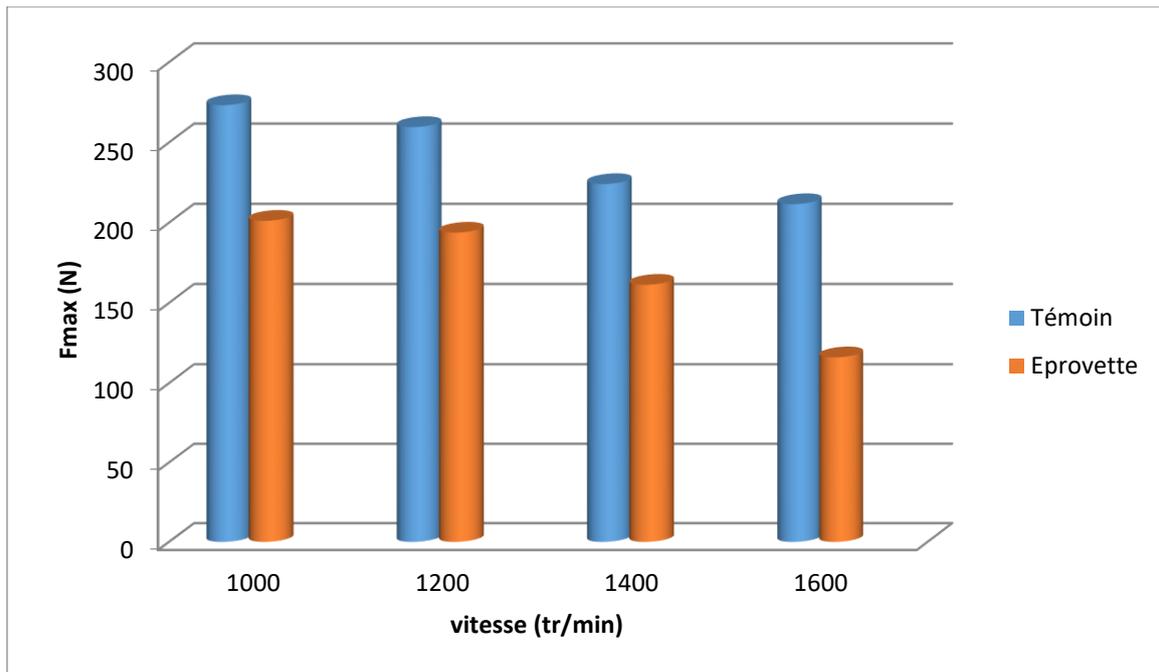


Figure IV.11. Essai de la résistance à la traction par flexion a 7j.



**Figure IV.12. Essai de la résistance à la traction par flexion a 28j.**

### Interprétation

Les essais de traction par flexion, sont utilisés pour considérer la fissuration toute en indiquant la résistance a la traction par flexion ils permettent aussi de contrôler la qualité de béton et de prévoir les déformations avant l'apparition des premiers fissures.

## IV.2. Caractérisation de performance d'isolation des échantillons

### IV.2.1. Caractérisation thermiques des échantillons

Les conductivités thermique ont été réalisés au centre national d'étude et de la recherche intégrées du bâtiment « CNERIB » a l'aide de CT-METRE selon la norme ISO8301.



Figure IV.13. Essai de la conductivité thermique et chaleur spécifique.

Tableau IV.5. la conductivité thermique et chaleur spécifique.

|   | Témoin | 1000<br>tr/min | 1200<br>tr/min | 1400<br>tr/min | 1600<br>tr/min |
|---|--------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Conductivité<br>thermique $\lambda$<br>(W/m.k)  | 1.774  | 0.896          | 0.836          | 0.809          | 0.782          |
| Chaleur<br>spécifique<br>(kJ/m <sup>3</sup> .k) | 2703.7 | 1562.3         | 1490.1         | 1472.9         | 1302.2         |

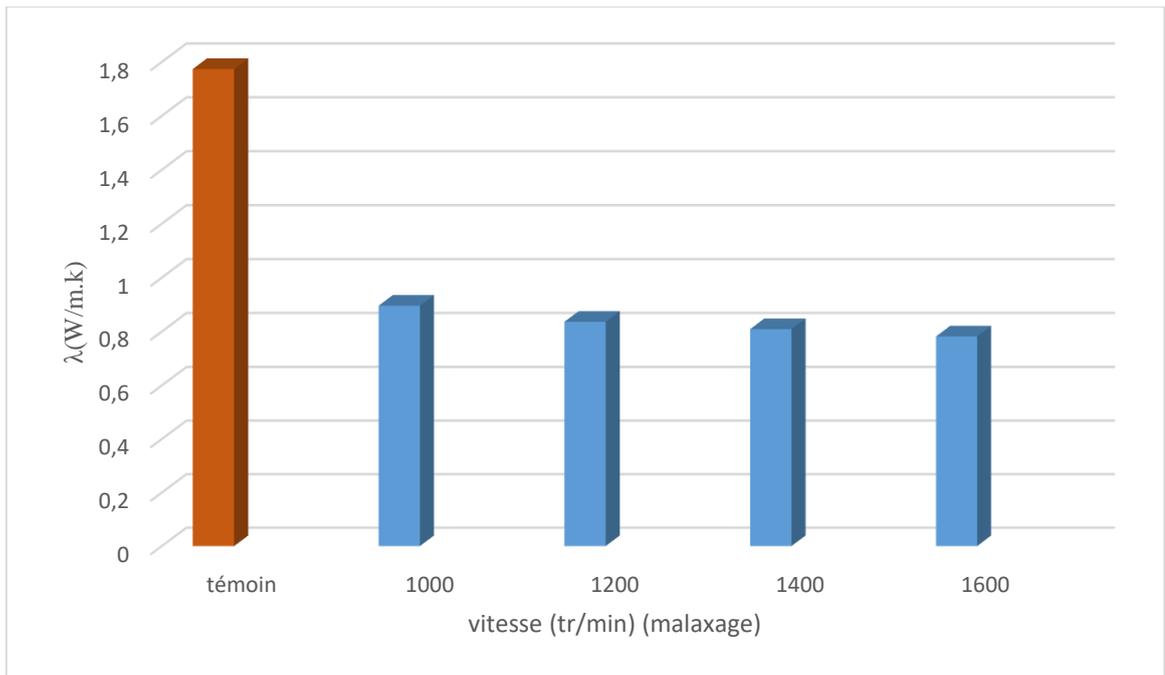


Figure IV.14. Essai de la conductivité thermique.

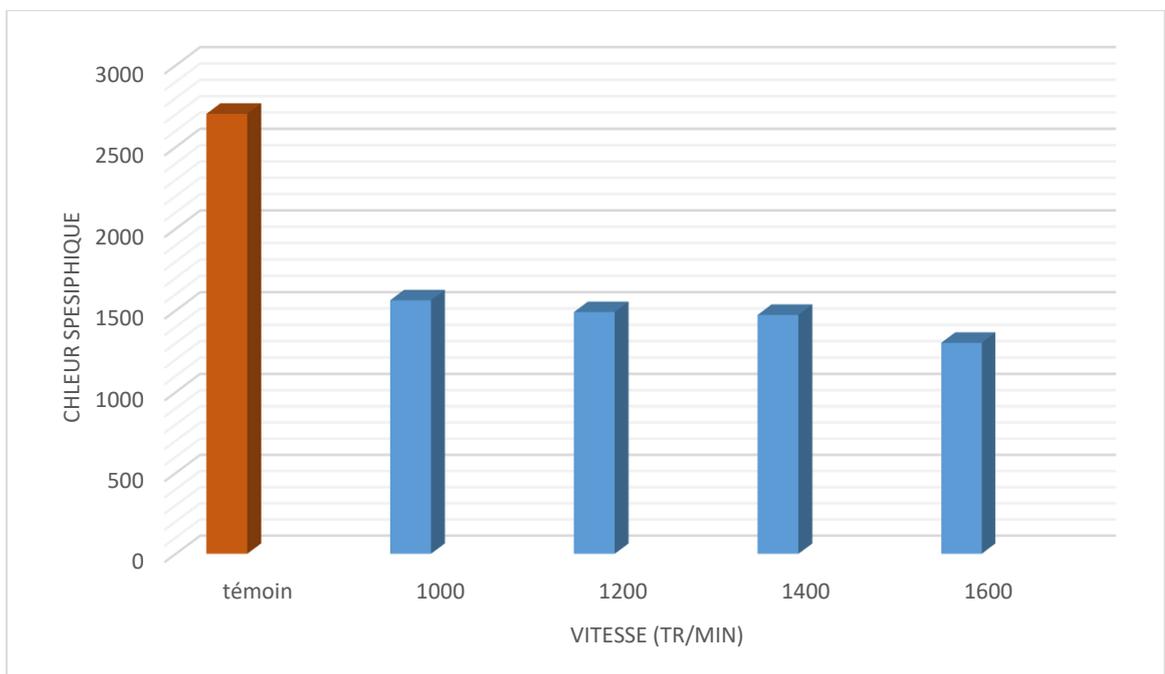


Figure IV.15. Chaleur spécifique.

