

# **UNIVERSITÉ DE BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo matériaux et Génie Civil

## **MEMOIRE DE MASTER**

Spécialité : génie civil

**FORMULATION D'UN BETON A BASE DE GRANULATS LEGERS**

Par

**TAFIANI ABDELKRIM**

**SLIMANE ZITOUN IBRAHIM**

Devant le jury composé de :

Said KENAI	Prof.	U. Saad Dahleb-Blida	Promoteur
Walid YAHIAOUI	MCB.	U. Saad Dahleb-Blida	Co-Promoteur

Blida, Octobre 2020

## Résumé

Le béton léger permet une plus grande souplesse dans la conception des ouvrages en construisant des bâtiments plus élancés. Il permet également un abaissement du coût global de l'ouvrage en diminuant les sections des éléments porteurs, les dimensions des fondations et en diminuant les coûts des transports et d'installation. En Algérie, une seule usine située à Bouinane (Wilaya de Blida) fabrique des granulats légers mais leur utilisation reste limitée. Dans cette étude, Nous tentons de contribuer à une meilleure compréhension des caractéristiques des granulats légers et leurs utilisations dans différentes applications en béton. A cet effet, une synthèse de recherches antérieures concernant les bétons à base de granulats légers artificiels est donnée. Les différents types de bétons légers, leurs caractéristiques et leurs utilisations sont données en premier lieu. Ensuite, la deuxième partie a été consacrée à une description des essais à l'état frais et à l'état durci.

Les résultats de cette synthèse bibliographique ont montré que le béton léger présente une faible masse volumique variant entre 800 et 2000 kg/m<sup>3</sup>. Grâce à leur légèreté, les bétons à granulats sont plus faciles à manipuler et à déplacer et peuvent être utilisés dans des applications de béton structurel ou non structurel comme les panneaux de façade, enduits et chape pour l'isolation thermique.

**Mots clés :** granulats légers, masse volumique, absorption d'eau, résistance à la compression, isolation thermique, isolation acoustique, durabilité.

## **ABSTRACT**

Lightweight concrete allows greater flexibility in the design of structures by constructing taller buildings. It also lowers the overall cost of the structure by reducing the sections of load-bearing elements, the dimensions of the foundations and by reducing transport and installation costs. In Algeria, a single plant located in Bouinane (Wilaya de Blida) manufactures light aggregates but their use remains limited. In this study, we try to contribute to a better understanding of the characteristics of lightweight aggregates and their use in different concrete applications. To this end, a summary of previous research relating to concretes based on artificial lightweight aggregates is given. The different types of lightweight concrete, their characteristics and uses are given first. Then, the second part was devoted to a description of the tests in the fresh state and in the hardened state.

The results of this literature review have shown that lightweight concrete has a reliable density varying between 800 and 2000 kg / m<sup>3</sup>. Thanks to their light weight, aggregate concretes are easier to handle and move and can be used in structural or non-structural concrete applications such as facade panels, plasters and screed for thermal insulation.

**Keywords:** lightweight aggregates, density, water absorption, compressive strength, thermal insulation, sound insulation, durability.

## Extended Abstract

Concrete is one of the most widely used building materials in the world. Concrete is a composite material made up of coarse and fine aggregates (gravel or crushed stone and sand), cement and water. It is in high demand and its use will continue to grow in the years to come.

In practice, the density of a concrete of normal density varies from 2200 to 2600 kg / m<sup>3</sup>, as a result, the self-weight of the concrete elements is high and can represent a high percentage of the load on the structure. The use of lower density concrete can therefore be beneficial in terms of load-bearing elements of smaller sections and the corresponding reduction in foundations. Occasionally, the use of lower density concrete can allow construction on low bearing capacity soil, so with these low densities the forms experience less pressure than with normal density concrete.

During the last decade many innovations have revolutionized concrete constructions, among which, Lightweight concretes, those with a dry density of less than 1800 kg / m<sup>3</sup>, its use in civil engineering since the beginning of the 20th century, in European countries (France, Germany), America (USA) and Asia (Japan and ex USSR). The use of these concretes continues to multiply because of the advantages of this product, especially on the economic and technical level. These concretes normally made by three procedures, using light aggregates, aeration or gas, or reducing the fine part of the aggregate. In each of the three cases, the reduction in the density of the concrete achieved by an increase in the air voids in the concrete.

To improve this type of concrete, we must consider two very important elements, the concepts related to the formulation of lightweight concrete and the use of lightweight aggregates. On the other hand, it is becoming more and more interesting to assess the potential of lightweight materials as a source of raw materials.

The mechanical characteristics of lightweight aggregate concretes based much more on the properties and proportions of aggregates present in the formulation. In particular, due to their high porosity, light aggregates are more deformable than the cement matrix and their influence on the strength of concrete is complex.

In Algeria, there is only one factory for light industrial aggregates based on expanded clay. The plant is located in Bouinane (Wilaya de Blida). It manufactures lightweight

aggregates of different sizes and grain sizes. Due to the lack of knowledge of the characteristics of lightweight aggregates and the advantages they offer, these aggregates are little used. Lightweight aggregates can be used in structural concrete such as slabs and structural elements to lighten the weight of the structure but also in non-structural applications such as slabs, cement plaster and facade panels for thermal insulation.

Lightweight concrete allows greater flexibility in the design of structures by constructing taller buildings. It also lowers the overall cost of the structure by reducing the sections of load-bearing elements, the dimensions of the foundations and by reducing transport and installation costs. In Algeria, only one plant located in Bouinane (Wilaya de Blida) manufactures light aggregates but their use remains limited. In this study, we try to contribute to a better understanding of the characteristics of lightweight aggregates and their uses in different concrete applications. To this end, a summary of previous research relating to concretes based on artificial lightweight aggregates is given. The different types of lightweight concrete, their characteristics and uses are given first. Then, the second part was devoted to a description of the tests in the fresh state and in the hardened state.

The results of this literature review have shown that lightweight concrete has a reliable density varying between 800 and 2000 kg / m<sup>3</sup>. Thanks to their lightweight, aggregate concretes are easier to handle and move and can be used in structural or non-structural concrete applications such as facade panels, plasters and screed for thermal insulation.

Although known in the world for more than a quarter of a century, lightweight concrete has been used in our country in a timid and individual way, but they are now experiencing a resurgence of interest, which seems quite deserved fact because of their interesting technical and economic properties.

The lightweight aggregates production unit based on expanded clay located in Bouinane Wilaya of Blida was visited and its aggregates characterized. The objective of this study was to valorize the light aggregates of this unit in the manufacture of structural and non-structural concrete in Algeria as well as in self-consolidating concrete.

The literature review has shown that the characteristics of lightweight aggregates directly influence those of lightweight concrete. The density of these concretes varies

between 800 and 2000 kg / m<sup>3</sup>. Thanks to their lightness, these aggregate concretes are easier to handle and move.

Lightweight concrete has a decrease in compressive strength (10 to 20%) compared to ordinary aggregate concrete. The flexural tensile strength is less affected.

The high porosity of lightweight aggregates does not affect the water permeability of lightweight concrete and its overall durability due to non-continuity of pores.

The lightweight concrete offers in addition to the advantage of the lightness necessary in the case of soils with low bearing capacity, a low thermal and sound conductivity.

Due to the health crisis, we are limited to characterization tests of lightweight aggregates and the scheduled tests on the characterization and performance of lightweight self-consolidating concrete have not been carried out. To this end, we propose for future work the study:

- Effect of lightweight aggregates on the rheology of ordinary and self-consolidating concrete.
- Effect of lightweight aggregates on compressive strength, short and long-term flexural strength.
- Effect of light aggregates on the durability indicators of ordinary and self-compacting concretes (water permeability, oxygen permeability, gas permeability, porosity accessible to water, capillary absorption...).
- Analysis of thermal and sound performance
- Study of beams or slabs of reinforced concrete with light aggregates.

**Keywords:** lightweight concrete, density, lightweight aggregates, compressive strength, thermal insulation, sound insulation, durability.

## ملخص:

تسمح الخرسانة خفيفة الوزن بمرونة أكبر في تصميم الهياكل من خلال تشييد مبانٍ أطول. كما أنه يقلل التكلفة الإجمالية للهيكل عن طريق تقليل أقسام العناصر الحاملة وأبعاد الأساسات وتقليل تكاليف النقل والتركيب. في الجزائر، يوجد مصنع واحد في بوينان (ولاية البليدة) ينتج الركام الخفيف ولكن استخدامه لا يزال محدودًا. في هذه الدراسة، نحاول المساهمة في فهم أفضل لخصائص الركام خفيف الوزن واستخداماتها في تطبيقات الخرسانة المختلفة. تحقيقًا لهذه الغاية، تم تقديم ملخص للأبحاث السابقة المتعلقة بالخرسانة القائمة على الركام الصناعي خفيف الوزن. يتم إعطاء الأنواع المختلفة من الخرسانة خفيفة الوزن وخصائصها واستخداماتها أولاً. بعد ذلك، تم تخصيص الجزء الثاني لوصف الاختبارات في الحالة المرنة وفي الحالة الصلبة.

أظهرت نتائج مراجعة الأدبيات هذه أن الخرسانة خفيفة الوزن لها كثافة موثوقة تتراوح بين 800 و2000 كغ/م<sup>3</sup>. بفضل وزنها الخفيف، يسهل التعامل مع خرسانة الركام وتحريكها ويمكن استخدامها في تطبيقات الخرسانة الإنشائية أو غير الهيكلية مثل ألواح الواجهات والجص وذراع التسوية للعزل الحراري.

**الكلمات المفتاحية:** الركام خفيف الوزن، الكثافة، امتصاص الماء، الخرسانة خفيفة الوزن، قوة الضغط، العزل الحراري، عزل الصوت، المتانة.

## **Remerciement**

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Géomatériaux et génie civil au niveau de « l'Université de Blida-1 » et au laboratoire de « ALGEXPAN » situé à Bouinan (Blida), sous la direction de Monsieur Said KENAI, et la codirection de Monsieur YAHIAOUI.

Nous voudrions particulièrement remercier notre encadreur, Monsieur Said KENAI, Professeur à « l'Université de Blida 1 » de nous avoir fait confiance et accepter de nous encadrer malgré ses occupations. Nous lui exprimons ici notre profond respect et notre gratitude pour le suivi, et pour leur précieuse aide qui a permis de réaliser ce travail. Nous tenons aussi à remercier Monsieur Walid YAHIAOUI, docteur à « l'Université de Blida1 » et à présenter notre gratitude et notre grand respect pour ses orientations et conseils, ainsi pour leur disponibilité durant toutes les phases du mémoire.

Nous tenons à remercier aussi tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner notre travail, et pour avoir sacrifié de leur temps surtout pendant cette pandémie.

Nous remercions Monsieur Belkacem MENADI, Professeur à « l'Université de Blida 1 » Madame BENTLEMCEN Maitre-Assistant à « l'Université de Blida 1 », pour leurs aides et conseils. Nous remercions aussi nos collègues pour leurs aides. Nous remercions également les techniciens pour leur disponibilité et toute l'équipe de laboratoire de Géométrieux et de génie civil.

Nous adressons aussi nos remerciements à toute l'équipe de « ALGEXPAN » qui ont mis à notre disposition des produits nécessaire pour l'élaboration de notre travail de recherche, et nous les remercions de nous avoir reçus dans leur laboratoire.

Nous les remercions enfin, particulièrement nos très chers parents, qui ont toujours été là pour nous. Je (Tafiani) remercie mon frère Rafik et mes sœurs, pour leurs aides et disponibilités ainsi pour leurs encouragements.



## Liste des figures

Figure 1.1: Photo du site et logo de l'usine de l'argile expansée « ALGEXPAN ».....	29
Figure 1.2: : Extraction de gisement.....	23
Figure 1.3: le four rotatif.....	24
Figure 1.4: les différentes fractions d'argile expansée. ....	25
Figure 1.5: Représentation schématique des différents types de bétons légers. ....	29
Figure 1.6: Béton cellulaire .....	30
Figure 1.7: Principe du transfert des contraintes .....	35
Figure 1.8: Performances du béton cellulaire à l'état durci.....	36
Figure 1.9: Différents types de béton caverneux .....	38
Figure 1.10: Classe de résistance des bétons de granulats légers en fonction de la masse volumique .....	37
Figure 1.11: Schéma (gauche) et photographie (droite) du système de fabrication et de mise en œuvre du béton de mousse sur le vaisseau Ryuling. ....	35
Figure 1.12: Etapes du dragage à la mise en place du matériau dans le port de Kumamoto. ....	36
Figure 1.13: Gamme de masses volumiques réelles sèches des bétons légers avec différents types de granulats légers.....	37
Figure 1.14: Résistance mécanique en fonction du pourcentage de mousse (gauche) et en fonction de la porosité (droite).....	38
Figure 1.15: Processus de fabrication de granulat léger à partir de boue issue de réservoir de décantation. ....	44
Figure 1.16: Résultats d'essai d'intrusion par la méthode du prosimètre à mercure sur 3 types de granulats légers dont deux d'argile expansée (C1, C2) et un de schiste expansé (S) (Zhang et al. 2004).....	48
Figure 1.17: Domaines de masse volumique de granulats légers et courants.....	57
Figure 1.18: Appareillage de mesure de l'absorption d'eau sous vide (Mills-Beale et al. 2009).....	58
Figure 1.19: Dispositif de l'essai d'absorption basé sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre (Kasemchaisiri et Tangtermsirikul).....	59
Figure 1.20: Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Riley 1950).....	55
Figure 1.21: Description de la résistance à l'écrasement d'un grain de granulat léger (Kockal et Ozturan 2011) .....	57

Figure 1.22: Relation entre module équivalent et la masse volumique (De Larrard).....	58
Figure 1.23: Relation entre la masse volumique réelle et le module d'élasticité dynamique de grains de granulat léger (Bremner et Holm).....	59
Figure 1.24: Relation entre la résistance en compression à 28 jours et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers.....	64
Figure 1.25: Relation entre la résistance en compression à 28 jours et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers.....	64
Figure 1.26: Résistance en compression à 28 jours avec (cure à 50 % HR à partir de 3 j) .....	65
Figure 1.27: Variation de la résistance à la compression en fonction de la composition de béton.....	63
Figure 1.28: Résistance en traction à 28 jours avec (cure à 100 % HR) .....	64
Figure 1.29: Résistance en traction à 28 jours avec (cure à 50 % HR à partir de 3 j) ....	64
Figure 1.30: Résultats de modules élastiques de bétons légers à 28 jours d'après plusieurs auteurs .....	64
Figure 1.31 : Schéma du glissement des couches. ....	73
Figure 1.32 : Schéma de la vitesse de cisaillement.....	74
Figure 1.33 : Porosité du béton. ....	77
Figure 1.34 : Concept de la perméabilité d'un milieu poreux. ....	78
Figure 2.1: Sable corrigé, Baghliia et Boughezoul. ....	82
Figure 2.2: Les différentes fractions de graviers utilisés .....	82
Figure 2.3 : Les courbes granulométriques des granulats classiques..... (Sable mélange, gravier (3/8) et (8/15)).....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 2.4 : Les différentes fractions de l'argile expansée. ...	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 2.5: La courbe granulométrique du sable nodulaire (classe 0/3).....	85
Figure 2.6 : Les courbes granulométriques de granulats légers nodulaires (classe 3/8 et classe 8/15) selon la norme EN 933-1 .....	85
Figure 2.7 : Essai de l'analyse granulométrique des GL .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 2.8 : Détermination de la masse volumique réelle et apparente des GL à l'aide d'un pycnomètre et récipient .....	87
Figure 2.9 : Les séquences de malaxage du mortier .....	87
Figure 2.10 : Organigramme des différents essais d'optimisation sur MAP.....	88
Figure 2.11 : Essai d'étalement pour les MAP. ....	90
Figure 2.12 : Dispositif de l'essai à l'entonnoir en V .....	90

Figure 2.13 : Organigramme des différents essais sur BAP.....	90
Figure 2.14 : Essai d'étalement. ....	91
Figure 2.15 : Essai V-funnel.....	92
Figure 2.16 : Essai de la boîte en L.....	93
Figure 2.17 : Essai de stabilité au tamis.....	93
Figure 2.18 : Rhéomètre Heidolph- RZR 2102. ....	97
Figure 2.19: Schéma du rhéomètre.....	97
Figure 2.20 : Profil de vitesse. ....	97
Figure 2.21 : Essai J. Ring.....	97
Figure 2.22 : L'aéromètre utilisé.....	97

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Propriétés comparées des bétons cellulaires.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Tableau 1.2 : Masses volumiques en vrac indicatives de granulats légers. ....	49
Tableau 1.3 : Exemples de formulations d'un béton léger de différentes classes de masse volumique ainsi que quelques propriétés sélectionnées.....	52
Tableau 1.4 : Compositions chimiques de quelques granulats légers.....	55
Tableau 1.5 : Masses volumiques et résistances à l'écrasement de granulats .....	57
Tableau 1.6 : Résistance à la compression. ....	63
Tableau 1.7 : Paramètres rhéologiques des pâtes ciments, mortier et béton .....	74
Tableau 1.8 : Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre >2 µm .....	75
Tableau 2.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques de notre ciment .....	81
Tableau 2.2 : Compositions chimiques de notre ciment. ....	81
Tableau 2.3 : Caractéristiques des granulats classiques utilisés .....	84
Tableau 2.4 : caractéristiques des différents granulats légers utilisés .....	86
Tableau 2.5 : Caractéristiques du « MEDAFLOW 30 ».....	87
Tableau 2.6 : Classes d'étalement .....	92
Tableau 2.7 : Essai de caractérisation des BAP à l'état frais.....	95

## **Liste des abréviations**

BGL : Le béton de granulat léger.

C : Ciment.

CTTB : Centre Technique des Tuiles et Briques.

EIPPCB: The European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau.

E/C : Le rapport massique eau sur ciment.

E/L : le rapport massique eau sur liant

FeBeCel : La Fédération belge de Béton Cellulaire.

F/C : le rapport massique filler sur ciment

GL : Granulats légers.

LCPC : Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées..

MAP : Mortier autoplaçant.

## Table des matières

<b>Résumé</b> .....	2
<b>Extended Abstract</b> .....	4
<b>ملخص</b> .....	7
Liste des figures .....	9
Liste des tableaux.....	11
<b>Liste des abréviations</b> .....	13
Table des matières .....	13
<b>Introduction générale</b> .....	19
<b>CHAPITRE I : PARTIE 01</b> .....	
<b>PRESENTAYION DE L'ENTREPRISE D'ARGILE EXPANSEE « ALGEXPAN »</b> 22	
1) Présentation de l'usine « <b>ALGEXPAN</b> » .....	22
2) Procédures de fabrication de l'argile expansée .....	22
2.1) L'extraction de l'argile et le stockage : .....	23
2.2) Le concassage, le broyage et le malaxage : .....	23
2.3) Le façonnage : .....	23
2.4) La cuisson : .....	23
2.5) Refroidissement et criblage : .....	25
3) Le granulats d'argile expansée.....	25
4) Domaine d'application .....	26
5) Avantages de l'argile expansée.....	26
<b>CHAPITRE I : PARTIE 02</b> .....	
<b>REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES BETONS LEGERS ET GRANULATS LEGERS</b> .....	27
1.1 Introduction.....	28

1.2. Bétons légers.....	28
1.2.1. Le béton cellulaire .....	29
1.2.2. Béton caverneux .....	32
1.2.4 Les bétons de mousse à base de sédiments.....	35
1.2.5 Propriétés mécaniques .....	38
1.2.6 La densité à l'état frais.....	36
1.2.7 Malaxage.....	39
1.3 Propriétés d'un béton à base de granulats légers .....	39
1.3.1 Formulation des bétons légers .....	40
1.3.2 Granulats légers .....	39
1.3.3. Procédés de fabrication des granulats légers .....	42
Expansion des granulats légers .....	44
b) Indice d'expansion.....	45
1.4. Historique de granulats légers.....	46
1.4.1 Propriétés physiques des granulats légers.....	47
1.4.1.1 Caractéristiques géométriques .....	47
1.4.1.2 Microstructure et porosité.....	47
1.4.2 La densité des bétons et granulats légers .....	48
1.4.2.1 Masse volumique apparente des granulats légers .....	48
a) Masse volumique en vrac .....	49
C) Masse volumique des bétons .....	51
1.4.3 Absorption d'eau des granulats légers .....	52
b) Méthode basée sur la saturation sous vide .....	53
c-) Méthode basée sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre.....	54
1.4.4 Composition chimique des granulats légers .....	55
1.4.5 Propriétés mécaniques des granulats légers.....	56
1.4.5.a Résistance à l'écrasement .....	56
1.4.5.b Module élastique.....	57

1.4.6 Propriétés thermiques des bétons légers .....	59
1.4.7 Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers.....	60
1.4.7. a Résistance à la compression.....	60
1.4.7. b Résistance à la traction .....	63
1.4.7. c Module élastique .....	65
1.4.8. Retrait et fluage.....	65
1.4.9 Propriétés acoustiques des bétons légers .....	66
1.5 Béton auto plaçant .....	66
1.5.1 Définition d'un BAP.....	66
1.5.2 Formulation des BAP.....	68
1.5.3 Caractérisations des BAP à l'état frais : .....	70
1.5.4 Rhéologie des bétons autoplaçants .....	72
1.5.5 Paramètres rhéologiques .....	72
1.6 Effet des granulats légers sur la durabilité des BAP :.....	75
1.6.a Absorption capillaire :.....	75
1.6.b La porosité .....	76
1.6.c Perméabilité à l'eau.....	77
1.6.d perméabilité aux gaz .....	77
<b>Conclusion</b> .....	<b>79</b>
<b>CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS</b> .....	<b>80</b>
2.1. Introduction.....	81
2.2. Caractéristiques des matériaux .....	81
2.2.1. Le ciment .....	81
2.2.2. Le sable .....	81
2.2.3 Les granulats .....	82
2.2.3.1 Granulats classiques :.....	82
2.2.3.2 Granulats légers : .....	84
2.2.4. Eau de gâchage .....	86



2.2.5. Les adjuvants .....	86
2.2.6 Les appareillages utilisés dans les essais de caractérisations des granulats légers .....	87
2.3. Formulation du mortier autoplaçant .....	88
2.3.1. Essais sur MAP à l'état frais .....	89
2.3.1. a. Essai d'étalement au Mini-Cône.....	89
2.3.1. b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test).....	90
2.3.2. Essais sur le BAP à l'état frais.....	91
2.3.2. a. Essai d'étalement (Slump flow test) .....	91
2.3.2. b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) : .....	92
2.3.2. c. Essai de la boîte en L .....	93
2.3.2. d. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage .....	94
2.3.2. e. Essai rhéologiques : .....	95
2.3.2. f. Essai J-Ring : .....	98
2.3.2. j. Essai Air occlus : .....	98
2.4 Méthodes de composition des BAPL.....	99
2.4.1 Propriétés à l'état frais des BAPL.....	100
Conclusion générale.....	101
Références Bibliographiques : .....	103

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Le béton est l'un des matériaux de construction le plus utilisé dans le monde. Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée et sable), de ciment et d'eau. Il est très demandé et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir

En pratique, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m<sup>3</sup>, en conséquence, le poids propre des éléments de béton est élevé et peut représenter un fort pourcentage de la charge sur la structure. L'utilisation d'un béton de masse volumique plus faible peut donc être bénéfique en termes d'éléments portants de sections plus petites et de la réduction correspondante en fondations. Occasionnellement l'utilisation d'un béton de masse volumique plus faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante, ainsi avec ces faibles densités les coffrages subissent une pression moindre qu'avec un béton de densité normale.

Lors de la dernière décennie de nombreuses innovations ont révolutionné les constructions en béton, parmi lesquelles, Les bétons légers, ceux dont la masse volumique à l'état sec est inférieure à 1800 kg/m<sup>3</sup>, son utilisation dans le génie civil depuis le début du 20ème siècle, dans les pays européens (France, Allemagne), d'Amérique (USA) et d'Asie (Japon et ex URSS). L'utilisation de ces bétons ne cesse de se multiplier à cause des avantages que présente ce produit surtout sur le plan économique et technique. Ces bétons normalement réalisés par trois procédures, en employant les agrégats légers, l'aération ou le gaz, ou en réduisant la partie fine du granulat. Dans chacun des trois cas la réduction de la densité du béton est réalisée par une augmentation des vides d'air dans le béton.

Pour améliorer ce type du béton, nous devons considérer deux éléments très importants, les concepts liés à la formulation des bétons légers et l'utilisation de granulats légers. D'autre part, il devient de plus en plus intéressant d'évaluer le potentiel des matériaux légers comme source de matières première.

Les caractéristiques mécaniques des bétons de granulats légers basés beaucoup plus sur les propriétés et proportions de granulats présents dans la formulation. En particulier, de

par leur forte porosité, les granulats légers sont plus déformables que la matrice cimentaire et leur influence sur la résistance du béton est complexe.

En Algérie, il existe une seule usine de granulats légers industriels à base d'argile expansée. L'usine est située à Bouinane (Wilaya de Blida). Elle fabrique des granulats légers de différentes dimension et granulométrie. En raison de la méconnaissance des caractéristiques des granulats légers et des avantages qu'elles offerts, ces granulats sont peu utilisés. Les granulats légers peuvent être utilisés dans les bétons structurels comme les dalles et les éléments structuraux pour alléger le poids de la structure mais aussi dans des applications non structurelles comme les hourdis, l'enduit de ciment et les panneaux de façade pour l'isolation thermique.

Dans ce mémoire, Le chapitre 1 se compose de deux parties, Dans la première partie du chapitre 1, on présente l'unité de fabrication de granulats d'argile expansée située à Bouinane.

Dans la deuxième partie de chapitre I on présente une synthèse bibliographique sur les granulats légers, leurs caractéristiques et le béton léger et sa performance à l'état frais et durci. Un résumé sur le béton autoplaçant à base de granulats ordinaires est donné ainsi que la performance de béton à base de granulats légers.

Dans le chapitre 2, les matériaux été essais de l'étude expérimentale préliminaire sont présentés.

Enfin, des conclusions générales te des recommandations pour des futur travaux sont données.

**CHAPITRE I : PARTIE 01**  
**PRESENTAYION DE L'ENTREPRISE D'ARGILE**  
**EXPANSEE « ALGEXPAN »**

## CHAPITRE I : PARTIE 01

### PRESENTAYION DE L'ENTREPRISE D'ARGILE EXPANSEE « ALGEXPAN »

#### 1) Présentation de l'usine « ALGEXPAN »

**ALGEXPAN** est le seul fabricant de granulats d'argile expansée en ALGERIE et détenteur de l'unique gisement d'argile à propriétés d'expansion sur le territoire. L'usine est implantée à Bouinan (Blida) (Figure 1.1). Le granulat est une harmonie de résistance et de légèreté. ALGEXPAN transforme l'argile en pierre poreuse et résistante par un traitement thermique sans additifs. ALGEXPAN extrait 1 m<sup>3</sup> d'argile de la nature pour fabriquer 2 à 3 m<sup>3</sup> de matériaux de construction. Le produit est à 100 % Algérien. La capacité de production est de 600 m<sup>3</sup> par jour.



