

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie  
Département Génie Procédés

## Mémoire de Master

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER** en :

**Filière : Génie Des Procédés**  
**Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux**

### THEME

L'influence de noyau d'olive sur les caractéristiques  
rhéologiques et physico-mécaniques d'un béton  
autoplaçant

Présenté par :

BENDJEMA Ilham

SELMANI Chaima

Encadrant: Dr. Y. LAMRI

Co-Encadrant: M. A. HICHOIR

2023/2024

## Résumé :

Ce travail vise à étudier l'impact de l'incorporation de poudre de noyaux d'olives sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques des bétons autoplaçants. Pour cela, des quantités variables de poudre de noyaux d'olives, correspondant à des pourcentages de substitution volumique de 10%, 15% et 20%, ont été intégrées dans le béton autoplaçant. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un béton ordinaire, à l'état frais et à l'état durci. Les résultats montrent que l'ajout de poudre de noyaux d'olives améliore significativement les résistances mécaniques et les propriétés rhéologiques du béton.

## ملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير إدخال مسحوق نوى الزيتون على الخواص الريولوجية والفيزيائية والميكانيكية للخرسانة ذاتية الدمك. لتحقيق ذلك، تم دمج كميات مختلفة من مسحوق نوى الزيتون، بما يتوافق مع نسب استبدال حجمية تبلغ 10% و 15% و 20%، في الخرسانة ذاتية الدمك. تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها بنتائج الخرسانة العادية في الحالة الطازجة والمتصلبة. تظهر النتائج أن إضافة مسحوق نوى الزيتون يحسن بشكل ملحوظ من المقاومة الميكانيكية والخواص الريولوجية للخرسانة

## Abstract :

This study aims to investigate the impact of incorporating olive stone powder on the rheological and physico-mechanical properties of self-compacting concrete. To achieve this, varying quantities of olive stone powder, corresponding to volumetric substitution percentages of 10%, 15%, and 20%, were integrated into the self-compacting concrete. The results obtained were compared to those of ordinary concrete in both fresh and hardened states. The findings indicate that the addition of olive stone powder significantly enhances the mechanical strengths and rheological properties of the concrete.

# **REMERCIEMENTS**

Avant toute chose

Nous remercions DIEU

Le tout puissant, l'omniscient et le miséricordieux

De nous avoir donné la force et la patience pour achever ce travail.

Nous remercions vivement et chaleureusement **Mr LAMRI.Y** et **Mr HIC HOUR. A** ; pour avoir Encadré et dirigé ce mémoire avec une grande rigueur scientifique.

On la remercie particulièrement pour sa disponibilité, ses conseils judicieux, son soutien Ainsi que sa patience, qui ont contribué à la réalisation et l'accomplissement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail **BENHAOUA.F.** comme présidente et **MESSAID.B** comme examinateur. Qu'elles trouvent ici notre profonde gratitude.

Nous saisissons cette occasion pour exprimer nos profonds respects et Nos reconnaissances à l'ensemble des enseignants de l'université M'Hamed Bouguera de Boumerdes.

Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidé conseillé, orienté et encouragé tout au long de la genèse

De ce mémoire

**MERCI.**

# DÉDICACE

Avant toute chose

Nous remercions DIEU

Le tout puissant, l'omniscient et le miséricordieux  
De nous avoir donné la force et la patience pour achever ce travail.

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents, les prunelles de mes yeux.

A mon cher papa qui a su se montrer patient, compréhensif et  
Encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand  
Réconfort Veuillez trouver ici, le témoignage de mon amour éternel.

Que dieu vous procure santé, prospérité et bonheur.

Que Dieu lui préserve du mal et vous procurer une longue vie.

Ma chère Maman,

Nul mot ne parviendra jamais à exprimer l'amour que je porte en toi.

Ton amour, ta patience, ton encouragement et tes prières ont été  
Pour moi le gage de la réussite. J'espère que ce travail soit à tes yeux  
Le fruit de tes efforts et un témoignage de ma profonde affection.

A mes chères sœurs : Samar et Bisma et Asma

A mon cher frère Smail.

A mon Oncle Sedik qui m'a aidé dans ce travail.

A mon binôme « Ilham » qui a partagée avec moi les moments difficiles de ce travail.

A mes amies : Wissam, Chiraz, Taima

A toutes l'équipes de laboratoire central de ENGO chacun à son nom pour leur aides qui nous  
ont été donné lors de notre stage



*Chaima*

# DÉDICACE

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour.

À mon cher père Kamel ;

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection .

À ma chère mère Hakima ;

Quoi que je fasse je ne saurais point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés à toujours été ma source de force pour affronter les différentes obstacles.

À mes chers sœurs ;

Feriel , Douaâ , Hadil et Assil

À mes amis ;

Wissem, Taima, Chiraz pour leur soutien moral

À mon binôme Chaima ;

Pour les efforts déployés avec assiduité et persévérance tout au long de ce projet .

Je remercie aussi Mr HICHOIR Abdelhak ingénieur de laboratoire d'ENGOA, pour ses conseils avisés et son aide précieuse durant toute la période du stage. Aussi à toute l'équipe du laboratoire chacun à son nom pour leur aides qui nous ont été donné lors de notre stage.

À tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.



**Ilham**

## Liste des figures :

### Chapitre II : Béton et constituants

Figure (II.1) : Poudre de ciment. ....	8
Figure (II.2) : fabrication de ciment. ....	8
Figure (II.3) : les granulats. ....	10
Figure (II.4) : L'eau de gâchage. ....	17

### Chapitre III : les bétons innovants

Figure III.1 : Essai d'étalement pour béton témoin.....	20
Figure III.2 : Essai d'entonnoir en V.....	21
Figure III.3 : Essai de boîte en L.....	21
Figure III.4 : Schéma descriptif de la boîte en U.....	22
Figure III.5 : Essai de stabilité au tamis. ....	23

### Chapitre IV : les méthodes de formulation de béton

Figure IV.1 : La courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse. ....	38
--	----

### Chapitre V : Préparation et techniques de caractérisation

Figure V.1 : Essai d'analyse granulométrique.....	42
Figure V.2 : Essai d'équivalent de sable.....	44
Figure V.3 : Essai au bleu de méthylène. ....	45
Figure V.4 : Essai pour déterminer la masse volumique.....	48
Figure V.5 : Essai pour déterminer l'absorption d'eau.....	49
Figure V.6 : Essai de Los Angeles. ....	50
Figure V.7 : Essai de Micro Deval.....	52

<b>Figure V.8 :</b> Essai d'étalement. ....	54
<b>Figure V.9 :</b> Essai de la boîte en L. ....	55
<b>Figure V.10 :</b> Essai de stabilité au tamis. ....	56
<b>Figure V.11 :</b> Essai de la résistance à la compression. ....	58

## **Chapitre VI : Résultats et interprétation**

<b>Figure VI.1 :</b> Courbe d'analyse granulométrique par tamisage.....	64
<b>Figure VI.2</b> Noyau d'olive avant broyage.....	69
<b>Figure VI.13</b> Noyau d'olive après broyage.....	69
<b>Figure VI.4</b> Agitateur (a), Pâte cimentaire (b) et Viscosimètre (c), Agitateur.....	71
<b>Figure VI.5 :</b> variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant.....	72
<b>Figure VI.6 :</b> variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant.....	72
<b>Figure VI.7 :</b> variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant.....	73
<b>Figure VI.8 :</b> variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant.....	74
<b>Figure VI.9 :</b> variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant.....	74
<b>Figure VI.10:</b> variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant .....	75
<b>Figure VI.11</b> Variation de la résistance de compression en fonction de taux des fillers à 7 jours.....	79
<b>Figure VI.12:</b> Variation de la résistance de compression en fonction de taux des fillers à 28 jours.....	80
<b>Figure VI.13 :</b> Variation de la résistance de compression en fonction de densité à 28 jours.....	81

## Liste des tableaux :

### Chapitre II : Béton et constituants

Tableau II.1. Liste des différents types de ciments courants normalisés.....	9
Tableau II. 2 Composition de ciment portland.....	10
Tableau II-3 : Classes des granulats selon la norme XP P 18-540. ....	15

### Chapitre IV : Les méthodes de formulation de béton

Tableau IV.1 : Paramètres pris en compte dans la détermination de Y (ordonnée du point de brisure). ....	35
--	----

### Chapitre IV : Les méthodes de formulation de béton

Tableau VI.1: Mesurer le coefficient d'équivalent de sable.....	58
Tableau VI.2 : Mesure le coefficient d'aplatissement des granulats.....	59
Tableau VI.3 : Propriétés physiques et mécaniques.....	59
Tableau VI.4 : Caractéristique physique du sable (0/1, 0/3) .....	60
Tableau VI.5 : Analyse granulométrique et classe granulaire de sable (0/3) .....	60
Tableau VI.6 : Analyse granulométrique et classe granulaire de sable (0/1) .....	62
Tableau VI.7 : Caractéristiques physiques de Gravier (3/8, 8/15, 15/25) .....	62
Tableau VI.8: Analyse granulométrique de Gravier (3/8) .....	63
Tableau VI.9 : Analyse granulométrique de Gravier (8/15) .....	63
Tableau VI.10 : Analyse granulométrique de Gravier (15/25) .....	63
Tableau VI.11 : Caractéristique techniques de ciment.....	65
Tableau VI.12 : Composition minéralogique du clinker.....	65
Tableau VI.13 : Propriétés physiques du ciment.....	65
Tableau VI.14 : Résistance à la compression.....	65
Tableau VI.15 : Temps de prise.....	65
Tableau VI.16 : Description du produit.....	67
Tableau VI.17 : Analyses chimiques des noyaux d'olive.....	70
Tableau VI.18 : les constituants de pâte cimentaires.....	71
Tableau VI.19 : composition des bétons autoplaçants.....	76

<b>Tableau VI.20</b> : variation de l'étalement des différents formulation étudiées. ....	77
<b>Tableau VI.21</b> : variation de l'écoulement en milieu confiné des différents formulation étudiés.....	77
<b>Tableau VI.22</b> : variation de stabilité au tamis des différents formulation étudiées.....	78
<b>Tableau VI.23</b> : masse volumique des différents formulation étudiées. ....	78
<b>Tableau VI.24</b> : la résistance à la compression des différents formulation étudiées.....	79
<b>Tableau VI.25</b> : la résistance à la compression des différents formulation étudiées.....	80

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction.....	1

## **Chapitre I: Présentation de l'entreprise**

I.1 Présentation de l'entreprise .....	3
I.2 Procédés techniques de réalisation maîtrisés.....	4
I.3 Développement .....	4
I.4 Organigramme de l'entreprise .....	5
I.5 Légende .....	6

## **Chapitre II : Béton et constituants**

II.1 Introduction .....	7
II.2 Historique .....	7
II.3 Définition .....	7
II.4 Composition de béton .....	7
II.4.1 Le ciment .....	7
II.4.2 Fabrication du ciment.....	8
II.4.3 Différents types de ciments.....	9
II.4.4 Les ajouts cimentaires.....	9
II.4.5 Composition de ciment portland .....	9
II.5 Les granulats.....	10
II.5.1 Les différents types de granulats.....	11
II.5.1.1 Les granulats naturels.....	11

II.5.1.2 Les granulats artificielle .....	11
II.5.1.3 Les granulats recyclés .....	12
II.5.2 Caractéristiques physiques des granulats recyclés .....	13
II.5.2.1 La masse volumique.....	13
II.5.2.2 La porosité .....	13
II.5.2.3 Absorption d'eau.....	13
II.5.3 Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés .....	13
II.5.3.1 Résistance à l'attrition.....	13
II.5.3.2 Résistance à la fragmentation .....	14
II.5.4 Caractéristiques géométrique des granulats recyclés.....	14
II.5.4.1 Granulométrie .....	14
II.5.4.2 Le coefficient d'aplatissement.....	14
II.5.5. Classe granulaire.....	14
II.6 Les adjuvants.....	15
II.6.1 Classification des adjuvants.....	15
II.6.1.1 Superplastifiants .....	16
II.7 L'eau de gâchage.....	16
II.8 Les ajouts minéraux.....	17

### **Chapitre III : Les bétons innovants**

III.1 Introduction .....	18
III .2 Les bétons innovants.....	18
III.2.1 Le béton autoplaçants .....	18
III.2.1.1 Les avantages de BAP.....	18
III.2.1.2 Utilisations des bétons autoplaçants.....	19
III.2.1.3 Les caractéristiques des BAP à l'état frais.....	19
III.2.1.3.1 L'essai de l'étalement.....	20
III.2.1.3.2 Essai à l'entonnoir en V.....	20
III.2.1.3.3 Essai boîte en L.....	21

III.2.1.3.4 L'essai d'étalement modifié (J-Ring) .....	22
III.2.1.3.5 Essai de la boîte en «U» .....	22
III.2.1.3.6 Essai de la stabilité au tamis.....	23
III.2.1.4 Caractéristiques des BAP à l'état durci .....	23
III.2.1.4.1 Résistance à la compression .....	24
III.2.1.4.2 Résistance à la traction.....	24
III.2.1.4.3 Module d'élasticité statique (en compression) .....	24
III.2.2 Béton à haut performance.....	25
III.2.2.1 Les caractéristiques des BHP à l'état frais .....	25
III.2.2.1.1 Maniabilité.....	25
III.2.2.1.2 Fluage et fluidité.....	25
III.2.2.2 Les caractéristiques des BHP à l'état durcis.....	25
III.2.2.2.1 La masse volumique.....	25
III.2.2.2.2 Résistance à la compression.....	26
III.2.2.3 Domaine d'application de BHP.....	26
III.2.2.4 Les avantages des bétons de haute performance (BHP) .....	26
III.2.3 Le béton cellulaire.....	27
III.2.3.1 Caractéristiques de béton cellulaire.....	27
III.2.3.1.1 La densité.....	27
III.2.3.1.2 La conductivité thermique.....	27
III.2.3.1.3 Masse volumique sèche apparente.....	28
III.2.3.1.4 Résistance à la traction par flexion.....	28
III.2.3.1.5 Résistance à la compression.....	28
III.2.3.2 Utilisation de béton cellulaire.....	29
III.2.4 Béton à chanvre.....	29
III.2.4.1 Le chanvre.....	29
III.2.4.2 Avantage de béton à chanvre.....	29

III.2.4.3	Caractéristiques des bétons de chanvre.....	30
III.2.4.3.1	Masse volumique des agro-bétons.....	30
III.2.4.3.2	Résistance en compression.....	30
III.2.4.3.3	Conductivité thermique.....	30
III.2.4.4	Utilisations de béton à chanvre.....	31

#### **Chapitre IV : Les méthodes de formulation de béton**

IV.1	Introduction.....	32
IV.2	La formulation de béton.....	32
IV.3	Méthode de faury.....	33
IV.4	Méthode française (Dreux 1970) .....	34
IV.5	Méthode japonaise.....	36
IV.5.1	Dosage des gravillons.....	36
IV.5.2	Dosage du sable.....	36
IV.5.2	Dosage du liant.....	37
IV.5.3	Dosage de l'eau et du super plastifiant.....	37
IV.6	Méthode de Dreux Gorisse.....	37
IV.7	Méthode de Bolomey.....	40

#### **Chapitre V : préparation et techniques de caractérisations**

V.1	Introduction.....	41
V.2	Préparation et technique de caractérisation des matières premières.....	41
V.2.1	Analyse granulométrique.....	41
V.2.1.1	But de l'essai.....	41
V.2.1.2	Principe de l'essai.....	41