### Interpolation et discussions

D'après la figure IV.8 ET IV.9 on constate

Une grande diminution de la conductivité thermique des bétons cellulaire par rapport au béton témoin cela est due à la structure poreuse et la grande distribution des vides dans les bétons cellulaire.

On constatera que la conductivité thermique entre les bétons cellulaire diminue à mesure que la masse volumique diminue et que porosité augmente.

### IV.2.2. Caractérisation de la vitesse de propagation des ondes ultrasons

Norme de références NA 5027

L'essai permet de détecter à la fois plusieurs caractérisation du béton cellulaire tels que la compacité, la résistance a la compression, le taux de pores et les effets de temps de durcissement ...ect.

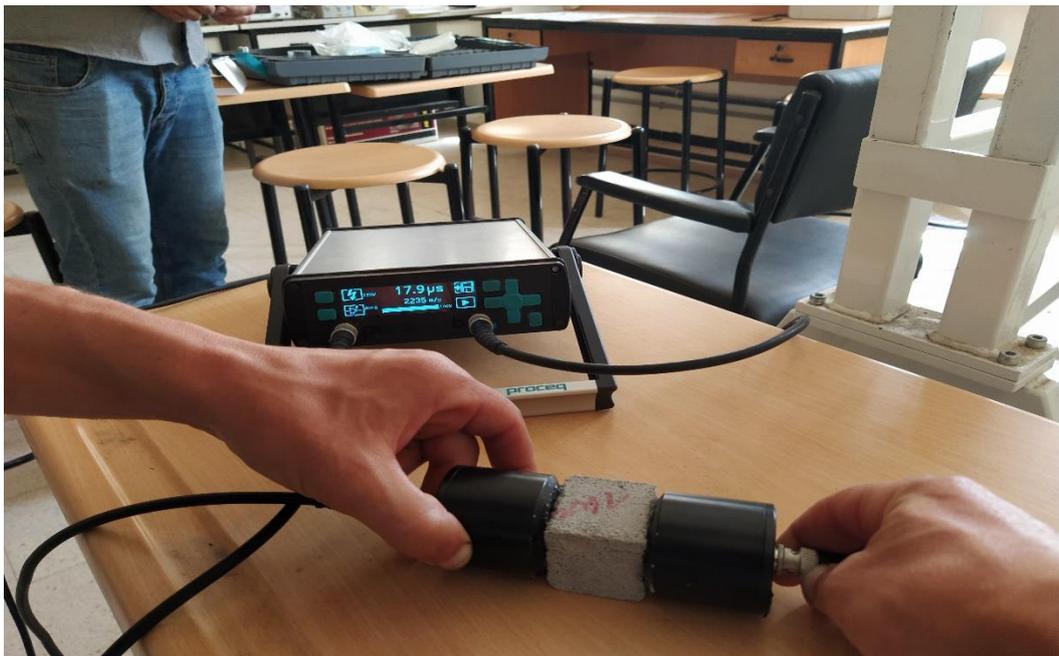
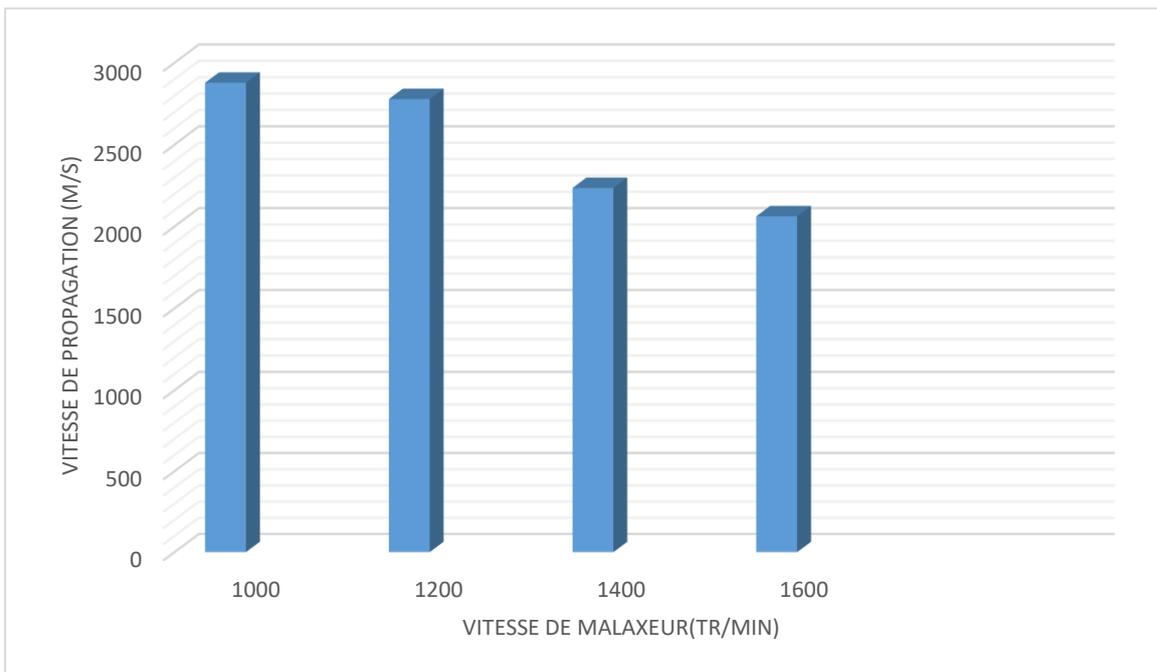


Figure IV.16.application de l'essai d'ultra-son

**Tableau.IV.6. Résultat d’essai ultrasonique.**

|                              | 1000   | 1200   | 1400   | 1600   |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                              | Tr/min | Tr/min | Tr/min | Tr/min |
| Vitesse de propagation (m/s) | 2878   | 2778   | 2235   | 2062   |
| Temps ( $\mu s$ )            | 13.9   | 14.4   | 17.4   | 19.4   |
| Masse volumique ( $g/cm^3$ ) | 1.54   | 1.40   | 1.06   | 1.02   |



**Figure IV.17. Résultats de mesure de la vitesse de propagation du son.**

**Interprétations**

On constate que la vitesse de propagation ultrasonique diminue avec la diminution de la masse volumique.

Ceci s'explique par la relation directe entre la vitesse de malaxage et le taux des vides (bulles d'air) créés dans le béton mousse, on peut dire que plus le béton est allégé plus les bulles qui constituent sa structure cellulaire sont nombreuses ce qui gêne la progression du son et prouve leur bonne isolation phonique.

*Conclusion  
générale*

## **Conclusion générale**

Cette étude est principalement basée sur la variation de la vitesse par son application sur la formulation des bétons cellulaire dans le but d'alléger les structures du béton et caractérisé une bonne isolation quel que soit thermique ou bien phonique.

Dans notre partie pratique, on a confectionné des bétons cellulaires à base d'adjuvant synthétique et malaxeur de différent vitesse.

Les résultats obtenus par les compositions élaborées à base de différent vitesse de malaxage avec même pourcentages de entraîneur d'air, sont satisfaisants et offrent de bonnes performances.