**Figure 1.1** : Photo du site et logo de l'usine de l'argile expansée « ALGEXPAN ».

#### 2) Procédures de fabrication de l'argile expansée

Auparavant, on a déjà connu que l'argile expansée appartient à la famille des matériaux céramiques. Alors, leur fabrication inclut dans l'industrie de céramique, et comme tout genre de céramisation des produits argileux comme les tuileries et les briqueteries, la fabrication de l'argile expansée aussi suit cinq (5) grandes étapes:

### 2.1) L'extraction de l'argile et le stockage :

L'extraction se fait dans le lieu où on trouve le gisement (l'argile et schiste) en quantité abondante, ces argiles sont ainsi acheminées vers le lieu de stockage en utilisant les différents moyens de transport (Figure 1.2).



**Figure 1.2 :** Extraction de gisement

### 2.2) Le concassage, le broyage et le malaxage :

A ce stade, on diminue la taille du granulat jusqu'à (0.1 ; 0.2 mm), on obtient une farine crue à l'aide des différentes machines comme le concasseur, le broyeur. Après, on ajoute l'eau afin d'obtenir une pâte très homogène.

### 2.3) Le façonnage :

Dans cette étape, on va donner la forme du produit qu'on voudrait obtenir. Alors, on utilise des moules spéciales en donnant leur forme arrondie dont le diamètre varie entre 10 à 20 mm, S'il n'y en a pas, on fera un petit modelage à main à condition que son diamètre soit obtenu.

### 2.4) La cuisson :

A cette étape, la bille d'argile crue subit 2 phases bien séparées de cuisson :

**La première phase :** C'est la phase de préchauffage, on met les billes d'argile crue au four rotatif à 400°C. Cette étape passe nécessairement par la phase de durcissement de l'argile expansée. En effet, elle y prend sa propriété plastique qui est déjà perdue lors de

malaxage. En outre, la quantité de l'eau restant dans ce matériau est suffisamment importante pour assurer leur dureté.

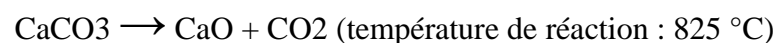
**La deuxième phase :** De plus, cette cuisson se fait dans un four rotatif dont la température tends vers 1200°C pendant (1h30) afin d'obtenir une bille d'argile expansée. Il vaut mieux aussi utiliser un four rotatif pour équilibrer et répartir la cuisson dans toutes leurs surfaces.



**Figure 1.3 :** Le four rotatif.

**Figure 1.3 :** le four rotatif

Dans cette étape, il y a une augmentation de volume des grains qui constituent ce matériau et on a diminution des vides. Le matériau devient compact. Ensuite, on a aussi vitrification des surfaces extérieures de ce matériau due à la cristallisation des silices et des alumines vers ses températures de vitrification. On a donc présence des différents dégagements gazeux qui sont piégés à cause de la formation de la structure vitreuse sur leur surface, Les différentes réactions sont explicitées par les équations :





### 2.5) Refroidissement et criblage :

La période de refroidissement se fait à l'air libre, Cette période suit directement la phase d'expansion de l'argile. Elle empêche ce matériau ainsi obtenu de fondre. On a donc durcissement total de ce matériau qui améliore la propriété mécanique.

**Criblage :** Après refroidissement, les billes d'argile expansée sont tamisées et criblées à l'aide d'une série des tamis, pour obtenir quatre classe de granulats :

- Classe 0/3 (sable nodulaire).
- Classe 3/8 (petit gravier nodulaire).
- Classe 8/15 (gravier nodulaire).
- Classe 15/25 (grand gravier nodulaire).



**Figure 1.4 :** les différentes fractions d'argile expansée.

On obtient un produit léger, dur, à texture cellulaire très marquée dont la masse volumique réelle varie de 750 à 1 200 kg/m<sup>3</sup>. Après criblage ou éventuellement concassage, les nodules ont, suivant leurs granularités, des masses volumiques apparentes comprises pour la plupart entre 300 et 1 000 kg/m<sup>3</sup>.

### 3) Le granulat d'argile expansée

La structure poreuse du granulat et l'écorce céramique qui l'enveloppe lui confèrent la légèreté et la dureté atteignant une résistance élevée à la compression. La surface poreuse et rugueuse du granulat lui permet d'avoir une excellente cohésion avec les liants hydrauliques.

- La masse volumique varie entre 350 à 800 kg/m<sup>3</sup>.
- La densité des particules entre 900 à 1700 kg/m<sup>3</sup>.
- La résistance à la compression jusqu'à 12 MPa.
- Le granulats est incombustible Euro classe A1.

#### 4) Domaine d'application

- Renforcement réhabilitation.
- Rattrapage de niveau.
- Pont thermiques de façade.
- Plancher technique.
- Plancher à grande surcharge.
- Remplissage des voutes.
- Isolation et drainage des parois enterrées
- Forme de pente.

#### 5) Avantages de l'argile expansée

- Bon isolant acoustique
- Bon isolant thermique
- Totalement incombustible, elle n'émet aucune substance en cas d'incendie
- Très bonne durabilité
- Imputrescible, elle ne craint pas les attaques de rongeurs, champignons ou insectes, ni les produits corrosifs
- Perméable à la vapeur, elle résiste à l'eau, mais doit sécher pour retrouver ses propriétés thermiques
- Ne se dégrade pas dans le temps
- Indéformable
- Ne se brise pas en cas de gel.
- Naturelle et écologique

**CHAPITRE I : PARTIE 02**

**REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PROPRIETES ET  
CARACTERISTIQUES DES BETONS LEGERS ET  
GRANULATS LEGERS**

## CHAPITRE I : PARTIE 02

### REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : PROPRIETES ET CARACTERISTIQUES DES BETONS LEGERS ET GRANULATS LEGERS

#### 1.1 Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique sur les bétons légers et les granulats légers, ainsi les facteurs qui influencent sur les performances des bétons légers à l'état frais et durci.

#### 1.2. Bétons légers

Le béton léger ou béton allégé est un béton du ciment avec une masse volumique à sec inférieure à celle d'un béton normal, ce béton a une densité inférieure à  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Une des techniques d'allègement des structures en béton consiste à remplacer totalement ou partiellement les granulats de masse volumique normale par des granulats légers. Les granulats légers sont des granulats poreux présentant une structure interne alvéolée, dont ils tiennent leur légèreté. Cette structure interne est obtenue soit de façon naturelle soit de façon artificielle par l'application d'un traitement thermique. Cette structure particulière est à l'origine des propriétés thermiques et acoustiques dont bénéficient les bétons incorporant des granulats légers [1].

Ces bétons à des fins d'isolation et d'allègement ou les deux à la fois, ils peuvent également être utilisés pour des éléments porteurs à condition que l'on possède les granulats permettant d'atteindre les résistances voulues. Donc les bétons légers de construction affectés par leurs masses volumiques et ces résistances variées. Bien utilisés, ces deux facteurs permettent d'apporter dans tous les domaines de la construction des solutions optimisées sur les plans constructif et économique ainsi qu'au niveau de la physique du bâtiment. Ils permettent ainsi d'avancer vers de nouveaux horizons de la construction [2].

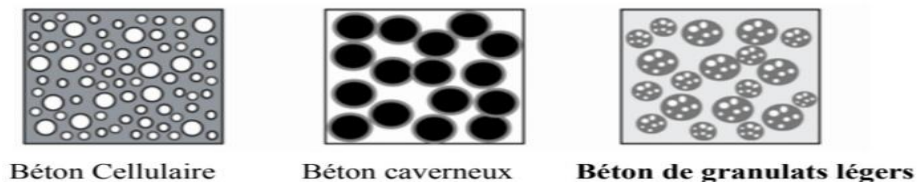
Enfin, le béton léger se caractérise principalement par sa faible masse volumique, adaptable aux exigences, par son excellent rapport (poids/résistance) et par sa bonne isolation thermique, sa résistance à la chaleur et au feu, sa résistance au gel ainsi que par son insensibilité générale aux agressions physiques et chimiques traditionnelles dans le domaine de la construction [2].

Pour développer un béton léger, on doit prendre en considération deux aspects :

- 1) les particularités en matière de formulation des bétons légers,
- 2) la source des constituants spécifiques (granulats légers) à la confection des bétons légers dont les matériaux légers (naturels, artificiels et recyclés).

Ces deux aspects sont reliés avec la masse volumique qui diminue en remplaçant une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits:

- dans les granulats ;
- dans la pâte de ciment ;
- Ou entre les gros granulats par élimination de granulats fins. Ceci produit trois types de dénominations pour ces bétons soient :
  - ✓ Les bétons cellulaires ;
  - ✓ Les bétons sans fines (caverneux) ;
  - ✓ Les bétons de granulats légers (argile expansé, le schiste expansé et la pierre ponce ...etc.).



**Figure 1.5** : Représentation schématique des différents types de bétons légers [3].

### 1.2.1. Le béton cellulaire

Le béton cellulaire est issu de longues recherches, entamées il y a plus de 150 ans. A cette époque, (Zernikov) a étudié des mortiers à base de chaux vive et de sable portés à haute température [4].

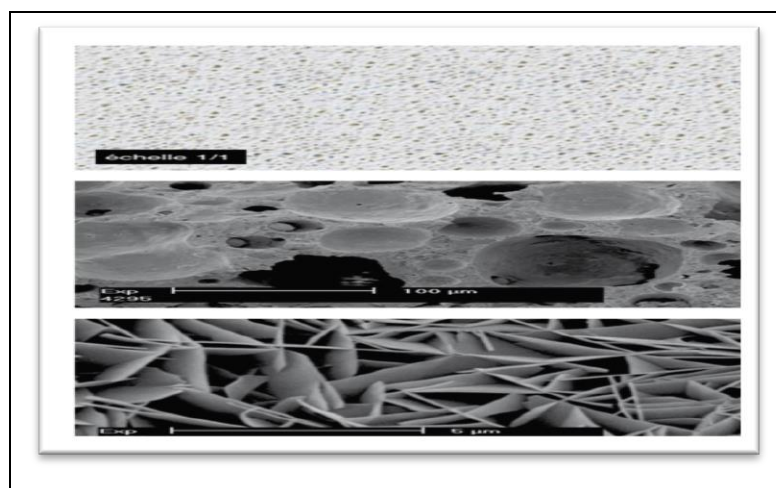
Les bétons cellulaires sont en général des mortiers remplis de petites bulles d'air. Ces mortiers sont des mélanges de sables (granulats à base de silice ou légers) et de ciment Portland. Les bulles sont créées à l'intérieur de la pâte grâce aux agents moussants qui sont utilisés dans le béton pour produire un volume d'air important. On cite parmi ces agents, la poudre d'aluminium ou le gâchage avec de l'eau savonneuse. La poudre

d'aluminium réagit chimiquement avec le ciment et l'eau lors du malaxage pour donner, d'une part, un sel et, d'autre part, de l'hydrogène qui compose ainsi les petites bulles. Ces processus demandent une grande précision et des calculs de dosage précis [4].

**Tableau 1.1:** Propriétés comparées des bétons cellulaires [2]

Masse volumique sèche	Résistance en compression	Résistance en flexion	Module d'élasticité	Conductivité thermique
kg/m <sup>3</sup>	MPa	MPa	GPa	Jm/m <sup>2</sup> s°C
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.00	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20

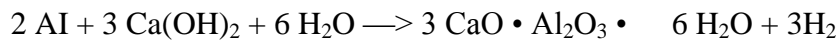
Les résistances et le module d'élasticité augmentent en fonction de l'augmentation de la masse volumique du béton (Tableau 1.1). En conséquence, il est possible d'obtenir une masse volumique souhaitée pour une résistance spécifique. Il est à noter que la résistance en flexion peut être améliorée par l'ajout d'armature ou de microfibrilles, celles-ci reprennent les efforts de flexion, et aide à contrôler la microfissuration lors de l'application d'une charge [2].



**Figure 1.6 :** Béton cellulaire [5].

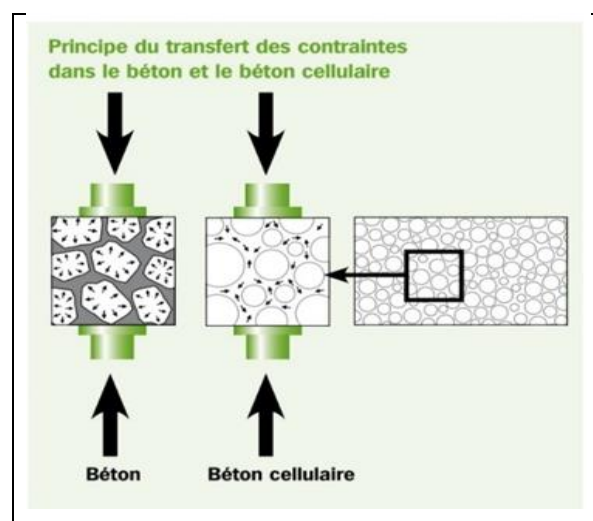
Les matières premières nécessaires à la fabrication du béton cellulaire sont le sable blanc très pur (95% de silice), la chaux, le ciment, la poudre d'aluminium et l'eau.

FeBeCel (La Fédération belge de Béton Cellulaire) [5], a noté qu'il s'agit uniquement de matières minérales présentes en abondance dans la nature. En présence d'eau, la chaux réagit avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite). La chaux et ciment servent de liants. La poudre d'aluminium extrêmement fine (env. 50  $\mu\text{m}$ ) ; utilisée en très faible quantité (+/- 0,05%), sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer les cellules. En milieu alcalin, la poudre d'aluminium réagit comme suit :



C'est l'hydrogène libéré qui a créé les cellules. En cours de durcissement de la pâte, l'hydrogène se libère et les cellules se remplissent d'air [5].

Le béton léger « cellulaire » ou « aéré » s'avère être le béton le plus susceptible de remplir les objectifs du système de plancher projeté. Le béton cellulaire est un matériau moulable, malléable, léger, durable et relativement résistant. Ce sont toutes des propriétés qui rendent les bétons légers excellents pour l'habitation à faible coût. Le béton cellulaire non traité à l'autoclave, nécessite peu d'outillage spécialisé et peut être assemblé sans trop de machinerie [3]. Les bétons cellulaires ont généralement une masse volumique et une résistance à la compression extrêmement faibles. L'utilisation la plus courante des bétons cellulaires se limite au béton de remplissage dans des murs, plafonds, planchers ou comme matériaux de remblai [2].

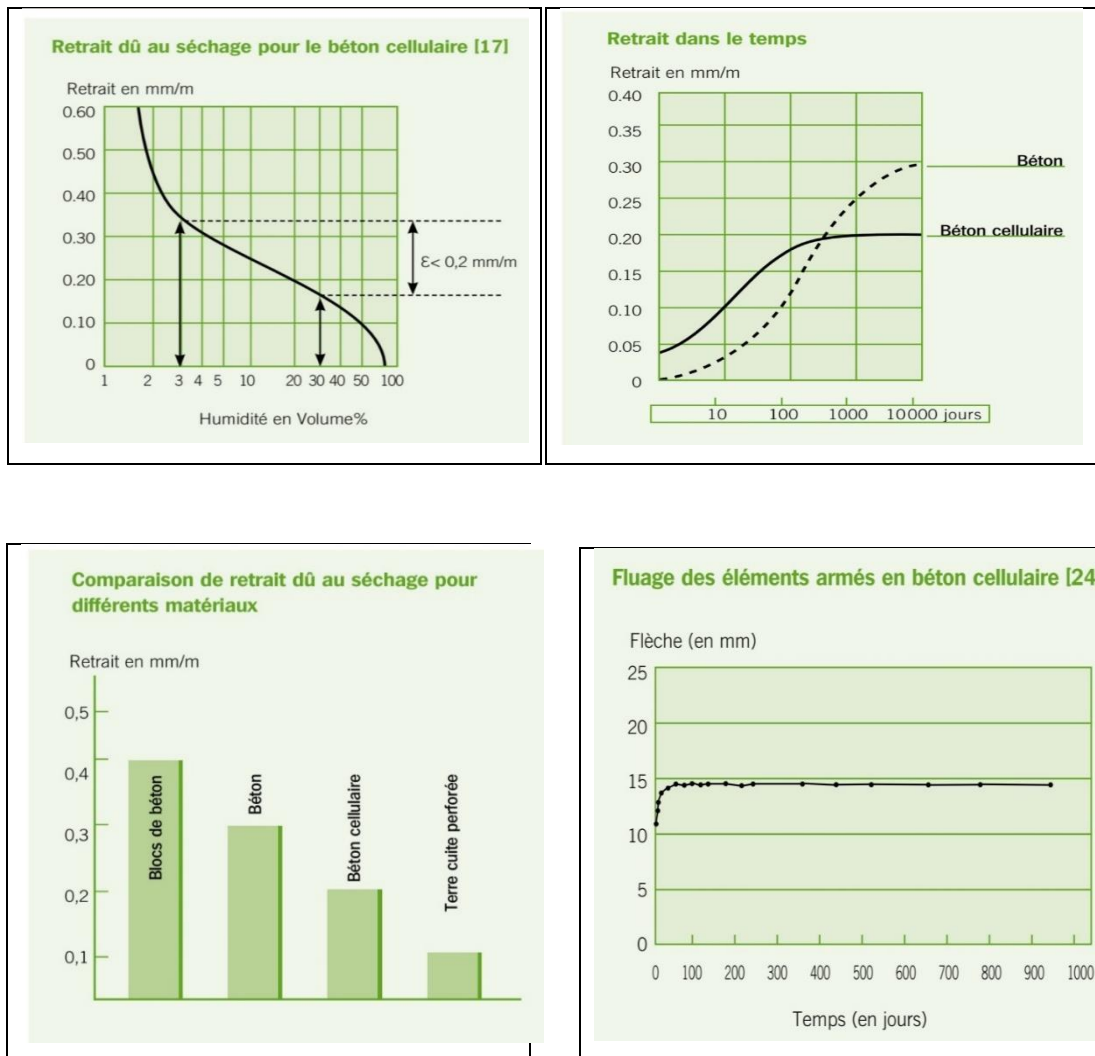


**Figure 1.7:** Principe du transfert des contraintes [5].

Les produits en béton cellulaire sont généralement des blocs de grandes dimensions : 6,6 à 8 blocs par  $\text{m}^2$  et des blocs de super format : 2 blocs par  $\text{m}^2$  ou des blocs et



linteaux en forme de U pour réalisation de poutres de ceinture, linteaux de grande longueur, linteaux à surcharge plus importante que celle admise par les linteaux standards et linteaux porteurs et non-porteurs. Ils peuvent être aussi des éléments armés sous forme de dalle de bardage : (pose horizontale ou vertical), dalles de cloison (hauteur d'étage), dalles de toiture et dalles de plancher. Un exemple de performance du béton cellulaire à l'état durci dans le cas de retrait et de fluage est donné par la figure 1.8 [5] :



**Figure 1.8 :** Performances du béton cellulaire à l'état durci [5].

### 1.2.2. Béton caverneux

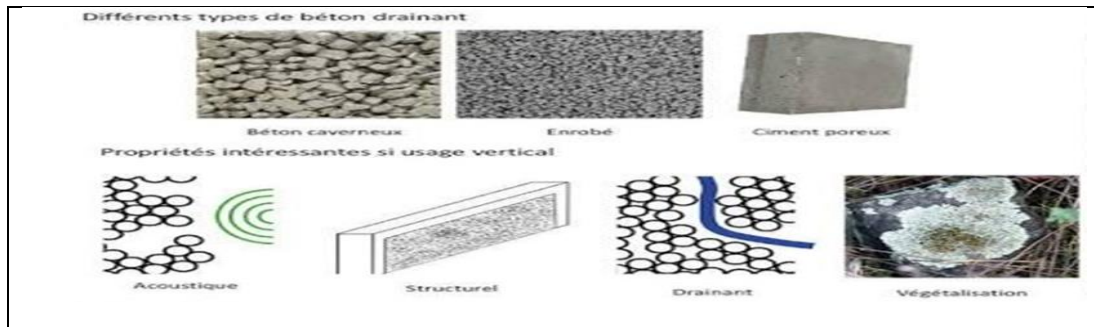
Les bétons caverneux sont obtenus en supprimant la totalité ou une partie du sable dans le béton. Un béton ne contenant pas de sable produit une agglomération de gros granulats dont les particules sont recouvertes par un film de pâte de ciment d'une



épaisseur de 1 à 3 mm, Cette substitution crée à l'intérieur du béton de larges cavités (pores), responsables de la diminution de la masse volumique et de la baisse de résistance à la compression [2]. Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Ces bétons ont donc une porosité élevée ; ils sont drainants. Ils sont fabriqués avec un minimum d'eau pour éviter le lavage de la pâte de ciment sur les granulats [3].

Le béton caverneux est un des types de béton léger obtenu quand on ne met pas de granulats fins dans le mélange. Ce béton ne contient que du ciment, de l'eau et de gros granulats. Il existe donc de gros vides au sein de la masse qui sont responsables de sa faible résistance. Toutefois la minuscule dimension de ces vides empêche tout mouvement capillaire de l'eau. La masse volumique du béton caverneux dépend de sa granulométrie [6].

La résistance en compression du béton caverneux est généralement comprise entre 1.5 et 14 MPa. On note une augmentation de la résistance avec l'âge semblable à celle des bétons de densité normale. Malhotra [6], a montré que la résistance en flexion est habituellement égale à 30 % de la résistance en compression, c'est-à-dire supérieure à celle du béton ordinaire. Le retrait du béton caverneux est considérablement plus faible que celui d'un béton de densité normale. Ce béton est très résistant au gel. Sa forte absorption d'eau le rend cependant inutilisable dans les fondations et dans les situations où il peut se saturer en eau [6]. Leur utilisation n'est généralement pas associée à la recherche de la légèreté du produit, mais bien d'avantage pour les particularités économiques occasionnées par la faible teneur en ciment. On les utilise principalement dans la confection de murs porteurs de bâtiments domestiques et dans les panneaux de remplissage de cadres de structure. Ainsi pour des ouvrages requérant des propriétés drainantes, tels les puits de captage des eaux de ruissellement, confection des éléments architecturaux [2].

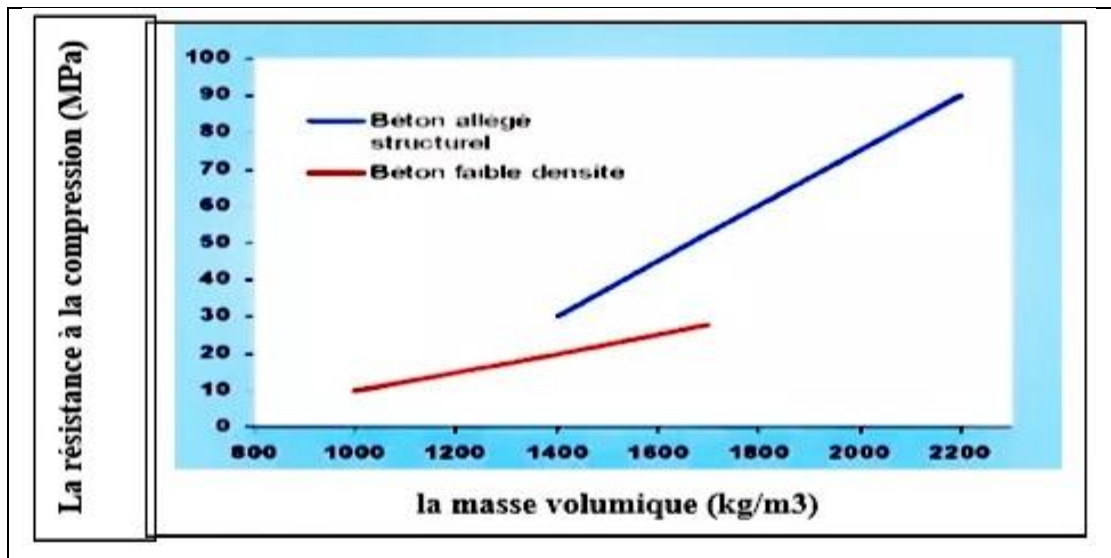


**Figure 1.9:** Différents types de béton caverneux [2].

### 1.2.3 Les bétons de granulats légers

Le béton de granulat léger (BGL) n'est pas une nouvelle invention en technologie de béton. On l'a connu depuis des périodes antiques, ainsi il est possible de trouver un bon nombre de références en liaison avec l'utilisation de BGL. Il a été fait en utilisant les agrégats normaux d'origine volcanique tels que : les pouzzolanes, les granulats de diatomite, les granulats de perlite et de vermiculite, l'argile expansée, le schiste expansé, les cendres volantes frittées, les granulats de laitiers bouletés expansés ; les granulats de verre expansé ; la pierre ponce....etc. [7].

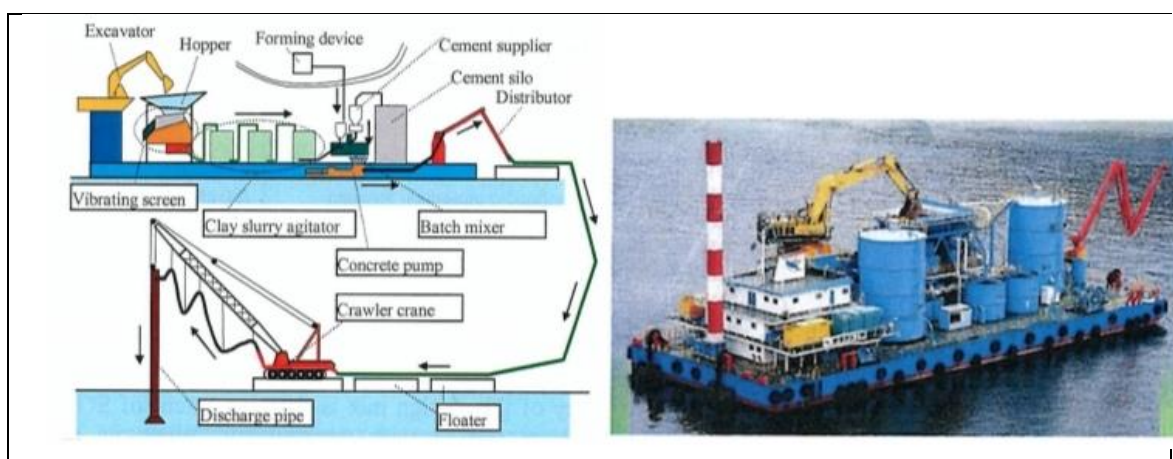
Les bétons de granulats légers sont utilisés dans le domaine du bâtiment et des ouvrages d'art. Ils sont utilisés notamment pour alléger les éléments tels que les poutres, les poteaux, les planchers, les tabliers de ponts etc. Les bétons de granulats légers sont également connus pour améliorer l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments ou l'absorption acoustique des écrans acoustiques protégeant les riverains des nuisances sonores. Ils sont utilisés dans les structures préfabriquées ou réalisées sur chantier. Les bétons légers pour les produits de structure présentent des masses volumiques réelles sèches comprises entre 1200 et 2000 kg/m<sup>3</sup> et des résistances à la compression comprises entre 25 et 80 MPa [8].