V.2.1.3 Mode opératoire.....	42
V.2.2 Essai équivalent de sable.....	42
V.2.2.1 But de l'essai.....	43
V.2.2.2 Mode opératoire.....	43
V.2.3 Essai au bleu de méthylène dit essai à la tâche.....	44
V.2.4 Coefficient d'aplatissement des granulats.....	45
V.2.4.1 But d'essai.....	45
V.2.4.2 Appareillage.....	45
V.2.4.3 Mode opératoire.....	45
V.2.5 Module de finesse.....	46
V.2.5.1 Principe d'essai.....	46
V.2.5.2 Mode opératoire.....	46
V.2.6 Masse volumique apparente.....	47
V.2.7 Masse volumique absolue.....	47
V.2.7.1 But de l'essai .....	47
V.2.7.2 Mode opératoire.....	47
V.2.8 Absorption d'eau.....	48
V.2.8.1 Mode opératoire.....	48
V.2.9 Essai de Los Angeles.....	49
V.2.9.1 But de l'essai.....	49
V.2.9.2 Principe de l'essai.....	49

V.2.9.3 Mode opératoire.....	50
V.2.10 Essai micro Deval.....	51
V.2.10.1 But de l'essai.....	51
V.2.10.2 Principe de l'essai.....	51
V.2.10.3 Mode opératoire.....	51
V.3 Essais rhéologique.....	52
V.3.1 Le viscosimètre.....	52
V.4 Techniques de caractérisation des BAP à l'état frais.....	52
V.4.1 Masse volumique.....	52
V.4.2 Essai d'étalement.....	53
V.4.2.1 But de l'essai.....	53
V.4.2.2 Appareillage .....	53
V.4.2.3 Mode opératoire.....	53
V.4.3 Essai de boîte en L.....	54
V.4.3.1 But de l'essai.....	54
V.4.3.2 Appareillage.....	54
V.4.3.3 Mode opératoire.....	54
V.4.4 Essai de stabilité au tamis.....	55
V.4.4.1 But de l'essai.....	55
V.4.4.2 Appareillage.....	55
V.4.4.3 Mode opératoire.....	56

V.5 Technique de caractérisation des BAP à l'état durci.....	56
V.5.1 Mesure de masse volumique.....	56
V.5.2 Essai de compression.....	57
V.5.2.1 But de l'essai.....	57
V.5.2.2 Mode opératoire.....	57

## **Chapitre VI : Résultats et discussions**

VI.1 introduction .....	58
VI.2 Expression des résultats de préparation et technique de caractérisation des matières premières .....	58
VI.3 Caractérisation des Granulats.....	59
VI.3.1 Caractéristique physique du sable (0/1 , 0/3 ) .....	60
VI.3.1.1 Analyse granulométrique et classe granulaire.....	60
VI.3.2 Caractéristiques physiques de Gravier (3/8, 8/15, 15/25) .....	61
VI.3.2.1 Analyse granulométrique.....	62
VI.4 Ciment.....	64
VI.5 L'eau de gâchage.....	66
VI.6 Adjuvant (Superplastifiant) .....	66
VI.7 Additif.....	67
VI.7.1 Noyau d'olive.....	67
VI.7.1.1 Caractéristiques des noyaux d'olive.....	68
VI.7.1.2 Les propriétés d'adsorption du noyau d'olive.....	68
VI.7.1.3 Broyage du noyau d'olive.....	68

VI.7.1.4 Analyses chimiques des noyaux d'olive.....	69
VI.8 Etude rhéologique sur la pâte cimentaire du BAP.....	70
VI.8.1 L'effet de l'ajout sur le comportement rhéologique de la pâte de BAP.....	70
VI.8.2 Effet de filler noyau d'olive. ....	71
VI.8.2.1 contrainte.....	71
VI.8.2.2 Viscosité.....	73
VI.9 Formulation Japonaise des bétons.....	75
VI.9.1 Formulation préliminaire d'un béton autoplaçants.....	76
VI.10 Caractérisation du béton à l'état frais.....	77
VI.10.1 Essai d'étalement.....	77
VI.10.2 Essai de boîte en L.....	77
VI.10.3 Essai de stabilité de tamis.....	78
VI.11 Caractérisation du béton à l'état durci.....	78
VI.11.1 Masse volumique.....	78
VI.11.2 Résistance à la compression .....	79
Conclusion .....	82
Références bibliographique.....	84



### **Introduction générale :**

De nos jours, le béton demeure l'un des matériaux de construction les plus largement utilisés à l'échelle mondiale. Sa fabrication et sa mise en œuvre simples, son coût relativement bas, ainsi que ses excellentes performances en termes de résistance mécanique et de durabilité en font un choix privilégié pour une multitude d'applications, allant des simples bâtiments résidentiels aux infrastructures complexes telles que les ponts, les routes, les barrages, ainsi que les centrales thermiques et nucléaires.

Les bétons autoplaçants (BAP), introduits il y a environ vingt ans, continuent d'être considérés comme des matériaux relativement récents, en dépit de leur potentiel de développement prometteur. Leur caractéristique distinctive par rapport aux bétons traditionnels réside dans leur fluidité exceptionnelle qui permet une mise en œuvre sans besoin de vibration. Ces bétons se compactent naturellement sous leur propre poids, facilitant ainsi leur coulage dans des zones fortement armées ou dans des configurations architecturales complexes et difficilement accessibles. Bien que leurs applications demeurent limitées à ce jour, leur adaptation croissante aux défis modernes de la construction laisse entrevoir un avenir prometteur pour les BAP.

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'utilisation des résidus de noyaux d'olive, préalablement écrasés, séchés et broyés à une surface spécifique de  $1965 \text{ cm}^2/\text{g}$ , intégrés dans des bétons autoplaçants en remplacement partiel du ciment avec des proportions variées (10%, 15% et 20%). Pour atteindre nos objectifs, cette étude est structurée en plusieurs chapitres :

- Le premier chapitre offre une vue d'ensemble de l'entreprise nationale des grands ouvrages d'art (ENGOA), où s'est déroulé notre stage pratique, détaillant ses différents départements et branches.
- Le deuxième chapitre se concentre sur la revue de la littérature, abordant les composants typiques du béton tels que les définitions, les constituants et les caractéristiques.
- Le troisième chapitre explore les différents types de bétons innovants, en mettant particulièrement l'accent sur les bétons autoplaçants et en discutant de leurs propriétés à l'état frais et durci.
- Le quatrième chapitre présente les différentes formulations de béton utilisées pour atteindre une composition optimale.
- Le cinquième chapitre traite des préparations et des techniques de caractérisation, en détaillant les méthodes d'essai appliquées aux matières premières utilisées ainsi qu'au béton obtenu.

## *Introduction générale*

---

- Le sixième chapitre analyse et interprète les résultats expérimentaux des essais rhéologiques sur la pâte cimentaire, les calculs de formulation des bétons ainsi que les caractérisations des bétons à l'état frais et durci.

En conclusion, une synthèse générale est présentée pour approfondir la compréhension de l'intégration des résidus de noyaux d'olive dans les bétons autoplaçants, en examinant leur influence sur les propriétés et les performances de ce matériau.

Dans le cadre de notre projet de fin d'études de master en génie des procédés des matériaux à l'Université de M'Hamed Bouguara de Boumerdes, nous avons la chance d'effectuer notre stage au sein de l'entreprise ENGOA, une société de premier plan dans le domaine de la construction de grands ouvrages. Ce stage revêt une importance cruciale, car il nous permet de confronter nos connaissances académiques aux exigences et défis réels de l'industrie, notamment en matière de contrôle de qualité et de construction moderne.

Les missions confiées par nos encadrants, M. BEKADI Mourad et M. HICHOIR Abdelhak, ont particulièrement retenu notre attention en raison de leur pertinence pour notre formation et de leur alignement avec nos aspirations professionnelles. Leur expertise et leur encadrement nous offrent l'opportunité de développer des compétences essentielles et de contribuer à des projets significatifs.

Dans un premier temps, nous présenterons l'entreprise ENGOA et son secteur d'activité. Ensuite, nous détaillerons les missions spécifiques qui nous seront confiées au cours de ce stage, avant de conclure par une évaluation de notre expérience et des compétences acquises.

### **I.1 Présentation de l'entreprise :**

L'historique de l'Entreprise Nationale des Grands Ouvrage d'Art, est caractérisé par les dates clés rappelées ci-après.

1968: Création de la Société Nationale des Travaux Routiers, SONATRO.

1983: Restructuration de la SONATRO et création de l'ENGOA le 12 Mars 1983.

1991: ENGOA change de statuts pour devenir EPE/SPA. Son capital social initial de 10 000 000 DA a été augmenté pour être porté à 3.640.000.000 DA en 2007

1998: ENGOA absorbe SNOA (Société Nationale d'Ouvrages d'Art) le 31-12- 1997

L'E.P.E-S.P.A / ENGOA est organisée selon un schéma d'organisation classique de type fonctionnel, « mono-unité ».

L'E.P.E-SPA / ENGOA a pour domaines d'activités, les opérations d'études et de réalisation des ouvrages d'art de toute nature ainsi que les travaux de génie civil s'y rapportant :

Viaducs, Tunnels, Passages Souterrains, Passerelles, Barrages, Structures à étages et Toutes autres constructions de nature socioculturelle et toute opération pouvant se rattacher directement ou indirectement à son objet, ou susceptible d'en faciliter l'extension ou le développement.

**I.2 Procédés techniques de réalisation maîtrisés :**

La conception et la construction de ponts nécessitent une maîtrise de diverses techniques pour assurer leur durabilité, leur sécurité et leur fonctionnalité. Voici un aperçu des procédés techniques de réalisation maîtrisés par ENGOA dans le domaine de la construction de ponts :

- Pont à poutre en béton armé
- Pont à poutres en béton précontraint
- Pont à dalle en béton précontraint
- Pont à culées en terre armée
- Pont mixte à poutres PRS
- en béton précontraint construit en encorbellement successif.
- Ouvrages préfabriqués << Matière >> (Trémie)
- Viaducs en caisson préfabriqué

**I.3 Développement :**

Depuis sa création, l'ENGOA ne cesse d'innover et d'investir aussi bien dans l'acquisition des biens d'équipements que dans les technologies de réalisation. Aujourd'hui, l'ENGOA est associée à tous les projets phares, et ils sont nombreux, dans le domaine des travaux publics. Avec son expérience, elle est non seulement un des éléments clés de la réalisation du méga chantier de l'Autoroute Est-Ouest, mais est un acteur majeur de la mutation que connaît le transport urbain, pour absorber la croissance continue du flux automobile dans les grandes villes et réduire les contraintes et engorgement, tout en préservant l'environnement urbain, l'ENGOA a étendu sa maîtrise aux ouvrages en milieu fermé.

**I.4 Organigramme de l'entreprise :**

L'organigramme de l'entreprise (ENGOA) reflète la structure organisationnelle et illustre les relations hiérarchiques et fonctionnelles entre les différents services et départements. Cette représentation permet de mieux comprendre le fonctionnement interne de l'entreprise, facilitant ainsi la coordination et la communication entre les équipes. La figure ci-dessous montre l'organigramme détaillé de l'Entreprise Nationale des Grands Ouvrage d'Art.



**I.5 LEGENDE :**

- D.A Direction audit
- D.T Direction technique
- D.O.P.J Direction organisation planification & informatique
- D.A.P Direction du personnel et de l'administration
- D.R.M Direction de réalisation et de la maintenance
- D.F.C Direction des finances et de la comptabilité
- DA Direction des approvisionnements

**II.1 Introduction :**

Le béton est le matériau de construction le plus utilisés à travers le monde grâce à la simplicité de sa fabrication et de sa mise en place. C'est un composite hétérogène qui résulte du mélange intime de ciment, de granulats, d'eau, et éventuellement d'adjuvants pour modifier ses propriétés. Ces éléments sont ainsi dosés, selon leurs caractéristiques, afin d'obtenir, après réaction physico-chimique entre eux, un produit solide dont les propriétés physiques et mécaniques peuvent être très supérieures à celles des roches les plus solides. Étant donné que le ciment est lui-même un liant hydraulique, il est constitué de minéraux naturels, ce qui en fait une roche artificielle.

**II.2 Historique :**

Le béton est apparu en réponse à la nécessité d'avoir un matériau de construction abordable, qui soit flexible lors de sa mise en place et résistant par la suite. La forme primitive du béton date de 7000 ans avant notre ère. Les Égyptiens et les Romains connaissaient un matériau similaire, mais l'essor réel du béton tel qu'on le connaît aujourd'hui est attribué à l'anglais Joseph Aspidin qui breveta le ciment Portland en 1824 [1].

**II.3 Définition :**

Le béton est un ensemble homogène obtenu par le mélange du ciment, de l'eau, des granulats, et quelque fois d'adjuvant. C'est un matériau synthétique ou un squelette de granulats est consolidé par une matrice de liant et d'eau (la pâte) qui durcit progressivement [1]. Sa masse volumique se situe aux alentours de  $2500 \text{ Kg/m}^3$ . Ses performances (durabilité, résistance au feu, etc....) varient selon ses composants. C'est un matériau dont le moulage est assez facile et il est adapté à tous les types de forme d'ouvrage.

**II.4 Composition de béton :****II.4.1 Le ciment :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue qui, mélangée avec l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [2]. C'est le composant de base de béton car il peut transformer le mélange sans s'agglomérer en un solide [3].



Figure II.1. Poudre de Ciment.

**II.4.2 Fabrication du ciment :**

Les matériaux naturels de carrière (calcaire, marne, argile...) doivent d'abord être concassés puis broyés pour obtenir un mélange intime, homogène et bien dosé (environ 75% de calcaire pour 25% d'argile).

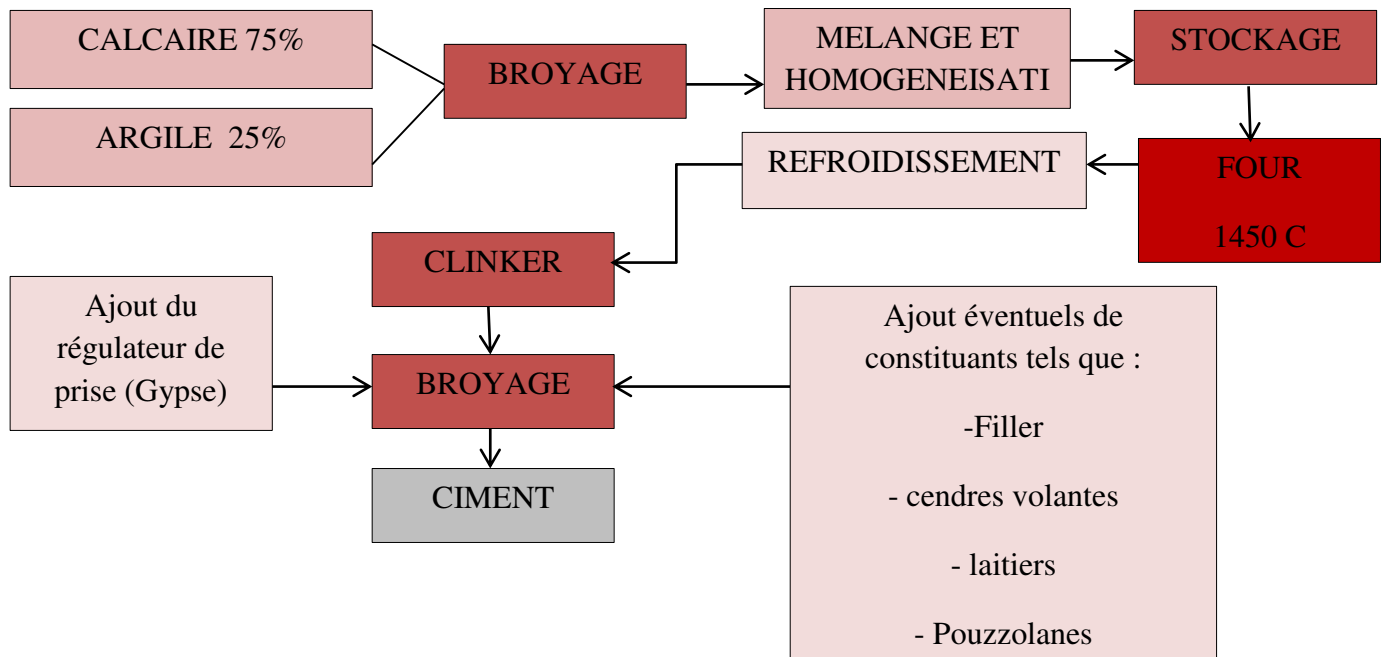


Figure II.2. Fabrication du ciment [4].