- ❖ Les caractéristiques du béton sont :
  - une masse volumique plus légère
  - augmentation de la masse volumique on se retrouvant avec un béton léger à partir de vitesse 1000 tr/min jusqu'à 1600 tr/min.
  - La résistance à la compression a 28 jours présente de bons résultats allant jusqu'à 54.15 MPA pour une vitesse de 1000tr/min.
  - Le béton présente une faible résistance à la traction par flexion.
  - Le résultat ultrasonique montre qu'on a bon béton surtout à la vitesse 1400 tr/min à cause de l'augmentation des pores.
  - Une bonne résistance thermique.
  - Absorption très élevée à partir de vitesse 1200 tr/min.

Enfin, on peut conclure qu'on peut utiliser des bétons cellulaires dans le domaine de construction, grâce à ces avantages (légèreté, isolant, protection de l'environnement...etc.) sans la nécessité de renforcement des fondations.

# *Annexes*

## Annexes

- **Essai de résistance a la compression des éprouvettes [NF EN 12390-3]**

- ✓ **But de l'essai**

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton durci, qui peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes prismatiques.

- ✓ **Principe de l'essai**

L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section soumise au chargement de l'éprouvette.

- ✓ **Matériel nécessaire**

- Machine d'essai de compression
- Balance
- Pieds à coulisse

- ✓ **Exécution de l'essai**

- L'éprouvette doit conforme aux EN 12350-1, EN 12390-1 ou EN 12390-2 et EN 12504-1.
- Les plateaux de la machine d'essai doivent être nettoyés.
- L'éprouvette est placée sur la machine d'essai avec une erreur de positionnement inférieure à 1% de sa surface
- La charge maximale obtenue doit être enregistrée.
- La résistance en compression  $f_c$  (MPa) est déduite par la formule ci-après

$$f_c = \frac{F}{A}(\text{MPa})$$

F: Charge maximale atteinte (N).

A : surface de l'éprouvette ( $\text{mm}^2$ ).



**Essai de compression**

- **Essais de de résistance a la flexion des éprouvettes NA 428**

- ✓ **Principe de l'essai**

L'éprouvette prismatique est soumise à un moment de flexion par application d'une charge au moyen de rouleaux supérieurs et inférieurs. la charge maximale atteinte est enregistrée à la résistance à la flexion calculée.

- ✓ **Exécution de L'essai**

- La machine d'essai doit être de force appropriée conforme à la norme NF EN 12390-4
    - Les éprouvettes prismatiques (moulées ou sciées) conformes à la norme NF EN 12390-1

- nettoyé les surfaces d'appui du dispositif d'essai ainsi que les plateaux de la machine d'essai

Positionner l'éprouvette en vérifiant que :

- Le centrage est réalisé (positionnement à  $\pm 2\text{mm}$ ).
- son axe longitudinal est orthogonal à l'axe des rouleaux
- la direction de chargement est perpendiculaire au sens de coulage : les rouleaux s'appuient sur les faces moulées de l'éprouvette ( face arasée perpendiculaire au sens de la charge ) .
- commencer le chargement seulement lorsque les rouleaux sont bien en contact avec l'éprouvette

-La vitesse de montée en charge doit être : choisie dans la gamme 0.04 à 0.06 MPa/s (valeur cible) jusqu'à la charge maximale F.

-La charge maximale obtenue doit être enregistrée

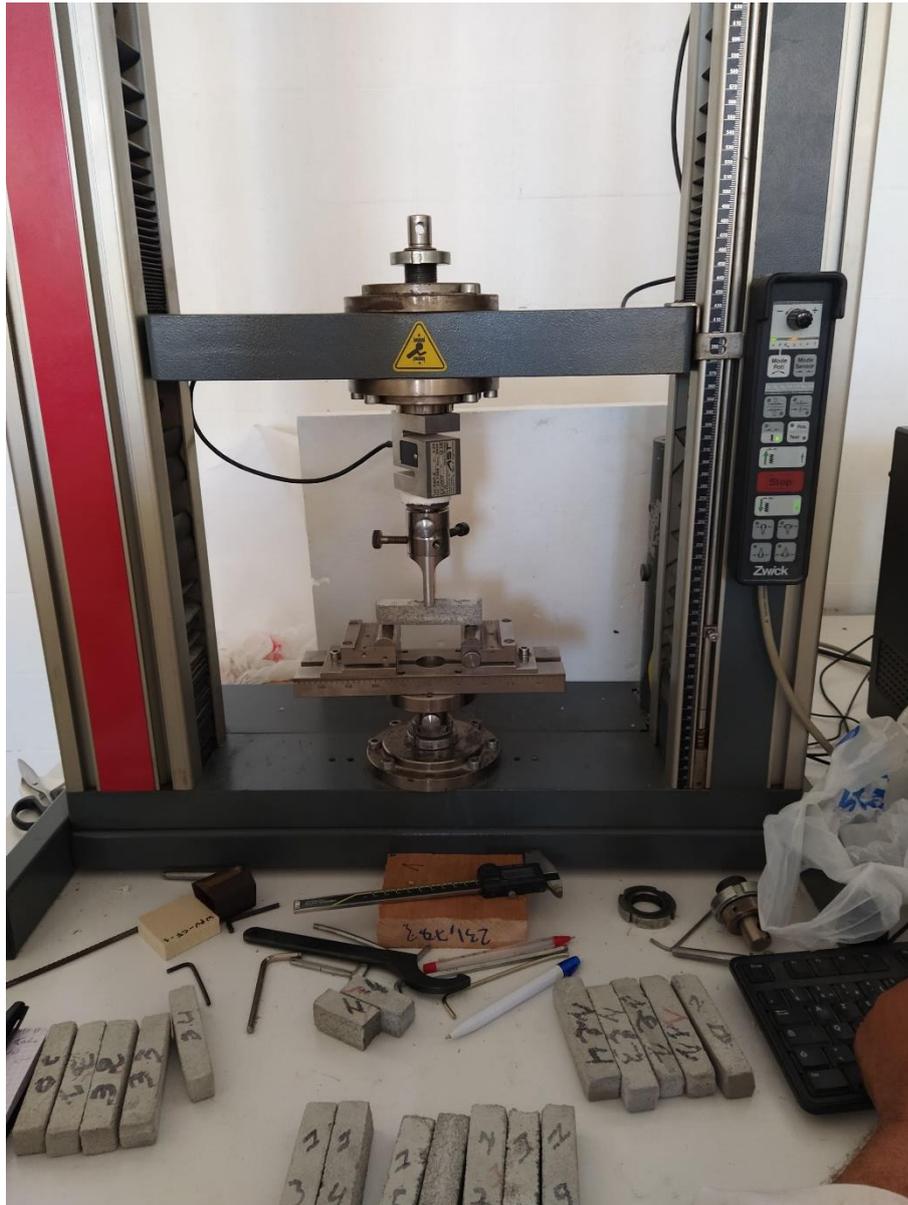
-La résistance en flexion  $R_f$  (MPa) est déduite de la formule suivante :

$$R_f = \frac{F L}{d_1 d_2^2} \text{ (MPA)}$$

**F**: charge maximale (N)

**L**: écartement entre les rouleaux d'appui (mm)

$d_1$  et  $d_2$ : dimensions latérales des éprouvettes en (mm)



**Essais de flexion**

- **Détermination de la vitesse de propagation du NA 5027**

- ✓ **But de l'essai**

Les méthodes d'essai non destructives permettent d'estimer la résistance du béton et/ou d'en apprécier la régularité ou l'homogénéité.

Ultrason c'est un essai non destructif très important qui nous permet de détecter à la fois plusieurs caractéristiques du béton durci, tels que: le degré de compacité, l'homogénéité, la résistance à la compression, le taux de fissuration, ...etc.

✓ **Principe de la mesure**

La mesure est définie dans la norme PR EN 12504-4. Elle consiste à déterminer le temps de parcours dans le béton d'une onde ultrasonique produite par un transducteur électroacoustique.