**Figure 1.10 :** Classe de résistance des bétons de granulats légers en fonction de la masse volumique [62].

#### 1.2.4 Les bétons de mousse à base de sédiments

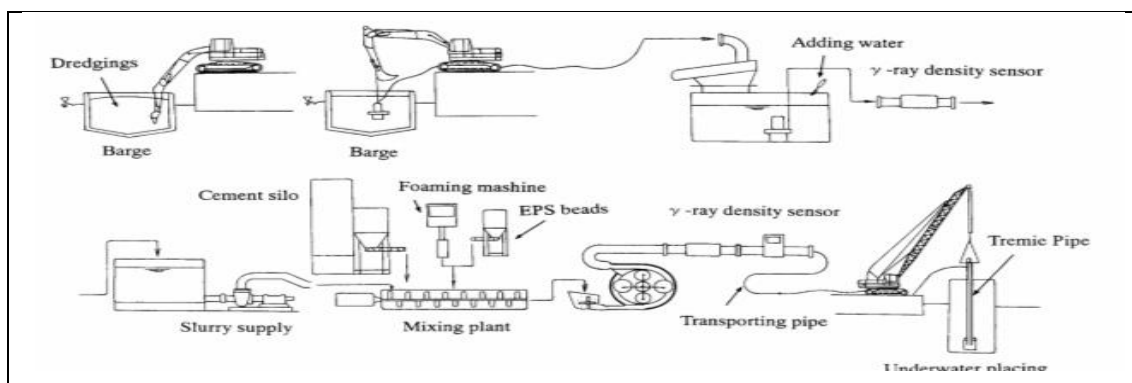
Le béton de mousse incorporant des sédiments issus du dragage a été l'objet de plusieurs travaux de recherches principalement menés au Japon, en Thaïlande et en Corée du Sud. Il a été appliqué dans plus de 30 projets ce qui représente plus de 300 000m<sup>3</sup> de béton (Miki H, 2005) [9].



**Figure 1.11 :** Schéma (gauche) et photographie (droite) du système de fabrication et de mise en œuvre du béton de mousse sur le vaisseau Ryuling [10]

Il a été utilisé pour construire le revêtement du tunnel de Yume-Shima qui relie l'île de Yume-Shima et Saki-Shima dans la baie d'Osaka (Tanaka Y, 2008) [10] (Horpibulsuk,)

[11]. Dans ce projet l'utilisation d'un matériau allégé a pour but de réduire la charge appliquée sur le tunnel. Le béton est fabriqué et mis en œuvre de manière continue grâce au vaisseau RyuJin (Figure 1-12). Le procédé de mise en œuvre coule directement le béton dans l'eau. Sa capacité de production est deux fois plus importante que pour un processus de fabrication à terre. Sa cadence est de  $360\text{m}^3/\text{h}$ . Le volume de béton produit pour ce projet est de  $68\,000\text{m}^3$  (Tanaka Y.) [10]. Les sédiments utilisés présentent une limite de liquidité de 90,7% et sont constitués de 45% d'argile. La densité et la résistance mécanique visée correspondent respectivement à 1,12 et 0,6 MPa. Le béton de mousse à base de sédiments marins a également été mis en application en tant que matériau de remplissage dans le port de Kumamoto au Japon (Sato T.) [12]. L'utilisation d'un tel matériau permet de réduire la poussée de la structure sur le sol ainsi que de recycler les sédiments dragués dans le port. Le processus de fabrication a lieu directement sur le site du dragage (Figure 1-12) [12].



**Figure 1.12 :** Etapes du dragage à la mise en place du matériau dans le port de Kumamoto [12].

Les sédiments utilisés dans le cadre de ce projet présentent une limite de liquidité de 63,8%. La densité et la résistance mécanique visées correspondent respectivement à 1,1 et 0,2 MPa. [12]

### 1.2.5 La densité à l'état frais

La porosité des granulats légers est à l'origine des phénomènes de transfert d'eau de la pâte vers les granulats légers et vice versa. Selon la teneur en eau initiale des granulats légers, leur incorporation dans le béton peut engendrer à l'état frais et à l'état durci des

mouvements d'eau. Les travaux expérimentaux portent donc logiquement sur des granulats d'argile expansée et d'ardoise expansée comme le suggère la Figure 1.13 [13].

L'incorporation des bulles d'air de la mousse à la matrice cimentaire est partielle. Cette incorporation partielle induit un écart entre la densité visée et celle réellement obtenue. Il est donc primordial d'évaluer les différents facteurs pouvant impacter l'éclatement des bulles d'air de la mousse lors de son incorporation dans la matrice cimentaire. Ces facteurs peuvent être de nature différente : L'énergie d'incorporation qui dépend de plusieurs paramètres [12] :

- Vitesse de malaxage (fixée par le protocole de fabrication),
- Fluidité du mélange intermédiaire qui peut être influencée par :
  - Les paramètres de formulation,
  - Le temps de prise du ciment,
  - Des interactions chimiques avec les composés présents dans les sédiments issus du dragage ou bien l'eau de mer,
  - La granulométrie du sol. Par rapport à l'application envisagée (remplissage entre deux rideaux de palplanches), la densité à l'état frais doit être comprise entre 1,1 et 1,3 (supérieure à 1 pour que le matériau puisse être coulé en dessous du niveau de l'eau) [12].

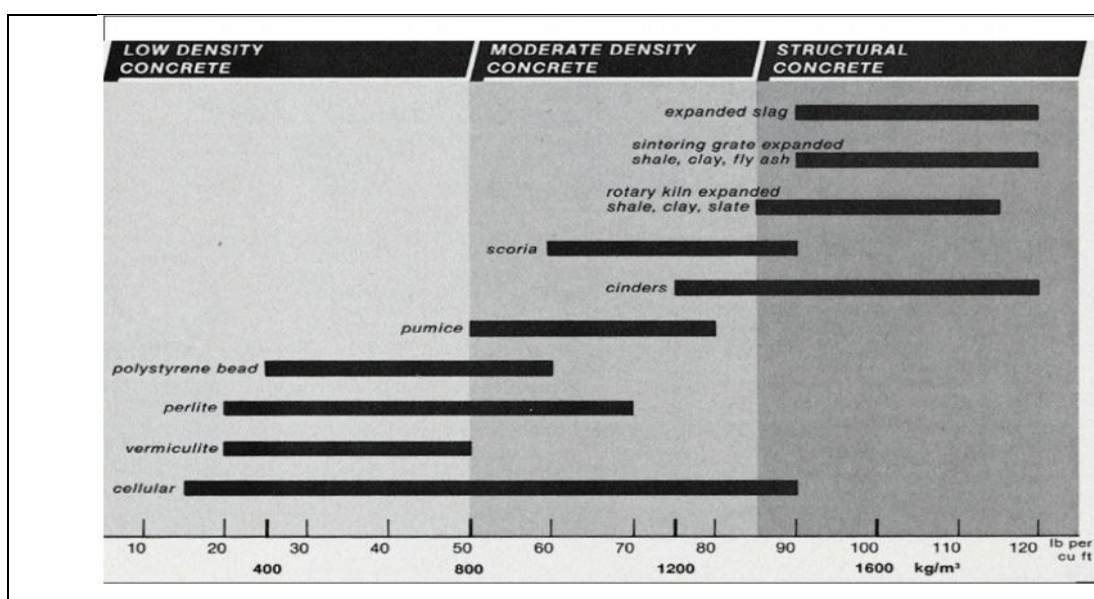
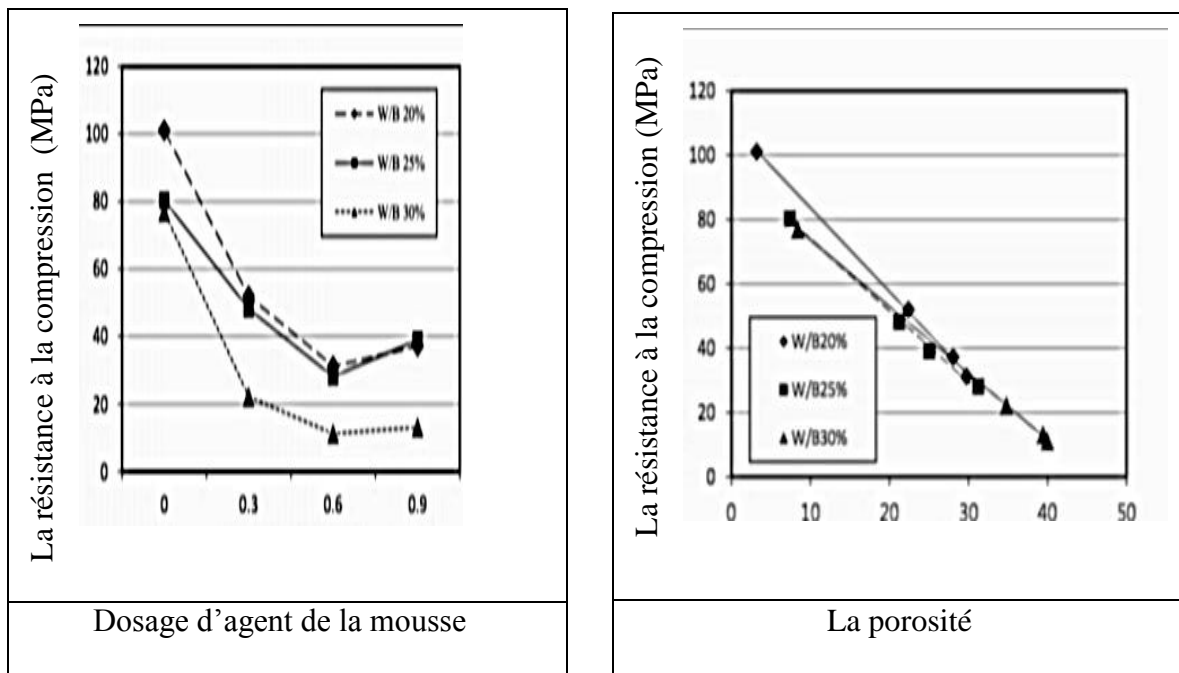


Figure 1.13 : Gamme de masses volumiques réelles sèches des bétons légers avec différents types de granulats légers [13].

### 1.2.6 Propriétés mécaniques

Des essais mécaniques en compression (sur des éprouvettes d'élancement 2 de dimension  $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$  à 28 jours de cure) menés dans le cadre des travaux de [5] indiquent un abaissement de la résistance mécanique avec l'ajout de mousse (Figure 1-14 gauche). Cet abaissement est directement lié à l'augmentation de la porosité avec l'ajout de la mousse. Il a été souligné que quelques soient les paramètres de formulation de la matrice cimentaire, la résistance mécanique dépend uniquement de la porosité du matériau (Figure 1-14) [14].



**Figure 1.14 :** Résistance mécanique en fonction du pourcentage de mousse (gauche) et en fonction de la porosité (droite) [14].

### 1.2.7 Malaxage

Le granulat léger est normalement dosé de manière gravimétrique. Pour cela, la teneur en eau et la masse volumique en vrac doivent être surveillées régulièrement et prises en considération lors du dosage. L'introduction dans le malaxeur peut être optimisée en pré-mélangeant le granulat léger avec 2/3 de l'eau de gâchage et en ajoutant ensuite le ciment et le reste de l'eau. A ce moment, seuls les adjuvants liquides sont dosés afin qu'ils ne puissent pas être absorbés par le granulat et perdre leur effet. La durée de malaxage minimale recommandée pour un béton léger compact est de 90 secondes après l'adjonction de tous les composants [15].

## 1.3 Propriétés d'un béton à base de granulats légers

### 1.3.1 Granulats légers

Les granulats représentent à peu près 70% du volume total d'un béton. Leurs caractéristiques ont alors une influence significative sur celles des bétons: soit ils influent directement sur une propriété particulière du béton, soit sur le rapport E/C nécessaire pour obtenir la maniabilité voulue. Et donc, leur granulométrie, forme, texture, densité, absorption, résistance mécanique, résistance à l'abrasion, réactivité, propriété thermique et leur résistance au gel sont autant de caractéristiques qui influent directement sur la formulation du béton [2].

Les granulats légers sont des matériaux poreux. Avant de présenter ces matériaux, nous allons définir deux grandeurs qui caractérisent leur légèreté : la masse volumique en vrac et la masse volumique réelle. La masse volumique en vrac désigne le rapport de la masse de granulat léger sec pour remplir de façon aléatoire un récipient sur le volume du récipient. La masse volumique réelle exprime le rapport d'une masse donnée de granulat léger sec sur le volume qu'elle occupe dans l'eau.

Selon la norme NF EN 206-1/CN [10], les granulats utilisés dans le domaine de la construction peuvent être subdivisés en trois catégories [16] :

- Le granulat léger : granulat d'origine minérale ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle inférieure ou égale à  $2\,000\text{ kg/m}^3$  ;
- Le granulat courant : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle comprise entre  $2\,000$  et  $3\,000\text{ kg/m}^3$  ;
- Le granulat lourd : granulat minéral et granulaire ayant après séchage à l'étuve, une masse volumique réelle supérieure ou égale à  $3\,000\text{ kg/m}^3$ .

Dans le cadre de notre étude, il s'agit de béton à granulats légers, d'où nous allons nous limiter à ce type de granulats. Il existe deux familles de granulats légers :

- Le granulat léger naturel qui ne subit aucune transformation autre que mécanique. C'est par exemple le granulat de pierre ponce, de diatomite de tufs volcaniques etc.
- Le granulat léger artificiel résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autre. C'est par exemple le granulat d'argile expansée, de schiste expansé, de cendre volante frittée etc. [16].

### 1.3.2 Formulation des bétons légers

A l'exception des granulats légers, les constituants et les méthodes de formulation utilisées sont les mêmes que pour les bétons de granulats rigides. Une attention particulière doit cependant être portée à la densité apparente et à l'absorption des granulats.

L'étude de la formulation d'un béton consiste à définir la composition optimale des granulats et le dosage en ciment et en eau, de façon à atteindre les propriétés du béton recherchées (Dreux, 1990). Dans l'ensemble, le processus de formulation comprend les étapes suivantes [2] :

- 1) définir la nature de l'ouvrage,
- 2) établir les propriétés du béton en fonction de la nature de l'ouvrage,
- 3) établir le dosage des constituants permettant ainsi d'atteindre les propriétés recherchées.

#### 1) La nature de l'ouvrage

La formulation du béton est tributaire de la nature de l'ouvrage. A ce titre, il convient de distinguer deux grandes familles de béton léger :

- le béton léger structural,
- le béton léger architectural.

On présente de façon sommaire les distinctions entre ces deux familles [2].

#### 2) Propriétés des bétons légers

La description des propriétés des bétons sera davantage axée sur les éléments suivants :



- la faible masse volumique ;
- la durabilité ;
- la rhéologie à l'état frais ;
- les propriétés mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité, etc.) [2].

### 3) le dosage

Le dosage est consisté essentiellement à déterminer la proportion des constituants de manière à produire le béton répondant aux qualités du béton recherchées. Cependant, ce dosage n'est pas aléatoire puisque l'obtention des qualités recherchées repose sur des principes (qualité de la pâte, type de granulat, rhéologie, etc.). Une fois ces principes établis, on peut identifier la méthode de dosage qui correspond le mieux aux matériaux utilisés et aux conditions d'application [2].

#### 3.1) Le principe de dosage

On peut, a priori, admettre que le béton est constitué essentiellement de deux phases : la pâte de ciment hydraté et les granulats [2]. Les propriétés du béton varient essentiellement en fonction des matériaux utilisés et de leur dosage. Les principes de dosage font référence à quatre principaux facteurs [2] :

- la qualité de la pâte de ciment hydraté,
- la qualité des granulats,
- la rhéologie recherchée,
- les propriétés mécaniques.

#### 3) Utilisation d'ajout cimentaire dans la composition du béton léger

Le béton léger est un mélange. Il est possible d'y intégrer des adjuvants et autres matériaux pour changer et améliorer certaines de ses caractéristiques [6]. Il est possible d'ajouter de la fumée de silice dans la formulation du béton léger pour améliorer ses résistances mécaniques. La fumée de silice est un ajout cimentaire qui réagit avec le ciment et l'eau du béton (action pouzzolanique) et comble les vides interstitiels entre les granulats du béton. Les cendres volantes, les poudres de silice et les autres matériaux contenant de la silice peuvent être utilisés comme agents pouzzolaniques au ciment [18].

### 1.3.3. Procédés de fabrication des granulats légers

Les granulats légers sont les moins utilisés des granulats et ce, partout dans les différents pays du monde. Ils se présentent sous la forme d'une structure poreuse (structure alvéolée) d'où leur légèreté (masse volumique réelle inférieure à  $2000 \text{ kg/m}^3$ ). Ils permettent une économie d'énergie par la réduction de la conductivité thermique mais aussi l'allègement de certains éléments de construction. Cette réduction en poids conduit à une diminution des sections des éléments structurels assurant la transmission des charges et conduit à des économies de transport des éléments manufacturés et à des gains de productivité à la mise en œuvre soit naturelles, soit artificielles, tenant compte des traitements qu'elles ont subis. C'est ainsi en considérant principalement des caractéristiques des produits finis, on distingue quatre types de granulats légers :

- Granulats légers naturels : ponce ou pouzzolane, matériaux volcaniques naturels de structures très poreuses ;
- Granulats légers ayant subi un traitement thermique : granulat d'argile, de schiste, d'ardoise, de perlite expansée ou de vermiculites exfoliées ;
- Les granulats légers de matériaux artificiels : le mâchefer, sous-produit de la combustion de charbon ou des ordures ménagères. Ce matériau est en très nette régression et on l'utilise que pour la fabrication de parpaings ;
- Les granulats légers de matériaux artificiels ayant subi des traitements spéciaux : granulats de nombreux déchets industriels comme le laitier de haut fourneau que l'on peut expanser, les cendres volantes que l'on peut fritter, le verre que l'on peut également expanser.

Enfin, nous pouvons les regrouper en deux grandes familles à savoir les granulats légers naturels et les granulats légers artificiels [8].

#### a) Granulats légers naturels

Les granulats légers naturels sont des granulats d'origine minérale issus de la transformation mécanique de roches naturellement alvéolées. Ils proviennent pour la plupart de roche d'origine volcanique ou sédimentaire présentant une structure interne alvéolée. Ils sont obtenus à l'issue de diverses transformations mécaniques. Le dynamitage de la roche va donner de gros blocs. Ces gros blocs sont ensuite concassés et criblés pour donner différentes tailles de grains [16].

### b) Granulats légers artificiels

Les granulats légers artificiels sont des granulats d'origine minérale dont l'expansion nécessite un traitement thermique préalable pour donner la structure alvéolée qui caractérise les granulats légers. En général, les méthodes d'expansion utilisées pour la fabrication des granulats sont à haute température (entre 1100 et 1500 °C). Il existe différents procédés qui dépendent de la matière première utilisée, du mode de préparation et du système de cuisson. Il s'agit entre autre du procédé par four rotatif, four à grille pour le frittage, lit fluidisé et autoclave.

Un procédé utilisant une ligne de micro-ondes est apparu récemment ([www.idco-france.com/](http://www.idco-france.com/)) [29]. Les fours équipés de brûleur sont remplacés par des fours alimentés aux micro-ondes (magnétons) pour l'expansion et la cuisson des granulats légers. Les différents procédés sont fondés sur les mêmes principes et visent la formation de grains avant la cuisson et l'élimination lente de l'eau de façonnage pour éviter l'éclatement des grains. La valorisation des sédiments, des co-produits et des déchets industriels ouvre la voie à la production des granulats légers à partir des résidus tels que les boues de décantation et de dragage [16]. L'échauffement rapide en fin de cuisson afin que la surface des grains puisse devenir étanche. La phase essentielle de l'expansion dépend de la synchronisation parfaite entre la phase du grésage prononcé et les dégagements de gaz. Des gaz provoquant l'expansion, nous notons la présence de CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub> mais aussi de (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, et H<sub>2</sub>O).

Toutefois, les composés dont les rôles sont les mieux connus et les plus importants sont le carbone, le soufre et l'oxyde ferrique. Les deux premiers ont une action de combustible et le troisième apporte l'oxygène nécessaire à la combustion [4]. La Figure 1.15 illustre les différentes phases du processus de fabrication d'un granulats léger à partir de boue issue d'un bassin de décantation [16].



**Figure 1.15 :** Processus de fabrication de granulat léger à partir de boue issue de réservoir de décantation [19].

### b.1) 2Expansion des granulats légers

#### a) Description du phénomène

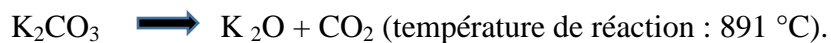
L'expansion caractérise l'augmentation de volume d'un matériau expansible sous l'effet d'un traitement thermique [20]. L'expansion est influencée par plusieurs facteurs tels que la composition chimique de la matière première, la température de cuisson et la taille des granules. Elle repose sur le phénomène d'alvéolage (qui consiste à créer un réseau d'alvéoles au sein du matériau) et nécessite la concomitance de deux actions :

- Le développement du caractère pyroclastique qui rend le matériau déformable ;
  - Les dégagements gazeux à la température de grésage qui déforment le matériau.
- La phase essentielle de l'expansion réside dans la synchronisation parfaite, dans une plage de température donnée, du développement du grésage et des dégagements gazeux.

Les travaux concernant la nature des gaz provoquant l'expansion font état de la présence non seulement de ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ) mais aussi de ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$  et de  $\text{H}_2\text{O}$ ) [21].

Toutefois, les composés dont les rôles sont les mieux connus et les plus importants sont le carbone, le soufre et l'oxyde ferrique. Les deux premiers ont une action de

combustible et la troisième joue le rôle de comburant en apportant l'oxygène nécessaire à la combustion. Dans le cas de l'argile expansée, la matière première est constituée de composés organiques et minéraux. Au cours de la phase de préchauffage, le craquage thermique des matières organiques (telles que l'amidon, la cellulose, les glucides ou encore les acides gras) conduit à la libération du carbone. Le carbone ainsi libéré va se fixer sur les particules argileuses. La décarbonatation des composés minéraux notamment des carbonates, produit des oxydes fondants dans une plage température comprise entre 300 et 900 °C. Ces oxydes contribuent pour la plupart à élargir le palier de fusion. Les différentes réactions sont explicitées par les équations ci-après :



A partir de 900 °C, les oxydes métalliques notamment les oxydes ferriques (de couleur rouge) présents dans les argiles ferrugineuses sont réduits par oxydoréduction en présence du carbone. Cette réaction produit des oxydes ferreux (de couleur noir) suivi d'un dégagement de monoxyde de carbone comme l'indique la réaction ci-après :



Par ailleurs, la présence de sulfure de fer (III) plutôt instable va se dissocier en soufre et en sulfure de fer (II). L'oxydation du sulfure de fer (II) produit de l'oxyde ferreux avec un dégagement de dioxyde de soufre comme l'indiquent les équations ci-dessous :



D'autres gaz tels que le diazote jouent un rôle « source » dans le processus d'expansion. Concomitamment, à la température d'expansion entre 1 100 et 1 300 °C, les silicates et les oxydes de fer formés sont portés à fusion et donnent un bain silicaté de viscosité finie qui encapsule les différents gaz produits. Le refroidissement brutal fige la matière dans son état et donne in fine des grains parcourus par un réseau d'alvéoles qui confère aux grains leur légèreté [21].

#### b) Indice d'expansion

L'indice d'expansion est un paramètre adimensionnel qui caractérise l'aptitude à l'expansion de la matière première utilisée pour la fabrication des granulats légers. L'indice d'expansion d'un matériau peut s'exprimer la relation suivante [22]:

$$I_g = \frac{\rho_{int}}{\rho_{exp}} \dots\dots\dots(1)$$

***I<sub>g</sub>***: Indice d'expansion

***P<sub>int</sub>*** : C'est la masse volumique réelle des granulats avant l'expansion.

***P<sub>exp</sub>***: Masse volumique réelle des granules après expansion.

L'indice d'expansion peut varier entre 1,1 et 5,5 (c'est-à-dire que le volume final des granulats peut varier entre 1,1 et 5,5 fois le volume initial) selon la nature de l'argile, la taille initiale des granulats et la température de cuisson. L'indice d'expansion est autour de 1,67 pour l'ardoise expansée et peut atteindre 30 pour la vermiculite par exemple [22].

#### 1.4. Historique de granulats légers

Historiquement, l'ingénieur Hayde Stephen est le premier à fabriquer des granulats légers par l'application d'un traitement thermique sur un matériau expansible [23]. Il déposa un brevet en 1918 pour la technique d'expansion de l'argile, de l'ardoise et du schiste à partir d'un four rotatif. C'est le début de la production et de la commercialisation des granulats légers artificiels. En France, l'intérêt pour les granulats légers artificiels s'est développé au début des années 1970 avec l'implantation de la première usine en 1964 à Watten dans le nord [19]. Les granulats légers sont aujourd'hui présents dans différents domaines tels que le bâtiment (béton préfabriqué et béton prêt à l'emploi), les travaux publics (remblai), l'horticulture (grainage de jardin), du traitement des eaux (filtre ou lit bactérien). Certains sont peu résistants voire fiables tandis que d'autres sont résistants et durs.

Il faut noter que l'utilisation des granulats légers date de l'époque romaine ou plusieurs édifices comme le Panthéon et le Colisée de Rome sont réalisés en partie en béton léger. Par exemple, le dôme du panthéon d'une portée d'environ 43 mètres a été réalisé avec des matériaux de densités variables dont un contenant de la pierre ponce [23].