### II.4.3 Différents types de ciments :

Les ciments courants conformes sont subdivisés en cinq principaux types:

**Tableau II.1.** Liste des différents types de ciments courants normalisés [5].

Désignation	Type de ciment	Teneur en clincer
<b>CEM I(CPA)</b>	Ciment Portland	95 à 100
<b>CEM II/A (CPJ)</b> <b>CEM II/B (CPJ)</b>	Ciment portland compose	80 à 94  65 à 79
<b>CEM III/A (CHF)</b> <b>CEM III/B (CHF)</b> <b>CEM III/C (CLK)</b>	Ciment de Haut-fourneau	35 à 64 20 à 34 5 à 19
<b>CEM IV/A (CPZ)</b>  <b>CEM IV/B (CPZ)</b>	Ciment Pouzzo lanique	65 à 90  45 à 64
<b>CEM V/A (CLC)</b> <b>CEM V/A (CLC)</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 20 à 39

### II.4.4 Les ajouts cimentaires :

Les ajouts cimentaires sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore le plus souvent au ciment et donnent ses propriétés au béton, grâce à une activité hydraulique et/ou pouzzolanique. Les modifications peuvent soit améliorer les caractéristiques du béton, soit lui donner des caractéristiques particulières [6].

### II.4.5 Composition de ciment portland :

Le ciment Portland est composé du clinker, de sulfates de calcium ajoutés au broyeur, de gypse (5%) et d'ajouts éventuels (laitiers, cendres volantes, pouzzolanes ou fillers organiques ou inorganiques). Le clinker contient donc un certain nombre de constituants dont la teneur varie suivant la catégorie de ciment considérée. Les teneurs en ces composés telles qu'elles ont été révélées par analyse chimique sont résumées dans le tableau II.2 [7].

Tableau II. 2 Composition de ciment portland

Composition	Teneur (%)
SiO <sub>2</sub>	19-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2-9
CaO	62-67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-5
MgO	0-3
SO <sub>3</sub>	1-3
K <sub>2</sub> O	0,6
Na <sub>2</sub> O	0,2

### II.5 Les granulats :

La plupart des définitions relatives aux granulats sont empruntées du texte de la norme XP P 18-540 [8]. Un granulat est une combinaison de particules de tailles allant de 0 à 125 mm, utilisée principalement pour fabriquer des mortiers, des bétons, des couches de fondation et de base, des liaisons et des roulements des chaussées, des assises et des ballasts de voies ferrées, ainsi que des agrégats. Ils sont utilisés pour fabriquer du béton en raison de leur faible coût volumique, de leur durabilité et de leur stabilité volumétrique par rapport au mélange ciment-eau [9].



Figure II .3. Les granulats.

### II.5.1 Les différents types de granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée. Les granulats naturels, sont ceux qui proviennent de roches meubles ou massives et qui ne subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de taille). Les granulats artificiels, obtenue par transformation thermique et mécanique des roches ou des minerais. Les granulats recyclés, lorsqu'ils sont issus de la destruction d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réemployés [10].

#### II.5.1.1 Les granulats naturels

Les granulats naturels ont leur origine dans deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Les granulats naturels sont constitués de trois types de roches :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres,
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, lithologies.

- **Les granulats Alluvionnaires :**

On les appelle roulés, car leur forme a été obtenue par l'érosion. Il s'agissait principalement de dépôts alluvionnaires découverts dans un lit de rivière (et éventuellement en mer) [11].

Ces particules fines on les lave afin d'éliminer les particules argileuses, puis on les crible afin d'obtenir diverses catégories de granulats.

- **Les granulats de carrières :**

Les granulats sont obtenus par abatage et concassage, puis en effectuant des opérations de criblage ou de tamisage afin de choisir des grains à une taille précise. Les granulats concassés ont des propriétés qui sont influencées par de nombreux facteurs : provenance de la roche, morphologie du banc, niveau de concassage [12]. La liaison de ce genre de granulats avec la pâte de ciment est très bonne en raison de leur texture de surface et de leur rugosité. Par ailleurs, ils requièrent davantage d'eau pour une certaine maniabilité, ce qui est dû à leurs angles et donc à leurs surfaces particulières [13].

#### II.5.1.2 Les granulats artificielle :

Les granulats artificiels sont soit d'origine minérale résultant d'un procédé industriel (transformations thermiques ou autre) ou soit fabriqué en vue d'obtenir un produit particulier.

- **Les granulats à hautes caractéristiques :**

Ce sont des granulats extrêmement résistants conçus spécifiquement pour répondre à différents usages, notamment pour renforcer la résistance des sols soumis à une forte usure tels que les sols industriels, les routes à grande circulation (granulats ferreux, Carborundum...) ou les granulats réfractaires (à faible coefficient de dilatation thermique) [14-15].

- **Granulats allégés par expansion ou frittage :**

Le laitier expansé, qui est produit en refroidissant le laitier à l'air [NF P 18-307], et l'argile ou le schiste expansé, qui sont obtenus en cuisant l'argile ou le schiste au four rotatif à une température supérieure à 1000 °C [NF P 18-309], sont les plus couramment utilisés. De masse volumique allant de 400 à 800 kg/m<sup>3</sup> en fonction du type et de la granularité, ils offrent la possibilité de fabriquer à la fois des bétons de structure et des bétons avec une excellente isolation thermique. Il existe d'autres types de granulats comme les granulats de couleur pour les bétons visibles, des granulats très légers provenant de sources végétales et organiques ainsi que minérales (bois, polystyrène expansé). Ce type de granulats offrent la possibilité de fabriquer des bétons isolants ou des blocs de remplissage. En général, leur masse volumique varie de 300 à 600 kg/m<sup>3</sup> [16].

### **II.5.1.3 Les granulats recyclés :**

Les granulats recyclés sont un produit fabriqué à partir de débris de démolition, qui sont obtenus par le concassage du béton d'anciennes constructions civiles. Le granulat réutilisé est constitué du granulat initial et d'une couche de mortier résiduel qui entoure le granulat initial. Les deux phases interagissent de manière cruciale pour améliorer la qualité du béton fabriqué à partir de granulats recyclés [17]. Il existe en général quatre catégories principales de granulats recyclés [18] :

- Granulats de fragments de béton et de ciment.
- Granulats provenant de débris de maçonneries.
- Granulats provenant de débris de béton bitumineux.
- Granulats provenant de déchets mixtes (déchets de construction, de démolition et de rénovation).
- La ponce ou la pouzzolane, des matériaux volcaniques naturels très poreux, sont des granulats légers naturels.

## **II.5.2 Caractéristiques physiques des granulats recyclés :**

### **II.5.2.1 La masse volumique :**

Le rapport entre la masse sèche d'un granulat et le volume qu'il occupe dans l'eau est appelé masse volumique. Généralement, le granulat recyclé (GR) a une masse volumique inférieure à celle du granulat naturel (GN) [19]. Selon les recherches sur le sujet, la masse volumique des granulats recyclés (GR) est généralement comprise entre 2,4 et 2,5 (entre 2400 et 2500 kg/m<sup>3</sup>), tandis que les granulats naturels (GN) ont généralement une masse volumique d'environ 2,75 (entre 2750 kg/m<sup>3</sup>). La diminution de la masse volumique du granulat recyclé est due à la présence du mortier résiduel qui présente une masse volumique inférieure.

### **II.5.2.2 La porosité :**

Les granulats recyclés, en raison de leur faible densité, de leur porosité élevée et de leur faible teneur en impuretés, ont une densité inférieure à celle des granulats naturels utilisés dans le béton, en raison de leur porosité beaucoup plus élevée que celle des granulats naturels. Un prosimètre à mercure a été utilisé pour évaluer la porosité de différentes fractions de sable recyclé. La porosité était d'environ 14 % pour les fractions inférieures à 1 mm et de 11,5 % pour les fractions supérieures à 1 mm. On a estimé que la porosité globale du sable était de 13% [20].

### **II.5.2.3 Absorption d'eau :**

La capacité d'absorption des granulats recyclés est plus élevée que celle des granulats naturels en raison de leur faible masse volumique et de leur porosité élevée. Cela entraîne une réduction de la capacité d'ouverture du béton et la création de réseaux poreux dans celui-ci, ce qui affaiblit les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci. Le processus de concassage peut impacter la capacité d'absorption des granulats recyclés. Effectivement, les fissures causées par le concassage entraînent une augmentation de l'eau, tandis que les fissures dans la partie hydratée du vieux mortier entraînent une absorption d'eau importante [21].

## **II.5.3 Caractéristiques mécaniques des granulats recyclés :**

### **II.5.3.1 Résistance à l'attrition :**

Il est crucial que les matériaux utilisés dans la construction des assises de chaussées soient soumis à des déformations régulières causées par le passage des véhicules, ce qui entraîne un effet d'attrition entre les granulats. L'essai Micro Deval (conformément à la norme NF P 18-572) consiste à reproduire des phénomènes d'usure dans un cylindre en rotation. On peut utiliser cet essai à sec ou en présence d'eau, ce qui est une méthode plus représentative [22].

### **II.5.3.2 Résistance à la fragmentation :**

Les granulats sont soumis à des contraintes dans les bétons, ce qui peut entraîner leur rupture : Leur résistance à la fragmentation est évaluée à l'aide de l'essai Los Angeles (LA). Son contenu est couvert par la norme NF P 18-573 [23]. L'objectif de l'essai est de mesurer la masse ( $m$ ) des éléments de moins de 1,6 mm, fabriqués par la fragmentation.

Le matériau testé est fragmenté et soumis aux chocs de boulets normalisés dans le cylindre de la machine Los Angeles à une vitesse régulière de 500 rotations [24].

### **II.5.4 Caractéristiques géométrique des granulats recyclés :**

#### **II.5.4.1 Granulométrie :**

L'analyse des particules au laser a été utilisée pour étudier la granulométrie des éléments fins. On obtient donc les diamètres des particules par diffraction (théorie de Fraunhofer). La réalisation de cette analyse se fait sur les éléments ayant une fraction inférieure à 500  $\mu\text{m}$  (en milieu liquide) puis à 100  $\mu\text{m}$  (en milieu sec). Il est possible d'obtenir les proportions d'éléments fins présents dans les granulats en effectuant une analyse successive des fractions granulaires étudiées. L'essai a été effectué conformément à la norme [NF EN 933-1], en réalisant un tamisage par voie sèche sans lavage sur les différents lots. Il est recommandé de ne pas laver les granulats recyclés (GR) qui contiennent du mortier autour du granulat parent avant l'essai, conformément à la norme.

#### **II.5.4.2 Le coefficient d'aplatissement :**

Le coefficient d'aplatissement représente la manière dont le granulat se forme en fonction de sa plus grande dimension et de son épaisseur. On peut le déterminer en effectuant un double tamisage, d'abord en utilisant la série de tamis à mailles carrée pour étudier la granulométrie. Ensuite, les refus retenus sur les différents tamis sont tamisés à nouveau sur une série de grilles à fentes parallèles. Il y a un rapport de 1,58 entre les dimensions des tamis et des grilles [25]. Les conditions de sa mesure sont établies par la norme NF P 18-561.

#### **II.5.5. Classe granulaire :**

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Un granulat est désigné par sa classe granulaire exprimée par le couple  $d/D$  ou  $0/D$  avec :

$d$  : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieur du granulat.

**Tableau II-3** : Classes des granulats selon la norme XP P 18-540

Classe	Dimension	Caractéristique
<b>Fillers</b>	0/D	D<2 mm avec au moins 85% de passant à 1,25 mm et 70% de passant à 0,063 mm
<b>Sablons</b>	0/D	D<1 mm avec moins de 10% de passant à 0,063 mm
<b>Sables</b>	0/D	$d-0 \leq D < 4$ mm
<b>Graviers</b>	0/D	$D \geq 6,3$ mm
<b>Gravillons</b>	d/D	$D \geq 2$ mm et $D < 6,3$ mm
<b>Ballasts</b>	d/D	d-31,5 mm et D-50 ou 63 mm

## II.6 Les adjuvants :

Ce sont des produits chimiques organiques ou inorganiques, incorporés généralement en faible quantité (moins de 5% de la masse du ciment sous forme de poudre ou de solution), avant ou pendant le malaxage, dans le but de modifier certaines propriétés du béton, qu'il soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement ou à l'état durci [26].

### II.6.1 Classification des adjuvants :

Un adjuvant, en général, une action principale d'après laquelle il se trouve classé et défini, mais il peut présenter également certaines actions secondaires que l'on appelle généralement « effets secondaires ». Les adjuvants sont classés par la norme NF EN 934- 2 comme suite [27] :

- Plastifiants réducteurs d'eau.
- Super plastifiants hautement réducteurs d'eau,
- Rétenteurs d'eau.
- Accélérateurs de prise.
- Entraîneurs d'air.
- Accélérateurs de durcissement.
- Retardateurs de prise.
- Hydrofuges.

Il existe également autres catégories normalisées d'adjuvants qui sont :

- Hydrofuges de masse.
- Entraîneur d'air.
- Rétenteurs d'eau.

### **II.6.1.1 Superplastifiants :**

La compréhension des interactions entre le ciment en cours d'hydratation et les super plastifiants conduisant aux changements rhéologiques mise en cause dans les cas d'incompatibilités. Après avoir décrit le ciment, ses réactions d'hydratation et ses caractéristiques rhéologiques, il reste à exposer les superplastifiants. Les superplastifiants peuvent être utilisés dans le béton pour trois différentes raisons ou leur combinaison.

- Pour augmenter l'ouvrabilité pour un mélange donné afin d'améliorer les caractéristiques de mise en œuvre du béton.
- Pour réduire la quantité de l'eau de gâchage pour un dosage donné de ciment, afin de diminuer le rapport E/C, augmenter les résistances mécaniques et améliorer la durabilité.
- Pour réduire aussi bien la quantité d'eau et du ciment, pour une ouvrabilité et une résistance données dans le but d'économiser du ciment et réduire le retrait du la fissuration et la contrainte thermique due à l'hydratation du ciment.

Les superplastifiants sont des polymères qui peuvent être solubles dans l'eau et qui ont de multiples utilisations dans l'industrie de la construction. Ces matériaux sont aussi connus sous le nom de réducteurs d'eau de haut rang. Les adjuvants pour béton sont des matériaux qui sont ajoutés au béton lors du processus de malaxage, en quantités inférieures à 5% de la masse de ciment, pour modifier ses caractéristiques à l'état frais et à l'état durci, conformément à la norme EN 934-2 [28].

### **II.7 L'eau de gâchage :**

L'eau est un ingrédient essentiel du béton. Il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences aux normes en vigueur. Les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, les eaux

d'origine souterraine, les eaux de rejet industriel, l'eau de mer et les eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire (essais chimiques, physiques, etc...). L'eau de gâchage doit répondre aux prescriptions de la norme [29].



**Figure II .4.** L'eau de gâchage.

### **II.8 Les ajouts minéraux :**

Les ajouts minéraux sont des matériaux présentant une granulométrie très fine que l'on incorpore au clinker afin de produire un ciment composé. Ils ont en commun de contenir une silice vitreuse réactive qui, en présence d'eau, peut se combiner à la température libérée par l'hydratation du  $C_2S$  et du  $C_3S$  avec la chaux pour former un silicate de calcium hydraté de la même nature que celui qui est formé lors de l'hydratation du ciment [30]. L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton offre des avantages techniques, économiques et environnementaux. Parmi celles-ci, on peut mentionner :

Les laitiers vitrifiés moulus granulé de haut fourneau.