✓ **Appareillage**

Un générateur d'impulsions électriques est associé à 2 transducteurs de 20 kHz à 150 kHz (émetteur et récepteur) et d'un amplificateur de signal. Un dispositif électronique permet de mesurer le temps écoulé entre le départ de l'impulsion au niveau du transducteur -réémetteur et son arrivée au transducteur-récepteur.

✓ **Résultat**

La vitesse (V) du parcours est lu directement sur un écran digital au moment de leur stabilisation.

Cet appareil nous indique le temps (T) de propagation des ondes à travers l'éprouvette de longueur (L) et donne la vitesse de propagation (V) selon l'équation suivant :

$$V=S/T \times 10^6$$

**V**: vitesse de propagation.

**S**: distance entre les têtes en mètre.

**T**: temps en microseconde.



**Essai d'ultra-son**

- **Détermination du temps de prise NF EN 196-3+A1: 2009**

- ✓ **Principe de l'essai**

La consistance est évaluée en mesurant la pénétration d'une tige cylindrique (la sonde de consistance) dans une pâte de ciment sous l'effet d'une charge constante. La grandeur mesurée est l'épaisseur de la pâte sous la sonde à l'arrêt. La pâte sera dite de consistance normale si l'épaisseur ainsi mesurée est de 62 mm

Le temps de prise est déterminé par l'observation de la pénétration d'une aiguille dans une pâte de ciment de consistance normalisée, jusqu'au moment où elle atteint une valeur de 63mm.

- ✓ **Matériels utilisés**

- Malaxeur conforme à l'EN 196-1.
  - Appareil de Vicat dont la masse totale des parties mobiles est de 300+1 g.
  - Un moule de Vicat tronconique ou cylindrique, et une plaque de base.
  - Une sonde d'une avec un diamètre  $\varnothing = 10.00 \pm 0.05$  mm.
  - L'aiguille de Vicat pour début de prise avec un diamètre  $\varnothing = 1.13 \pm 0.05$  mm, et l'accessoire annulaire pour fin de prise.
  - Une spatule.
  - Une balance de précision de  $\pm 1$ g.
  - Un chronomètre de précision de  $\pm 1$  s.
  - Cylindre gradué de précision de  $\pm 1$  mm.
  - Eau distillée ou dis ionisée.
  - Conteneur de stockage pour immersion des moules.
  - Enceinte Climatique à température régulée thermo statiquement à  $(20,0 \pm 1,0)^\circ\text{C}$ .
- Deux plaques de verre supérieure et inférieure pour chaque moule Bouilloire le Chatelier.
- pied à coulisse
  - Appareil le Chatelier ; un moule qui doit être en laiton élastique, muni d'aiguille de mesure et a les dimensions.

### **Temps de début de prise**

- Enlever la sonde et la remplacer par l'aiguille de début de prise
- Régler l'appareil de Vicat équipé de l'aiguille, en l'abaissant jusqu'au contact avec la plaque de base, placée dans le conteneur d'eau, et en calant l'indicateur à Zéro.
- Relever l'aiguille en position d'attente
- Placer le moule rempli de la pâte de consistance normalisée et la plaque de base dans le conteneur, ajouter de l'eau à  $(20,0\pm 1,0)$  °C de manière que la surface de la pâte soit recouverte de 5 mm d'eau au minimum et entreposer dans l'enceinte à température contrôlée
- Abaisser l'aiguille avec précaution jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte. Marquer une pause de 1s à 2s à cette position de manière à éviter une vitesse initiale aux parties mobiles. Lâcher ces derniers rapidement et laisser l'aiguille pénétrer verticalement dans la pâte.
- Effectuer la lecture de l'échelle à la fin de la pénétration ou après 30s de la libération de l'aiguille.
- Enregistrer la lecture de l'échelle qui indique la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base, conjointement avec le temps écoulé depuis l'instant  $t_0$
- Répéter l'essai de pénétration sur la même éprouvette à des positions régulièrement espacées, situés à 8 mm au moins du bord du moule ou à 5 mm les unes des autres, et à 10mm au moins du dernier point de pénétration, et à intervalle de temps appropriés (10 min par exemple), conserver l'éprouvette dans son conteneur dans l'enceinte climatique.
- Nettoyer l'aiguille de Vicat après chaque pénétration.
- Enregistrer le temps  $t_i$  à 5 min près, temps de début de prise au bout duquel, la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de  $(6\pm 13)$  mm.

### **Temps de fin de prise**

L'essai se fait sur la face de l'éprouvette primitivement en contact avec la plaque de base.

- Retourner le moule sur sa plaque de base. Immerger le moule et la plaque de base dans le conteneur d'eau à  $(20,0\pm 1,0)$  °C et entreposer dans l'enceinte climatique à température  $(20,0\pm 1,0)$  °C. Après un temps approprié, placer le moule et l'entourer sous l'aiguille de l'appareil de vicat munit préalablement d'un accessoire annulaire
- Suivre le même mode opératoire de la détermination de début de prise Nettoyer l'aiguille de Vicat aussitôt après chaque pénétration

### Expression des résultats

- Enregistrer à 15 min de près le temps mesuré depuis l'instant to au bout du quel l'aiguille de l'accessoire annulaire cesse de laisser trace sur l'éprouvette.



**malaxeur conforme à l'EN 196-1**



**appareil Vicat**



**Prisomètre automatique**

- **Essais réalisé :**

- ✓ **Essais mécaniques:**

- Détermination des résistances mécaniques à 7 et 28 jours

- ✓ **Essais physiques:**

- Détermination de la consistance normalisée .
- Détermination du temps de prise
- Détermination de la stabilité .
- Mesure de la masse volumique absolue du ciment
- Détermination de la finesse

- ✓ **Essais chimiques:**

- Détermination de la perte au feu.
- Détermination du résidu insoluble .
- Détermination de la teneur en chlorures
- Analyse élémentaire par spectrophotométrie de fluorescence X
- Dosage de la chaux libre

- ✓ **Essai minéralogique**

- **Modalité des essais:**

- ✓ **Essais mécaniques:**

La détermination des résistances mécaniques à 2 et 28 jours est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-1.

- ✓ **Essais physiques:**

Les déterminations de la consistance normalisée, le temps de prise et la stabilité sur ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme EN 196-3. Les déterminations de la finesse par perméabilité de l'air et la masse volumique absolue du ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme EN 196-6.

- ✓ **Essais chimiques:**

Les déterminations de la perte au feu, du résidu insoluble sont réalisées sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-2. La détermination de la teneur en chlorures sur ciment

selon les modalités de la norme EN 196-2. L'analyse élémentaire ciment par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme EN 196-2. Le dosage de la chaux libre est réalisé suivant les modalités de la méthode PT207 CERILH 1970.

✓ **Essai minéralogique**

La détermination des constituants du clinker est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme ENV 196-4.

• **Permeabilmètre de baline**

Réf. L0041

$$K = 2,431 \quad V = 1,8595$$

$K = \text{constante } 132 \text{ .y vo wine u}$

V = volume

V<sub>ssb</sub> / standar : 3200 + 260

Vous venez d'acquérir votre perméabilimètre de Blaine L0041. Nous vous remercions de votre choix et espérons qu'il vous donnera entière satisfaction. Avant d'utiliser votre matériel, nous vous conseillons de lire attentivement ce manuel d'utilisation afin de vous familiariser avec son maniement.

✓ **Etapes de la fabrication du ciment**

- Broyage calcaire + argile : on obtient le CRU
- Cuisson du CRU (1450°C): on obtient le CLINKER.
- Broyage du clinker (pour une bonne résistance du produit fini. les grains de ciment doivent être le plus fins possible).
- Ajouts minéraux (laitier. cendres volantes. gypse...).

La finesse d'un ciment qui traduit sa réactivité) est caractérisée par la surface spécifique qui est mesurée à l'aide de l'appareil de Blaine.