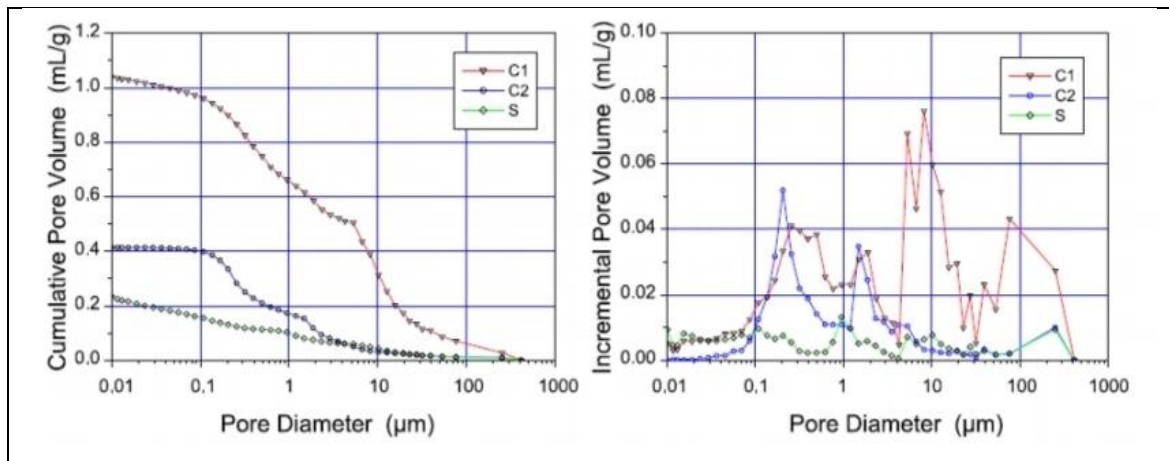
### 1.4.1 Propriétés physiques des granulats légers

#### 1.4.1.1 Caractéristiques géométriques

Concernant la forme de ses grains, il peut y avoir certains qui sont régulières et d'autres irrégulières avec des formes sphériques. Du point de vue granulométrique, ceux régulières donnent généralement les meilleurs résultats. En effet leur variation modifie l'uniformité du béton. La forme et la texture d'un granulat influencent davantage la rhéologie à l'état frais d'un béton fraîchement malaxé que celle d'un béton durci. Un béton fabriqué avec des granulats dont les particules sont rugueuses, anguleuses et allongées demande plus d'eau qu'un béton fabriqué avec des granulats lisses, arrondis et compacts. Du point de vue de la rhéologie à l'état frais, les particules anguleuses nécessitent donc plus de ciment pour maintenir le même rapport eau/liant. De même, les bétons fabriqués avec des granulats anguleux ou à granulométrie très discontinue peuvent être difficiles à pomper. Par contre, l'adhérence pâte/granulat est souvent meilleure dans le cas des particules rugueuses et anguleuses comparativement aux particules lisses et arrondies. Il importe donc de tenir compte de ces aspects lors de la sélection des granulats pour un béton [24].

#### 1.4.1.2 Microstructure et porosité

Les granulats légers sont des matériaux poreux caractérisés par une porosité totale beaucoup plus importante que celle des granulats de masse volumique normale. La structure poreuse des grains est dessinée par la texture de la carapace périphérique et la distribution des pores au cœur. Les gros pores se situent au cœur dès le début de l'expansion des granulats tandis que les petits pores se retrouvent sur la carapace dont l'épaisseur est estimée entre 500 et 1 000  $\mu\text{m}$  [25]. La distribution des pores est hétérogène et le diamètre maximal d'un pore peut atteindre 7000  $\mu\text{m}$ . Malgré, les différences dans la distribution et la taille, les pores sont en général non connectés entre eux. La distribution capillaire de deux types de granulat d'argile expansée et d'un type de granulat de schiste expansé montre la variabilité de la taille des pores au sein d'un même type de granulat léger (Figure 1.16) [26].



**Figure 1.16:** Résultats d'essai d'intrusion par la méthode du prosimètre à mercure sur 3 types de granulats légers dont deux d'argile expansée (C1, C2) et un de schiste expansé (S) (Zhang et al. 2004) [26].

La porosité d'un granulat léger varie de 25 à 75% du volume apparent. Elle est proportionnelle à la taille des grains : plus la taille des grains augmente, plus ils sont poreux et la densité apparente diminue. La porosité est aussi à l'origine du phénomène de transfert d'eau de la pâte vers les granulats légers et vice versa [28]. La relation suivante permet de déterminer la porosité d'un granulat léger [28] :

$$n = v/V \quad \dots\dots\dots (2)$$

Avec :  $v$  : volume des pores

$V$  : volume total du corps des granulats.

#### 1.4.2 La densité des bétons et granulats légers

##### 1.4.2.1 Masse volumique apparente des granulats légers

La légèreté des granulats légers peut être caractérisée soit par la masse volumique en vrac ou soit par la masse volumique réelle.

- ❖ La masse volumique en vrac qui est le rapport de la masse volumique de granulats légers secs (granulats qui remplissent aléatoirement et sans compactage un contenant spécifié) sur le volume du contenant ;



- ❖ La masse volumique réelle qui est le rapport de la masse d'un échantillon de granulats légers secs sur le volume qu'il occupe dans l'eau [23].

#### a) Masse volumique en vrac

Elle peut être déterminée par la procédure NF EN 1097-3 [40]. La masse volumique en vrac intervient dans le choix du granulat léger pour un type donné de béton léger (béton isolant ou béton de structure). Pour la confection de bétons isolants on s'orienta vers des granulats légers de faible masse volumique en vrac et pour la réalisation de bétons de structure, on choisira des granulats légers de masse volumique en vrac plus élevée. Les ordres de grandeurs de masse volumique en vrac pour les principaux granulats légers sont indiqués au tableau 1.2 [23].

**Tableau 1.2 :** Masses volumiques en vrac indicatives de granulats légers [23].

<b>Nature</b>	<b>Type de transformation</b>	<b>Description</b>	<b>Masse vol. en vrac (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Masse volumique réelle sèche du béton (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Argile expansée</b>	Thermique	Expansion et cuisson de granules d'une argile grasse à plus de 1 100°C	350 à 750	800 à 1 900
<b>Schiste expansé</b>	Mécanique et thermique	Expansion et cuisson de schistes houillers à haute température autour de 900 °C	500 à 800	800 à 1 900
<b>Ardoise expansée</b>	Mécanique et thermique	Fragment de schiste ardoisier expansé à une température de 1 130 °C	500 à 1 000	800 à 1 900

<b>Pierre ponce</b>	Mécanique	Les pierres ponces proviennent du refroidissement de lave volcanique en éruption à des températures de 500 à 600 °C	560 à 1 300	800 à 1 800
<b>Cendre volantes frittée</b>	Thermique	Expansion et cuisson à 1 250 °C de granules de cendres volantes obtenues par formage	600 à 1 100	1 100 à 1 900
<b>Laitier expansé</b>	Thermique	Laitier de fonderie en fusion mis en contact avec l'eau	600 à 1 100	1 100 à 1 900
<b>Pouzzolane</b>	Mécanique	Roche volcanique naturelle	650 à 1 000	1 100 à 1 900
<b>Polystyrène expansé</b>	Thermique	Ramollissement sous chaleur de granulés de polystyrène provoquant leur expansion	10 à 20	300 à 1 200

#### b) Masse volumique réelle

Elle exprime le rapport de la masse d'un échantillon de granulats légers secs sur le volume qu'il occupe dans l'eau. Elle peut être déterminée selon la norme NF EN 1097-6 [27]. La masse volumique réelle est un paramètre prééminent dans le processus de détermination des proportions des constituants granulaires entrant dans la composition du béton. Tout comme la masse volumique en vrac qui intervient dans le choix du granulat léger, la masse volumique réelle intervient dans la détermination des proportions des constituants granulaires entrant dans la composition du béton [23]. La corrélation entre la masse volumique en vrac ( $MV_{\text{vrac}}$ ) et la masse volumique réelle ( $MV_{\text{réelle}}$ ) peut s'établir par la relation suivante :

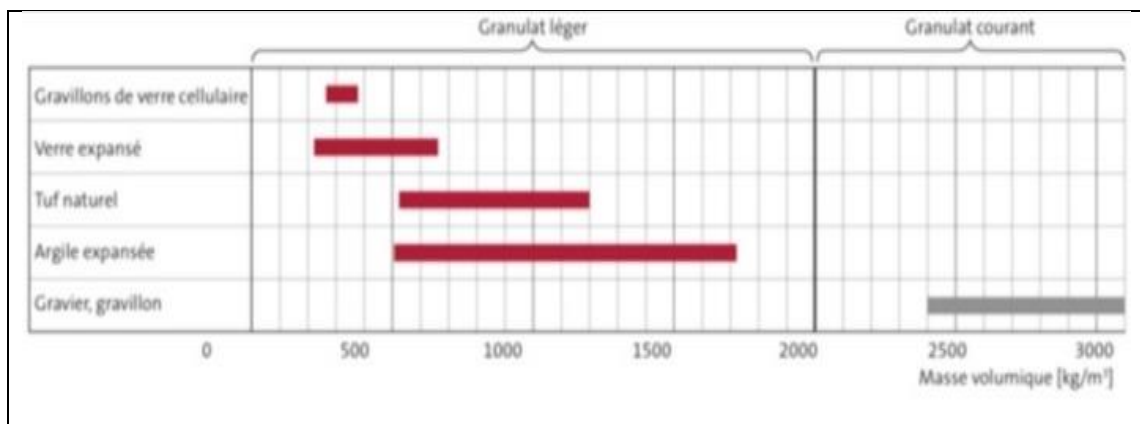
$$MV_{réelle} = 7/4 MV_{vrac} \dots\dots\dots(3)$$

Il est à noter que cette relation permet en bonne approximation, d'estimer la masse volumique réelle des granulats légers utilisés dans les bétons légers de structure dont le coefficient d'absorption d'eau n'excède pas 15 % [23].

### C) Masse volumique des bétons

La masse volumique du béton représente l'une des caractéristiques les plus importantes dans le 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 [29].

La figure 1.17 résume les masses volumiques de béton léger à base de différents granulats. Le tableau 1.3 donne des exemples de formulations d'un béton léger de différentes classes de masse volumique



**Figure 1.17:** Domaines de masse volumique de granulats légers et courants [30].

**Tableau 1.3** : Exemples de formulations d'un béton léger de différentes classes de masse volumique ainsi que quelques propriétés sélectionnées [30]

Composant		Masse volumique [kg/dm <sup>3</sup> ]	Béton léger classe de masse volumique D1.0		Béton léger classe de masse volumique D1.2		Béton léger classe de masse volumique D1.8	
			Teneur [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [l/m <sup>3</sup> ]	Teneur [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [l/m <sup>3</sup> ]	Teneur [kg/m <sup>3</sup> ]	Volume [l/m <sup>3</sup> ]
Ciment	CEM II/B-M(T-LL) (Optimo 4)	3.03	400		350		350	
Addition	cendre volante	2.24	200					
Granulat courant	sable 0/4	2.68			840		840	
Granulat léger	argile expansée		350		240		481	
Eau		1.00	210		185		175	
Teneur en air				200		70		50
Adjuvant	fluidifiant, entraîneur d'air, agent moussant		selon besoin					
Masse volumique et volume du béton frais			1160	1000	1616	1000	1846	1000
Propriétés de béton durci sélectionnées: résistance à la compression [N/mm <sup>2</sup> ]			10		24		45	
Module d'élasticité [N/mm <sup>2</sup> ]			6000		15 000		20 000	

#### 1.4.3 Absorption d'eau des granulats légers

C'est une caractéristique très importante des granulats légers puisqu'elle influe directement sur la formulation du béton. L'absorption est déterminée numériquement par un coefficient (coefficient d'absorption) qui permet de déterminer la capacité d'absorption d'un granulat. Le degré d'absorption d'un granulat varie généralement de 0,2 à 2%. Les méthodes d'estimation du coefficient d'absorption se font en présence d'eau. Nous notons trois de ces méthodes dont celle [31] :

- Du pycnomètre ; est décrite dans la norme NF EN 1097-6 [27].
- Basée sur la saturation sous vide ; NF EN 1097-6 [27]
- Basée sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre. (Kasemchaisiri et Tangtermsirikul) ont proposé une approche qui consiste à éliminer progressivement l'eau libre par gravitation en mode statique ou en mode dynamique selon le dispositif présenté à la Figure 1.19. Tout comme la porosité qui est proportionnelle à la taille, les propriétés de l'absorption sont déterminées par celle-ci aussi, ainsi que par la distribution des pores.

##### a) Méthode du pycnomètre (NF EN 1097-6 [27])

La méthode du pycnomètre est décrite dans la norme NF EN 1097-6 [27]. Elle consiste à immerger une prise d'essai préalablement séchée dans un pycnomètre rempli d'eau afin de mesurer l'augmentation de masse de l'échantillon du fait de la pénétration d'eau dans les pores accessibles à l'eau. Le coefficient d'absorption après 24 heures d'immersion dans l'eau est calculé à partir de la relation suivante :

$$W_{A24} = [(M_{SSS} - M_{Sec}) / (M_{Sec})] * 100 \dots\dots\dots(4)$$

**Avec :**  $M_{SSS}$  masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air

$M_{Sec}$  masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air

#### b) Méthode basée sur la saturation sous vide

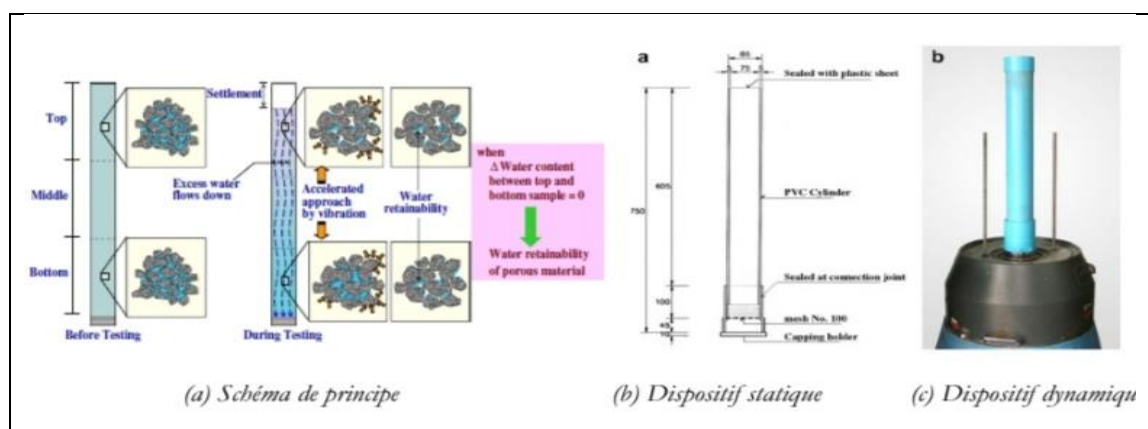
Un appareillage (Figure 1.18) adapté à la mesure sous vide de la masse volumique réelle et l'absorption d'eau des gravillons naturels, artificiels et recyclés. L'objectif est de réduire l'échéance des 24 heures préconisée dans la norme de référence en l'occurrence la norme NF EN 1097-6 [27] pour caractériser l'absorption d'eau des granulats. L'idée est d'établir une corrélation entre le coefficient d'absorption dans les conditions atmosphériques à 24 heures et le coefficient d'absorption sous vide à 10, 20 et 30 minutes [32]. Le principe consiste à maintenir le pycnomètre sous vide lors de l'essai d'absorption en appliquant une pression constante de 4 kPa respectivement pendant 10, 20 et 30 minutes. Les résultats ont montré que le coefficient d'absorption sous vide à 10 minutes est équivalent au coefficient d'absorption à pression atmosphérique selon le mode opératoire décrit par la norme suscitée.



**Figure 1.18 :** Appareillage de mesure de l'absorption d'eau sous vide (Mills-Beale et al. 2009) [32].

### c-) Méthode basée sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre

L'état saturé sec en surface (SSS) est requis pour la détermination du coefficient d'absorption des granulats. Dans le cas des granulats poreux, il est difficile d'atteindre cet état par les méthodes usuelles en raison de la friction développée entre les grains. La difficulté de la mesure est donc palpable pour les sables légers, recyclés ou encore pour les granulats recevant un traitement minéralisant. (Kasemchaisiri et Tangtermsirikul 2007) [33], ont proposé une approche qui consiste à éliminer progressivement l'eau libre par gravitation en mode statique ou en mode dynamique selon le dispositif présenté à la Figure 1.19 [33].



**Figure 1.19** : Dispositif de l'essai d'absorption basé sur le déplacement gravitationnel de l'eau libre (Kasemchaisiri et Tangtermsirikul) [33].

L'essai consiste à suivre l'évolution de la différence de masse entre l'échantillon en partie supérieure et l'échantillon en partie inférieure. La différence de masse s'annule lorsque l'eau libre est entièrement éliminée des deux échantillons. Cet état proche de l'état saturé sec en surface permet d'estimer la teneur en eau de l'échantillon non saturé en partie supérieure par l'expression :

$$W_i = [(B-A)/A] * 100 \dots\dots\dots (5)$$

Avec : **W<sub>i</sub>** : teneur du l'échantillon ;

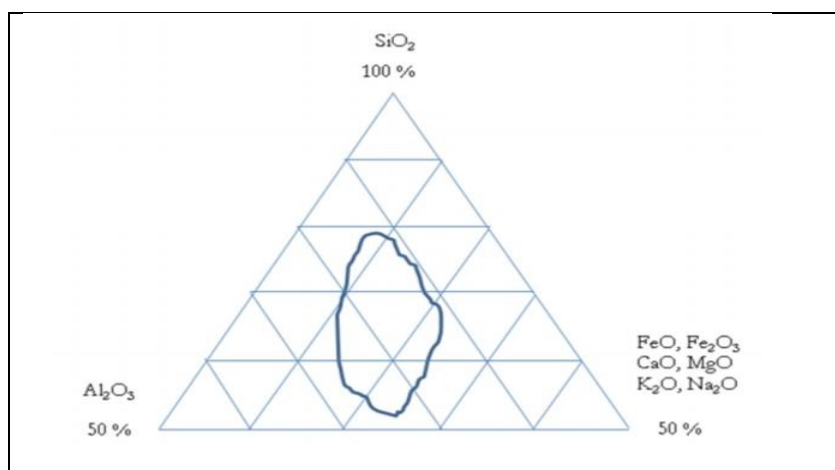
**B** : masse de l'échantillon non saturé en partie supérieure ;

**A** : masse de l'échantillon en partie supérieure après séchage à masse constante à l'étuve à  $105 \pm 5$  °C.

Le mode dynamique permet d'accélérer l'élimination de l'eau libre par centrifugation.

#### 1.4.4 Composition chimique des granulats légers

Les granulats légers sont issus de matières premières et donc leur composition chimique dépend de ces dernières. Dans leur nature chimique, on note la présence de silice, d'alumine, de chaux, d'oxydes métalliques et d'alcalins [4]. D'après les travaux de (Riley 1950) [34], la composition chimique des argiles expansibles appartient au domaine délimité sur le diagramme ternaire à la Figure 1.20 et tableau 1.4.



**Figure 1.20:** Diagramme de Riley pour la composition limite des argiles expansibles sous traitement thermique (Riley 1950) [34].

**Tableau 1.4 :** Compositions chimiques de quelques granulats légers [16].

Producteurs	Type de granulats	Proportions de Composés chimiques (%)												
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	FeO	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	S
Argex	Argile expansée	55-65	15-19	12-16	1-3	1-2	0,15-0,25	-	-	-	1,5-3,5	0,3-0,7	0,8-1	0,7-1,3
Liapor	Argile expansée	55	24	14	5	-	-	-	-	-	2	2	-	-
Granulex-GEM	Ardoise expansée	63	21	8,5	0,5	1	-	-	-	-	3,6	1,5	-	-
Liaver	Verre expansé	72,5	1,5	0,3	8,8	2,1	-	0,1	-	0,044	0,7	13,7	0,06	-
Euro Pomice	Pierre ponce	62,5	17,5	2,6	2,5	0,4	-	-	-	-	9,5	2,2	0,5	-

### 1.4.5 Propriétés mécaniques des granulats légers

Il est difficile de déterminer avec précision la résistance à l'écrasement et le module d'élasticité des granulats légers compte tenu de la variabilité qui existe entre chaque particule prise de façon isolée (porosité, densité, forme, dimension, irrégularités, etc.). Cependant, il existe plusieurs essais permettant d'approcher les performances mécaniques des grains [16].

#### 1.4.5.a Résistance à l'écrasement

Plusieurs essais permettent de caractériser la résistance à l'écrasement des granulats légers. Il s'agit entre autres de :

- l'essai d'écrasement au pot mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) (Figure 1.21) qui caractérise la résistance conventionnelle des grains. Le principe de ce essai a été repris par la norme européenne EN 13055-1 [36] pour mesurer la résistance à l'écrasement en vrac ;
- l'essai au fil mis au point par le Laboratoire de l'École des Mines de Paris (ARMINES) qui donne la résistance à la traction par fendage du grain ;
- l'essai de compression hydrostatique mené par le Centre Technique des Tuiles et Briques (CTTB) qui caractérise la résistance à la rupture du grain ;
- l'essai d'écrasement à la « plaque » mis au point par (Kockal et Ozturan) [35] qui donne la résistance à l'écrasement d'un grain considéré comme sphérique. La Figure 1.21 décrit l'essai. La résistance à l'écrasement du granulat est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\sigma = (2.8 * P) / (\pi * X^2) \dots\dots\dots(6)$$

Avec :

$\sigma$  : Résistance à l'écrasement

P : Charge à la rupture du grain

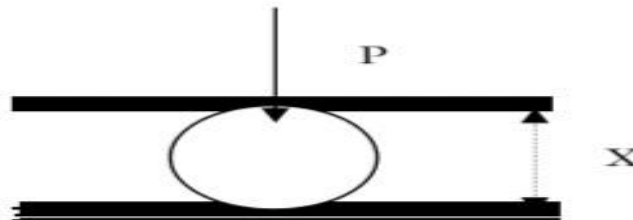
X : Diamètre du grain.

Les résistances conventionnelles des granulats légers peuvent varier de 1 à 15 MPa en moyenne et parfois plus notamment pour les granulats légers artificiels. Elles dépendent de la nature de la matière première et de la quantité de chaleur appliquée pour les granulats légers artificiels. Le tableau 1.5 ci-dessous donne la résistance à l'écrasement de quelques granulats légers.



Tableau 1.5 : Masses volumiques et résistances à l'écrasement de granulats

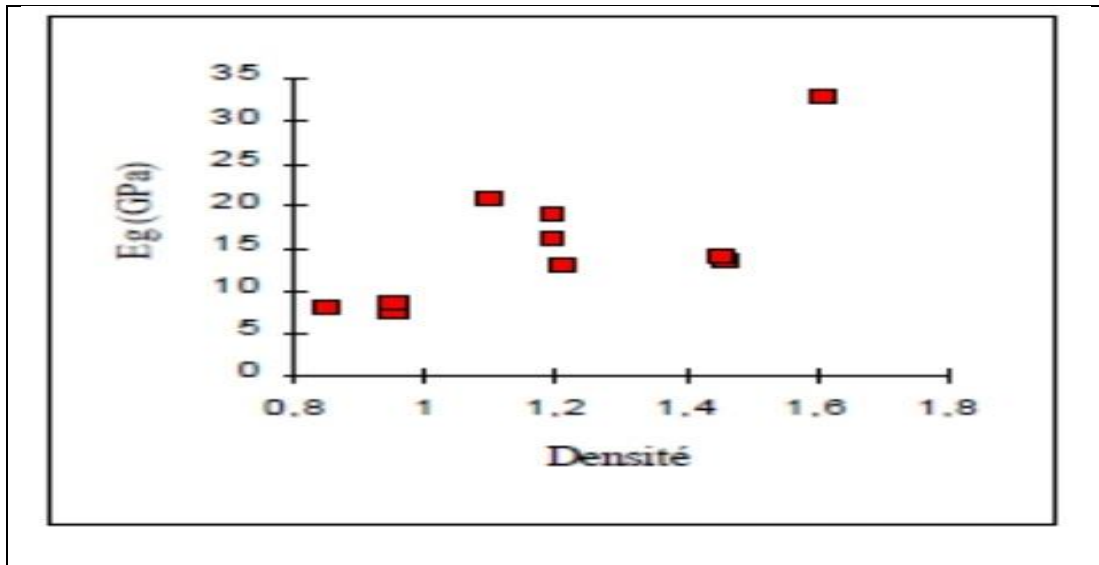
Fabricants	Type	Classe gran. (d/D)	Facteur de forme	Masse vol en vrac (kg/m <sup>3</sup> )	Masse vol. réelle (kg/m <sup>3</sup> )	Rés. écrasement (MPa)
<b>Argex</b>	Argile expansée	4/8	Concassé	552-748	1 200	6,8-11,4
	Argile expansée	4/8	Rond	650-850	1300	10-20
	Argile expansée	4/10	Rond	468-632	850	4,4-8,5



**Figure 1.21** : Description de la résistance à l'écrasement d'un grain de granulat léger (Kockal et Ozturan 2011) [35].

#### 1.4.5.b Module élastique

Le module élastique équivalent des granulats légers usuels varie entre 2 et 17 GPa tandis que pour les granulats alluvionnaires, la variation est entre 30 et 100 GPa (Rochholz) [37]. Par analyse inverse et à partir du modèle tri sphère, (De Larrard 1995) [38] établit un rapport de linéarité entre le module d'élasticité et la masse volumique réelle des granulats légers comme l'illustre la Figure 1.22.



**Figure 1.22:** Relation entre module équivalent et la masse volumique (De Larrard) [38].

Le modèle proposé par (Bremner and Holm) [39] et illustré par la figure 1.23 est le modèle communément admis pour décrire le module d'élasticité dynamique des granulats légers. Il s'exprime par la relation suivante

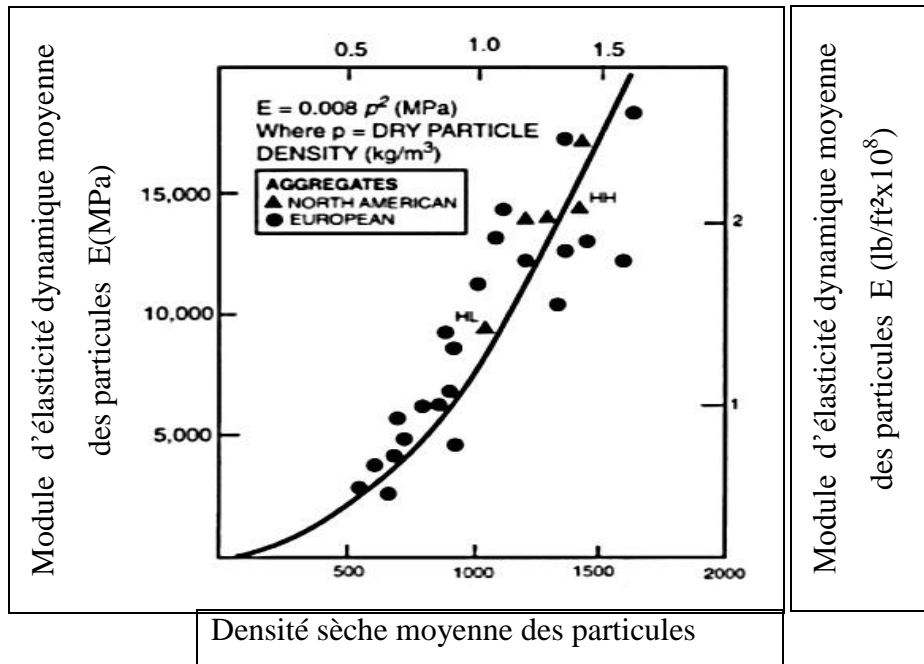
$$E_g = 0.008 \cdot P_g^2 \dots\dots\dots (7)$$

Avec :

E : Module d'élasticité dynamique (MPa)

P : Masse volumique réelle du granulat ( $\text{kg/m}^3$ )

Densité relative sèche



**Figure 1.23** : Relation entre la masse volumique réelle et le module d'élasticité dynamique de grains de granulat léger (Bremner et Holm) [39].

#### 1.4.6 Propriétés thermiques des bétons légers

La conduction thermique, est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique, est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure [42].