Les cendres volantes.

Les additions calcaires.

Les fumées de silice.

Les pouzzolanes.

**III.1 Introduction :**

Au cours des dix dernières années, les bétons ont connu une progression technologique significative. Les avancées spectaculaires dans la formulation, la maîtrise de la rhéologie des bétons à l'état frais et la durabilité des bétons à l'état durci ont été réalisées grâce à la compréhension des phénomènes physiques, chimiques et physico-chimiques qui sous-tendent le comportement du béton. Les résistances mécaniques exceptionnelles des nouveaux bétons répondent à tous les défis actuels en matière de mise en place, de sécurité, de santé, de confort et d'esthétique, en combinant compétitivité économique, durabilité et respect de l'environnement.

**III .2 Les bétons innovants :**

Le béton est un matériau de construction extrêmement populaire, notamment en raison de sa durabilité et de sa facilité de production. Sa composition est basée sur des matériaux simples : sable, eau, ciment. Cependant, le béton traditionnel comporte quelques contraintes, en particulier en ce qui concerne son impact sur l'environnement et son empreinte carbone. Heureusement, des chercheurs à travers le monde s'efforcent de créer de nouvelles variétés de béton plus résistant, plus économique et plus respectueux de l'environnement. Bientôt, ces matériaux innovants pourraient révolutionner le domaine du bâtiment et de la construction et contribuer à l'innovation du secteur de la rénovation.

**III.2.1 Le béton autoplaçants :**

Les bétons autoplaçants sont des bétons particuliers, extrêmement fluides, qui se fixent et se serrent uniquement grâce à la gravité, sans avoir besoin de vibrations internes ou externes, même dans des coffrages très ferrailés [31]. Le béton BAP, également connu sous le nom de béton autoplaçants, est un béton spécial qui offre des performances optimales en termes de fluidité, de résistance et de durabilité, en respectant les exigences de durée de vie de différentes charges et conditions environnementales [32].

**III.2.1.1 Les avantages de BAP :**

La qualité de matériau autoplaçants confère au béton plusieurs avantages techniques et socio-économiques par rapport au béton ordinaire. On peut résumer les avantages du BAP dans les points suivants :

**a- Avantages techniques :**

- Mise en place rapide du béton ce qui augmente la capacité de construction [33].
- Amélioration la résistance grâce à l'augmentation de la compacité et la diminution de la porosité [34].
- Bétonnage en milieux fortement ferraillés.
- Amélioration de la qualité esthétique des parements et de l'enrobage des aciers.
- Réalisation d'éléments de formes plus complexes ou de grande hauteur.

**b- Avantages socio-économiques:**

Les BAP sont si fluides qu'il n'est plus nécessaire de les développer pour les mettre en place. La suppression de la phase de vibration est particulièrement bénéfique pour les personnes chargées de la mise en œuvre, car cela entraîne :

- Une diminution de la pénibilité des tâches ;
- Une réduction des risques d'accident [35].

**III.2.1.2 Utilisations des bétons autoplaçants :**

Dans de nombreux domaines, le béton autoplaçants (BAP) représente une alternative intéressante au béton conventionnel. Comparé au béton vibré, le béton autoplaçants présente plusieurs avantages [36,37]. Tout d'abord, il améliore le rendement et la rapidité d'exécution des travaux. Grâce à sa fluidité, il permet une plus grande liberté dans les formes de coffrage, ce qui facilite le bétonnage des éléments exigus et des sections complexes. De plus, il améliore la qualité des surfaces de béton et facilite le coulage dans des zones à armature dense. Le béton autoplaçants permet également de remplir des parties difficilement accessibles, réduit la pénibilité du travail et élimine le risque de syndrome du vibreur. En plus d'améliorer la productivité des entreprises, le BAP contribue à augmenter la qualité et la durabilité des ouvrages en béton.

**III.2.1.3 Les caractéristiques des BAP à l'état frais :**

Les caractéristiques principales d'un béton frais autoplaçants sont la fluidité et l'uniformité. On examine ces caractéristiques sous différentes perspectives et on peut les classer en trois critères mesurables par des tests empiriques : le remplissage, la résistance à la ségrégation et la capacité à traverser les obstacles, que nous désignerons sous le nom de capacité de passage [38-39].

### III.2.1.3.1 L'essai de l'étalement :

L'essai d'étalement est utilisé pour évaluer la fluidité du béton dans un milieu non confiné. On maintient un échantillon de béton dans un cône d'Abrams sur une plaque horizontale en acier humidifiée (figure III.1). Par la suite, on lève le cône de manière régulière et verticale et on laisse s'écouler le béton. L'essai d'affaissement sur cône d'Abrams qui consiste à mesurer le diamètre d'étalement de la galette de béton sur deux côtes perpendiculaires [40].



Figure III.1 : Essai d'étalement pour béton témoin

### III.2.1.3.2 Essai à l'entonnoir en V:

L'objectif de cet essai est d'analyser la capacité du béton à se déplacer dans un environnement confiné. Le temps d'écoulement du béton est mesuré à travers (figure III.2). Souvent, on utilise ce temps d'écoulement pour évaluer la viscosité du béton autoplaçants. L'écoulement rapide du béton hors de l'entonnoir entraîne une diminution de sa viscosité. Il est recommandé d'avoir un temps d'écoulement de 8 à 14 secondes [41].



Figure III.2 : Essai d'entonnoir en V

### III.2.1.3.3 Essai boîte en L :

En testant la boîte en L, on peut évaluer sa capacité à se déplacer dans un environnement confiné et sa capacité à traverser une zone fortement armée. Grâce à cet essai, il est possible de s'assurer que la mise en place du béton ne sera pas perturbée par des blocages de granulats avant les armatures. La technique implique de remplir le béton dans la partie verticale d'une boîte en forme de L (figure III.3), puis de retirer la trappe, ce qui entraîne l'écoulement du béton dans la partie horizontale à travers une série d'armatures composée de trois barres d'armatures de diamètre 16 mm [42]. Le taux de remplissage  $H2/H1$  exprime les résultats de l'essai, ce qui indique la capacité à circuler dans un environnement confiné. Si ce rapport atteint une valeur supérieure à 0,8, cela indique un bon déroulement du BAP.



Figure III.3 : Essai de boîte en L

### III.2.1.3.4 L'essai d'étalement modifié (J-Ring) :

L'essai d'étalement modifié a été créé au Japon et implique de faire s'écouler le béton à travers des barres d'armature pour évaluer sa capacité à se bloquer. A cet effet, le béton s'écoule depuis le cône situé au centre d'un anneau en métal. Des barres d'armature de 16 à 18 mm sont soudées sur cet anneau de 300 mm de diamètre, avec une distance régulière d'environ deux fois et demi leur diamètre. Le béton BAP répond parfaitement aux critères de fluidité recherchés, avec une faible tendance à la ségrégation et un enrobage complet des armatures, lorsqu'il s'écoule de manière homogène à travers cet anneau et lorsque la répartition des granulats semble homogène, tant à l'intérieur que à l'extérieur de l'anneau [43].

### III.2.1.3.5 Essai de la boîte en «U» :

L'objectif de cet essai est de mesurer la capacité de remplissage du BAP dans un coffrage confiné et fortement ferrailé. La boîte «U» est divisé en deux parties symétriques R1 et R2 par une cloison centrale, dont le fond est équipé d'une trappe coulissante qui permet de libérer les grilles d'armatures (figure III.4). L'essai de boîte en «U» nécessite 16 L de béton et s'appuie sur la mesure de la hauteur H de béton dans la partie R2, après avoir rempli la partie R1 et ouvert la trappe. Dans ce cas, les auteurs estiment qu'un béton sera "autoplaçants" si la hauteur de remplissage H est supérieure à 30 cm [44].

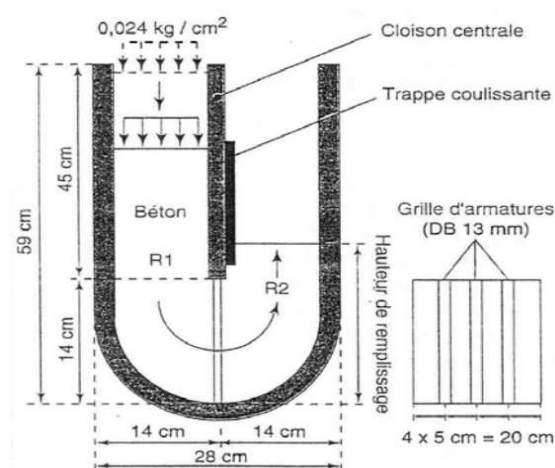


Figure III.4 : Schéma descriptif de la boîte en U

### III.2.1.3.6 Essai de la stabilité au tamis :

La capacité d'un BAP à maintenir ses particules en suspension, sans risque de tassement par gravité ou de ressuage, est appelée résistance à la ségrégation statique. L'essai de stabilité au tamis est utilisé pour évaluer la ségrégation statique d'un BAP (voir figure III .5). L'essai est créé par l'entreprise « GTM construction », il permet de donner une évaluation des BAP en ce qui concerne le risque de ségrégation. Il est nécessaire de verser 10 litres de béton immédiatement après le malaxage dans un seau, puis de couvrir le seau afin de prévenir la dessiccation du béton, puis de le laisser reposer pendant 15 minutes. Le béton doit être versé au centre d'un tamis de 5mm à une hauteur de chute de 50cm, puis le béton doit être récupéré en passant dans un récipient. Après deux minutes, le pourcentage de laitance est évalué en fonction du poids de l'échantillon qui passe au travers du tamis [45].

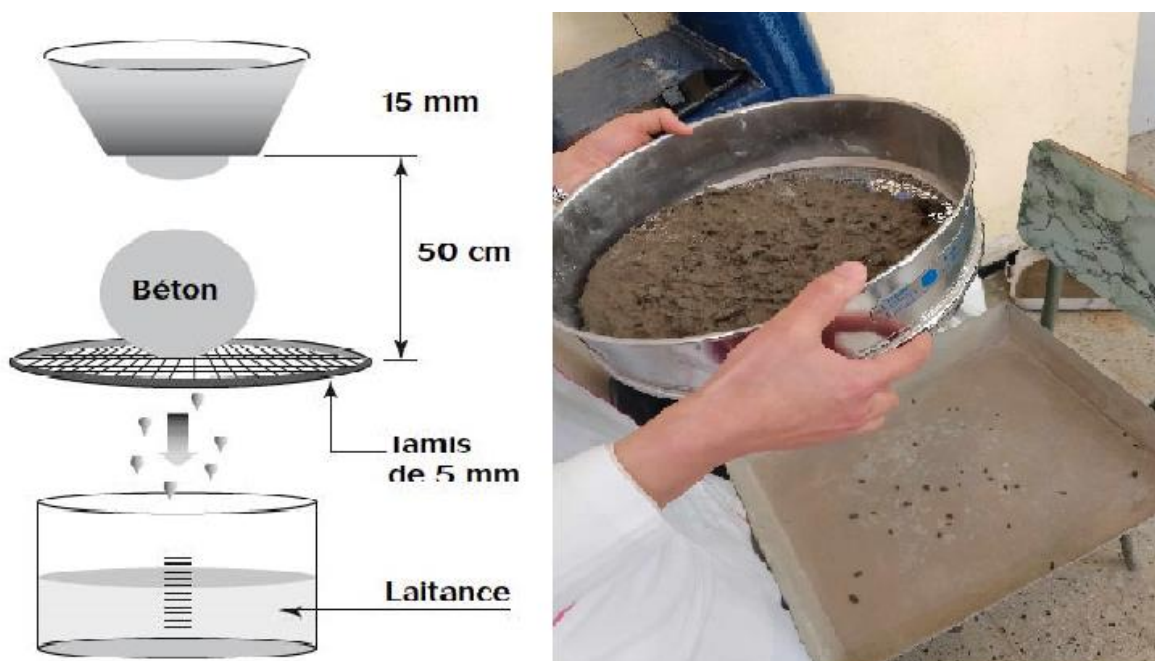


Figure III.5 : Essai de stabilité au tamis

### III.2.1.4 Caractéristiques des BAP à l'état durci :

Au cours de cette partie, nous présentons brièvement les disparités entre les caractéristiques des bétons autoplacants à l'état durci et celles des bétons ordinaires. Les propriétés mécaniques sont examinées d'une part, et les propriétés physico-chimiques (durabilité) d'autre part. Les

principales conclusions exposées sont issues de l'étude menée au sein du LMDC [46,47]. Plusieurs séries d'échantillons ont été testées, avec des matériaux similaires, un squelette granulaire similaire (à l'exception des BHP), et différentes classes de résistance pour les bétons de construction (20 MPa), les bétons d'ouvrage (40 MPa) et les bétons à haute performance BHP (60 MPa).

#### **III.2.1.4.1 Résistance à la compression :**

L'évolution de la résistance mécanique des BAP contenant des fillers calcaires est comparée à celle des bétons vibrés dans différentes études. Selon ces écrivains, la résistance augmente rapidement dès le plus jeune âge, jusqu'à 28 jours. Cela est dû à une hydratation renforcée grâce à une augmentation des sites de nucléation des fines du filler [48]. Cette résistance augmente d'autant plus que la finesse du filler est importante [49].

#### **III.2.1.4.2 Résistance à la traction :**

Les variations de résistance peuvent être causées par la particularité des BAP. Par exemple, la quantité de fines ou bien le volume de sable peuvent influencer la résistance en traction [50]. Ils démontrent que lorsque la quantité de sable ou/et le volume de fines augmente, cela entraîne une augmentation de la résistance en traction. Effectivement, la capacité d'un béton à résister à la traction est influencée par divers facteurs. Il est important de souligner que la microstructure de la pâte cimentaire et la porosité de l'auréole de transition sont souvent employées dans la littérature afin d'expliquer les variations ou les résultats de résistance à la traction obtenus.

#### **III.2.1.4.3 Module d'élasticité statique (en compression):**

Des bétons autoplaçants et des bétons ordinaires vibrés à résistance mécanique égale sont testés par [47]. Le module d'élasticité des BAP est équivalent à celui des BO pour des rapports gravier sur sable G/S similaires. De plus, en fonction des rapports G/S, le module d'élasticité des BAP est plus faible que celui des BO. Cela s'explique par le fait que la quantité de pâte est plus élevée pour les bétons qui se fondent. En effet, le module d'élasticité d'un béton est fonction des proportions volumiques de ses constituants et de leurs modules respectifs (le module de la pâte est bien inférieur à celui des granulats).

### **III.2.2 Béton à haut performance :**

Hautes performances signifient facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. Le béton haute performance (BHP) se distingue par sa résistance mécanique et sa durabilité exceptionnelles. Il se distingue par une résistance à la compression extrêmement élevée, atteignant 50 MPa après 28 jours, et des propriétés exceptionnelles à l'état frais, à court ou à long terme. Les BHP ont une réduction significative de la porosité, une plus grande résistance aux agents agressifs et, de manière générale, une durabilité améliorée et une résistance accrue [51,52]. Les bétons à haute performance « BHP » connaissent actuellement une croissance fulgurante dans le domaine du génie civil, en particulier dans la construction des ouvrages. Ils ont la capacité de supporter des charges plus importantes ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et offrent la possibilité de réaliser des portées plus grandes [53].

#### **III.2.2.1 Les caractéristiques des BHP à l'état frais :**

##### **III.2.2.1.1 Maniabilité :**

Les super-plastifiants ont un effet lubrifiant qui facilite la glisse des particules solides les unes sur les autres. Le matériau frais est facile à déformer, même avec un effort léger. Prenons l'exemple de l'essai au cône d'Abrams, le béton s'étale et présente des affaissements généralement supérieurs à 20 cm.

##### **III.2.2.1.2 Fluage et fluidité :**

Le taux de fluage est nettement inférieur à celui d'un béton ordinaire. Le rapport entre la déformation différée et la déformation instantanée, appelé coefficient de fluage, varie entre 1 et 1,5 pour les BHP et 2 pour les bétons. En général, un BHP a une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones où la densité d'armature est élevée [53].