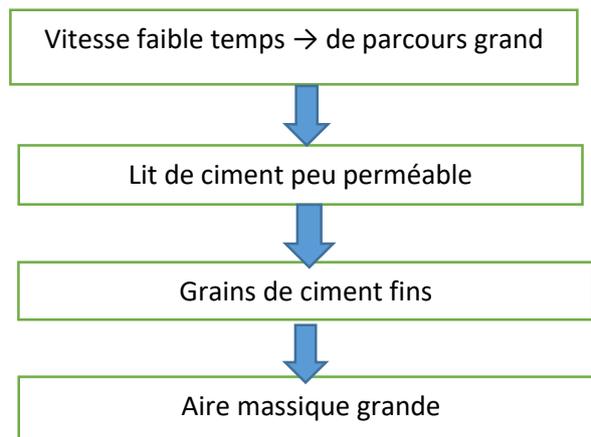
✓ **Définition**

Aire massique (ou surface spécifique) : total des aires de tous les grains par unité de masse -> plus les grains sont fins. Plus l'aire massique est grande.

### ✓ Principe de la méthode

La finesse du ciment est déterminée sous forme de surface massique, en mesurant le temps mis par une quantité fixée d'air, pour traverser un lit de ciment compacté à des dimensions et une porosité spécifiées.

La surface massique est exprimée en  $cm^2/g$ . La vitesse d'écoulement de l'air dans les grains de ciment est d'autant plus faible que les grains sont fins.



Norme → NF EN 196-6

### • Description de l'appareille

Le perméabilimètre est constitué de (voir figure page suivante):

- ✓ un manomètre 0 en U (verre d'épaisseur 1 à 1,5 mm) doté de quatre graduations
  - à la graduation inférieure, affleure un liquide stable (ni volatil, ni hygroscopique), de faible densité et de faible viscosité (en général de l'huile minérale extra fluide).
  - le manomètre est relié à une poire par l'intermédiaire d'un tuyau flexible et d'un robinet .
  - à l'un des orifices supérieurs du manomètre est adapté un ajustage rode
- ✓ une cellule de mesure (en métal inoxydable) placée sur et constituée de:
  - une grille perforée en fond de cellule.
  - une rondelle de papier filtre de texture spéciale .
  - un piston ajusté ® pour tasser le solide

l'ensemble des éléments constituant la cellule est en acier inoxydable ou en un autre matériau résistant à l'abrasion et à la corrosion .



**Permeabilimètre de blaine**

➤ **Réalisation d'un essai-utilisation de l'appareille**

\* Agiter l'échantillon de ciment d'environ 1kg pour essai en le secouant pendant deux minutes dans un récipient bouché, pour disperser les amas éventuels.

\* Attendre deux minutes

\* Remuer doucement la poudre résultante en utilisant une baguette sèche et propre, de façon à disperser les fines dans tout le ciment.

\* Peser à 0,01 g près une masse de ciment déterminée par:

$$m = (1-n) \times p \times V$$

\* m: masse de ciment en g

\* n: porosité de la couche de ciment prise égale à 0.500

\* p: masse volumique absolue du ciment en g/cm

\* V: volume apparent de la poudre, en cm', après tassement dans la cellule.

Pour la détermination du volume de ciment et de la masse volumique absolue du ciment, voir nota I et nota 2.

\* Placer la grille et le papier filtre au fond de la cellule.

\* Verser le ciment lentement, à l'aide d'un entonnoir.

\* Nivelier par petits chocs successifs.

\* Recouvrir d'une rondelle de papier filtre.

\* Introduire progressivement le piston Jusqu'à ce que sa butée vienne toucher le bord de la cellule.

\* Enduire de vaseline les parois extérieures de la cellule.

\* Placer la cellule sur l'appareil et enlever le piston.

\* Noter la température de la salle.

\* A l'aide de la poire, aspirer le liquide jusqu'au trait no1.

\* Fermer le robinet.

\* Lorsque le niveau du liquide parvient au trait no 2, déclencher le chronomètre.

\* Quand le niveau du liquide parvient au niveau n°3, arrêter le chronomètre.

\* Noter le temps t en secondes

\* Sur la même pesée de ciment refaire une deuxième mesure de t, puis refaire une nouvelle série de deux mesures avec une deuxième pesée de ciment.

✓ **Remarque importante :**

Lorsqu'on presse la poire, il se produit une aspiration assez importante de liquide manométrique (il est très délicat de « doser » cette aspiration), le plus simple est de procéder comme suit :

1. Fermer le robinet

2. Presser la poire

3. Ouvrir très légèrement le robinet jusqu'à ce que le liquide manométrique monte au-dessus du trait 1.

4. Fermer le robinet, déclencher le chronometre lorsque le liquide est au niveau 2.

**Nota 1:** détermination de la masse volumique absolue du ciment

$\rho_{\text{abs-ciment}}$  doit être déterminée à l'aide d'un pycnomètre avec un liquide non réactif. La mesure doit avoir une précision de  $0.01 \text{ g/cm}^3$

**Nota 2 :** détermination du volume de ciment

La norme NF EN 196-6 donne les dimensions intérieures de la cellule (ainsi que celles de tous les autres constituants de l'appareil de Blaine). Le volume de ciment est donc facilement calculable :

$$V = \pi \times \frac{G^2}{4} \times H$$

Avec :

$$G = 12.7 \pm 0.1 \text{ mm}$$

$$H = 15 \pm 1 \text{ mm}$$

Ces dimensions étant données avec des tolérances, le volume ainsi calculé n'est pas parfaitement précis. Si la détermination nécessite plus de précision, il faut procéder à une manipulation.

- Appliquer à l'intérieur de la cellule un très fin film d'huile minérale légère.

- Placer le disque perforé puis 2 disques de papier filtre au fond de la cellule (ajuster leur positionnement à l'aide de la baguette en verre).
- Remplir la cellule avec du mercure.
- Vider la cellule, peser le mercure à 0.01 g près ( $m_2$ ) et relever la température
- Enlever 1 disque de papier filtre, former un lit de ciment compacté, le surmonter d'un disque de papier filtre, remplir à nouveau la cellule de mercure, enlever le mercure, peser le à 0.01 g près ( $m_3$ ) et vérifier la température.

Le volume du lit V est donné par :

$$v = \frac{m_2 - m_3}{\rho_H} \text{ en } cm^3. \text{ avec du masse volumique du mercure à la température de l'essai.}$$

Répéter la procédure avec des lits de ciment frais jusqu'à ce que 2 valeurs de V different de moins de  $0.005 \text{ cm}^3$

## • **Mesure du coefficient de friabilité des sables**

### ✓ **Objet**

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la résistance à la fragmentation des sables.

### ✓ **Domaine d'application**

La présente norme s'applique aux sables contenus dans les granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

### ✓ **Références**

P 18-553 Granulats - Préparation d'un échantillon pour essai.

P 18-560 Granulats - Analyse granulométrique par tamisage.

P 18-572 Granulats - Essai d'usure micro-Deval,

NF ISO 5725 Application de la statistique - Fidélité des méthodes d'essai-- Détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode d'essai normalisée par essais inter laboratoires (Indice de classement X 06-041.)

## ✓ Généralités

### ✚ But de l'essai

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge en présence d'eau. Les éléments fins du sable, inférieurs à 0,2 mm, ne sont pas étudiés.

Le sable est écrêté à 2 ou 4 mm

### ✚ Définition

L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai

Si  $M$  est la masse de matériau soumis à l'essai et  $m$  la masse des éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai le coefficient de friabilité du sable est :

$$F_S = 100 \frac{m}{M}$$

## ✓ Appareillage

### ✚ Appareillage d'usage courant

Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau (P 18-553) et une analyse granulométrique par tamisage (P 18-560), dont un jeu de tamis de 0,1 - 0,2 - 1 - 2 - 4 et 8 mm d'ouverture et d'au moins 200 mm de diamètre

### ✚ Appareillage spécifique

Appareil micro-Deval (P 18-572).

Charge bruyante constituée par des billes sphériques en acier inox Z 30 C 13 de diamètre:

$$(30 \pm_{0,05}^{0,1}) \text{ mm}, (18 \pm_{0,5}^{0,1}) \text{ et } (10 \pm 0,5) \text{ mm}$$

## ✓ Matière soumise à l'essai

### ✚ Prise d'échantillon

La masse de l'échantillon envoyé au laboratoire est au moins égale à 2 kg, elle est partagée suivant les prescriptions de la norme P 18-553.