Les propriétés thermiques du béton, sont directement liées à celles de ses composants, matrice et granulats, ainsi qu'au degré de saturation du matériau. Les bétons légers fabriqués avec les granulats obtenus à partir de procédés à très haute température, ont un coefficient de dilatation thermique qui peut varier entre  $7$  et  $11 \times 10^6$  °C [42]. Ainsi, il existe une forte relation entre porosité et faible conductivité thermique, elle doit être nuancée en tenant compte du mode de transfert de la chaleur dit convection. Cette dernière, traduit les transferts de chaleur entre un solide immobile et un fluide en mouvement. Lorsque le matériau contient un important réseau de pores connectés, l'air

peut s'y déplacer et les transferts de chaleur par convection, peuvent devenir significatifs. En revanche, un matériau contenant un grand nombre de pores occlus comme le béton cellulaire (80%), ne présente pas de convection. Plus de la moitié de l'air est immobile dans les pores occlus et la conductivité thermique est faible.

Les propriétés thermiques des bétons légers, sont liées aussi au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant. Cette dernière est corrélée à la teneur en eau massique des bétons légers par des formules empiriques [42]. En dernier lieu, la chaleur massique est un autre élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse est de 1°C. Plus elle est élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. On peut noter que le pouvoir isolant du matériau, dépend non seulement de la conduction thermique mais également de la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps [42].

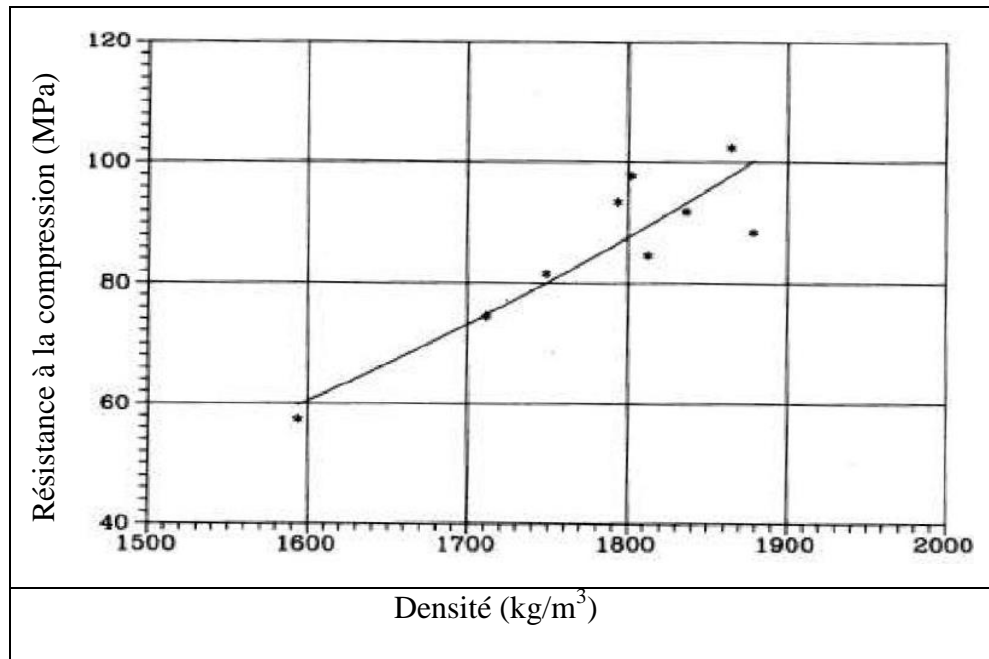
Les bétons légers, présentent également une meilleure résistance au feu que le béton traditionnel du fait de sa faible conductivité thermique (augmentation moins importante de la température dans le béton léger), de son faible coefficient de dilatation et de stabilité des granulats légers liée à leur fabrication à plus de 1100°C) [42].

#### 1.4.7 Propriétés mécaniques des bétons de granulats légers

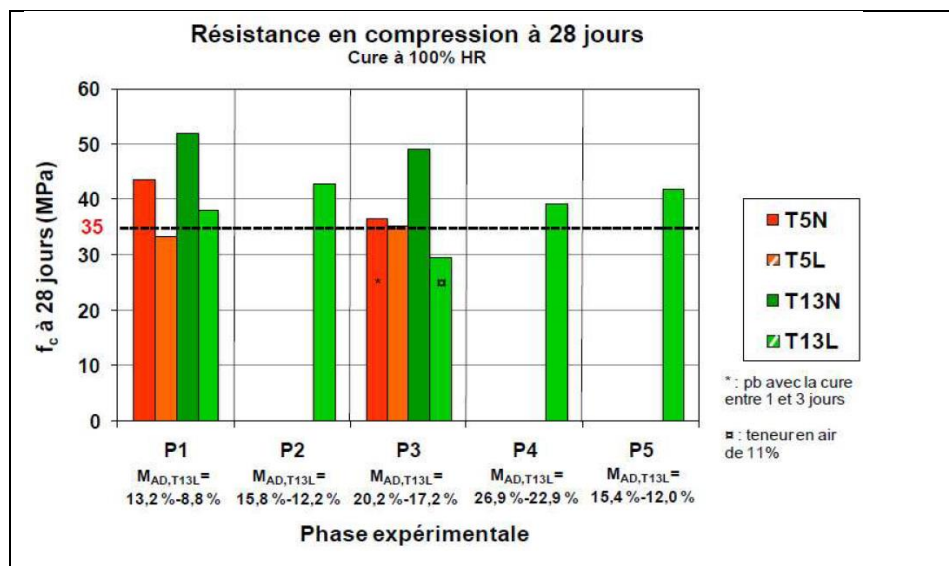
##### 1.4.7. a Résistance à la compression

Avec des granulats légers et une formulation de béton appropriée, il est possible d'obtenir des résistances à la compression comparables à celles obtenues avec du béton traditionnel. L'évolution des connaissances et des technologies du béton ont permis au fil des ans d'améliorer les propriétés des bétons, dont celles des bétons légers. Par exemple, l'utilisation d'ajouts minéraux (fumée de silice, cendres volantes, laitiers) et d'adjuvants (agents entraîneurs d'air (AEA) superplastifiant (SP), agents réducteurs d'eau (WR) et accélérateurs de prise) ont donné la possibilité notamment de diminuer le rapport E/L tout en conservant une bonne maniabilité. Des résistances en compression de 100 MPa ont même été obtenues et sont présentées (Figure 1.24) [61]. Les résultats

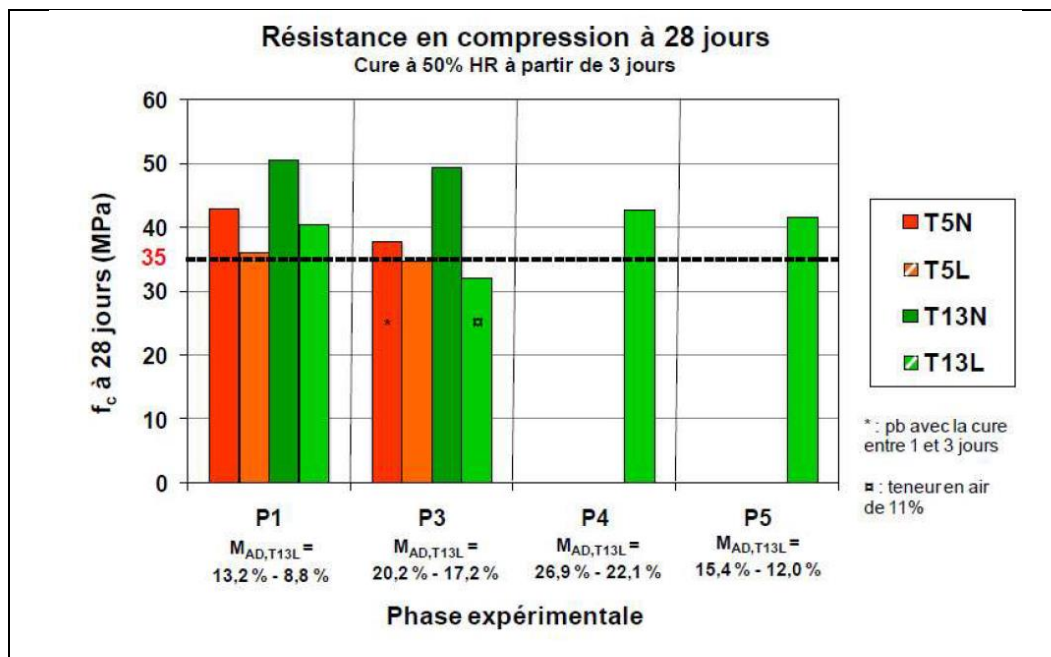
des essais de détermination de la résistance en compression à 28 jours sont présentés dans les figure (1.25) et figure (1.26) [61].



**Figure 1.24 :** Relation entre la résistance en compression à 28 jours et la densité du béton frais d'un mélange avec des granulats légers [61].



**Figure 1.25:** Résistance en compression à 28 jours avec (cure à 100% HR) [61]



**Figure 1.26:** Résistance en compression à 28 jours avec (cure à 50 % HR à partir de 3 j)  
[61]

A l'exception de ceux de la phase expérimentale P3, tous les mélanges T13L fabriqués ont une résistance en compression supérieure à la limite minimale fixée, soit 35 MPa. La particularité du mélange T13L de la phase P3 a pour origine une teneur en air trop élevée, puisqu'elle avoisine les 11 %. Un très léger surdosage de l'agent entraîneur d'air peut expliquer une telle valeur. Les mélanges T5L atteignent presque tous également la limite de 35 MPa, à l'exception du mélange de la phase P1 en cure humide dont la résistance en compression à 28 jours est de 34 MPa.

La différence entre les résistances des mélanges T5N et T13N est plus importante que celle entre les mélanges T5L et T13L : elle tourne autour de 10 MPa pour les bétons usuels contre 5 MPa pour les bétons légers. En portant une attention particulière aux mélanges T13L des phases P4 et P5, il est important de noter que la différence de résistance en compression est très faible, environ 2 MPa. Or, les teneurs en eau des GL au moment de fabriquer ces mélanges étaient respectivement de 26,9 % et de 15,4 % pour les phases P4 et P5 [61].

D'après la figure 1.27 et tableau 1.6, on constate :

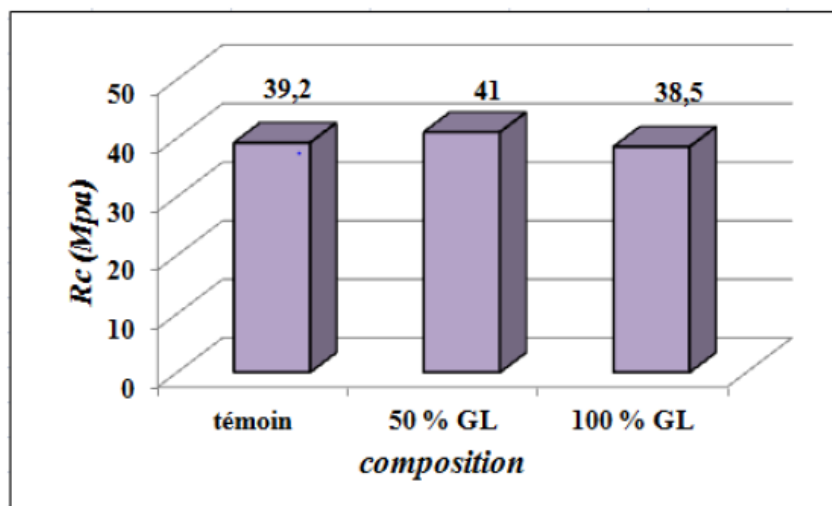
- a) 1er lieu une légère augmentation de résistance à la compression pour le béton à GL 50% qui est d'ordre de 4.39%. Cette amélioration est due probablement à la

bonne adhérence liant granulats que présentent les compositions à base de granulats légers.

- b) 2eme lieu une très légère diminution de cette résistance pour le béton à GL 100% qui est d'ordre de 1.79%. Cette légère diminution est due probablement au plus de porosité représentée cette composition par rapport au béton témoin et béton à GL50% [54].

**Tableau 1.6 : Résistance à la compression [54].**

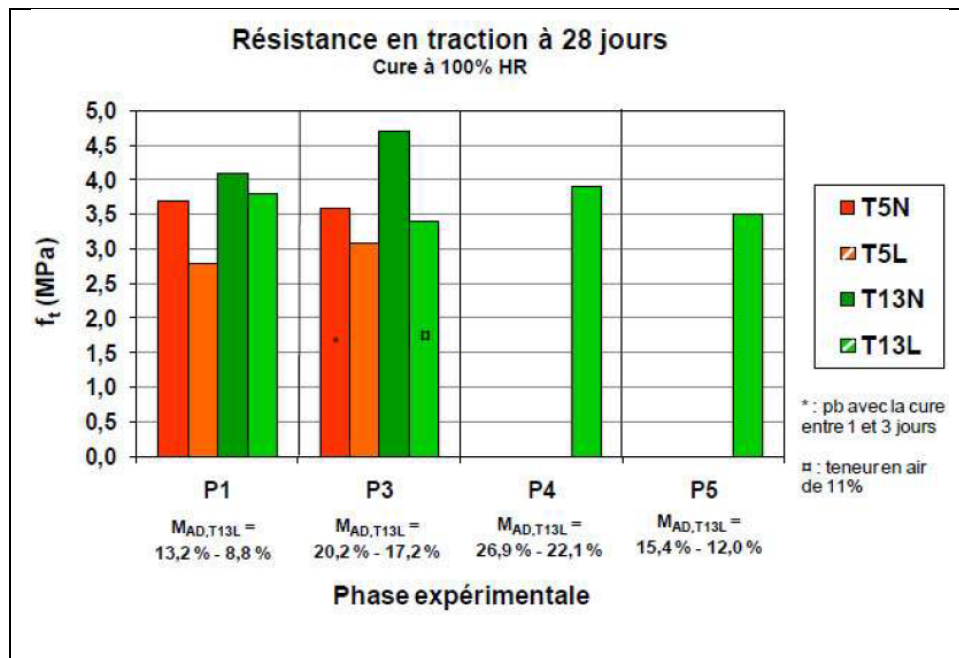
Composition	Rc (MPa)
Témoin	39.2
50 % GL	41.0
100 % GL	38.5



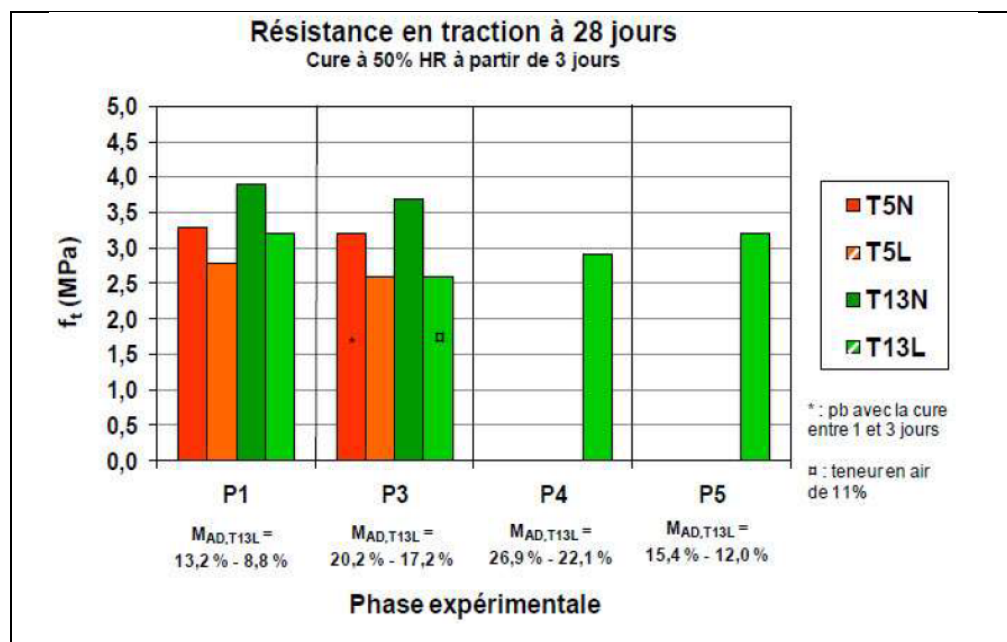
**Figure 1.27 : Variation de la résistance à la compression en fonction de la composition de béton [54].**

#### 1.4.7. b Résistance à la traction

Tout comme les bétons classiques, les bétons à granulats légers présentent une faible résistance à la traction, puisque la propagation des fissures peut s'effectuer au travers des granulats. Des résistances à la traction par fendage de 3,3 à 4,2 MPa pour des bétons d'une masse volumique de 1940 kg/m<sup>3</sup>, ou de 3,5 à 5,6 MPa pour des bétons, dont la masse volumique variait de 1620 à 1885 kg/m<sup>3</sup>, ont par exemple été rapportées [20]. Les résultats des essais de détermination de la résistance en compression à 28 jours sont présentés dans les figure (1.28) et figure (1.29) [23].



**Figure 1.28** : Résistance en traction à 28 jours avec (cure à 100 % HR) [61].



**Figure 1.29** : Résistance en traction à 28 jours avec (cure à 50 % HR à partir de 3 j) [61].

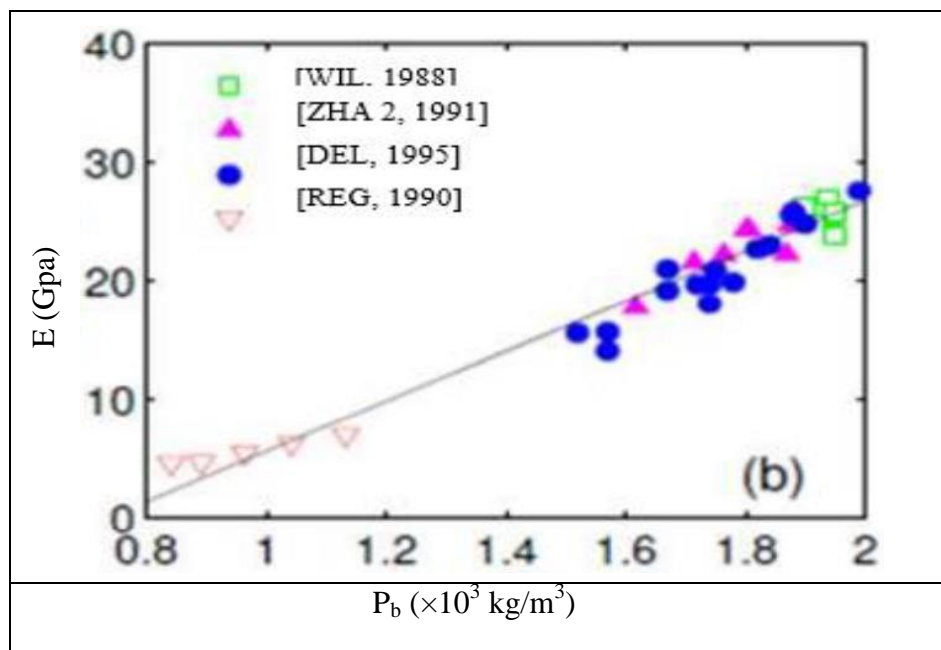
A la lumière des figures (1.28 et 1.29), des observations similaires à celles effectuées pour les résistances en compression peuvent être effectuées. C'est pourquoi il ne sera fait ici état que des remarques qui sont spécifiques aux résultats de résistance en traction par fendage brésilien.



Que ce soit pour les bétons usuels ou les bétons légers, les mélanges présentent généralement des résistances plus élevées avec une cure humide. D'autre part, il convient de noter que d'une manière globale, la différence entre les résistances des bétons légers et des bétons usuels est moins marquée que pour les résistances en compression. Par rapport aux bétons de référence, les bétons légers montrent une résistance en traction inférieure de l'ordre de 5 à 10% alors que la résistance en compression est plus faible d'environ 10 à 20%.

#### 1.4.7. c Module élastique

Pour un rapport E/L équivalent, le module élastique d'un béton à granulats légers est inférieur à celui d'un béton normal. La cause principale réside dans le module élastique des granulats légers (10 à 20 GPa) qui est très inférieur à celui des granulats de masse volumique usuelle (granite, 10 à 70 GPa, calcaire, 10 à 55 GPa). La figure suivante présente des résultats de modules élastiques de bétons légers à 28 jours. On constate notamment que le module élastique semble proportionnel à la masse volumique [54].



**Figure 1.30** : Résultats de modules élastiques de bétons légers à 28 jours d'après plusieurs auteurs [54].

#### 1.4.8. Retrait et fluage

Le retrait du béton léger est augmenté de 20 à 50 % par rapport à celui d'un béton de masse volumique courante selon la norme suisse SIA 262. Pour le béton léger, les déformations de fluage peuvent être estimées selon la norme SIA 262. On appliquera un coefficient de fluage  $\phi(t, t_0)$  multiplié par le facteur de correction  $\eta$  le .

Le retrait du béton léger est plus important que celui du béton normal. Il est de l'ordre de 0.5 fois le facteur d'un béton normal pour les classes inférieures à du LC 16/18 et de 1.2 pour les classes supérieures à du LC 20/22. LC signifie « light concret » et qui veulent dire béton léger, le premier chiffre qui suit désigne la résistance à la compression à 28 jours sur une éprouvette cylindrique et le second chiffre désigne la résistance à la compression à 28 jours sur une éprouvette cubique [54].

#### 1.4.9 Propriétés acoustiques des bétons légers

Lorsqu'un son est émis, une onde acoustique se propage dans l'air jusqu'à atteindre un obstacle. Lorsque cette onde incidente rentre en contact avec un matériau, deux ondes sont créées: une onde réfléchie qui se propage dans le même milieu, alors que l'onde incidente et une onde transmise qui traverse le matériau de part en part. L'isolation acoustique, vise à limiter la transmission de ces sons par un matériau [42].

Cette isolation, est généralement réalisée par de matériaux de forte densité, car leur inertie fait qu'ils sont plus difficilement mis en mouvement par les ondes acoustiques, ils génèrent donc, moins d'ondes transmises par vibrations. Les bétons légers, comme leur nom l'indique, ne fonctionnent pas par cet effet de masse. On peut également, limiter la transmission du son en imperméabilisant la surface du matériau. Les ondes sont alors, réfléchies et renvoyées vers la source émettrice. Les matériaux peu perméables, sont donc de bons isolants, dans le sens où ils empêchent la transmission du son entre deux pièces voisines. La troisième façon d'agir sur les ondes acoustiques, est l'absorption, les matériaux amortissent les sons par dissipation visqueuse. Cependant, ce mécanisme de dissipation d'énergie, suppose que les ondes puissent pénétrer dans le matériau et disposer d'un espace suffisant pour être amorties. Il faut donc, une certaine perméabilité et une porosité ouverte importante [42]. La caractérisation des propriétés acoustiques des bétons légers, est basée surtout sur l'expérimentation avec plusieurs principes et dispositifs qui sont disponibles, nécessitant la reproduction des phénomènes sonores, sur des matériaux représentant les différents paramètres le caractérisant [42].

### 1.5 Béton auto plaçant

#### 1.5.1 Définition d'un BAP

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration (compaction sous le seul effet de la gravité sans apport d'énergie

extérieure). Homogènes et stables, ils présentent des résistances, des performances à l'état durci et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels mis en œuvre par vibration. Ils se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs propriétés à l'état frais. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles de mobilité et de remplissage des coffrages tout en conservant leur homogénéité lors de l'écoulement (absence de ségrégation dynamique) et une fois en place (absence de ségrégation statique).[43]. Les BAP présentent de nombreux avantages :

a) Avantages techniques :

- Facilité et rapidité la mise en œuvre du béton.
- Réalisation d'éléments de forme complexe.
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.

b) Avantages économiques :

- Réduction du cout de main d'œuvre et du temps de bétonnage.
- Absence de systèmes de vibration réduisant ainsi les couts et les nuisances sonores dans et au voisinage du chantier.

c) Avantages écologiques :

- Valorisation des déchets de construction (récupération de ces déchets au niveau des chantiers, industries, carrières, stations de concassage).
- Diminution de la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'industrie cimentaire (due à la réduction de la quantité de ciment nécessaire au BAP).

Les inconvénients des BAP:

La composition des BAP implique un dosage délicat des matières premières. Il est donc préférable de faire appel à une entreprise spécialisée pour réaliser ces bétons. La liquidité des BAP est très précise et réclame donc un étroit partenariat entre la société de fabrication et l'entrepreneur du chantier. En effet, suivant le type de coffrage, sa disposition ou sa taille, on préférera plutôt un type de liquidité ou un autre. Cela rajoute donc des contraintes dans les préparatifs du chantier puisque beaucoup de discussions s'imposent. De plus, la rigueur dans les délais est de mise, sans quoi la liquidité du béton peut varier. Cet aspect prend beaucoup plus d'importance que pour les bétons vibrés. Rajoutons à cela que les matières premières en elles-mêmes sont spécifiques et ne sont pas toujours disponibles de stock chez les fabricants [44].

### 1.5.2 Formulation des BAP

La mise au point d'une formule de BAP est beaucoup plus complexe, parce que, d'abord, les constituants sont au nombre minimal de six, contre quatre dans le cas des BO. Ensuite, le cahier des charges d'un BAP comporte plus de clauses, en particulier à l'état frais ; il faut assurer, en plus de l'étalement, la capacité de remplissage et la stabilité. Enfin, et surtout, les propriétés des BAP sont contradictoires ; un béton riche d'une pâte fluide est très sensible à la ségrégation [45].

Depuis l'invention du BAP, aucune méthodologie pratique de formulation n'a été établie. Les différentes propriétés recherchées rendent la formulation du BAP relativement compliquée. De multiples approches se sont développées à travers le monde pour la formulation d'un BAP. Nous rapportons un exposé général sur les approches principales [44].

- Méthode japonaise :

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

- a). Dosage des gravillons :

Les chercheurs japonais ont montré que le risque de blocage est minimisé lorsque le volume du gravillon pour 1 m<sup>3</sup> de béton est limité à la moitié de sa compacité. Par définition, la compacité d'un mélange de grains est le rapport du volume de grains et du volume total du système grains + vides. Elle dépend bien sûr du mode de compactage.

- b). Dosage du sable :

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est garantie par la réduction des frictions granulaires.

- c). Dosage du liant :

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, par exemple, en respectant la donnée des normes (soit ici une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>). Les rapports massiques eau sur ciment (E/C) et filler sur ciment (F/C) peuvent également être choisis sur des critères de résistance.

d). Dosage de l'eau et du super plastifiant :

Les dosages en eau et en super plastifiant sont déterminés au moyen d'essais sur mortiers, dont le volume de sable est fixé à 40 %. On réalise des mesures d'étalement avec un cône à mortier et des mesures d'écoulement à l'entonnoir [44].