#### **III.2.2.2 Les caractéristiques des BHP à l'état durcis :**

##### **III.2.2.2.1 La masse volumique :**

La masse volumique d'un BHP est légèrement plus élevée que celle d'un Béton ordinaire. Cela s'explique par la compacité optimale des BHP.

- Masse Volumique apparente = 2400 et 2500 pour les BHP.

-Masse Volumique apparente = 2350 à 2400 pour BO

#### **III.2.2.2 Résistance à la compression:**

Les bétons sont classés selon de leur résistance la compression à 28 jours. Les bétons de haute performance présentent une résistance exceptionnelle à la compression. Une plus grande résistance à l'âge jeune, ce qui permet de diminuer le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Les délais d'exécution peuvent donc être raccourcis. Après le durcissement, la résistance finale augmente, ce qui permet de diminuer les sections du béton et, par conséquent, de réduire le poids de la construction [52,54].

#### **III.2.2.3 Domaine d'application de BHP :**

Dans les constructions de toutes tailles, les BHP sont employés pour obtenir des résistances mécaniques très élevées, des structures compactes ou des réductions de section [55]. Ils offrent également la possibilité de satisfaire des besoins d'intégration dans l'environnement, de prendre en considération des contraintes climatiques extrêmes ou de protéger contre les agressions chimiques [55]. Les BHP sont utilisés notamment pour la réalisation de bâtiments de bureaux, parkings, tunnels et travaux souterrains, ouvrages d'art et de génie civil, ponts routiers, plates-formes d'exploitation et de stockage, préfabrication, ouvrage en site maritime, ouvrages de l'industrie chimique ou du nucléaire, bâtiment agricole.

#### **III.2.2.4 Les avantages des bétons de haute performance (BHP) :**

Les BHP présentent des avantages par rapport au béton traditionnel :

- **En terme de résistance :**

Résistance élevée à la compression permet de diminuer les quantités de béton nécessaires  
Résistance élevée à l'état frais, ce qui favorise une augmentation de la vitesse des travaux.

- **En terme de durabilité :**

L'utilisation de ce matériau dans des environnements hostiles est possible grâce à sa durabilité (résistance aux agressions extérieures). La durabilité permet de réduire les dépenses liées à l'entretien et à la maintenance.

### III.2.3 Le béton cellulaire :

Le béton cellulaire est un matériau de construction fabriqué à partir de déchets minéraux. Abondamment présent dans la nature, ses constituants sont : du sable fin, du ciment, de la chaux et d'un agent expansif tels que : Poudre d'aluminium, Agent moussant, Entraîneur d'air [56]. Les matières premières essentielles sont le sable, la chaux et le ciment. Celles-ci sont intimement mélangées dans des proportions bien déterminées, après quoi on y ajoute de l'eau. L'adjonction d'une petite quantité de poudre d'aluminium aura pour effet de faire lever la pâte [57].

#### III.2.3.1 Caractéristiques de béton cellulaire :

##### III.2.3.1.1 La densité :

La densité du béton cellulaire varie de 300 à 1800 kg/m<sup>3</sup>, il est essentiel que ses caractéristiques soient alignées avec sa densité. En spécifiant la densité, les conditions d'humidité, (c'est-à-dire, séchage à l'étuve ou à l'air libre) doivent être indiqués. On peut produire du béton cellulaire avec une variété de densités pour des applications spécifiques en modifiant sa composition, ce qui a un impact sur la structure, la taille et la répartition des pores. Il est essentiel d'avoir une structure cellulaire stable et souvent sphérique afin d'obtenir des propriétés structurelles et fonctionnelles optimales. Il est également nécessaire de répartir les pores de manière uniforme dans la masse afin d'obtenir des produits de densité homogène. Le développement des macros pores dans la matrice est influencé par la densité d'une façon significative. Selon les méthodes traditionnelles, la densité du béton cellulaire est corrélée à sa taille et à sa porosité [56].

##### III.2.3.1.2 La conductivité thermique :

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplis d'air [58]. La densité du béton cellulaire est essentiellement influencée par sa conductivité thermique. La conductivité thermique est également influencée par d'autres éléments tels que le taux d'humidité, la température, la structure poreuse et les matières premières [59]. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire. En raison de la présence de bulles d'air dans ses cellules, le béton cellulaire développe des caractéristiques d'isolation thermique significatives. Il assure une ambiance agréable à

l'intérieur par l'élimination des ponts thermiques. Le béton cellulaire absorbe l'augmentation de la température extérieure durant le jour et restitue l'énergie accumulée pendant la nuit.

#### **III.2.3.1.3 Masse volumique sèche apparente :**

Le béton cellulaire présente des caractéristiques qui sont directement ou indirectement liées à sa densité, comme la résistance du béton cellulaire diminue de manière exponentielle lorsque sa densité diminue. Selon son nom, le béton cellulaire est celui qui présente un poids propre et une légèreté supérieure à celle du béton traditionnel. De cette manière, il peut présenter une résistance pratiquement équivalente à celle du béton à résistance normale, avec des teneurs inférieures. Masse volumique sèche apparente [60].

#### **III.2.3.1.4 Résistance à la traction par flexion :**

Tous les bétons sont nettement moins performants en traction qu'en compression. En l'absence de données expérimentales, il convient de prendre en compte les données suivantes :

La résistance à la traction du béton cellulaire représente 12% de la résistance en compression [60]. Selon la norme EN 12602, la résistance à la traction par flexion est de 22% de la résistance en compression.

#### **III.2.3.1.5 Résistance à la compression :**

La résistance à la compression augmente en fonction de la masse volumique du béton cellulaire décrite dans les normes belges PTV 21-002 et NBN B 21-004. Au moment du calcul d'un mur, il est important de prendre en considération la résistance accrue des maçonneries à joints collés (comme c'est le cas en béton cellulaire) par rapport à celles maçonnées à joints de mortier [61]. De façon générale, les maçonneries en blocs de béton cellulaire collés de type C4/550 offrent la possibilité de construire des bâtiments jusqu'à une hauteur de R+5. Cependant, il est essentiel de faire une étude spécifique pour les hauteurs supérieures. Afin d'améliorer les performances, il est possible que la société de production de béton cellulaire recommande un type de densité plus élevée, après avoir effectué le calcul et respecté la norme "maçonnerie" NBN B 24-301 ou NBN EN 1996-1-1 [62].

#### **III.2.3.2 Utilisation de béton cellulaire :**

Agricole, exigent les produits en béton cellulaire. Portants ou non portants, les blocs sont utilisés aussi bien en murs intérieurs qu'extérieur. En bâtiments industriels ou en grandes

surfaces commerciales, on utilise principalement les dalles de mur, appelées aussi dalles de bardage. [60]. Pour son excellente isolation thermique, le béton cellulaire est généralement utilisé, il est ainsi et particulièrement apprécié car il conserve la fraîcheur des bâtiments en été. Grâce à l'utilisation de matériaux traditionnels, la réalisation du béton cellulaire devient plus simple et plus rapide.

#### **III.2.4 Béton à chanvre :**

Le béton de chanvre est composé d'une combinaison de chènevottes, de liant et d'eau. Les recherches effectuées ont permis déterminer les caractéristiques physiques du matériau. Le matériau possède une grande porosité, ce qui lui confère des caractéristiques d'isolant thermique et d'absorbante acoustique. Grâce à sa capacité à stocker et déstocker la vapeur d'eau, le béton de chanvre présente des performances hygrothermiques intéressantes. Effectivement, les caractéristiques hygrothermiques du béton de chanvre contribuent au confort intérieur au sein d'un local et améliorent ainsi ses performances énergétiques. Ce matériau est utilisé en remplissage d'ossatures, sa résistance mécanique ne lui permet pas d'être utilisé comme matériau porteur [63].

##### **III.2.4.1 Le chanvre :**

Le chanvre est cultivé par l'homme depuis le néolithique, une plante annuelle et herbacée de la famille des Cannabinacées, en raison de sa qualité de fibres, de ses graines oléagineuses et de ses vertus médicinales. Les avantages agronomiques du chanvre sont importants : il est une excellente herbe d'assolement, sa culture améliore la structure du sol et peut être réalisée sans traitement ni engrais. Les trois coproduits du chanvre sont la graine, les fibres et les chènevottes. En construction, on peut utiliser les fibres pour fabriquer de la laine isolante et les chènevottes pour fabriquer du béton de chanvre et des enduits. Une tonne de paille produit en moyenne 0,3 tonne de fibres et entre 0,55 et 0,65 tonne de chènevotte [64].

##### **III.2.4.2 Avantage de béton à chanvre :**

Le béton de chanvre possède des caractéristiques isolantes exceptionnelles, aussi bien thermiques que phoniques. Il est très durable, régule l'humidité ambiante et ne subit jamais d'attaques de rongeurs, de champignons ou de moisissures, sous réserve d'une formulation ou d'un traitement adéquat. De plus, la chaux est assainissant et contribue à la qualité de l'air à l'intérieur des habitations [65].

- Pas de dégagements toxiques pendant l'utilisation ou en cas d'incendie
- Produit adapté à la rénovation
- Recyclable et biodégradable après destruction
- Protection de la structure bois en cas d'incendie.

### **III.2.4.3 Caractéristiques des bétons de chanvre :**

#### **III.2.4.3.1 Masse volumique des agro-bétons :**

Les bétons de chanvre ont une masse volumique apparente très faible par rapport aux bétons traditionnels. Elle peut varier de 250 à 500 kg.m<sup>-3</sup> en fonction de la formulation. C'est précisément cette faible densité qui assure aux performances thermiques du béton de chanvre. Toutefois, la résistance mécanique et la densité sont aussi étroitement liées. De cette manière, les agro-bétons présentent des résistances mécaniques faibles en raison de leur faible densité. Les valeurs observées dans la littérature sont très similaires aux densités apparentes obtenues [66].

#### **III.2.4.3.2 Résistance en compression :**

La réaction des agro-bétons à un effort de compression varie en fonction de la direction de l'effort appliqué [67]. En effet, lors du compactage, les particules de chènevotte ont tendance à se déplacer. De manière traditionnelle, les bétons de chanvre sont soumis à des tests de compression en appliquant un effort parallèlement à la direction de compactage. On dirige donc la force de compression perpendiculairement à la direction d'orientation des particules de chanvre. En revanche, si l'essai de compression est effectué perpendiculairement à la direction de compactage, les chènevottes sont plus sollicitées longitudinalement, dans leur direction de plus grande rigidité.

#### **III.2.4.3.3 Conductivité thermique :**

La conductivité thermique est la grandeur la plus couramment employée pour évaluer les performances thermiques d'un matériau. La densité du matériau est étroitement liée à cette dernière. Le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction est caractérisé par cette grandeur physique. La conductivité thermique d'un matériau diminue à mesure que celui-ci devient plus isolant. Chaque formulation de béton de chanvre a été évaluée en fonction de son coefficient de conductivité thermique [68].

**III.2.4.4 Utilisations de béton à chanvre :**

Actuellement, on utilise principalement du béton de chanvre en doublure ou en remplissage afin de former un élément de construction qui offre une excellente isolation thermique et phonique, sans apport structurel [68]. Plusieurs applications sont envisagées pour l'utilisation du béton de chanvre, que ce soit en rénovation ou en construction neuve : remplissage de colombages, plancher de structure en bois, éléments de construction préfabriqués ayant un rôle structurel ou porteur (brique, bloc en béton de chanvre) [66].

**IV.1 Introduction :**

L'étude de la composition d'un béton implique de déterminer le mélange idéal des différents granulats disponibles, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de produire un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage concernée. Les méthodes de composition se subdivisent en deux types:

Les méthodes à "granularité continue" sont utilisées lorsque la courbe sur le graphique granulométrique évolue de façon continue, c'est-à-dire du plus petit grain de ciment de dimension  $d_c=6.3 \mu\text{m}$  au plus gros grain D des graviers.

Les méthodes à "granularité discontinue" sont utilisées dans les méthodes où la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'élément intermédiaire.

Les bétons à granularité continue sont plus plastiques et ont une bonne ouvrabilité, tandis que ceux à granularité discontinue présentent généralement des résistances en compression légèrement plus élevées, mais au détriment de leur ouvrabilité. Cependant, il semble que la majorité des bétons actuellement utilisés sont à granularité continue.

**IV.2 La formulation de béton :**

La formulation a pour fonction de donner une nouvelle perspective sur le béton en choisissant les proportions de chaque composant pour obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre. Elle doit d'abord respecter les exigences de la norme NF EN 206-1, qui varie en fonction de l'environnement dans lequel le béton sera utilisé. Cela peut être plus ou moins difficile en fonction de la quantité minimale de ciment à incorporer dans la formule et de la quantité d'eau maximale tolérée. De la même manière, dans chaque environnement spécifique, les producteurs devront garantir une résistance à 28 jours sur des éprouvettes, ce qui pourrait justifier des dosages de ciments plus ou moins élevés que les recommandations de la norme. Cette exigence sera basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, qui dépend de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats [69].

**IV.3 Méthode de faury :**

La méthode de Faury permet de produire des bétons contenant moins de sable et davantage de gravier. Ces bétons présentent une résistance accrue et seront adaptés à des travaux où une grande maniabilité n'est pas indispensable [70].

La méthode prend comme échelle : [71]

-la  $5\sqrt{D}$  en abscisse

-en ordre, la décimale correspondant au pourcentage de matière en volume absolu qui traverse les passoires correspondantes.

-On effectue le calcul en suivant les étapes suivantes.

$$D_{\max} = D_{n-1} \left( \frac{1+x}{2y} \right)$$

$D_{n-1}$  : le diamètre qui correspond au tamis n-1

X : le refus sur le tamis n-1

y : le refus entre  $D_{n-1}$  et  $(D_{n-1})/2$

Alors :  $D_{\max} = D_{n-1} (1 + x/2y)$

$$Y = 27 + 17.8 \sqrt{D_{\max}} + 3.5$$

-On calcule D/2

D : la fraction max de la classe supérieure

$D_{100\%} \dots D$  : le diamètre du tamis situé avant le premier tamis d'analyse granulométrique.

Selon cette estimation, la courbe de référence de Faury est composée de trois points.

$$[0.0065 ; 1], [D/2 ; Y \cdot D_{\max}/2], [D_{100\%} ; 100\%]$$

Ensuite, la courbe granulaire de FUARY a été tracée.

- La formule suivante donne la quantité d'eau E.

$$E = 0.39/5\sqrt{D} \times 1000 \dots \dots \dots (1)$$

- Détermination des éléments secs

$$\text{Eléments secs} \quad \boxed{ES = 1000 - E}$$

Pour notre cas on a choisi le dosage de ciment à 400Kg /m<sup>3</sup>

le volume de ciment dans un mètre cube de béton égal  $V_c = \frac{400}{M_{vabs}}$

Alors le pourcentage de ciment égal à  $\frac{V_c}{ES} \times 1000$

- Les pourcentages

Selon la courbe, on obtient donc :

-Le pourcentage de sable

-Le pourcentage de gravier (3/8)

-Le pourcentage de gravier (8/15)

La structure d'un mètre cube de béton avec un volume de :

Sable = le pourcentage de sable  $\times ES$

Gravier (3/8) = le pourcentage de 3/8  $\times ES$

Gravier (8/15) = le pourcentage de 8/15  $\times ES$

Ciment = le dosage choisi par un mètre cube

Eau = Calculé à l'aide de la formule (1).