L'essai est effectué sur un sable 0,2-2 mm ou 0,2-4 mm

### ✚ Préparation de l'échantillon pour essai

Tamiser par voie humide le matériau sur les amis 0,2 mm et 2 mm ou 4 mm.

La détermination des résistances mécaniques à 2 et 28 jours est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-1.

Les déterminations de la consistance normalisée, le temps de prise et la stabilité sur ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme EN 196-3. Les déterminations de la finesse par perméabilité de l'air et la masse volumique absolue du ciment sont réalisées suivant les modalités de la norme EN 196-6.

Les déterminations de la perte au feu, du résidu insoluble sont réalisées sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-2. La détermination de la teneur en chlorures sur ciment selon les modalités de la norme EN 196-2. L'analyse élémentaire ciment par spectrométrie de fluorescence X est réalisée selon les modalités de la norme EN 196-2. Le dosage de la chaux libre est réalisé suivant les modalités de la méthode PT207 CERILH 1970.

La détermination des constituants du clinker est réalisée sur ciment selon les modalités de la norme ENV 196-4.

Vous venez d'acquérir votre perméabilimètre de Blaine L0041. Nous vous remercions de votre choix et espérons qu'il vous donnera entière satisfaction. Avant d'utiliser votre matériel, nous vous conseillons de lire attentivement ce manuel d'utilisation afin de vous familiariser avec son maniement.

La finesse d'un ciment (qui traduit sa réactivité) est caractérisée par la surface spécifique qui est mesurée à l'aide de l'appareil de Blaine.

Aire massique (ou surface spécifique) : total des aires de tous les grains par unité de masse -> plus les grains sont fins. Plus l'aire massique est grande.

La finesse du ciment est déterminée sous forme de surface massique, en mesurant le temps mis par une quantité fixée d'air, pour traverser un lit de ciment compacté à des dimensions et une porosité spécifiées.

La surface massique est exprimée en  $cm^2/g$ . La vitesse d'écoulement de l'air dans les grains de ciment est d'autant plus faible que les grains sont fins.

Le perméabilimètre est constitué de (voir figure page suivante):

l'ensemble des éléments constituant la cellule est en acier inoxydable ou en un autre matériau résistant à l'abrasion et à la corrosion .

Lorsqu'on presse la poire, il se produit une aspiration assez importante de liquide manométrique (il est très délicat de « doser » cette aspiration), le plus simple est de procéder comme suit :

La norme NF EN 196-6 donne les dimensions intérieures de la cellule (ainsi que celles de tous les autres constituants de l'appareil de Blaine). Le volume de ciment est donc facilement calculable :

Ces dimensions étant données avec des tolérances, le volume ainsi calculé n'est pas parfaitement précis. Si la détermination nécessite plus de précision, il faut procéder à une manipulation.

Répéter la procédure avec des lits de ciment frais jusqu'à ce que 2 valeurs de V différent de moins de  $0.005 \text{ cm}^3$

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la résistance à la fragmentation des sables.

La présente norme s'applique aux sables contenus dans les granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

NF ISO 5725 Application de la statistique - Fidélité des méthodes d'essai-- Détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode d'essai normalisée par essais inter laboratoires (Indice de classement X 06-041.)

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge en présence d'eau Les éléments fins du sable, inférieurs à 0,2 mm, ne sont pas étudiés.

Le sable est écrêté à 2 ou 4 mm

L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,1 mm produits au cours de l'essai

Si M est la masse de matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 0.1 mm produits au cours de l'essai le coefficient de friabilité du sable est :

Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau (P 18-553) et une analyse granulométrique par tamisage (P 18-560), dont un jeu de tamis de 0,1 - 0,2 - 1 - 2- 4 et 8 mm d'ouverture et d'au moins 200 mm de diamètre

Appareil micro-Deval (P 18-572).

Charge bruyante constituée par des billes sphériques en acier inox Z 30 C 13 de diamètre

La masse de l'échantillon envoyé au laboratoire est au moins égale à 2 kg, elle est partagée suivant les prescriptions de la norme P 18-553.

L'essai est effectué sur un sable 0.2-2 mm ou 0.2.4 mm

Tamiser par voie humide le matériau sur les amis 0.2 mm et 2mm ou 4 mm.

Sécher à l'étuve a 105 °C, jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à c

Sécher à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0.1%.

Homogénéiser et peser l'échantillon pour essai: qui doit être de 500g ± 2g

Préparer la charge broyant de la façon suivante :

Prendre 9 billes de 30 mm de diamètre, dont la masse doit être comprise entre 925 g et 985 g. ajouter 21 billes de 18 mm de diamètre, dont la masse doit être comprise entre 440 g et 500 g et compléter avec des billes de 10 mm de diamètre, de façon que la masse totale de la charge soit de 2 500g ± 4g.

L'usure de la charge doit être contrôlée périodiquement Les billes de 18 mm et 30 mm sont contrôlées par pesée de l'ensemble et remplacement des plus usées par pesées élémentaires, jusqu'à se retrouver à l'intérieur des tolérances Les billes de 10 mm sont contrôlées en les pesant par lot de dix, en deçà d'une masse de 34 g par lot elles sont remplacées par des belles conformes.

#### ✓ Exécution de l'essai

Introduire la charge dans le cylindre d'essai, puis les 500 g de matériau préparé suivant les dispositions du chapitre 3

Ajouter 2,5l d'eau

Mettre le cylindre en rotation à la vitesse de 100 tr/min pendant 15 min Verser ensuite lentement la totalité du contenu du cylindre sur deux tamis superposés de 8 mm pour recueillir la charge abrasive) et de 0,1 mm .

Laver l'ensemble sous un jet d'eau, jusqu'à eau claire, puis enlever le tamis de 8 mm.

Sécher le refus au tamis de 0,1 mm à étuve 105 C. jusqu'à masse constante.

Tamiser à sec le refus à 0.1 mm.

Peser à 0.1 près le refus sur le tamis de 0.1 mm, soit m'cette masse.

#### ✓ Expression des résultats

La masse des éléments inférieurs à 0,1 mm produits durant l'essai est égale à  $m = 500 - m'$

Le coefficient de friabilité mesuré est alors

$$F_s = 100 \frac{500 - m'}{500} = \frac{m}{5}$$

Arrondi à l'unité la plus proche.

### ✓ Précision

La répétabilité ( $r$ ) et la reproductibilité ( $R$ ) ont été déterminées à partir de deux répétitions d'essais effectués sur chaque matériau dans dix-huit laboratoires. L'interprétation a été effectuée conformément à la norme NF ISO 5725 .

Les valeurs établies entre les niveaux 16 et 38 sont les suivantes :

- pour  $F_s$  16 : répétabilité  $r = 2$  et reproductibilité  $R = 4,2$ ;
- pour  $F_s = 38$  : répétabilité  $r = 6,2$  et reproductibilité  $R = 8,4$  .