- L'approche suédoise :

Cette méthode est basée sur la méthode japonaise citée ci-dessus, le principe est d'intégrer l'approche de l'évaluation du risque de blocage dans le processus de formulation. Pour chaque rapport G/S on estime le volume de pâte critique pour le blocage, on retiendra ensuite le rapport G/S qui vérifie les propriétés rhéologiques recherchées. Les dosages des fines, de l'eau et du super plastifiant sont ajustés pour avoir une viscosité suffisante, un faible seuil de cisaillement, et une résistance souhaitée. Cette approche permet une meilleure optimisation du squelette granulaire. Cependant, on ne peut pas appliquer le critère de blocage à n'importe quel type de granulats [44].

- Formulation par volume de pâte minimal :

Dans cette méthode le béton est considéré comme un matériau bi-phasique, une phase solide constitué par les granulats et une phase liquide qui est la pâte (eau, liant, adjuvants).

Les chercheurs supposent que la pâte joue deux rôles principaux dans un BAP : D'une part, elle assure la fluidité du mélange, ce qui limite les frottements entre les granulats, d'autre part elle écarte les gravillons pour éviter le phénomène de blocage. Pour assurer ces deux rôles les chercheurs jugent qu'il doit exister un volume minimum de pâte [46].

- Formulation par optimisation du squelette granulaire :

Sachant que la résistance à la compression augmente avec la compacité de la pâte et que l'ouvrabilité est tributaire de l'arrangement du squelette granulaire. La formulation des bétons est basée sur l'optimisation de la porosité du système, en prenant en considération tous les grains solides, du ciment aux gravillons. Si la phase interstitielle est l'eau de gâchage, et non plus la pâte. Plus la quantité d'eau qui écarte les grains est importante, plus la suspension est fluide. A quantité d'eau constante, si on minimise la porosité de l'empilement de grains, on optimise en conséquence le volume d'eau

disponible pour fluidifier le mélange. Cet exemple simple montre donc le lien entre compacité et rhéologie [46].

- Méthode basée sur un plan d'expérience :

Le principe de cette méthode est l'utilisation d'un plan d'expérience pour connaître l'effet des paramètres de composition du béton. Khayat et al ont réalisé une telle étude avec les facteurs suivants :

Le volume de gravillons, la masse de fines (C+A), le rapport massique eau sur fines  $E/(C+A)$ , la masse de super plastifiant et la masse d'agent de viscosité. Chaque facteur est varié sur une plage comportant cinq points, ce qui élève le nombre de compositions effectuées à 25. Au final, les modèles obtenus sont fournis avec les résultats des essais, notamment l'étalement et le taux de remplissage, en fonction des différents facteurs. Même si ces modèles ne sont exploitables que pour les constituants utilisés dans l'étude, cette approche fournit surtout un support pour corriger une formule ne répondant pas, par exemple, aux critères de l'AFGC.

### 1.5.3 Caractérisations des BAP à l'état frais :

La formulation d'un béton autoplaçant est essentiellement focalisée sur l'obtention des propriétés à l'état frais qui sont essentielles pour assurer leurs performances souhaitées. C'est pour cela que de nombreuses recherches visent également au développement de techniques de caractérisation du critère autoplaçant. Il est nécessaire de caractériser les matériaux locaux à travers plusieurs essais. Ainsi, un ensemble de tests combinés a été mis en place pour pouvoir satisfaire tous les essais de l'écoulement du béton. Diederich [47] rapporte dans sa thèse que nombreux essais ont été développés et regroupés sous la forme de recommandations par l'AFGC dans le cadre du Projet National Béton Autoplaçant (AFGC, 2008). Ces recommandations ont finalement conduit à l'écriture d'une norme européenne EN 206-9, Règles complémentaires pour le béton autoplaçant datant de novembre 2014 (NF EN206-9) [48]. L'ouvrabilité des BAP se décompose en trois caractéristiques principales:

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams), mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L) et stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis) [49].

#### a) Essai d'étalement

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton en milieu non confiné. Un échantillon de béton dans un cône d'Abrams est maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée. Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton. L'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer (en utilisant le même matériel) le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtes perpendiculaires [49].

#### b) Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. La partie verticale de la boîte est remplie de béton qu'on laisse reposer une minute. On tire la trappe et on laisse le béton s'écouler travers l'espace entre armatures. Une fois l'écoulement terminé, on mesure les deux hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H2/H1$ . Un béton autoplaçant possède un taux de remplissage  $H2/H1$  supérieur ou égal à 0,8. Un blocage quelconque du béton durant le passage à travers les armatures traduit le phénomène de ségrégation [49].

#### c) Essai de V funnel

L'essai d'écoulement au V-funnel permet de mesurer le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée. Le plus souvent, la partie inférieure de l'entonnoir est rectangulaire de dimensions 7,5 cm x 6,5 cm. Elle est équipée d'une trappe. Le temps d'écoulement du béton autoplaçant à l'entonnoir doit être généralement inférieur à 12 secondes pour obtenir un béton de viscosité suffisante [50].

#### d) Essai de stabilité au tamis

L'essai de stabilité au tamis permet de quantifier le risque de ségrégation des BAP. Il complète l'essai de la boîte en L. Cet essai consiste à prélever un échantillon de 10 litres de béton, après 15 minutes d'attente, on verse sur un tamis d'ouverture 5 mm, une masse de  $4.8 \pm 0.2$  kg de béton et laissé deux minutes, avant de peser la masse de la laitance traversant le tamis. On calcule le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon :

$$P_i = \frac{\text{masse de laitance}}{\text{masse de l'échantillon}} \dots \dots \dots (8)$$

1.5 La mesure de ce pourcentage permet de classer les formules de BAP :

- 0% < % Laitance < 15 %) Stabilité satisfaisante
- 15% < % Laitance < 30 %) Stabilité critique
- % Laitance > 30%) Stabilité très mauvaise. [49].

#### 1.5.4 Rhéologie des bétons autoplaçants

La caractérisation du béton à l'état frais peut se faire grâce à l'étude des propriétés rhéologiques fondamentales telles que le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. La rhéologie est définie comme étant la science de l'écoulement ou la déformation des corps sous l'effet des contraintes appliquées, variables au cours du temps. La connaissance du comportement rhéologique est essentielle pour caractériser l'écoulement d'un béton, qui permet de caractériser le comportement du béton au cours de la mise en œuvre et d'analyser l'écoulement en étudiant les contraintes et les déformations subies par le matériau. L'exploitations des paramètres rhéologiques conduit à l'élaboration des courbes d'écoulement qui relie la contrainte de cisaillement ( $\tau$ ) à la vitesse de cisaillement ou le gradient de vitesse, notée ( $\dot{\gamma}$ ) [50].

#### 1.5.5 Paramètres rhéologiques

##### a) Viscosité

Par définition la viscosité est une mesure des frictions internes d'un fluide lors du déplacement d'une couche moléculaire par rapport à celle qui lui est sous-jacente. En raison du frottement permanent sur les molécules de la seconde couche, cette friction apparaît lorsqu'une tranche de fluide se déplace par rapport à une autre tranche. Elle se traduit par la résistance à l'écoulement d'un système soumis à une contrainte tangentielle (Figure 1.31). La viscosité est définie généralement comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement  $\tau$  et le gradient de vitesse de cisaillement  $\dot{\gamma}$  correspondant :

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \dots \dots \dots (9)$$

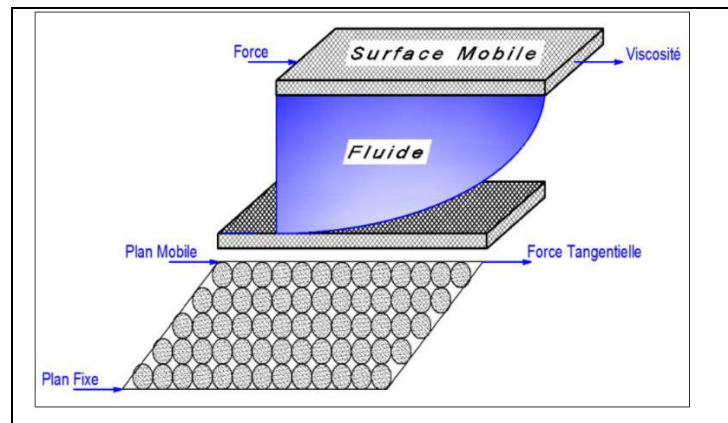
Avec :

$\tau$ : Contrainte de cisaillement.

$\dot{\gamma}$  : taux de cisaillement.



$\mu$  : viscosité plastique.



**Figure 1.31** : Schéma du glissement des couches [51].

### b) Contrainte de cisaillement

Une contrainte de cisaillement  $\tau$  est une contrainte mécanique appliquée parallèlement ou tangentiellement à une face d'un matériau contrairement aux contraintes normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire [18]. Ainsi, la contrainte de cisaillement c'est le rapport d'une force par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \dots\dots\dots(10)$$

Avec :

- $\tau$  : contrainte de cisaillement [Pa].
- $dS$  : surface élémentaire d'une couche cisailée.
- $dF$  : projection de la force de frottement tangentielle.

### c) Vitesse de cisaillement

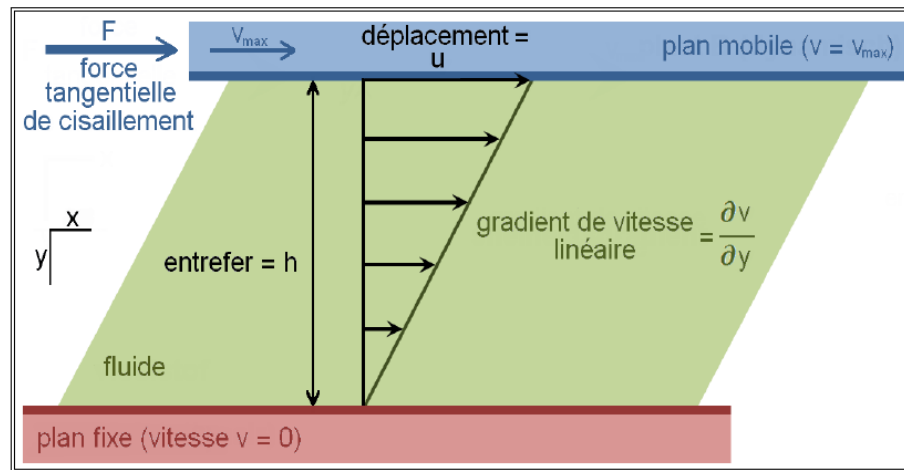
La vitesse de cisaillement ou « gradient de vitesse » ou « taux de cisaillement », mesure le cisaillement appliqué au sein d'un fluide (Figure 1.32). Elle dépend de la contrainte de cisaillement et de la nature du fluide. Le gradient de vitesse s'agit de la vitesse de déformation de deux couches Successives d'un fluide cisailé. Le déplacement entre les deux plans est défini comme la déformation, symbole  $\gamma'$  suivant la relation :

$$\gamma' = \frac{dx}{dz} \dots\dots\dots(11)$$

La norme du gradient de vitesse constant dans tout l'échantillon est définie comme la vitesse de cisaillement, appelée également vitesse de déformation ou taux de cisaillement. Il s'agit de la vitesse de déformation entre deux couches successives

voisines du fluide cisailé. Elle est souvent présentée comme étant la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \dots\dots\dots(12)$$



**Figure 1.32 :** Schéma de la vitesse de cisaillement [51].

#### d) Seuil de cisaillement

Le seuil de cisaillement est la contrainte de cisaillement minimum à atteindre pour que le matériau s'écoule. Pour une contrainte de cisaillement plus faible, le matériau se comporte comme un solide et ne s'écoule pas. Il existe différentes méthodes pour mesurer le seuil de cisaillement parmi lesquelles des méthodes qui nécessitent la connaissance des notions physique du matériau [51]. Le tableau 1.7 résume les plages des caractéristiques rhéologiques des matériaux cimentaires.

**Tableau 1.7 :** Paramètres rhéologiques des pâtes ciments, mortier et béton [51]

Matériaux	Pate de Ciment, coulis	Mortier	Béton fluide	Béton autoplaçant	Béton Ordinaire
Seul de cisaillement (N/m <sup>2</sup> )	10-100	80-400	400	50-200	500-2000
Viscosité (Ns/m <sup>2</sup> )	0.01-1	1-3	20	20-100	50-100

### 1.6 Effet des granulats légers sur la durabilité des BAP :

La durabilité du béton léger, est un facteur essentiel du point de vue économique et dépend principalement de son environnement et de sa composition. Il ressort de plusieurs recherches théoriques et expérimentales, étudiant son comportement vis-à-vis certain nombre de mécanismes susceptibles de le dégrader et en examinant les différents paramètres spécifiques à son sujet que l'utilisation des granulats légers, n'affecte pas sa durabilité à long terme. La porosité des granulats est généralement discontinue et n'influence pas la perméabilité du béton. Les grands volumes de vides occasionnés par ces granulats, peuvent augmenter la perméabilité aux gaz des bétons légers, pour ce type de composites cimentaires, ce paramètre de premier ordre, conditionne presque toutes ses propriétés et, en premier lieu, sa résistance mécanique [52].

#### 1.6.a Absorption capillaire :

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. Cependant, l'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption. Une étude expérimentale menée par VAQUIER a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats légers et en analysant les conséquences sur l'absorption, voir tableau suivant [53].

**Tableau 1.8 :** Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre  $>2\ \mu\text{m}$  [53].

	Porosité ouverte (%)	% pores diamètre $>2\ \mu\text{m}$
ponce	55,0	68,0
Argile expansée	53,9	11,7
Schiste expansé	37,0	34,7
Cendre frittée	37,0	17,6

### 1.6.b 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 appelée  $\emptyset$ , due à la présence de l'air intra- particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de  $\mu m$ ), la porosité des granulats sera qualifiée de porosité microscopique [53].

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant  $\emptyset_1$ , la taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de Ca (OH) 2 ou de C-S-H, varie entre 0.01  $\mu m$  et 5  $\mu m$  et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varient entre 5  $\mu m$  et 1 mm. L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique [53].

$$\emptyset_l = \frac{V_{\text{vides}}}{V_{\text{liant}}} \dots\dots\dots(13)$$

Avec :

***Vvides***: Volume des vides contenus dans la matrice de liant ( $m^3$ )

***Vliant***: Volume total occupé par la pâte de liant ( $m^3$ ).

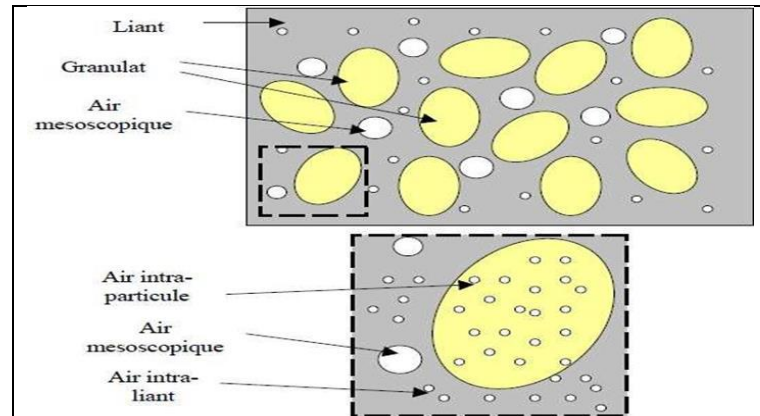
Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité mésoscopique du matériau [53].

$$\emptyset_{\text{meso}} = \frac{V_{\text{vides}}}{V_t} \dots\dots\dots(14)$$

Avec :

***Vvid***: Volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra- particule ( $m^3$ )

***V t***: Volume total occupé par le matériau ( $m_3$ )



**Figure 1.33 : Porosité du béton [53].**

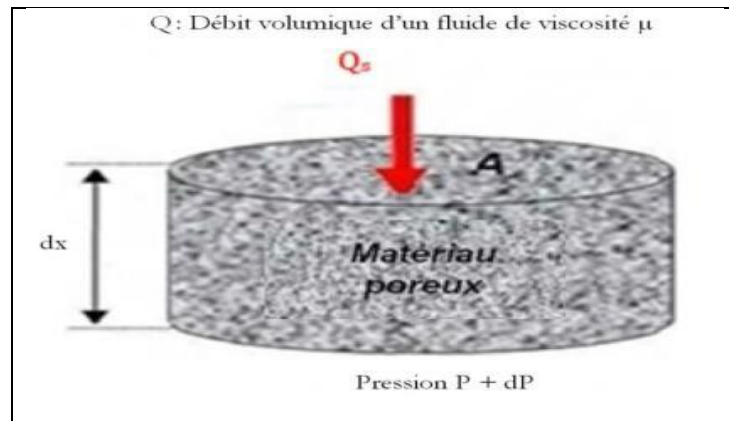
### 1.6.c Perméabilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméabilité, 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 de sorption-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 perméabilité car les pores, non reliés entre eux, ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. La porosité et la perméabilité sont donc liées mais la première n'applique pas forcément la deuxième [21].

### 1.6.d perméabilité aux gaz

La perméabilité aux gaz est un indicateur de durabilité général majeur qui évalue la capacité du matériau vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs [54]. La perméabilité traduit l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide liquide ou gazeux sous l'effet d'un gradient de pression. La perméabilité  $k$  d'un milieu poreux est définie par la relation de Darcy [54] qui exprime le débit volumique  $Q$  d'un fluide de viscosité  $\mu$  qui traverse une épaisseur  $dx$  de matériau de section apparente  $A$  sous la différence de pression  $dp$  (Figure 1.34).

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots(15)$$



**Figure 1.34** : Concept de la perméabilité d'un milieu poreux [54].

### Conclusion :

Cette synthèse a été menée afin de se familiariser avec les bétons autoplaçants et les bétons à base des granulats légers,

En résumé, nous abordons, à travers la bibliographie, d'abord des problèmes liés aux choix du matériau utilisés et aux méthodes d'allégier 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 on diminue la masse

volumique par le remplace d'une quantité de matériaux par de l'air. Ces vides d'air peuvent être incorporés à trois endroits :

- Dans les granulats ;
- Dans la pâte de ciment ;
- Entre les gros granulats par élimination de granulats fins.
- Il convient de compléter notre bibliographie centrée sur le béton de granulats légers en notant l'importance des propriétés et les caractéristiques de chaque type de granulat.
- Les caractéristiques des granulats et de la matrice jouent un rôle important sur la réponse mécanique du matériau.
- On remarque que le béton léger est très utile et son application est très large.

A l'issue de ce chapitre aussi nous pouvons tirer quelques conclusions sur le béton autoplaçant :

- · Le béton autoplaçant se compacte sous l'effet de la gravité, sans vibration.
- · Une fluidité et viscosité élevée sans aucun risque de ségrégation.
- · Capacité de passage dans les milieux confinés
- · Capacité de remplissage sans l'intervention humaine (pour la mise en place).
- · Le principe des formulations consiste à choisir une proportion optimale des différents constituants pour obtenir les meilleures caractéristiques du béton.

[55]

### **Conclusion :**

La revue bibliographique a montré qu'il y a plusieurs types de granulats légers. Le béton à base de granulats légers présente des avantages de faible poids et de faible conductivité thermique. Le béton léger a une résistance à la compression plus faible de 10 à 20% par rapport au béton ordinaire et une résistance à la traction par flexion plus faible de 5 à 10%. Les résultats obtenus mettent en évidence l'atteinte de valeurs du module élastique plus faibles de presque un tiers pour les mélanges de béton léger par rapport aux mélanges de béton usuel. La faible masse volumique et la porosité des granulats légers n'affectent pas sa perméabilité à l'eau au gaz et le béton léger est durable si sa composition est optimisée. Le béton léger peut être utilisé comme béton autoplaçant.

L'unité de production de granulats d'argile expansée de Bouinan est unique en Algérie et sa production nécessite de trouver des utilisations dans différentes applications.

## **CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS**



## CHAPITRE II : MATERIAUX ET ESSAIS

### 2.1. Introduction

Ce chapitre donne les différentes caractéristiques des matériaux utilisés pour la formulation des mortiers autoplaçants (MAP) et bétons autoplaçants légers (BAPL) faites au laboratoire de Géomatériaux et génie civil au niveau de « l'Université de Blida-1 » et au laboratoire de « ALGEXPAN » situé à Bouinan (Blida), ainsi que la Procédure expérimentale et les méthodes d'essais réalisés.

### 2.2. Caractéristiques des matériaux

#### 2.2.1. Le ciment

Le ciment utilisé dans cette étude un ciment de Lafarge-Algérie, c'est le ciment Portland composé CEM II/A 42,5.

**Tableau 2.1** : Caractéristiques physiques et mécaniques de notre ciment [25]

Masse volumique absolue ( $\rho$ abs) ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )	Finesse SSB ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	Consistance normale (%)	Temps du début de prise (minutes)	Temps de fin de prise (minutes)	Classe vrai (MPa)
3151	3489	25,86	200	255	54,21

**Tableau 2.2** : Compositions chimiques de notre ciment [25]

Composant	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)
Taux	62,57	17,59	4,82	3,06	1,22	2,56	0,21	0,59

#### 2.2.2. Le sable

Nous avons utilisé un mélange de deux types de sables dans notre étude :

- Le premier provient de la région de Baghlia, c'est un sable grossier, roulé de forme arrondie et d'une surface lisse (Mf=3,67),

- Le deuxième est caractérisé par sa finesse très élevée, il provient de la région de Boughezoul (Mf=1.54).

Les courbes granulométriques des différents sables utilisés sont données par la figure



2.2 et la figure 2.3 présente la courbe granulométrique du sable corrigé.

**Figure 2.1 :** Sable corrigé, Baghlia et Boughezoul.

### 2.2.3 Les granulats

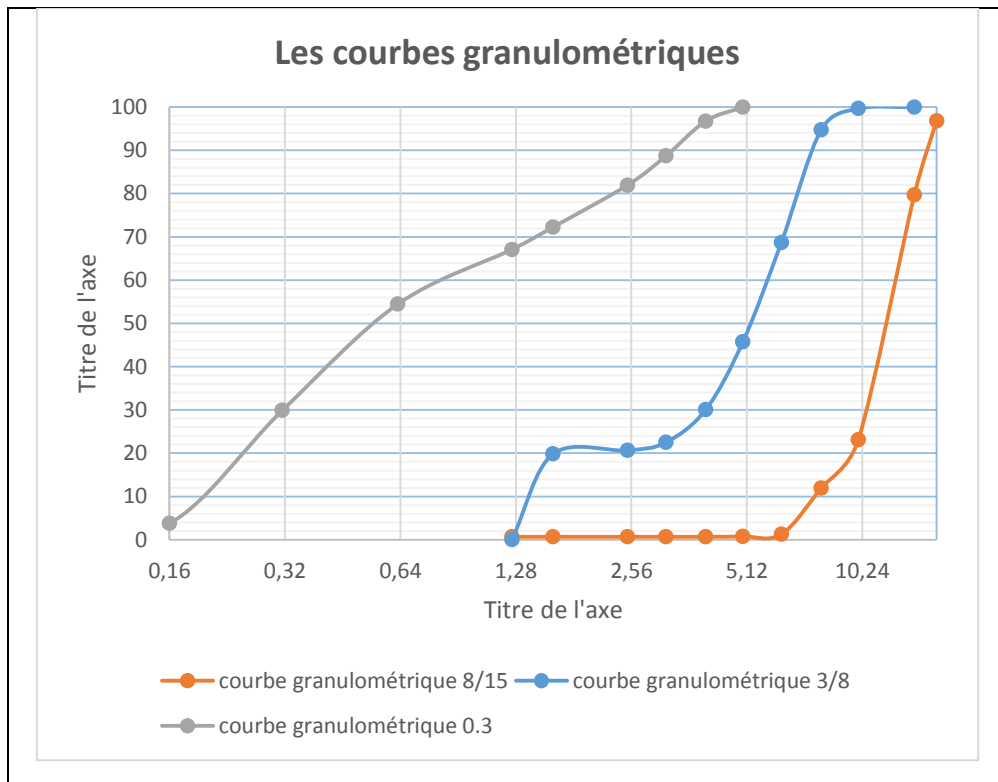
#### 2.2.3.1 Granulats classiques :

Nous avons utilisé deux fractions de graviers dans notre étude, provient de la wilaya de Sétif. Les deux fractions sont des graviers concassés de classes (3/8 et 8/15). Les courbes granulométriques des graviers sont données dans les figures 2.5 et 2.6 et leurs caractéristiques données par le tableau 2.6.



**Figure 2.2 :** Les différentes fractions de graviers utilisés

Les courbes granulométriques de sable et graviers sont données dans les figures 2.3 et leurs caractéristiques données par le tableau 2.3.



**Figure 2.3 :** Les courbes granulométriques des granulats classiques (sable mélange, gravier (3/8) et (8/15)).

**Tableau 2.3** : Caractéristiques des granulats classiques utilisés

<b>Granulats</b>	<b>Sable (Boughezoul) (0/2.5)</b>	<b>Sable (Baghlia) (0/5)</b>	<b>S/corrigé</b>	<b>Gravier (3/8)</b>	<b>Gravier (8/15)</b>
<b>Masse volumique absolue (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2530	2530	2640	2684	2697
<b>Masse volumique apparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1470	1440	1660	1497	1472
<b>Coefficient d'absorption (%)</b>	1.2	1.25	1.25	0,5	0,5
<b>Module de finesse</b>	1.54	3.67	2.8		
<b>Composition (%)</b>	50	50	100		
<b>Equivalent de sable visuel (%)</b>	70	86			
<b>Equivalent de sable au piston (%)</b>	66	86			

#### 2.2.3.2 Granulats légers :

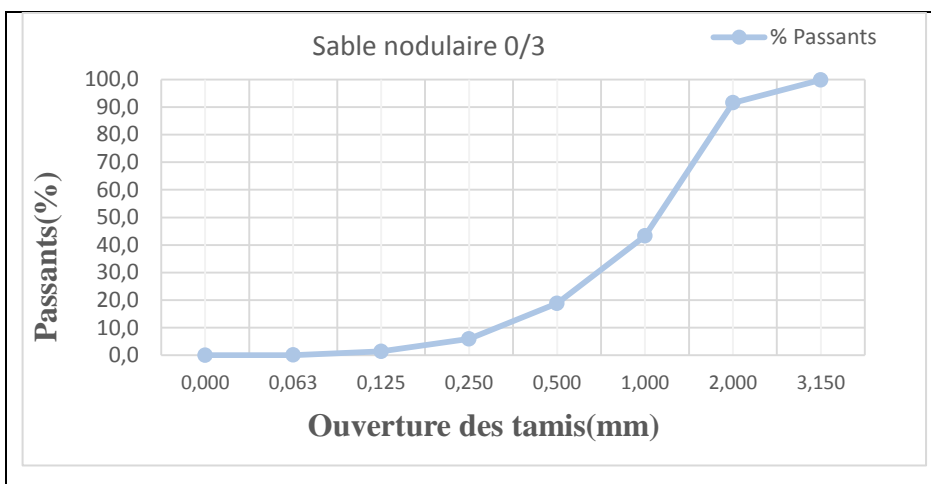
Nous avons utilisé trois fractions de l'argile expansée dans notre étude, provient de l'usine « Algexpan » situé à Bouinan (Blida) (Figure 2.8).