La composition en masse : les quantités massiques des granulats est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\boxed{\text{Le volume en litre} = \frac{\text{la densité absolue}}{\text{la densité apparente}} = \text{la masse en kg}}$$

#### IV.4 Méthode française (Dreux 1970) :

Cette méthode est essentiellement empirique, contrairement à la méthode Faury qui lui est antérieure et qui repose sur la théorie de l'optimum granulaire de Caquot [72]. Au LCPC (laboratoire central de ponts et chaussées), on a créé un modèle mathématique en utilisant un modèle de suspension solide. Ce modèle basé sur les interactions granulaires entre les différents composants du mélange. Il offre la possibilité de prédire la granulométrie d'un mélange granulaire avec une précision inférieure à 1% en utilisant les composants suivants :

- Les distributions granulaires
- Les proportions du mélange
- La compacité propre
- La densité apparente [73].

##### ➤ **Étapes successives de la méthode :**

**Étape 1 :** Examen de la structure (dimensions, espacement entre armatures, enrobage, etc.).

**Étape 2 :** Détermination de la résistance à la compression. Elle est déduite de la résistance désirée et d'un coefficient probable de variation.

**Étape 3 :** Choix de la texture du béton frais. La définition de cette spécification est basée sur l'affaissement ou le test CES (l'essai CES86 a été effectué sur les deux réactions). L'objectif de cet essai est de remplir un moule cubique avec du béton frais, avec une face verticale transparente et équipée d'un treillis d'acier. On insère du béton frais dans l'appareil en deux couches, piquées 25 fois, puis on applique une vibration de 10 secondes à la boîte. On peut observer l'apparence du béton sur la surface transparente, et la compactibilité obtenue est satisfaisante : après avoir été vibré, l'acier est correctement enrobé par le béton frais, et il n'y a ni bulles ni nids d'abeilles).

**Étape 4 :** Sélection de  $D_{\max}$ . Elle est faite à l'aide d'une table fixant des valeurs maximales fonction des dimensions de la structure analysée à l'étape 1.

**Étape 5 :** Calcul de la quantité de ciment. En premier lieu, on déduit le rapport ciment/eau en se basant sur la résistance désirée, en se basant sur la loi de Bolomey :  $f_c = 24.6 (C / E - 0.5)$ . La résistance du ciment et un facteur adapté aux granulats sont pris en considération dans cette loi. On calcule donc un dosage minimum de ciment afin de garantir la durabilité. Il est supposé que ce dosage soit inversement lié à la racine cinquième de  $D_{max}$ . Enfin, on déduit le dosage réel en ciment d'un abaque, en se basant sur le rapport ciment/eau et l'affaissement.

**Étape 6 :** Calcul de la quantité (totale) d'eau. La quantité de ciment déterminée précédemment et le rapport ciment/eau sont utilisés pour le calcul. Une correction peut être effectuée à ce stade afin de prendre en compte la variation de  $D_{max}$  (augmentation de la quantité d'eau lorsque  $D_{max}$  diminue). Cette valeur est donc la quantité d'eau à ajouter au malaxeur, ajustée par l'eau libre présente dans les matériaux bruts (granulats).

**Étape 7 :** Analyse du sable. Le sable peut être accepté ou rejeté en fonction de sa qualité. On représente sa courbe granulométrique sur un diagramme standard. Dans le cas où le module de finesse est excessif (sable trop grossier), on ajoute un sable fin correcteur.

**Étape 8 :** Tracé de la courbe granulaire de référence. Les éléments suivants influencent la détermination de l'ordonnée Y :  $D_{max}$ , concentration en ciment, intensité de la vibration, structure des grains et module de finesse du sable. Le tableau IV.1 présente une synthèse des mouvements de Y lors d'une augmentation.

**Tableau IV.1 :** Paramètres pris en compte dans la détermination de Y (ordonnée du point de brisure).

Paramètres	Evolution de Y
$D_{max}$	↓
Dosage en ciment	↓
Vibration	↓
Forme des particules	Roulée ou concassées
Modèle de finesse	↑

**Étape 9 :** Détermination du volume solide du mélange frais. Cette quantité est tabulée en fonction de  $D_{max}$  et de la consistance.

**Étape 10 :** Détermination des fractions de granulaire. On calcule les proportions respectives

(en volume) en utilisant la courbe de référence (étape 8). Ainsi, le volume dans le volume unité de béton est déterminé en multipliant le volume solide par la proportion obtenue pour chaque granulat. Enfin, on calcule la masse du granulat en multipliant le volume de chaque granulat par sa masse volumique. Au stade actuel, on connaît la composition théorique ; elle doit être vérifiée sur des mélanges de laboratoire et ajustée (si nécessaire) [74].

#### **IV.5 Méthode japonaise :**

Les BAP sont formulés de manière sûre en utilisant l'approche développée à l'université de Kochi, en mettant l'accent sur le volume de pâte plutôt que sur les granulats. Les bétons obtenus contiennent une quantité limitée de granulats, ce qui les éloigne de l'optimum économique. Au Japon, les dépenses supplémentaires sur le matériau sont compensées par des économies sur la main-d'œuvre. Les étapes successives de la méthode seront présentes ci-après.

##### **IV.5.1 Dosage des gravillons :**

Le risque de blocage est réduit lorsque le volume du gravillon pour 1 m<sup>3</sup> de béton est réduit à la moitié de sa taille, comme l'ont démontré les chercheurs japonais. La compacité d'un mélange de grains correspond, par définition, au rapport entre le volume des grains et le volume total du système grains + vides. D'après le mode de compactage, elle varie. Si aucune indication n'a été fournie, nous avons choisi de la mesurer selon la procédure du LCPC. Chaque gravillon a une compacité d'environ 0,57. Si la granulométrie est de 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m<sup>3</sup>. En ce qui concerne la formule de granulométrie 0/14 mm, granulométrie 0/10 mm, le volume du gravillon est donc posé à 285 l/m<sup>3</sup>. Dans le cas de la formule de granulométrie 0/14 mm, nous choisissons de répartir ce volume pour moitié en 6/10 et en 10/14.

##### **IV.5.2 Dosage du sable :**

Le volume du sable est posé forfaitairement à 40 % du volume de mortier du béton. La fluidité du béton est assurée grâce à la diminution des frictions entre les granules.

##### **IV.5.2 Dosage du liant :**

La méthode ne précise pas comment doser le liant. Néanmoins la quantité de ciment peut être fixée, en respectant la donnée des normes (une masse minimale de ciment de 350 kg/m<sup>3</sup>). Il est également possible de choisir les rapports massiques d'eau sur le ciment et de filler sur le ciment en fonction des critères de résistance.

### IV.5.3 Dosage de l'eau et du superplastifiant :

Les dosages en eau et en superplastifiant, 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 [74].

Les chercheurs définissent alors deux grandeurs : étalement relatif et l'écoulement relatif.

L'étalement relatif  $D$  est donné par l'équation :

$$D = \frac{d^2 - d_0^2}{d^2}$$

Où  $d$  est le diamètre de la galette et  $d_0$  la base du cône. Ils définissent également.

L'écoulement relatif  $T$  par l'équation :

$$T = 10/t_c$$

Où  $t_c$  : est le temps d'écoulement à l'entonnoir.

Les chercheurs japonais ont montré que la relation entre l'étalement et l'écoulement est linéaire lorsque le dosage en eau varie à quantité de superplastifiants constante. À l'aide de peu d'essais, il est alors possible de trouver un couple adjuvant/eau permettant de fluidifier de manière optimale le mortier.

### IV.6 Méthode de Dreux Gorisse :

Cette méthode française est essentiellement empirique et remonte à 1970. Dans le but de collecter des données sur des bétons satisfaisants, Dreux a réalisé une enquête approfondie. En analysant statistiquement ce grand nombre de bétons et en combinant les courbes granulaires obtenues, ils ont pu établir une approche empirique pour déterminer une courbe granulair de référence qui se présente sous la forme de deux lignes droites dans un diagramme semi-logarithmique.

De plus, elle est extrêmement facile à utiliser car elle ne nécessite que de connaître les courbes granulométriques des granulats utilisés [75].

➤ Résistance visée :

$$\sigma'_{28j} = \sigma_{28j} + 0.15 \sigma_{28j}, \text{ Soit } \sigma'_{28j} = 1.15 \sigma_{28j}$$

avec :  $f_c' = \sigma'_{28j}$  résistance visée à 28 jours

$f_{CE}$ : classe vraie de ciment en MPa.

$G$  : coefficient granulaire.

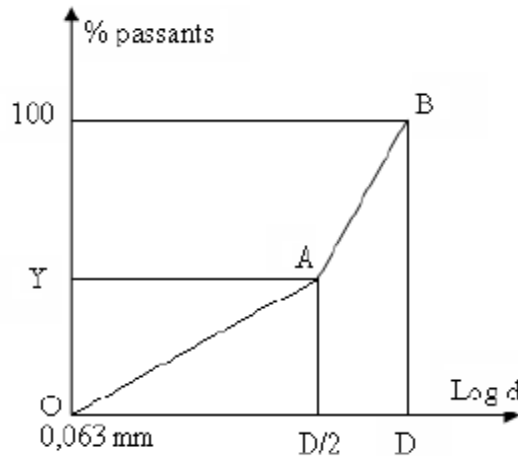
$C$  : dosage en ciment (Kg de ciment/m<sup>3</sup> de béton).

$E$  : dosage en eau (Kg d'eau/m<sup>3</sup> de béton ou litre d'eau/m<sup>3</sup> de béton).

- Selon le rapport  $\frac{C}{E}$ , on calcule le volume d'eau comme suit :

$$E = \text{le rapport } \frac{C}{E} \times \text{dosage de ciment} \dots\dots\dots(1)$$

- Tracé de la courbe granulatoire de référence AOB :



**Figure IV.1 :** La courbe optimale type selon la méthode Dreux-Gorisse.

Le graphe d'analyse granulométrique, de type AFNOR, montre le pourcentage de tamisât en fonction du module ou diamètre de tamis, nous traçons une composition granulatoire de référence OAB

avec :

- le point O est repéré par ses coordonnées: [0.01; 0]
- le point B est repéré par ses coordonnées: [D; 100],  
(D: le diamètre du plus gros granulat).
- Le point de brisure A aux coordonnées  $[\frac{D}{2}; Y]$ , suivantes:

- en abscisse :

- si  $D \leq 20$  mm, le point de brisure a pour abscisse:  $A = D/2$

- en ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

D : diamètre du plus gros granulat

K : un terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés.

la ligne de partage:

Le point d'ordonnée 95% de la courbe granulatoire du plus petit granulat est relié au point

d'ordonnée 5% de la courbe granulaire du plus gros granulat par la ligne de partage. Le croisement de cette ligne avec la courbe théorique du mélange optimum représente les coefficients de volume absolu de sable et de gravier. Le pourcentage de tamisât correspondant à ce point d'intersection est utilisé pour lire ces proportions. La proportion de sable est indiquée par ce pourcentage, tandis que le complément indique la proportion de gravier.

-Après le traçage de la courbe on obtient les pourcentages des granulats (sable et gravier).

-Détermination de la composition en volume absolu :

- Le dosage en béton est déterminé pour obtenir un mètre cube de béton en place, ce qui implique que le volume de matière est de  $1\text{m}^3$ .

$$V_{\text{abs}} = V_S + V_g + V_C = 1$$

$V_{\text{abs}}$  : la masse absolue de ciment  $\text{kg}/\text{m}^3$

$V_S, V_g$  et  $V_C$  : le volume de sable ,gravier et ciment respectivement d'un mètre cube du béton.

$$V_C = \frac{C}{V_{\text{abc}}} \quad \text{soit, } C: \text{ dosage en ciment ( kg}/\text{m}^3)$$

- Volume absolu de granulats :

De la relation de  $\gamma = V_C + V_g + V_S$  on en déduit  $V_g$  et  $V_S$

en remplaçant le volume de granulats  $V_S + V_g$  par la valeur  $V_G$ , alors  $\gamma = (V_C + V_G)$

$$V_G = (1000 \times \gamma) - V_C$$

$V_G$  : volume absolu des granulats en litre ( $V_G = V_g + V_S$ )

$\gamma$ : Coefficient de compacité

Volume de sable = Le pourcentage  $\times V_G$

- Détermination de la composition pondérale sèche en Kg

-Masse de ciment : le dosage choisi

-La quantité d'eau : E par la formule (1)

-Masse de sable  $S = V_S \times M_{V_{\text{abs}}}$

-Masse de gravillons

$$G_{3/8} = V_G \times M_{V_{\text{abs}}}$$

$$G_{8/15} = V_G \times M_{V_{\text{abs}}}$$

Finalement on trouve les quantités des masses de gravier, sable et eau et dosage de ciment pour un mètre cube de béton.

**IV.7 Méthode de Bolomey :**

La formulation en termes de résistance à la compression, la méthode est basée sur la relation suivante :

$$R_{cb} = R_{cc} \times G$$

$R_{cb}$ : résistance à la compression du béton

$R_{cc}$ : résistance caractéristique à la compression du ciment

C : quantité ciment ; E : quantité d'eau efficace ( $\leq 200$  litres) ; Air : volume d'air (en litre) ;

G : coefficient de qualité des granulaires.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est recherchée de façon à ce qu'elle soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique obtenue par la formule suivante:

$$P = A + (100 - A) \times \left(\frac{d}{D}\right)^n$$

A : varie de 8 à 16, il est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est plus fort

P : est le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d

D : est le diamètre du plus gros grain.

Cette méthode aboutit théoriquement, plus au moins, à une granularité continue [76].

**V.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous détaillons les diverses matières premières employées, telles que les granulats, le ciment, ainsi que les adjuvants et additifs. Nous exposons également les différentes techniques de caractérisation physico-chimique et mécanique utilisées pour évaluer le comportement des bétons autoplaçants (BAP) par rapport aux bétons ordinaires.

**V.2 Préparation et technique de caractérisation des matières premières :****V.2.1 Analyse granulométrique :**

L'analyse granulométrique est une méthode importante pour évaluer la distribution de la taille des particules d'un matériau granulaire. La taille des particules influence les propriétés des matériaux telles que l'écoulement et le transport, cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en application de la loi de Stokes.

**V.2.1.1 But de l'essai :**

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains qui constituent un échantillon. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

**V.2.1.2 Principe de l'essai :**

L'analyse consiste à séparer et de classer ces grains en fonction de leur diamètre à l'aide de tamis, qui sont emboîtés les uns sur les autres et dont les dimensions des ouvertures sont orientées de haut en bas. On place l'échantillon étudié sur le tamis supérieur et on obtient le classement des grains en vibrant la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au-dessus d'un tamis de 0,08 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,08.

### V.2.1.3 Mode opératoire :

Le mode opératoire de l'analyse granulométrique se résume selon les étapes suivantes :

- Echantillonner et peser une masse  $M_1$ (g)
- Sécher la masse  $M_1$ , puis la peser
- Laver la masse  $M_1$  sur un tamis de 0.08 mm
- Sécher le refus sur le tamis 0.08 mm, laissé refroidir, peser et inscrire  $M_2$

Le module de finesse est donné par la formule suivant :

$$M_f = \left( \frac{1}{100} \right) \times \sum R_c \text{ des tamis 5 jusqu'à tamis 0.08 mm}$$

$$R_c = \left( \frac{R_g}{M_1} \right) \times 100$$

Avec :

$R_c$  : Refus cumulé (%)

$R_g$  : Masse de refus (g)



Figure V.1 : Essai d'analyse granulométrique

### V.2.2 Essai équivalent de sable :

Cet essai permet de mesurer la propreté du sable, il est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

**V.2.2.1 But de l'essai :**

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

**V.2.2.2 Mode opératoire :**

- Préparer l'échantillon de sable de masse (m), tamisé au mailles de 5 mm (03 prise d'essai) de 120g.
- Emplir les éprouvettes par l'eau distillé jusqu'à la moitié.
- Verser les quantités de sable dans les éprouvettes gradués.
- Eliminer les boules d'air (frapper contre la paume de la main), et laisser à reposer 10 min.
- Après 10 min, boucher les éprouvettes et les placer dans l'agitateur (90 cycle, pendant 30 min).
- Procédés au lavage des éprouvettes, et compléter les niveaux des éprouvettes jusqu'à le trait de jauge.
- Laissez les éprouvettes reposer 20 min, et éviter toute vibration.
- Mesurer le coefficient d'équivalent de sable (descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette. L'immobiliser au de sable. Mesure H1 et H2.