**Essais micro-deval**

- **Calcul de la porosité totale**

- **Eprouvette (64cm<sup>3</sup>)**

$$\%P = \left(1 - \frac{d_{ap}}{d_{sp}}\right) \times 100$$

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1000 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,53}{2,26}\right) \times 100 = 32,3\%$$

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1200 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,55}{2,26}\right) \times 100 = 31,4\%$$

- ✓ Pour vitesse da malaxage 1400 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,49}{2,26}\right) \times 100 = 34\%$$

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1600 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,45}{2,26}\right) \times 100 = 35,8\%$$

- **Eprouvette (200cm<sup>3</sup>)**

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1000 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,644}{2,48}\right) \times 100 = 33,8\%$$

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1200 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,642}{2,48}\right) \times 100 = 33,7\%$$

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1400 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,594}{2,48}\right) \times 100 = 35,7\%$$

- ✓ Pour vitesse de malaxage 1600 tr/min

$$\%P = \left(1 - \frac{1,59}{2,48}\right) \times 100 = 35,9\%$$

En pend

$$\rho = \frac{M_s}{V} \rightarrow d_{ap}$$

D<sub>sp</sub> = la moyenne des valeurs dsp/4 (constante)

M<sub>s</sub> : masse de l'éprouvette

V : volume de l'éprouvette



**Moule des éprouvettes de dimension (4x4x4)(cm)**

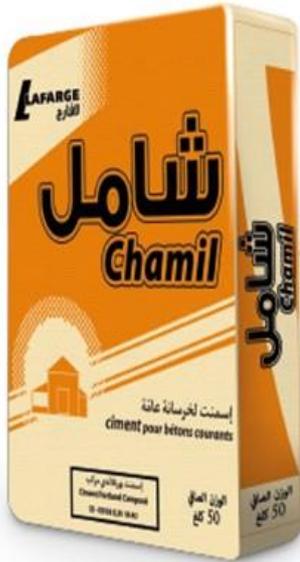


**Moule des éprouvettes de dimension (10x10x2)(cm)**



**Eprouvettes de dimension (4x4x4 et 10x10x2 et 10x2x2) (cm)**

ALGÉRIE



# شامل Chamil

50kg



## Ciment pour bétons courants

CPJ - CEM II/B 32.5 N

**CHAMIL** Ciment gris pour bétons courants et structurels ; destiné à la construction de votre Maison

**CHAMIL**  
CPJ - CEM II/B 32.5 N.

**CHAMIL** est certifié, conforme à la norme Algérienne (NA 442) et européenne (EN 197-1)

### AVANTAGES PRODUIT



- Un ciment « tout en un » pour construire votre maison : permet de réaliser toutes les étapes de construction
- Un bon comportement pour les travaux de maçonnerie : dressage et talochage
- Un temps de prise étudié pour un usage confortable.
- Un ingrédient idéal pour la composition des mortiers de finition.

### APPLICATIONS RECOMMANDÉES

- Construction de maisons individuelles.
- Tous travaux de maçonnerie.



### FORMULATION CONSEILLÉE

|                       | Ciment  | Sable (sec) $\phi/5$                | Gravillons (sec) $8/15\text{mm}$ $15/25\text{mm}$    | Eau (litres)  |
|-----------------------|--|--|--|--|
| Dosage pour béton B25 | X 1     | + X7                                | + X5  + X4  | + 25 L   |
|                       | Ciment  | Sable Correcteur $\phi/1\text{mm}$  | Sable (sec) $\phi/4\text{mm}$    | Eau (litres)  |
| Mortier de briquetage | X 1     | + X6                                | + X9   | + 35 L   |
| Mortier de finition   | X 1     | + X9                                | + X6   | + 35 L   |

Remarque: un bidon = 10 Litres

### CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

#### • Analyses chimiques

|   | Valeur    |
|---|-----------|
| Perte au feu (%) (NA5042)                 | 13.0±2    |
| Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> ) (%) | 2.5±0.5   |
| Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)      | 1.7±0.5   |
| Teneur en Chlorures(NA5042) (%)           | 0.02-0.04 |

#### • Temps de prise à 20° (NA 230)

|                      | Valeur |
|----------------------|--------|
| Début de prise (min) | 150±30 |
| Fin de prise (min)   | 250±50 |

#### • Composition minéralogique du Clinker (Bogue)

|         | Valeur |
|---------|--------|
| C3S (%) | 60±3   |
| C3A (%) | 7.5±1  |

#### • Résistance à la compression

|                | Valeur |
|----------------|--------|
| 2 jours (MPa)  | ≥ 10.0 |
| 28 jours (MPa) | ≥ 32.5 |

#### • Propriétés physiques

|   | Valeur        |
|---|---------------|
| Consistance Normale (%)   | 27±2.0        |
| Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231) | 4 300 - 5 500 |
| Retrait à 28 jours (µm/m)   | < 1 000       |
| Expansion (mm)  | ≤ 3.0         |

### CONSIGNES DE SÉCURITÉ

1- **PROTÉGEZ VOTRE PEAU** : Portez les équipements adaptés dans vos chantiers: casques, lunettes, gants, genouillères, chaussures et vêtements de sécurité.

2- **MANUTENTION** : levez le sac en pliant les genoux et en gardant le dos droit.



LAFARGE ALGÉRIE

Centre commercial Bab Ezzouar, Tour n°02, Etages 05 & 06, Bab Ezzouar Alger, Algérie

Tél: + 213 (0) 21 98 54 54

Fax: + 213 (0) 23 92 42 94

www.lafargealgerie.com

**LAFARGE**  
لافارج

# MEDA-AIR

Conforme à la norme NA 1946 , NA 427

## Entraîneur d'air

### Description

Le **MEDA-AIR**, est un entraîneur d'air sous forme liquide à diluer dans l'eau.

Le **MEDA-AIR** permet la formation dans le béton de petites bulles d'air qui modifient le comportement du béton à l'état frais comme à l'état durci. Ces bulles d'air uniformément réparties assurent la cohésion du béton frais et augmentent sa résistance au gel.

### Domaines D'application

- Béton soumis aux cycles de gel dégel
- Bétonnage par temps froid
- Ouvrages exigeant de hautes résistances à la compression tels que les ouvrages d'art, barrages, digues...
- Béton extrudés
- Utilisé pour les bétons en milieux agressifs

### Propriétés :

#### Sur béton frais :

- Augmentation de la cohésion
- Diminution de la ségrégation
- Amélioration de la maniabilité

#### Sur béton durci :

- Amélioration des résistances aux cycles gel dégel.
- Amélioration de l'aspect au démoulage

### Caractéristiques :

- Forme ..... Liquide
- Densité ..... 1,00 ( $\pm$  0,01)
- pH ..... 7-8
- Ions chlorures ..... < 0,1%

### Mode D'emploi :

Mélanger le **MEDA-AIR** avant son utilisation afin de l'homogénéiser.

**MEDA-AIR** est introduit dans le malaxeur mélangé à l'eau de gâchage. Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant

*Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.*

Le **MEDA-AIR** peut être utilisé en association avec les

au béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été ajoutée.

Ne pas introduire le **MEDA-AIR** sur les composants secs du béton.

plastifiants et super plastifiants :

**MEDAPLAST SP, MEDAFLOW SF, MEDAPLAST SP 40 et MEDAFLOW 30.**

**NB :** La couleur n'a aucune incidence sur les caractéristiques techniques du produit.

### Dosage:

Plage de dosage recommandée : 0,01% à 0,1% du poids de ciment, soit 0,01 litre à 0,1 litre par 100 kg de ciment.

Le dosage dépend de la quantité d'air occlus désirée mais aussi de la composition du béton et de ses caractéristiques. Il est nécessaire d'effectuer sur les chantiers, des dosages précis et de disposer par conséquent de doseurs suffisamment sensibles, vu que les doses préconisées sont très faibles.

### Conditionnement Et Stockage :

Le **MEDA-AIR** est conditionné dans des bidons de **10 kg** et en fût de **225 kg**.

Stocké à l'abri du soleil à une température comprise entre 5°C et 35°C.

### Durée de conservation :

Une année dans son emballage d'origine et à l'abri du gel.