- la première fraction : c'est un sable nodulaire de classe (0/3).
- La deuxième fraction : c'est un gravier nodulaire de classe (3/8).
- La troisième fraction : c'est un gravier nodulaire de classe (8/15)

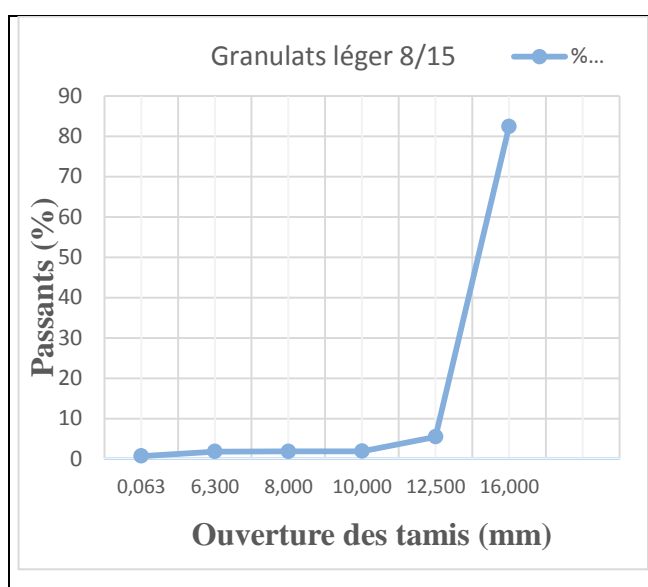
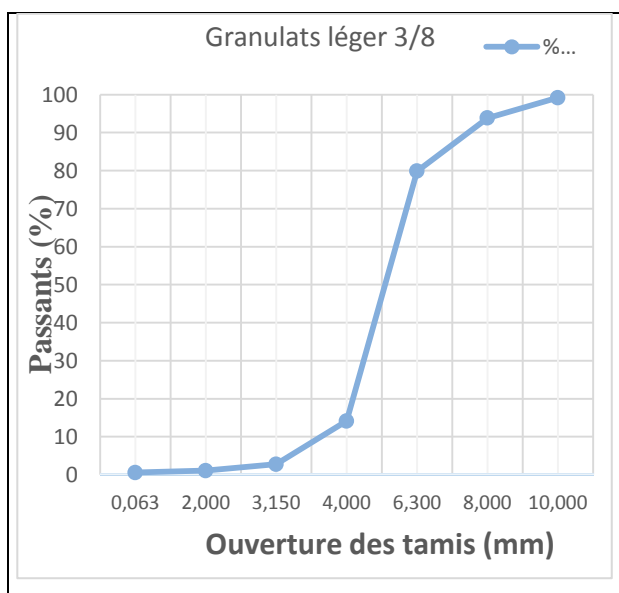
Les courbes granulométriques des granulats légers (argile expansée) selon la norme EN 933-1 (Figures 2.8 et 2.9). Les caractéristiques des granulats légers testés sont présentées dans le tableau 2.4.



**Figure 2.4 :** Les différentes fractions de l'argile expansée.



**Figure 2.5 :** La courbe granulométrique du sable nodulaire (classe 0/3)



**Figure 2.6 :** Les courbes granulométriques de granulats légers nodulaires (classe 3/8 et classe 8/15) selon la norme EN 933-1

**Tableau 2.4** : caractéristiques des différents granulats légers utilisés

<b>Granulats légers</b>	<b>Sable 0/3</b>	<b>Granulats 3/8</b>	<b>Granulat 8/15</b>	<b>Norme</b>
<b>Masse volumique en vrac (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	1074	650	528	EN 1097-3 [7]
<b>Masse volumique réelle (kg/ m<sup>3</sup>)</b>	1366	1093	981	EN 1097-6 [8]
<b>Le coefficient de corrélation</b>	1,25	1,68	1,86	
<b>Teneur en fine (%)</b>	0,14			EN 933-1 [26]
<b>Module de finesse</b>	2,41			EN 12620 [27]
<b>L'Humidité En été (%)</b>	< 3	< 3	< 3	EN 1097-5 [28]
<b>Absorption d'eau (%)</b>	17,5	11,96	13,6	EN 1097-6 [8]

#### 2.2.4. Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des éprouvettes est une eau potable du robinet, propre et exempte d'impuretés.

#### 2.2.5. Les adjuvants

L'adjuvant utilisé est un superplastifiant confectionné par la société « Granitex » et mis sur le marché par sa dénomination commerciale « MEDAFLOW 30 ».

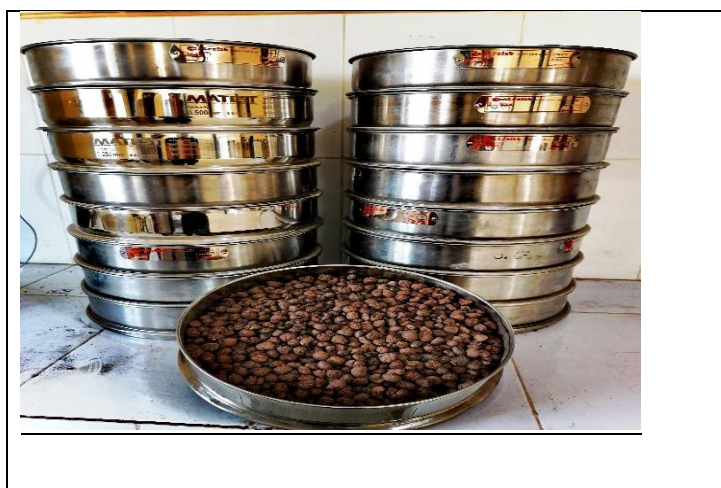
**Tableau 2.5** : Caractéristiques du « MEDAFLOW 30 »

<b>Aspect</b>	<b>Liquide</b>
<b>Couleur</b>	marron
<b>Extrait sec</b>	30%

<b>Densité</b>	1,07 ± 0,01
<b>PH</b>	6 – 6,5
<b>Teneur en chlorures</b>	< 0,1 g/l

### 2.2.6 Les appareillages utilisés dans les essais de caractérisations des granulats légers

L'analyse granulométrique des GL est réalisée selon la norme (EN 933-1) [27] (Figure 2.7):



**Figure 2.7 :** Essai de l'analyse granulométrique des GL

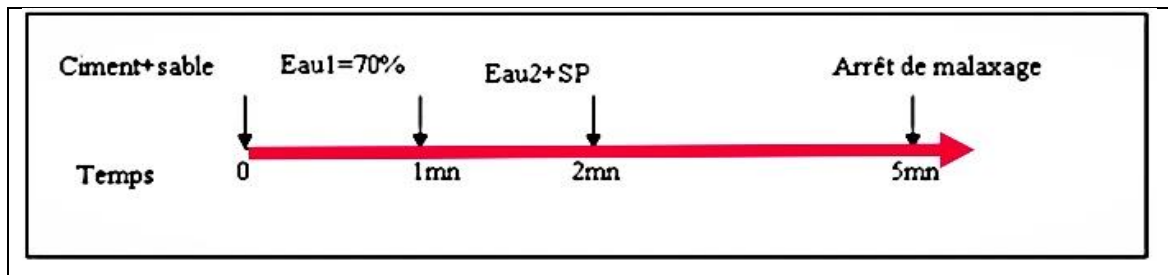
2) La masse volumique apparente est réalisée selon la norme EN 1097-3 [7] et la masse volumique réelle est réalisée selon la norme EN 1097-6 [8] (Figure 2.8).



**Figure 2.8 :** Détermination de la masse volumique réelle et apparente des GL à l'aide d'un pycnomètre et récipient.

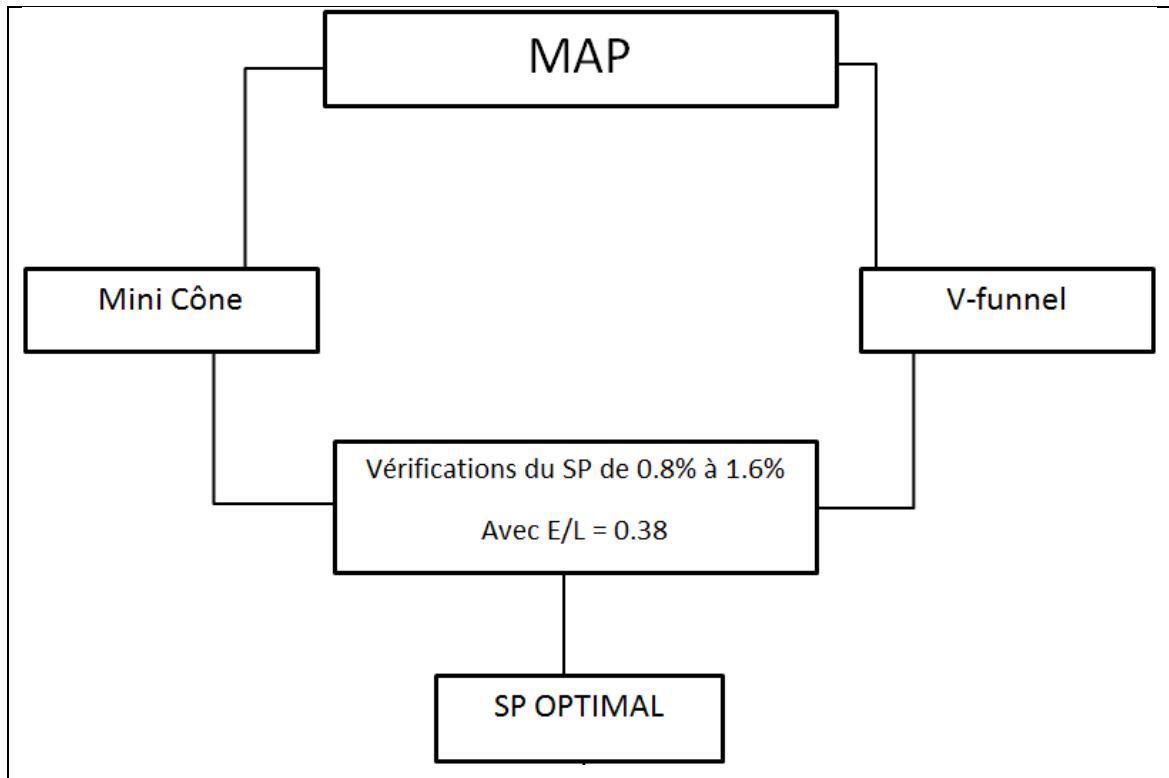
### 2.3. Formulation du mortier autoplaçant

Un grand nombre d'approches de formulation existe dans le cadre des BAP, nous avons retenu la méthode dite " Japonaise " proposée par Okamura et al. Cette méthode consiste de formuler un BAP en composant en premier lieu le mortier, la méthode est purement expérimentale et nécessite pas beaucoup de moyen pour son application. Dans le mortier, la proportion du sable est arbitraire. Il reste ensuite à trouver expérimentalement les dosages en eau et en superplastifiant, pour un liant donné (rapport massique ciment sur addition fixé), et suivant certains critères de rhéologie. La formulation finale est obtenue en ajoutant au mortier un volume de gravillons limité, de manière sécuritaire à la moitié de leur compacité [56]. L'objectif de cette formulation est d'optimiser le dosage en superplastifiant afin d'obtenir un mélange optimal de chaque type de ciment pour un mortier autoplaçant homogène et stable « sans ségrégation et sans ressuage ». La séquence de mélange du mortier est donnée par la figure 2.9. La figure 2.10 présente les essais d'optimisation du plastifiant.



**Figure 2.9 :** Les séquences de malaxage du mortier.





**Figure 2.10** : Organigramme des différents essais d'optimisation sur MAP.

### 2.3.1. Essais sur MAP à l'état frais

#### 2.3.1. a. Essai d'étalement au Mini-Cône

L'essai d'étalement consiste à remplir le moule tronconique (mini cône) de 60 mm de hauteur, un diamètre du haut de 70 mm et du bas de 100 mm ; placé au centre d'une plaque horizontale en acier lisse, une fois le cône est soulevé le mortier s'écoule sur la plaque. Le diamètre d'étalement du mortier est mesuré suivant deux directions perpendiculaires pour retenir la moyenne. (D moyen). Le (D moyen) est calculé comme suit :

$$D = \frac{D1+D2}{2} \dots\dots\dots(16)$$

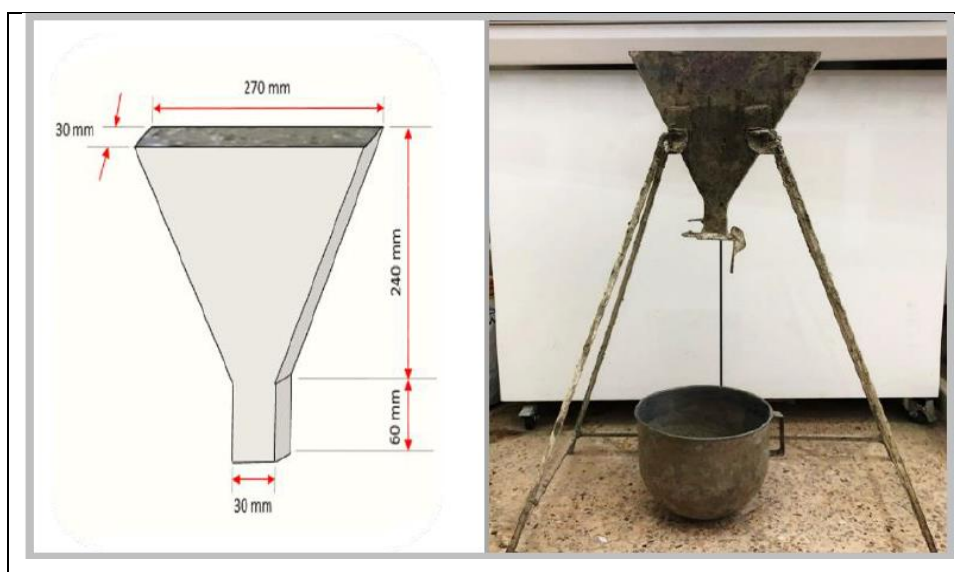
La figure (2.11) montre le dispositif de l'essai d'étalement pour les mortiers.



**Figure 2.11** : Essai d'étalement pour les MAP [57].

### 2.3.1. b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test)

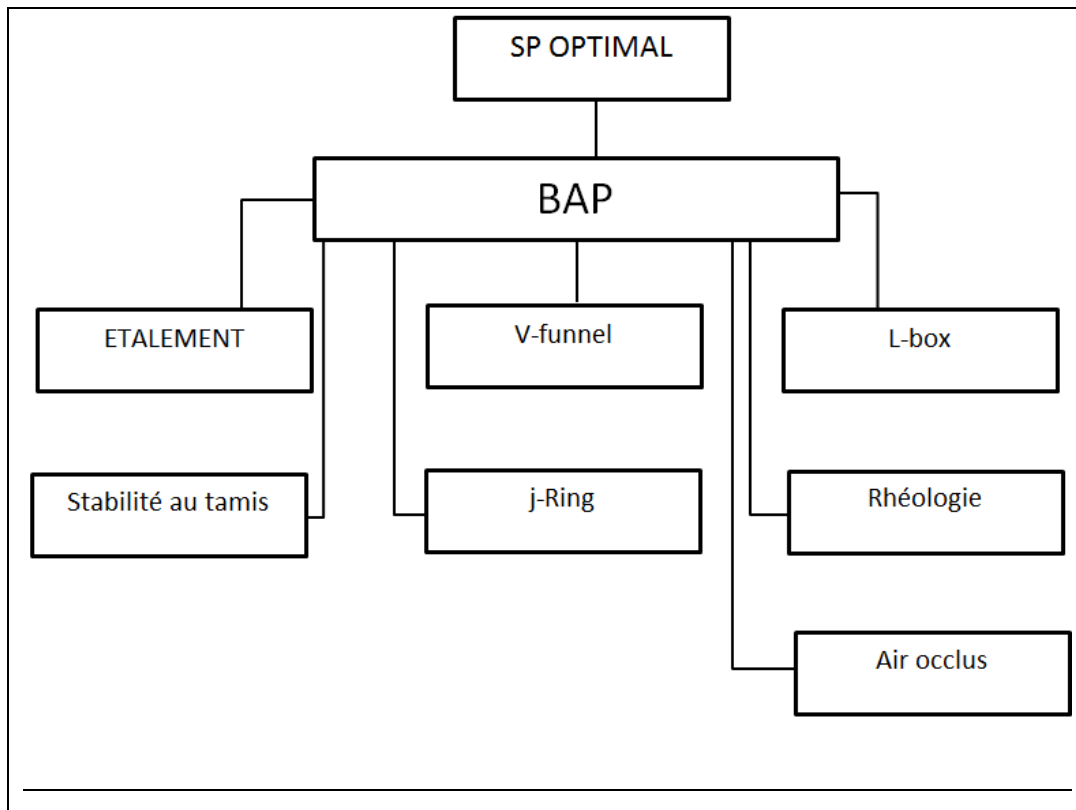
L'essai de l'entonnoir en V (V-funnel) consiste à remplir l'entonnoir de 1.1 litre de mortier et mesurer le temps d'écoulement entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. La figure (2.12) montre le dispositif de l'essai à l'Entonnoir en V. Plusieurs travaux montrent que lorsque la valeur d'étalement comprise entre 250 et 280 mm et le temps d'écoulement compris entre 2 et 6 s produisent un MAP réussi [57].



**Figure 2.12** : Dispositif de l'essai à l'entonnoir en V.

### 2.3.2. Essais sur le BAP à l'état frais

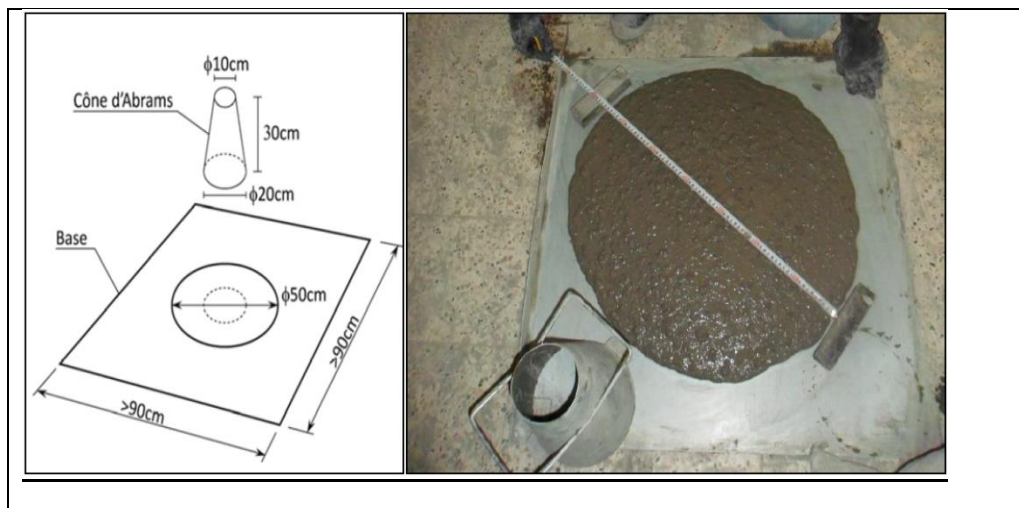
La figure 2.13 résume les essais d'optimisation sur le béton autoplaçant.



**Figure 2.13 :** Organigramme des différents essais sur BAP.

#### 2.3.2. a. Essai d'étalement (Slump flow test)

L'essai d'étalement permet de mesurer le diamètre l'étalement au cône d'Abrams. On remplit un échantillon de béton dans un cône d'Abrams maintenu sur une plaque en acier horizontale et humidifiée (Figure 2.14). Ensuite on lève d'un geste régulier et vertical le cône et on laisse s'écouler le béton. Le premier résultat de cet essai est exprimé par la moyenne de deux mesures du diamètre de la galette de béton obtenue. Il nous renseigne sur la déformabilité du béton. Cet essai est complété par la mesure du temps mis par l'étalement pour atteindre un diamètre de 50 cm, et qui nous renseigne sur la vitesse d'étalement du béton.



**Figure 2.14 :** Essai d'étalement.

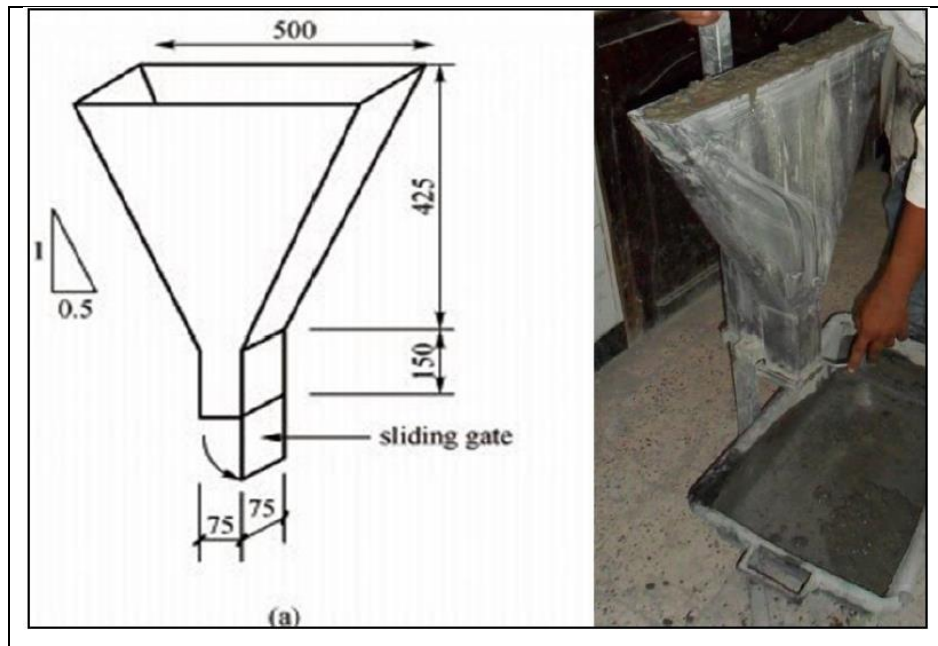
Dans tous les cas, les BAP ne doivent présenter aucun signe visible de ségrégation ou de ressuage lors de l'essai d'étalement [58]. La recommandation d'AFGC [49] prévoit une répartition des BAP en trois classes (Tableau 2.6).

**Tableau 2.6 :** Classes d'étalement [17]

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

### 2.3.2. b. Essai à l'entonnoir en V (V-Funnel test) :

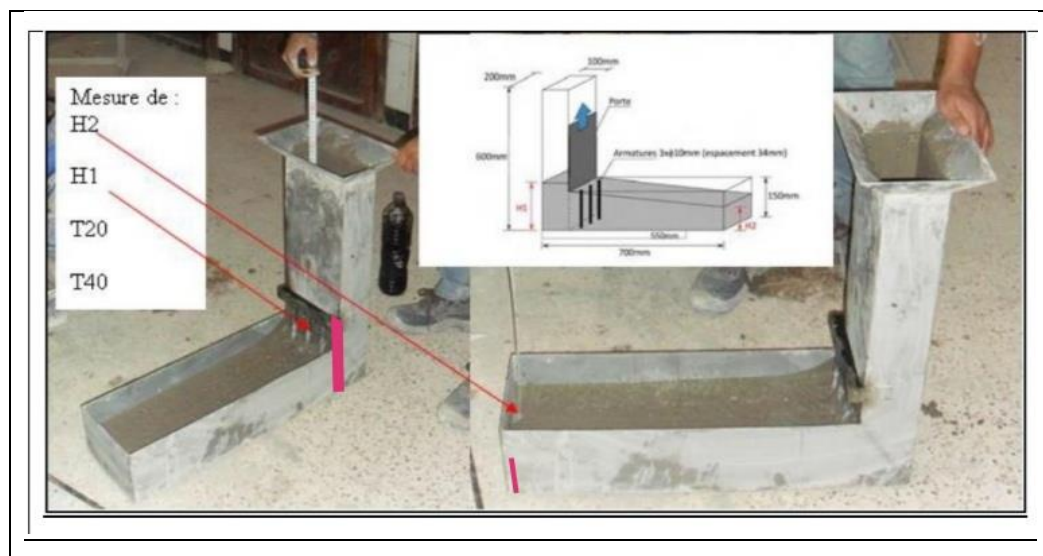
Cet essai consiste à étudier la mobilité du béton en milieu confiné. L'essai d'écoulement au V-Funnel, dont les dimensions sont définies (Figure 2.15) mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir de dimension spécifiée. Ce temps d'écoulement est un critère utilisé pour définir la viscosité du béton autoplaçant. Il s'agit de remplir l'entonnoir de béton, puis on le laisse reposer pendant 1 minute. L'essai consiste à observer l'écoulement du béton à travers l'entonnoir et à mesurer le temps d'écoulement entre le moment où la trappe est libre et le moment où on aperçoit la lumière par l'orifice.



**Figure 2.15 :** Essai V-funnel.

### 2.3.2. c. Essai de la boîte en L

L'essai de la boîte en L fait partie des essais de caractérisation de la mobilité en milieu confiné. Il vérifie que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage au droit des armatures. Un échantillon de béton est rempli en une seule fois dans la partie verticale de la boîte. Après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers une série d'armatures séparant la partie verticale et la partie horizontale de la boîte formée de 3 barres d'armatures de diamètre  $\phi 16\text{mm}$ . Le résultat est représenté par le ratio  $H2/H1$  qui doit être supérieur à 0,80 (Figure 2.16).



**Figure 2.16 :** Essai de la boîte en L.

Après avoir soulevé la trappe, les paramètres suivants peuvent être mesurés :

- Le temps d'écoulement du béton T20 pour arriver à la distance 200 mm (dans la partie horizontale).
- Le temps d'écoulement du béton T40 pour arriver à la distance 400 mm (dans la partie horizontale).
- Une fois l'écoulement du béton achevé, on mesure les hauteurs H1 et H2 (Figure 2.16).

#### 2.3.2. d. Essai de résistance à la ségrégation par tamisage

Cet essai caractérise la ségrégation des bétons autoplaçants. Il peut être utilisé en phase d'étude de formulation d'un béton autoplaçant. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité [18]. L'essai nécessite un seau de 10 litres avec un couvercle, un tamis de maille 5 mm, un fond et une bascule avec précision (Figure 2.17). Un échantillon de 10 litres de béton est mis au repos pendant 15 min. Il s'agit ensuite de déverser  $4,8 \text{ kg} \pm 0,2 \text{ kg}$  de l'échantillon sur un tamis de 5 mm posé sur le fond avec une hauteur de  $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$ . Après 2 min d'attente, on pèse le poids de laitance qui est traverser le tamis et on calcule le pourcentage de la laitance selon l'expression :

$$\%_{\text{laitance}} = \frac{P_{\text{laitance}}}{P_{\text{echantillon}}} \dots\dots\dots(17)$$



**Figure 2.17** : Essai de stabilité au tamis.

Pour qu'un béton soit qualifié autoplaçant, il doit satisfaire les différents essais de caractérisation adoptés par les recommandations d'AFGC [49], le tableau 2.7 résume les valeurs préconisées pour un BAP.