Les résultats de l'essai sont donnés comme suite :

Equivalent de sable avec le piston :

$$\text{ESP} = \frac{H2}{H1} \times 100$$

H2 : hauteur de sable propre

H1 : hauteur de sable propre +hauteur des impuretés.



**Figure V.2 :** Essai d'équivalent de sable

### V.2.3 Essai au bleu de méthylène dit essai à la tâche :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène, pour cela on prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sable imbibé de bleu, et on dépose celle-ci sur le papier filtre. La valeur au bleu des fines (VB) a été réalisée selon les démarches de la norme (NFP 94-068). Deux cas sont possibles :

- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) incolore.  
→ Le test est négatif.
- La goutte centrale bleue est entourée d'une zone humide (auréole) teintée de bleu.  
→ Le test est positif.

La valeur au bleu des fines (VB) est donnée par la formule suivante :

Avec :

$$VB = \frac{V_v}{M} \times 10$$

$V_v$  : volume de solution de bleu utilisée jusqu'à obtention du test positif (en  $\text{cm}^3$ ).

$M$  : masse sèche de la prise d'essai (en g).

Comme  $VB = 0,25 < 1$  sable non argileux.



Figure V.3 : Essai au bleu de méthylène.

## V.2.4 Coefficient d'aplatissement des granulats :

### V.2.4.1 But d'essai :

Les bétons de ciment, ainsi que les corps de chaussées et les couches de roulement, ne sont réalisés qu'avec des granulats à forme assez ramassé, à l'exception des granulats plats. Effectivement, ces types de matériaux ne permettent pas de réaliser un béton très compact, et d'autre part, en matière de technique routière, ils ne peuvent pas être employés car ils entraînent des couches de roulement trop poreuses. La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

### V.2.4.2 Appareillage :

- Une série des tamis normalisés à mailles.
- Une série de tamis à fentes de largeurs normalisés.
- Une balance.

### V.2.4.3 Mode opératoire :

- Tamiser l'échantillon sur un tamis de 4 mm
- Peser la masse de refus  $m_0$ .
- Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis.

- Noter les refus de chaque classe granulaire sur la grille correspondante et noter les tamisâtes Me (g).

Le coefficient d'aplatissement A est donné par :

$$A(\%) = \left( \frac{\sum M_{ei}}{M_{gi}} \right) \times 100$$

### V.2.5 Module de finesse :

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondéral sur les différents tamis de la série sauf le tamis (0.08 mm).

#### V.2.5.1 Principe d'essai :

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtes les uns sur les autres, dont les démentions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau analysé est disposé en haut des tamis et les grains sont triés grâce à la vibration de la colonne de tamis. Avant de procéder au tamisage, on lave l'échantillon au-dessus d'un tamis de 0.08 mm pour éliminer les particules fines et prévenir ainsi l'agglomération des grains, ce qui pourrait fausser les résultats de l'analyse. On effectue une analyse granulométrique sur la fraction qui a été refusée par le tamis de 0.08 mm

#### V.2.5.2 Mode opératoire :

- Préparer l'échantillon de masse M(g),
- Tamisage de l'échantillon sur les tamis ;(0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5)

Le module de finesse donné par la formule suivant :

$$M_F = \left( \frac{1}{100} \right) \times \sum R_C$$

$$R_C = \left( \frac{R_e}{M_1} \right) \times 100$$

Avec :

R<sub>C</sub> : refus cumulé en (%)

R<sub>g</sub> : la masse de refus en (g)

**V.2.6 Masse volumique apparente :**

Cet essai est défini comme étant la masse de l'unité de volume apparente du corps, c'est-à-dire celle du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

On détermine la masse volumique apparente par la formule suivante :

$$M_{vap} = \frac{M_2 - M_1}{V}$$

$M_{vap}$ : Masse volumique apparente

$M_1$  : Masse de réceptions en (Kg)

$M_2$  : Masse de réceptions + granulats en (Kg)

$V$  : Volume total de réceptions en (L)

**V.2.7 Masse volumique absolue :**

Cet essai est défini comme étant la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister entre les grains.

**V.2.7.1 But de l'essai :**

Cet essai a pour but de permettre de connaître la masse d'une fraction granulaire lorsque par exemple on élabore une composition de bétons. Ce paramètre permet, en particulier, de déterminer la masse ou le volume des différentes classes granulaires malaxées pour l'obtention d'un béton dont les caractéristiques sont imposées.

**V.2.7.2 Mode opératoire :**

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume  $V_1$  (60ml) d'eau.
- Introduire dans une éprouvette une masse  $M$  du granulat (60g), en veillant bien à l'élimination des bulles d'air.
- Laisser l'échantillon stabiliser, après on procède à la lecture du nouveau volume  $V_2$  (granulats + eau).

La formule qui nous permet la détermination de la masse volumique est :

$$M_{va} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

$M_{va}$  : masse volumique absolue ;

$M_s$  : masse des grains solides ;

$V_1$  : volume d'eau

V2 : volume totale (grains solide + eau).



Figure V.4 : Essai pour déterminer la masse volumique

### V.2.8 Absorption d'eau :

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22°C à la masse sèche de l'échantillon.

#### V.2.8.1 Mode opératoire :

- Echantillonnage (diviser l'échantillon par 4 pour obtenir la masse). La masse d'essai M1 ( $D_{\max} \times 2$ ) et tamiser au tamis 4 mm
- Laver l'échantillon au tamis 0.063 mm puis le sécher.
- Peser le pycnomètre sur une balance en ajustant la tare.
- Remplir le pycnomètre de l'eau jusqu'à trait de jauge
- Introduire la matière à tester (sable) dans le pycnomètre puis le peser M<sub>2</sub>
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec de l'eau.
- Mettre le pycnomètre dans le bain d'eau à  $T=22 \pm 3^\circ$  pendant 24h
- Après immersion pendant 24 h en calcule le coefficient d'absorption d'eau conformément à l'équation suivante :

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M1 - M4)}{M4}$$

Avec :

**M1** : la masse des granulats saturés et superficiellement secs dans l'air, en(g).

**M4** : la masse de la prise d'essai séchée à l'étuve dans l'air, en (g).



**Figure V.5 :** Essai pour déterminer l'absorption d'eau

## V.2.9 Essai de Los Angeles :

### V.2.9.1 But de l'essai :

L'essai Los Angeles permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulat.

### V.2.9.2 Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer la masse  $M$  d'éléments inférieure à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètre compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

### V.2.9.3 Mode opératoire :

- Prélever une masse d'échantillon de 5 kg, séché et tamiser par tamis de 14 mm ;
- En prend une masse de 5 kg (5000g), tamiser l'échantillon à sec chacun des deux tamis de 10 mm et 12.5 mm ;
- Introduire les 11 boules de 5 kg dans la machine (LOS), ainsi que le matériaux (gravier), et laisser broyer pendant 15 min ;
- Une fois l'essai terminé, recueille l'échantillon et le tamiser sur un tamis de 1.6 mm
- Laver le refus et le séché à 105 C°.

Le coefficient de Los Angeles LA est déterminé comme suit :

$$\text{Résistance aux chocs} = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

M1 : la masse initiale en (g) ;

M2 : la masse sèche en (g) ;

Les granulats sont qualifiés comme suit :

LA < 15.....très bon ;

15 ≤ LA < 20.....Bon à moyen ;

20 ≤ LA < 30.....Moyen à faible ;

LA ≥ 30 .....Médiocre.



**Figure V.6** : Essai de Los Angeles.

## V.2.10 Essai micro Deval :

### V.2.10.1 But de l'essai :

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat.

### V.2.10.2 Principe de l'essai :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produits dans la machine Deval par les frottements réciproques et les chocs modérés des granulats.

**V.2.10.3 Mode opératoire :**

- Prélever une masse d'échantillon pour les gravillons. Tamiser par un tamis de 14 mm.
- Peser une masse  $M=500$  g, tamiser l'échantillon à sec sur chacun des deux tamis de classe 10 et 12.5 mm
- Introduire cette masse  $M$  à l'intérieur de cylindre et ajouter une charge abrasive, qui correspond à la classe granulaire choisie.
- On note qu'il existe deux modes opératoires pour l'essai micro Deval :
  - ✓ A sec
  - ✓ Humide
- Mettre les cylindres en rotations pendant 2h à 12000 tr.
- Après essai, recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soit d'éviter les pertes de granulat. Laver soigneusement l'intérieur de cylindre.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1.6 mm
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau et retirer la charge abrasive, puis sécher le refus à 1.6 mm à 105C°. A la fin peser le refus.

Le coefficient de MICRO DEVAL est déterminé comme suite :

$$\text{Résistance à l'usure} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$$



**Figure V.7 :** Essai de Micro Deval

**V.3 Essais rhéologique :**

La rhéologie est l'étude des chargements de forme et de l'écoulement de la matière, comprenant l'élasticité, la viscosité et la plasticité à l'aide d'un viscosimètre.

**V.3.1 Le viscosimètre :**

Le viscosimètre est un appareil de mesure physique capable de mesurer la viscosité des fluides.

**V.4 Techniques de caractérisation des BAP à l'état frais****V.4.1 Masse volumique :**

Cet essai consiste à :

- Remplir un récipient de volume V en (litre) et de masse M en (Kg) d'un échantillon de béton frais, en deux couches tassé par vibration.
- Araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Peser le récipient rempli, soit de masse Mt en (Kg).

La masse volumique de béton frais sera alors :

$$M_{vb} = (M_t - M) / V \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

**V.4.2 Essai d'étalement :**

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais. Ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

**V.4.2.1 But de l'essai :**

L'essai d'étalement est utilisé pour caractériser la fluidité du béton.

**V.4.2.2 Appareillage :**

- Plaque d'étalement
- Cône d'étalement
- Mètre ou règle.

**V.4.2.3 Mode opératoire :**

- S'assurer que la plaque est placée sur un support stable et horizontal.
- Humidifier la surface de la plaque (éliminer l'eau en excès avec un chiffon).
- Placer et centrer le cône d'étalement sur la plaque.
- Prélever un échantillon de béton représentatif.
- Equiper la partie supérieure du cône d'un entonnoir. Remplir le cône en déversant de manière continue, jusqu'à l'arase supérieur de cône.
- Soulever le cône verticalement.
- Une fois que le béton s'est étalé sur la table, mesurer le diamètre final.

**Figure V.8 :** Essai de l'étalement**V.4.3 Essai de boîte en L :**

La boîte en « L » permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

**V.4.3.1 But de l'essai :**

Le but de cet essai est de vérifier la capacité du BAP à remplir dans un milieu confiné.

**V.4.3.2 Appareillage :**

- Boite en L.
- Balance.
- Règle.

**V.4.3.3 Mode opératoire :**

- La partie verticale de la boîte est entièrement remplie de béton. Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute.
- Puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte en L à travers le ferrailage.
- Quand le béton ne s'écoule plus, on mesure les hauteurs H1 et H2 et on exprime le résultat en terme de taux de remplissage  $H2/H1$ .



**Figure V.9 :** Essai de la boîte en L.

**V.4.4 Essai de stabilité au tamis :**

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres ou 4.8kg) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm. Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton.

**V.4.4.1 But de l'essai :**

Cet essai permet d'évaluer le risque de ségrégation statique et d'étudier le ressuage du BAP, qui doit être stable et conserver une composition homogène sous l'effet de la gravité.

**V.4.4.2 Appareillage :**

- Tamis de 5 mm
- Une balance.
- Main écope.
- Chronomètre.

**V.4.4.3 Mode opératoire :**

- Prélever un échantillon de béton de 5 Kg juste après le malaxage ;
- Attendre 15 min ;
- Poser le fond et le tamis à vide sur la balance et faire la tare ;
- Verser sur le tamis un poids de béton égal à 4.8 kg (tolérance  $\pm 0.2$  kg), verser ce béton au centre du tamis d'une hauteur de chute de  $50 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$  ;
- Peser le poids de l'échantillon. Attendre 2 min ;
- Peser le fond avec la laitance on a :  $P \text{ laitances} = (P \text{ fond} + \text{laitance}) - P \text{ fond}$ .
- Calculer le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon  
$$P = (P \text{ laitance} / P \text{ échantillon}) \times 100.$$



**Figure V.10 :** Essai de stabilité au tamis.

**V.5 Technique de caractérisation des BAP à l'état durci :****V.5.1 Mesure de masse volumique :**

Les masses des bétons sont mesurées aux âges de 7 et 28 jours, la détermination est simple, il suffit de peser les éprouvettes de chaque série du béton puis prendre la moyenne des trois. La masse volumique est donnée par l'expression suivante :

$$M_{vd} = M/V$$

Avec :

M : masse du béton durci

V : volume de l'éprouvette tel que  $V=3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

**V.5.2 Essai de compression :****V.5.2.1 But de l'essai :**

- Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton.
- L'essai se fait sur une éprouvette cubique de dimensions normalisées (15×15×15) cm.

**V.5.2.2 Mode opératoire :**

- Après malaxage, on remplit en béton un moule cubique normalisé, le remplissage du moule se fera en 3 couches bien vibrées chacune.
- L'éprouvette sera immergée dans un bac d'eau pour durcir à une température moyenne de 20 °C.
- Le démoulage se fera après une 24 heure. Généralement, la résistance est déterminée à 7 et 28 jours.
- L'essai de résistance à la compression s'effectue sur une presse de capacité de 3000 KN, en utilisant des éprouvettes cubiques (15×15×15) cm de l'âge de 7, et 28 jours à une vitesse de 0.5 KN/S.
- La résistance en compression calculée est la moyenne des résistances obtenues sur trois éprouvettes.

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$\epsilon = P / S$$

$\epsilon$  : contrainte de rupture (MPa)

S : section de l'éprouvette : ( $2 \times 10^{-2}$ ) m<sup>2</sup>.

P : charge de la rupture (MN).



Figure V.11 : Essai de la résistance à la compression.

**VI.1 introduction :**

Dans ce dernier chapitre, nous présentons et discutons les résultats obtenus pour le béton autoplaçants. Nous abordons les différentes propriétés physiques, chimiques et mécaniques mesurées au cours de nos expérimentations. Les résultats sont analysés en détail afin d'évaluer la performance du BAP par rapport aux bétons ordinaires, en mettant particulièrement l'accent sur la fluidité, la résistance mécanique et la durabilité. Ces discussions permettent de mieux comprendre les avantages et les limitations du BAP, et de formuler des recommandations pour son utilisation optimale dans diverses applications.