### Précaution D'emploi

Manipulation non dangereuse. Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex-dz.com](http://www.granitex-dz.com)

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Avril 2007



**Grani**  
فرانتيكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél : (213) 021 51 66 81 & 82

Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



*Références  
bibliographiques*

## **Référence bibliographique**

- [1]: Mémoire fin d'étude «valorisation des sables locaux dans la formulation de béton ordinaire » 2015/2016 AYADI Walid abdelghani et GUENOUNE Abdelmalek.
- [2]: Azzouz Hocine : « étude des bétons à base des sables de dune », Mémoire de Magister Université Mohamed kheider, biskra, 2009.
- [3]: REZIG Salima : « Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux », Université Mohamed Khider, Biskra.
- [4]: Philippe Chevalier Jean-Christophe Van den Schrieck : « Le sable naturel en Région Wallonne », Août 2011.
- [5]: TAFRAOUI Ahmed : « Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental, (Algérie). Application aux nouveaux bétons », THESE DE DOCTORAT, Université de Toulouse, 2009.
- [6]: ANDRIAMANANSTILAVO.N: «Comportement des matériaux cimentaires dans un coffrage expérimentation, modélisation et simulation de la poussée et du processus de maturation ». Thèse de doctorat à l'Université de boumerdes, 2003.
- [7]: Walther .R et Miehlbradt.M : « Dimensionnement des structures en béton », traité de Génie Civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1990.
- [8]: NF EN 197-1 : Ciment - Composition, spécification et critères de conformité des ciment courants indice de classement P 15-101-1.
- [9]: NF EN 450 : Cendres volantes pour béton - Définitions, exigences et contrôle de qualité: indice de classement P 18-050.
- [10]: NF P 18 -508 : Additions pour béton hydraulique – Additions calcaires-Spécification et critères de qualité : indice de classement P 18-508.
- [11]: NF P 18-502 : Additions pour béton hydraulique – Fumée de silice : indice de classement P 18-509.
- [12]: NF EN 196 -1 : Méthodes d'essais des ciments – Détermination des résistances Mécaniques : indice de classement P 15 – 471.
- [13]: P.J. Tikalsky, J. Pospisil, W. MacDonald, «A method for assessment of the freeze-thaw Resistance of preformed foam cellular concrete, Cement and Concrete Research 34 (5) (2004) 889-893.
- [14]: N. Beningfield, R. Gaimster, P. Griffin, Investigation into the air void characteristics of

Foamed concrete, in : Global Construction : Ultimate Concrete Opportunities : Proceedings of The International Conference held at the University Of Dundee, Scotland, UK on 5-7 July 2005. Cement combinations for durable concrete, vol.6 (1), Thomas Telford Services Ltd, London, 2005, p. 51.

[15]: ACI523.2R-96, Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units, ACI Committee 523, 1996.

[16]: PANESAR DK. « Cellular concrete properties and ne effect of synthetic and protein Foaming agents ». Construction and building materials, vol. 44, p. 575-84, 2013.

[17]: DU L, FOLLIARD KJ. Mechanisms of air entrainment in concrete ». Cement and concrete research, vol. 35, p. 1463-71, 2005.

[18]: NAMBIAR EKK, RAMAMURTHY K. «Influence of filler type on the properties of foam concrete ». Cement and concrete composites, vol. 31, p.105-12.

[19]: ELBACHIR Yasmina : « Effet des différents adjuvants sur la performance du béton », mémoire de Master Professionnel, Université de Mohamed Boudiaf, 2014.

[21]: NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-342.

[22]: CIMBÉTON : « Les constituants des bétons et des mortiers, chapitre 2, Les adjuvants », Paris, 2006.

[23]: NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-335.

[24]: NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-336.

[25]: NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-337.

[26]: NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-338.

[27]: NF EN 934-2 : Adjuvants pour béton, mortier et coulis, Définition, exigences, conformité, marquage et étiquetage, indice de classement : P 18-334.

[28]: Journée d'information : « ciments – bétons – adjuvants », Les adjuvants Définitions Et opportunités d'utilisation, Organisée par : ERCE- CTC- est – GRANITEX, 2004.

- [29]: Kass J.L and Campbell-Allen D (1972) : Functional classification of lightweight Concrete, *Matériaux Et Constructions*, vol.5, n°27, pp.171-172.
- [30]: Tasserie M (1991) : Optimisation physico-chimique d'un verre Expansé. Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, juin 1991, 149p
- [31]: Carrel P, Louvigne M, Malaval R (1982): Le polystyrène expansé, *Le bâtiment bâtir*. Avril 1982, pp 28-34.\*
- [32]: Ferrer M (1985) : Béton léger isolant à base de billes de polystyrène. Thèse de doct. Ing. Université de Clermont Ferrand, 62 p.
- [33]: Morog D (1989) Chronique technologique : du béton à partir de Granulats de bois minéralisé Procédés Agresta, comportement mécanique et principales utilisations. CIIC, Paris, Bull. Bétons 89, n°16, Janvier 1989, p4-5.
- [34]: Ouadi R (1991) : Conception d'un panneau sandwich isolant-porteur. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 194p.
- [35]: HERRMANN, A.S. NICKEL, J. and RIEDEL, U. Construction Materials based upon biologically renewable resources – from components to finished Parts. *Polymer Degradation and Stability*, 1998, vol.59, pp.251-261.
- [36]: KHEDARI, J, CHAROENVAI, S. and HIRUNLABH, J. New insulating Particleboards from durian peel and coconut coir. *Building and Environment*, 2003, Vol.38, pp.435-441.
- [37]: LUIZ DE BARROS SALGADO, A. Bamboo, a cellulosic and energetic raw material. In: Perazzo Barbosa N., Swamy R.N. and Lynsdale C. Ed. *Proc. Of the International Conference on Sustainable Construction into the next millenium: Environmentally friendly and innovative cement based materials*, November 2-5, Joao Pessoa, Brasil, 2000, pp.39-44.
- [38]: PIMENTIA, P. CHANDELLIER, J. RUBAUD, M. DUTRUEL, F. et NICOLE, H. Etude de la faisabilité des procédés de construction à base de bétons de bois. *Cahiers du CSTB*, janvier - février, 1994, n° 346.
- [39]: ARNAUD L. Pâte crue de béton cellulaire, approches théorique et Expérimentale : l'homogénéisation le vibroscope. Thèse de Mécanique ECL, Paris Ecole Centrale Paris, 1993, 280 p.
- [40]: VILLAIN, G. Caractérisation de la prise de matériaux à base de ciment par Propagation d'ondes acoustiques et ultrasonores. (Chapitre 2 Modélisation par Méthode auto cohérente). Thèse MEGA. Lyon : INSA de Lyon, 1997, pp.87-100.

- [41]: NARAYANAN, N and RAMAMURTHY, K. Prediction models based on gel-pore parameters for compressive strength of aerated concrete. *Concrete Science and Engineering*, 2000, vol.2, pp.206-212.
- [42]: Commission des bétons légers; Terminologie et définitions. *Matériaux et Construction*, N°13, pp60-69.
- [43]: Méthodes d'essais des bétons cellulaires. *Matériaux et constructions*, vol.8, n°45, p.224.
- [44]: Cormon P (1973): *Bétons légers d'aujourd'hui*, ed Eyrolles.
- [45]: J.F. Sacadura, 'Initiation aux Transferts Thermiques', Collection Tec & Doc, Lavoisier, 446 p., 1993.
- [46]: J. Brau, 'Théorie du Conditionnement d'Air', Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.
- [47]: C. Jean, 'Transfert de Chaleur', Tome 1- Cours, Edition Masson, 1922.
- [48]: X. Faure, K. Johannes, F. Jousselein, P. Pierson and D. Quenard, 'Couplage des Transferts de Chaleur par Convection, Chaleur Sensible et Latente dans un Système Solaire Intégré', 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 Août 2007.
- [49]: C. Jean, 'Transfert de Chaleur', Tome 3- Corrigés de Problèmes, Edition Masson, 1922.
- [50]: C. Inard, P. Depecker et J. Roux, 'Un Modèle Simplifié pour la Prédiction du Champ de Température dans les Bâtiments', *Revue Générale de Thermique*, Vol. 36, N°2, pp. 113 - 123, 1997.
- [51]: ELLE BP. « Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities ». *Energy and building*, vol. 43, p. 2549-63, 2011.
- [52]: FEDULLO D, GALLAUZIAUX T. « Le grand livre de l'isolation : Solutions thermiques, acoustiques, écologiques et hautes performances », Paris, Eyrolles, 2011
- [53]: NEVILLE AM. « Properties of Concrete ». Édition : 5, Harlow, England, New York, Prentice Hall, 2011.
- [54]: LITEBUILT.com. « Applications for Litebuilt® aerated and composite concrete », <http://itebuilt.com>, 2014
- [55]: M.CONTANT: « Confection de bétons légers la fabrication d'éléments architecturaux ». Projet d'application présenté à L'école de technologie supérieure. Ecole de technologie supérieure L'université du Québec Édition. Montréal 14 Avril 2000.