**Tableau 2.7** : Essai de caractérisation des BAP à l'état frais [49]

Essai	Recommandation AFGC
Essai d'étalement SF (mm)	$550 \leq SF \leq 850$
T50 (sec)	$2 \leq T_{50} \leq 6$
V-funnel (sec)	$6 \leq T_v \leq 12$
L-Box	$\frac{H_2}{H_1} \geq 80$
Stabilité au tamis (%)	$0 \leq (\%) \pi \leq 15$

### 2.3.2. e. Essai rhéologiques :

Il existe une grande variété de rhéomètres à bétons pour caractériser le comportement des bétons à l'état frais. le rhéomètre à bétons Heidolph- RZR 2102 Control Z est utilisé comme rhéomètre pour identifier les paramètres rhéologiques des bétons autoplaçants frais. Ce rhéomètre est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, croisillon



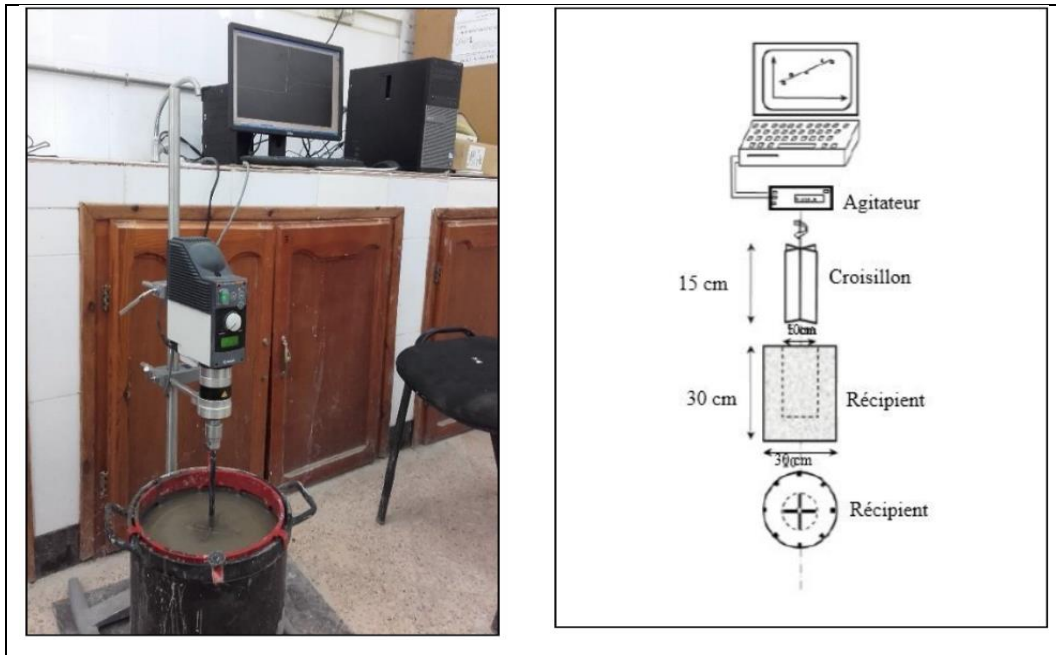
vane à quatre pales de 15 cm de hauteur et de 10 cm de diamètre, et d'un récipient cylindrique de dimension 30x30cm, présenté sur la figure 2.18. Le rhéomètre est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Le schéma de la figure 2.19 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur. La vitesse de rotation de l'outil est imposée et les contraintes résultantes sont mesurées. Les données sont directement exportées vers une feuille de calcul Excel (affichage en temps réel) [59].

Le rhéomètre peut fonctionner en imposant des taux de cisaillement appliqués sur béton d'où on obtient les contraintes de cisaillement. A partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de BAP. Ce rhéomètre peut être assimilé également à un rhéomètre couette cylindrique. L'outil vane joue le rôle du cylindre intérieur et la paroi de la cuve remplace le cylindre extérieur. La géométrie vane est généralement précise pour la mesure de seuil de cisaillement. Les utilisateurs ne considèrent généralement que l'utilisation du vane conduit à des surestimations de contraintes liés aux effets de bords du vane (dilatance durant la mise en cisaillement). Il est donc nécessaire de tenir compte de cet effet lors de la mesure des paramètres rhéologiques, en particulier en phase de mise en place de l'écoulement. De plus, la vane provoque une localisation du cisaillement qui peut induire une migration des granulats du béton vers des zones moins cisailées ou favorisée une ségrégation verticale (effet de sédimentation) [59].

Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de BAP frais et de mesurer le couple appliqué. L'utilisation d'une pale a été préférée à celle d'un cylindre où son insertion dans l'échantillon crée une perturbation minimale par rapport à l'insertion d'un cylindre [59]. Le principe de l'essai, peut être résumé comme suit:

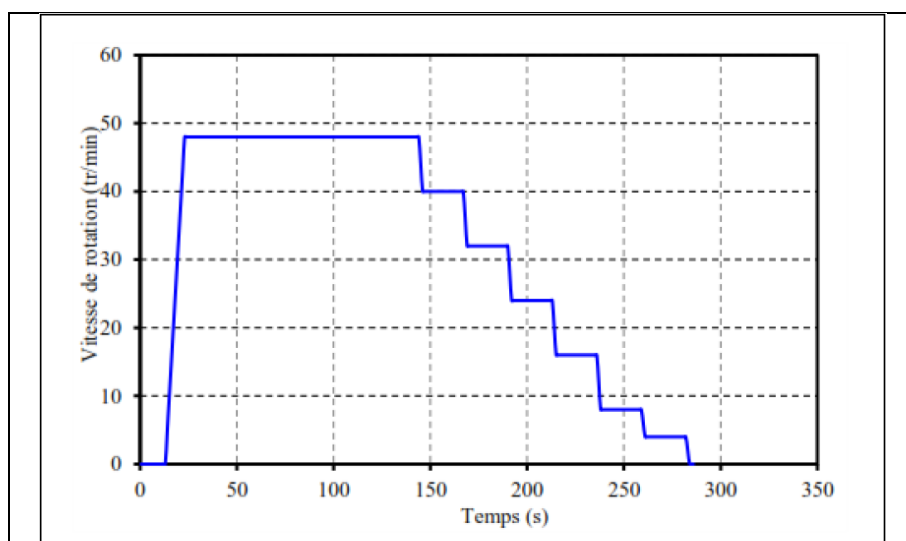
- On verse le BAP préparé dans le récipient ;
- On fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du béton. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du mortier.
- On démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié à l'aide du logiciel.





**Figure 2.18** : Rhéomètre Heidolph- RZR 2102. **Figure 2.19** : Schéma du rhéomètre.

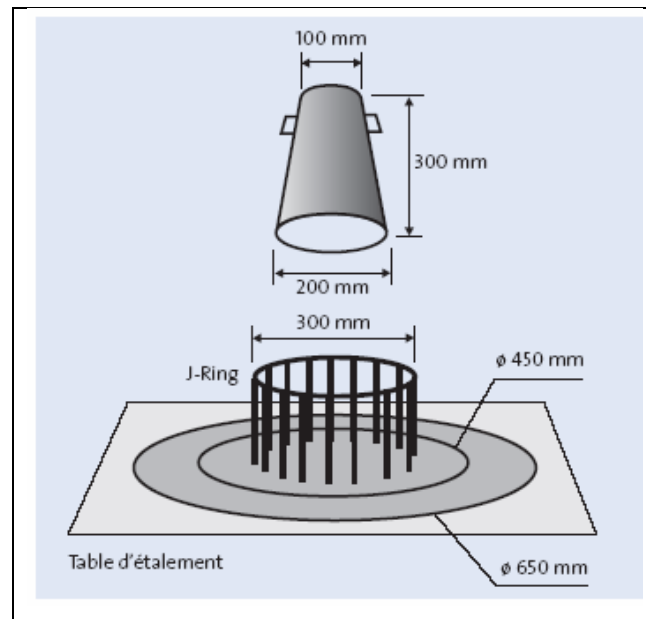
Le profil de vitesse choisi permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du béton. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires ( $\Omega$ ,  $M$ ). Le profil de vitesse est illustré sur la figure 2.20.



**Figure 2.20** : Profil de vitesse [59].

### 2.3.2. f. Essai J-Ring :

Cet essai consiste à faire écouler le béton au travers de barres d'armatures afin de pouvoir évaluer sa tendance au phénomène de blocage, le béton s'écoule à partir du cône disposé au centre d'un anneau métallique (Figure 2.21), on caractérise donc la tendance à la ségrégation et l'enrobage d'armatures, de plus, la répartition des granulats doit être homogène [60].



**Figure 2.21 :** Essai J. Ring.

### 2.3.2. j. Essai Air occlus :

La mesure de l'air occlus a été effectuée au moyen d'un aéromètre de 1 litre (Figure 2.22). On commence d'abord par remplir la chambre inférieure de l'appareil par le béton, on fixe ensuite la chambre supérieure, on injecte de l'eau à l'aide d'une pissette dans le premier robinet, le deuxième est ouvert, quand l'eau commencera à sortir de ce dernier on ferme les deux robinets et on applique une pression en actionnant la pompe manuelle intégrée jusqu'à ce que l'aiguille du manomètre de l'appareil indique la valeur de référence 0%. On ouvre la valve qui sépare les volumes des deux chambres (supérieures et inférieures), le mélange est alors comprimé et le pourcentage d'air occlus est directement indiqué par l'aiguille du manomètre.



**Figure 2.22 :** L'aéromètre utilisé.

#### 2.4 Méthodes de composition des BAPL

Les auteurs ont proposé des adaptations des méthodes de formulation courantes pour la composition des bétons auto-plaçants (BAP) légers. Les contributions portent notamment sur la prise en compte de l'absorption et la légèreté des granulats légers (Helland et al. 2000). La forte absorption d'eau des granulats légers peut dans certains cas modifier les paramètres de compositions tels que le rapport  $E_{\text{eff}}/L$  et la masse volumique réelle [1].

Au sens la norme NF EN 206-1/CN [41], la teneur en eau efficace est la différence entre la quantité d'eau totale contenue dans le béton frais et la quantité d'eau absorbable par les granulats. Dans le cas des granulats traditionnels l'eau absorbable est marginale (entre 0,1 et 2 % en proportion massique). En revanche, l'eau absorbable par les granulats légers est plus importante et peut atteindre 15 % et plus en proportion massique selon (Neville 1995) et (Zhang et al. 2004). Dans la pratique, l'absorption différée du granulat léger peut se traduire par une chute brutale de l'ouvrabilité du béton en présence de granulats légers secs ou pré-humidifiés (Papanicolaou et Kaffetzakis) [1].

La légèreté qui est l'un des principaux avantages des granulats légers est considérée comme une des principales difficultés dans la formulation des BAPL. En général, les bétons incorporant des granulats légers ont une forte propension à la ségrégation en raison du contraste de densité pâte/granulats (Kim et al.). Cette singularité augmente le risque de ségrégation durant le malaxage, le transport et la mise en place du béton léger frais (Chia et al. 2005). Elle est d'autant présente qu'il s'agit de BAPL. Même si, l'auto compactibilité des BAP tend à diminuer le risque de séparation entre la matrice et les granulats pouvant subvenir lors de la vibration, elle n'assure de facto, ni l'homogénéité ni la stabilité du mélange à l'état frais en particulier des BAPL selon (Uygunoglu 2008)

et (Wu et al. 2009). La ségrégation dynamique ou statique se caractérise par une séparation pâte/granulats marquée par une orientation préférentielle des granulats légers vers la face de coulage (Neville) et (Wall) [1]. Une autre conséquence de la ségrégation des BAPL va être une variation spatiale des propriétés mécaniques et de durabilité à l'état durci. (Yanai et al.) a adapté la proportion du granulat léger en adoptant un rapport volumique G/S de 1,2 et le rapport Eeff/L de 0,39 obtenir pour des bétons auto-plaçants légers de sable normal (BAPLSN) homogènes et stables. Le choix de granulat léger résistant pour limiter la différence de rigidité entre la matrice cimentaire et les granulats légers a permis d'améliorer les performances mécaniques du béton. (Michtcherine et al.) [1] ont adapté les propriétés de la pâte et du mortier de sable normal en incorporant un agent de viscosité pour formuler des BAPL de granulats d'argile expansée et d'ardoise expansée présentant des propriétés à l'état frais similaire au BAP traditionnel en termes d'étalement et de viscosité apparente. (Muller and Haust) [1] abordent dans le même sens et montrent que l'optimisation du dosage en liant et des paramètres rhéologiques du mortier de sable (seuil de cisaillement et viscosité) permet de formuler des BAPL de masse volumique réelle à l'état frais comprise entre 1 500 et 2 000 kg/m<sup>3</sup>. Cette approche consiste à définir un mortier dont les propriétés rhéologiques sont suffisamment faibles pour faciliter l'écoulement du matériau mais suffisamment élevées pour limiter le risque de blocage des granulats légers. En somme les méthodes de formulation traditionnelles de bétons auto-plaçants de masse volumique normale (BAPN) sont adaptées pour la formulation des BAPL. Pour tenir compte de la forte absorption et de la légèreté des granulats légers, les auteurs ont recours [1] :

- au pré-mouillage pour atténuer l'absorption dans la pâte ;
- à l'utilisation d'agent de viscosité pour optimisation la viscosité de la pâte afin de limiter les risques de ségrégation ;
- à l'optimisation du volume de pâte pour limiter le risque de blocage des granulats légers [1].

#### 2.4.1 Propriétés à l'état frais des BAPL

La caractérisation des BAPL au même titre que les BAPN (béton autoplaçant normal) [1].

- la capacité de remplissage qui donne l'aptitude du mélange à se mettre en place sous l'effet de sa gravité et à remplir le volume offert ;

- la capacité de passage qui détermine l'aptitude du matériau à résister au blocage dans un milieu confiné ;
- la résistance à la ségrégation qui évalue la capacité du mélange à résister à une séparation entre les phases sous l'effet d'interactions dissipatives.

### Conclusion générale

Bien que connus dans le monde depuis plus d'un quart de siècle, les bétons légers ont été employés dans notre pays d'une façon timide et individuelle, mais ils connaissent à l'heure actuelle un regain d'intérêt, qui semble tout à fait mérité en raison de leurs propriétés techniques et économiques intéressantes.

L'unité de production des granulats légers à base d'argile expansée située à Bouinane wilaya de Blida a été visitée et ses granulats caractérisés. Cette étude avait pour objectif de valoriser les granulats légers de cette unité dans la fabrication de béton structurel et non structurel en Algérie ainsi que dans le béton autoplaçant.

La synthèse bibliographique réalisée a montré que les caractéristiques des granulats légers influent directement sur ceux des bétons légers. La masse volumique de ces bétons varie entre 800 et 2000 kg/m<sup>3</sup>. Grâce à leur caractère de légèreté, ces bétons à granulats sont plus faciles à manipuler et à déplacer.

La différence entre les résistances des bétons légers et des bétons usuels est moins marquée que pour les résistances en compression : par rapport aux bétons de référence, les bétons légers montrent une résistance en traction inférieure de l'ordre de 5 à 10% alors que la résistance en compression est plus faible d'environ 10 à 20%. Les résultats obtenus mettent en évidence l'atteinte de valeurs du module élastique plus faibles de presque un tiers pour les mélanges de béton léger par rapport aux mélanges de béton usuel.

La porosité élevée des granulats légers n'affecte pas la perméabilité à l'eau du béton léger et sa durabilité en générale en raison de la non continuité des pores.

Le béton léger offre en plus de l'avantage de la légèreté nécessaire dans le cas de sols à faible portance, une faible conductivité thermique et phonique.

En raison de la crise sanitaire, nous nous sommes limitées à des essais de caractérisations des granulats légers et les essais programmés sur la caractérisation et performance de béton autoplaçant léger n'ont pas été réalisés. A cet effet, nous proposons pour les futurs travaux l'étude:

- Effet des granulats légers sur la rhéologie du béton ordinaire et autoplaçant.
- Effet des granulats légers sur la résistance à la compression, résistance à la flexion à court et long terme.
- Effet des granulats légers sur les indicateurs de durabilité des bétons ordinaires et autoplaçants (Perméabilité à l'eau, perméabilité à l'oxygène, perméabilité au gaz, porosité accessible à l'eau, absorption capillaire, ..).
- Analyse de la performance thermique et phonique
- Etude de poutre ou dalles e béton armé avec granulats légers.

### Références Bibliographiques

- [1] Razzouk, R « Aptitude à l'emploi des bétons de granulats légers dans le cas de la précontrainte par fils adhérents », Thèse de doctorat de Université de Paris VI, 1975.
- [2] M. Constant, « 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.
- [3] M.SHINK, « Compatibilité élastique, Comportement mécanique et optimisation Des bétons de granulats légers ». Université Laval Québec Avril 2003.
- [4] SFBC. « Mémento du béton cellulaire » Eyrolles juin 2005 France.
- [5] J. Cox, Jacques Sizaire ir. Pascal Meulders ir. Elly Van Overmeire ir. Albert Ingelaere "Le Béton Cellulaire" article réalisé par La Fédération belge de Béton Cellulaire p. 122, 2005.
- [6] [A. NEVILLE, 2000] « Propriétés des bétons ». Eyrolles. Paris, 2000.
- [7] JOHN L. CLARKE, 1993, « Structural lightweight Aggregate Concrete » Edited by Chief Structural Engineer British Cement Association Crowthorne First Edition 1993
- [8] Mme. MOHELLEBI Samira : « Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hydro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites », Thèse de Doctorat Génie Civil, Tizi-Ouzou 2014.
- [9] Miki H, New technologies for soft ground improvement in Japan - Low improvement ratio cement column method and lightweight banking method new soil treatment methods in Japan. TREMTI. Paris 2005.
- [10] Tanaka Y, "Application of foam mixed lightweight stabilized geo-material for Port and Airport constructions". Technology Research & Development Center, TOA Corporation, Yokohama, Japan 2008.
- [11] Horpibulsuk, Factors influencing unit weight and strength of lightweight cemented clay. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 2014.
- [12]. Satoh T. Field placing test of lightweight treated soil under seawater in Kumamoto port. Soils and Foundations, 41, 145-154. 2001.

- [13] (ACI 213 R – 79 1981) at the high end of the lightweight concrete spectrum Structural lightweight concrete Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete (ACI 213R-79); 1981
- [14] Lee H, Fundamental duty on the development of structural lightweight concrete by using normal coarse aggregate and foaming agent. *Materials*. 2014.
- [15] Guide pratique du béton : Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables. 6<sup>em</sup> Edition (français, édition suisse), janvier 2015, Dr. Peter Lunk, Cathleen Ho”mann, Erich Ritschard, Dr. Jean-Gabriel Hammerschlag, Kerstin Wassmann, Dr. Thomas Schmidt.
- [16] Latifou Bello : Méthodologie de formulation des bétons auto plaçants légers, Rapport d’études et recherches, Septembre 2015..
- [17] G. Dreux & J. Festa : «Nouveau guide du béton et de ses constituants». 8<sup>ème</sup> Édition. Eyrolles. Mai 1998.
- [18] Barbara Pacewska<sup>1</sup>, Iwona Wilińska<sup>2</sup>, Mariola Nowacka<sup>3</sup>, Ina Pundiene<sup>4</sup>, Marius Aleknevicius Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars, 2002.
- [19] Chen H. J., Yang M. D., Tang C. W., Wang S. Y. Producing synthetic lightweight aggregates from reservoir sediments *Construction and Building Materials* 28 (2012) pp. 387-394
- [20] EIPPCB, best available techniques in ceramic manufacturing industry European Commission Directorate General Joint Research Centre, Draft Reference Document; 2005
- [21] Everhart J., Ehlers E., Johnson J. A study on lightweight aggregate *Engineering Experiment Station Bulletin n° 169 part II*, pp 21-45, Ohio State University, 1958.
- [22] Ozguven A., Gündüz L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate *Cement & Concrete Composites* 34, 781-787, 2012.
- [23] Arnould M. et Virlogeux M. « Granulats et Bétons Légers », Presse de l’École Nationale des Ponts et Chaussées, 1986.



- [24] Liao Y. C and Huang C. Y. Effects of CaO addition on lightweight aggregates produced from water reservoir sediment *Construction and Building Materials* 25 pp. 2997-3002, 2011.
- [25] González-Corrochano B., Alonso-Azcàrate J., Rodas M., Luque F. J., Barrenechea J. F. Microstructure and mineralogy of lightweight aggregates produced from washing aggregate sludge, fly ash and used motor oil *Cement & Concrete Composites* 332, 694-707, 2010
- [26] Zhang D., Li Z., Zhou J. and Wu K. “Development of thermal energy storage concrete *Cement and Concrete Research*” 34; pp 927-934, 2004.
- [27] La norme NF EN 1097-6, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats- Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, Janvier 2014.
- [28] GAGNE. R, Durabilité et réparation du béton, (chapitre 2). Cours Maitrise de Génie civil, Sherbrooke, université de Sherbrooke, Canada, 34p. 2004.
- [29] <http://www.betonsfeidt.lu/betons/produits/betons-speciaux/beton-leger>
- [30] : Guide pratique du béton : Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables. 6<sup>em</sup> Edition (français, édition suisse), janvier 2015, Dr. Peter Lunk, Cathleen Ho”mann, Erich Ritschard, Dr. Jean-Gabriel Hammerschlag, Kerstin Wassmann, Dr. Thomas Schmidt.
- [31] M.-H. ZHANG, O. E. GJORV, Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete, *ACI materials Journal*, 88(2):150-158, 1990.
- [32] Mills-Beale J., You Z., R. Williams C., Dai Q. Determining the specific gravities of coarse aggregates utilizing vacuum saturation approach *Construction and Building Materials* 23, 1316-1322, 2009.
- [33] Kasemchaisiri R. and Tangtermsirikul S. A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete *Construction and Building Materials* 21, pp. 1322-1334, 2007.
- [34] Riley C. M. Relation of chemical properties to the bloating of clays *Journal of American Ceramic Society*; 30 (4); pp. 121 – 128, 1950.

- [35] Kockal N. U. and Ozturan T. Characteristics of lightweight fly ash aggregates produced with different binders and heat treatments *Cement and Concrete Composites* 33, 61-67, 2011
- [36] La norme européenne EN 13055-1, Granulats légers - Partie 1: Granulats légers pour bétons et mortiers, Décembre 2002
- [37] Rochholz J. M. Determination of elastic properties of lightweight aggregate by ultrasonic pulse velocity measurement *The International Journal of lightweight concretes* 1, pp. 78-90 - 1979
- [38] De Larrard F. Une approche de la formulation des bétons légers de structure *Bulletin de Liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées* n° 195 ; pp 39-47, 1995.
- [39] Bremner T. W. and Holm T. A. Elastic compatibility and the behavior of concrete *ACI journal, Proceedings* V. 83 N. 2, pp. 244-250, 1986.
- [40] La norme NF EN 1097-3, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats- Partie 3: Méthodes pour la détermination de la masse volumique en vrac et de la porosité intergranulaire, Août 1998.
- [41] La norme NF EN 206-1/CN, Béton - Partie 1 : Spécification, Performance, Production et conformité - complément national à la norme NF EN 206-1, Décembre 2012.
- [42] C, Véronique, "Propriétés mécanique, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules," *Thèse Dr. de l'INDS de Lyon*, juin 2005.
- [43] Généralités, Définition d'un BAP, [www.infociments.fr/betons/les-betons-autoplaçants](http://www.infociments.fr/betons/les-betons-autoplaçants) (Consulté le : 28/03/2020 9 :01).
- [44] Benaddad .S, Benatsou. N, "Etude à la compression d'un Béton autoplaçant avec additions minérales (Argile cuite et broyée et Fillers calcaires)," *Mémoire master. Univ. d'Abderrahmane Mira-Bejaia*.
- [45] Brahim.N, "Etude des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons autoplaçants," *Mémoire magister. Univ. Mohamed Khider –Biskra*, 2006.
- [46] A, Turcry .Ph et Loukili., "Différentes approches pour la formulation des BAP," *Rev. française génie Civ.*, vol. 7 n°4, 2003.

- [47] Diederich P, “Contribution à l’étude de l’influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton,” *Thèse Dr. l’université Toulouse III* -, 2010.
- [48] NF EN 206-9, “Béton - Partie 9: Règles complémentaires pour le béton autoplaçant.”
- [49] AFGC, “Recommandations pour l’emploi des bétons autoplaçants,” *Doc. Sci. Tech.*, 2008.
- [50] El Barrak M., Contribution à l’étude de l’aptitude l’écoulement des bétons autoplaçants a l’état frais, Thèse de Doctorat de Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2005.
- [51] Soualhi H., Optimisation de la viscosité des bétons à faible impact environnemental, Thèse de doctorat de l’université de Cergy –Pontoise, 2014.
- [52] Pigeon, “Conception d'un béton destiné aux ouvrages hydrotechniques,” *Québec*, pp. 36–72.
- [53] Kh, Sene.L et Dieye, “Les bétons à granulats légers-Etudes des bétons à base d’argile expansée et à base de coquillages réalisées au Sénégal,” *Mémoire Master Univ. Guelma – 8 mai 1945*, 2019.
- [54] Agoumimelcha.A et Ouannoughi.B, “Formulation et caractérisation d’un béton léger à base de granulats obtenus par recyclage des boues de barrage,” *Mémoire Master d’ Univ. M’HAMED BOUGARA –BOUMERDES*, 2017.
- [55] Formulation et performances d'un béton autoplaçant incorporant des granulats en caoutchouc. <https://www.memoireonline.com/> (Consulté le : 25/08/2020 11 :17).
- [56] Turcry P., « Retrait et fissuration des bétons autoplaçant influence de la formulation», Thèse de doctorat de l’école Centrale de Nantes, pp 213, 2004.
- [57] Ines Bouteldja, “Rhéologie et performances des mortiers autoplaçants à base des ciments binaires et ternaires,” *Mémoire Master d’ Univ. Blida 1*, 2019.
- [58] Boukendakdji O., Etude de l’influence des paramètres de formulation sur les propriétés d’un béton autoplaçant : optimisation des conditions opératoires, Thèse de Doctorat de l’université de Blida, 2010.

- [59] Soualhi H., Kadri E.H, Ngo T.-T., Bouvet A., Cussigh F., Kenai S., A Vane Rheometer for Fresh Mortar: Development and Validation, *Journal Applied Rheology*, 2013, DOI: 10.3933/APPLRHEOL-24-22594.
- [60] Messiad Boutheyna & Bourtal Housseem Eddine, "Etude comparative de durabilité entre les bétons autoplaçants et les bétons ordinaires," *Mémoire Master d' Univ. 08 Mai 1945 - Guelma*, 2018.
- [61] Thomas Calais, "Propriétés mécaniques et durabilité d'un béton léger," *Mémoire Master la Fac. des études supérieures Postdr. l'Université Laval- QUÉBEC*, 2013.
- [62] G. Leca®, "Béton de granulats légers (EN206)" [Online]. Available: <https://www.lecasystem.fr/fr/beton-de-granulats-legers-en206%0A%0A>.