**VI.2 Expression des résultats de caractérisation des matières premières :**

Les différentes analyses et mesures du coefficient d'équivalent de sable et le coefficient d'aplatissement des granulats, ainsi que les propriétés physiques et mécaniques des granulats (Los Angeles, Micro Deval et propreté) sont représentés respectivement dans les tableaux VI.1 VI.2 et VI.3

**Tableau VI.1:** Mesure de coefficient d'équivalent de sable

<b>Essai (1)</b>	<b>Essai (2)</b>	<b>Essai (3)</b>
<b>T<sub>1</sub> = 11 : 37</b>	T <sub>1</sub> = 11 :40	T <sub>1</sub> = 11 :43
<b>T<sub>1+10</sub> = 11 :47</b>	T <sub>1+10</sub> = 11 :50	T <sub>1+10</sub> = 11 :53
<b>T<sub>2+20</sub> = 12 :09</b>	T <sub>2+20</sub> = 12 :12	T <sub>2+20</sub> = 12 :15
<b>H<sub>1</sub> (cm) = 10,3</b>	H <sub>1</sub> (cm) = 10,4	H <sub>1</sub> (cm) = 10,3
<b>H<sub>2</sub> (cm) = 10,9</b>	H <sub>2</sub> (cm) = 9,2	H <sub>2</sub> (cm) = 9,2
<b>ESP (1) = 87,37</b>	ESP (1) = 88,46	ESP (1) = 89 ,32
<b>ESP<sub>moy</sub> = 88,38</b>		

Tableau VI.2 : Mesure de coefficient d'aplatissement des granulats

TAMISAGE SUR TAMIS		TAMISAGE SUR GRILLE	
Classe granulaire d/D (mm)	Mgi (g)	Classe des grilles (mm)	Mei (g)
31.5/40	0	20	0
25/31.5	210.4	16	0
20/25	1766.3	12.5	119.8
16/20	2182.6	10	138.8
12.5/16	8533.4	8	14.7
10/12.5	2.4	6.3	0
$\sum M_{gi} = 5015.1$		$\sum M_{ei} = 273.3$	
<b>Coefficient d'aplatissement A = <math>\frac{\sum M_{ei}}{\sum M_{gi}} \times 100 = 5</math></b>			

Tableau VI.3 : Propriétés physiques et mécaniques

TYPE D'ESSAI	LES MASSES		PROPRIETES
LOS ANGELES	Masse 1 initiale (g)	Masse 2 sèche (g)	Résistance aux chocs = $\frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$
	5000	4012.3	19
MICRO DEVAL	Masse 1 initiale (g)	Masse 2 sèche (g)	Résistance à l'usure = $\frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100$
	500	420.5	15
PROPRETE	Masse 1 initiale (g)	Masse 2 sèche (g)	La propreté = $\frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$
	3/8 2000	1989.2	0.5
	8/15 2000	1992.3	0.3
	15/25 2000	1994.1	0.2

### VI.3 Caractérisation des granulats :

Dans cette étude on utilise les agrégats concassés à base des roches sédimentaires carbonatées de nature calcaire, ces agrégats (3/8 ; 8/15, 15/25) et le sable 0/3 provenant de notre station de concassage d'entreprise ENGOA située à BEN TALHA. La roche ballaste (25/40 mm ou bien

40/70mm) de la carrière ALGRAN KADDERA. Par contre le sable naturel 0/1 provenant de BOUSSADA.

### VI.3.1 Caractéristique physique du sable (0/1, 0/3)

Les caractéristiques physiques masse volumiques apparent et absolu, bleu de méthylène, l'équivalent de sable et l'absorption d'eaux du sable (0/1, 0/3) sont présentés dans le tableau VI.4

**Tableau VI.4 :** Caractéristique physique du sable (0/1, 0/3)

Caractéristiques	Sable 0/1	Sable 0/3 (lavé)	Unités
Masse volumiques Apparent	1.60	1.55	g/cm <sup>3</sup>
Blue méthylène	0.8	0.86	/ sans unité
Masse volumique absolue	2.6	2.64	g/cm <sup>3</sup>
Equivalent de sable	72	88.38	%
Absorption	0.92	0.88	%

#### VI.3.1.1 Analyse granulométrique et classe granulaire :

Les tableaux VI.5 et VI.6 présentent l'analyse granulométrique et classe granulaire du sable (0/1 et 0/3) de keddara

#### Sable de keddara (0/3) :

**Tableau VI.5 :** Analyse granulométrique et classe granulaire de sable (0/3) :

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
2.5	154.8	15.48	84.52
1.25	494.5	49.45	50.55
0.63	709.3	70.93	29.07
0.315	849.8	84.98	15.02
0.16	932.3	93.23	6.77
0.08	977.7	97.77	2.23
FT	997.9	-	-

$$\boxed{\text{MF}=3.14}$$

- On remarque que le sable de keddara à un module de finesse de (3,14), donc une correction est nécessaire.

### Correction de module de finesse su sable :

La correction de sable : le module de finesse désiré est :

$$\% S_F = \frac{\text{MF}_{\text{sg}} - \text{MF}_{\text{sd}}}{\text{MF}_{\text{sg}} - \text{MF}_{\text{sf}}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad \frac{3.14 - 2.7}{3.14 - 0.92} \times 100 = 19\%$$

$$\% S_G = \frac{\text{MF}_{\text{sd}} - \text{MF}_{\text{sf}}}{\text{MF}_{\text{sg}} - \text{MF}_{\text{sf}}} \times 100 \quad \Rightarrow \quad \frac{2.7 - 0.92}{3.14 - 0.92} \times 100 = 80\%$$

### Sable de keddara (0/1):

Tableau VI.6 : Analyse granulométrique et classe granulaire de sable (0/1)

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
<b>0.63</b>	20	0.2	99.98
<b>0.315</b>	237	23.70	76.30
<b>0.16</b>	740	74	25
<b>0.08</b>	955.5	99.55	0.45
<b>FT</b>	999	99.90	-

### VI.3.2 Caractéristiques physiques de Gravier (3/8, 8/15, 15/25) :

Les caractéristiques physiques masse volumiques apparent et absolu, propreté et l'absorption d'eaux de gravier (3/8, 8/15, 15/25) sont présentés dans le tableau VI.7

Tableau VI.7 : Caractéristiques physiques de Gravier (3/8, 8/15, 15/25)

Caractéristique	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Gravier 15/25	Unité
Masse volumique absolue	2.66	2.68	2.70	g/cm <sup>3</sup>
Propreté	0.5	0.3	0.2	%
Masse volumique apparente	1.40	1.43	1.44	%
Absorption	0.45	0.40	0.35	%

### VI.3.2.1 Analyse granulométrique :

Les tableaux VI.8, VI.9 et VI.10 présentent l'analyse granulométrique et classe granulaire de gravier (3/8, 8/15, 15/25) de keddara

#### Gravier (3/8) :

Tableau VI.8: Analyse granulométrique de Gravier (3/8)

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Passant (%)
8	59.6	2.98	97.02
6.3	538.7	26.935	73.065
5	1072.4	53.62	46.38
4	1520.4	76.02	23.98
2.5	1803	90.15	9.85
FT	1990.2	-	-

**Gravier 8/15 :**

**Tableau VI.9 :** Analyse granulométrique de Gravier (8/15)

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Refus (%)</b>	<b>Passant (%)</b>
<b>16</b>	30.5	0.87	99.13
<b>12.5</b>	906.6	25.90	74.1
<b>10</b>	2202.2	62.92	37.08
<b>8</b>	3319.6	94.84	5.16
<b>6.3</b>	3474.5	99.27	0.73
<b>5</b>	3477.4	99.35	0.65
<b>4</b>	3478.6	99.38	0.62
<b>2.5</b>	3480.1	99.43	0.57
<b>FT</b>	3494.3	-	-

**Gravier 15/25 :**

**Tableau VI.10 :** Analyse granulométrique de Gravier (15/25)

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus (g)</b>	<b>Refus (%)</b>	<b>Passant (%)</b>
<b>25</b>	210.4	4.19	95.81
<b>20</b>	1976.7	39.38	60.62
<b>16</b>	4159.3	82.87	17.13
<b>12.5</b>	5012.7	99.87	0.13
<b>10</b>	5015.1	99.92	0.08
<b>FT</b>	5018.1	1.99	0.01

### Courbe d'analyse granulométrique de gravier :

La courbe représente dans la figure VI.1 montre l'analyse granulométrique des gravier (0/3, 3/8, 8/15)

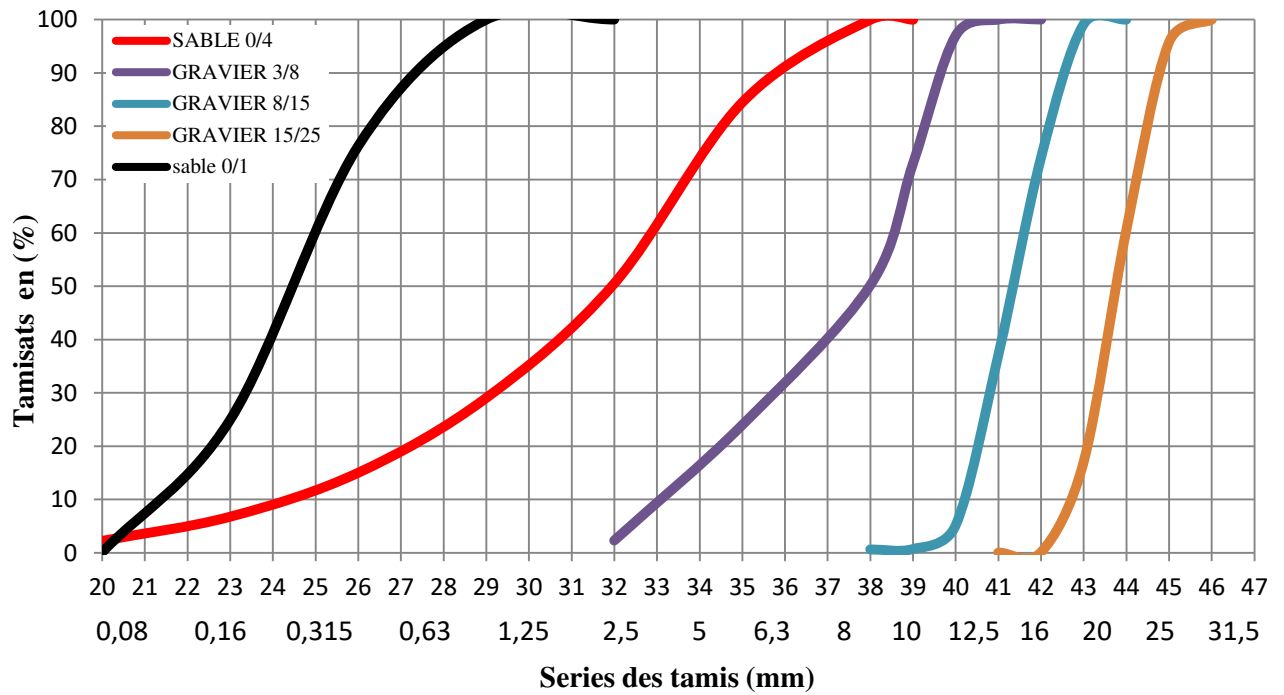


Figure VI.1 Courbe d'analyse granulométrique

### VI.4 Ciment :

Le ciment utilisé pour notre étude est un ciment de type CEM II / 42,5 Matine provenant de la cimenterie de Msila.

### Caractéristique techniques de ciment :

Les caractéristiques techniques de ciment tel que composition minéralogique, Propriétés physiques sont présentés dans les tableaux VI.11, VI.12, VI.13, VI.14 et VI.15

**Tableau VI.11** : Caractéristique techniques de ciment

Analyse chimique	Valeur
Pert au feu (%) (NA5042)	10.0 ± 2
Teneur en sulfates (SO <sub>3</sub> ) (%)	2.5 ± 0.5
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%)	1.7 ± 0.5
Teneur en chlorures (NA5042)	0.02- 0.05

**Composition minéralogique du clinker (bogue) :**

**Tableau VI.12** : Composition minéralogique du clinker

Composition minéralogique du clinker (bogue)	Valeur
C3S (%)	60 ± 3
C3A (%)	7.5 ± 1

**Propriétés physiques :**

**Tableau VI.13** : Propriétés physiques du ciment

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normal (%)	26.5 ± 2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm <sup>2</sup> /g) (NA231)	3700 – 5200
Retrait à 28 jours (µm/m)	≤ 1000
Expansion (mm)	≤ 3.0

**Résistance à la compression :**

**Tableau VI.14** : Résistance à la compression

Résistance à la compression	Valeur
2 jours (MPa)	≥ 10.0
28 jours (MPa)	≥ 42.5

**Temps de prise à 20° (NA 230) :**

**Tableau VI.15** : Temps de prise

Temps de prise à 20° (NA 230)	Valeur
Début de prise (min)	150 ± 30
Fin de prise (min)	230 ± 50

**VI.5 L'eau de gâchage :**

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable du réseau public de la wilaya d'Alger.

**VI.6 Adjuvant (Superplastifiant) :**

L'adjuvant utilisé est un Superplastifiant liquide sous le nom Le **Sika 665**

**Information sur le produit :**

Sika ViscoCrete 665 est un Superplastifiant haut réducteur d'eau polyvalent de nouvelle génération non chloré à base de copolymère acrylique. Il est compatible avec tous les ciments même avec un taux C3A faible.

**Domaines d'application :**

Sika ViscoCrete 665 permet la fabrication :

- de bétons plastiques à autoplaçants transportés sur de longues distances et pompés.
- de bétons à longs maintiens de rhéologie (>2h30), sans reprise de fluidité dans le temps

**Caractéristiques et Avantages :**

Sika ViscoCrete 665 est un superplastifiant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :

- Longue rhéologie (>2h30)
- Evolution rapide des résistances à court et à long terme
- Réduction de la viscosité amélioration de la stabilité du béton frais et limitation de la ségrégation avec des granulats concassés
- Pas de reprise de fluidité dans le temps
- Qualité de parement

**Description du produit :**

Le tableau VI.16 montre les différentes caractéristiques techniques de superplastifiant Sika ViscoCrete 665

Tableau VI.16 : Description du produit

<b>Conditionnement</b>	Fût de 200 kg, Cubi de 1000 kg, Vrac
<b>Aspect / Couleur</b>	Liquide marron
<b>Durée de Conservation</b>	12 mois dans son emballage d'origine intact
<b>Conditions de Stockage</b>	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Sika ViscoCrete 665 peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
<b>Densité</b>	1,085 ± 0,015
	5 ± 1,0
<b>Valeur PH</b>	33,0 ± 1,1% (méthode halogène selon NF 085)
<b>Teneur Totale en Ions Chlorure</b>	≤ 0,1%
<b>Équivalent Oxyde de Sodium</b>	≤ 1,0%

### VI.7 Additif :

Dans ce travail, nous avons utilisé des poudres de noyaux d'olive comme additif dans notre béton autoplaçants. Ces poudres ont été broyées pour atteindre une finesse de 1965 cm<sup>2</sup>/g, mesurée au Centre CETIM. Des essais rhéologiques ont également été réalisés pour déterminer le point de saturation.

#### VI.7.1 Noyau d'olive :

Les noyaux (grains) d'olive sont les sous-produits du pressage de l'olive et de la séparation des restes de pulpe à l'aide de machines de centrifugation modernes produisent des noyaux d'olive secs et propres, sans poussière, résidus végétaux ou autres corps étrangers/impuretés.

Les noyaux d'olives constituent le troisième produit majeur des déchets issus des industries alimentaires pouvant trouver un débouché dans la fabrication des matériaux de construction.

**VI.7.1.1 Caractéristiques des noyaux d'olive :**

Forme : ellipsoïdale

La taille : petite à moyenne.

Pois de 20 grains : 10 à 15g.

Couleur : verre et noir

Surface : grossière.

**VI.7.1.2 Les propriétés d'adsorption du noyau d'olive :****Structure poreuse :**

Le noyau d'olive est poreux, ce qui lui donne une surface spécifique importante. Ces pores ont la capacité de capter et de stocker différentes substances à leur surface.

**Adsorption des composés organiques :**

Le noyau d'olive a été étudié pour son potentiel d'adsorption de composés organiques, tels que les colorants, les métaux lourds et les polluants. Ces substances peuvent être adsorbées par les pores du noyau d'olive, ce qui réduit leur présence dans l'environnement.

**Capacité d'adsorption :**

Le noyau d'olive peut présenter une capacité d'adsorption significative, bien qu'elle puisse varier en fonction de la taille des particules, de la surface spécifique et des conditions expérimentales.

**VI.7.1.3 Broyage du noyau d'olive :**

Pour pouvoir l'utiliser comme addition dans les différentes compositions du BAP, nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à 60 °C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et ainsi faciliter son broyage. Ensuite, un broyage total a été effectué à l'aide d'un broyeur à boulets. Enfin, la quantité finale de noyau d'olive obtenue après le broyage a été mélangée dans le but d'assurer une bonne homogénéisation du mélange préparé. Dans notre étude, une finesse du noyau d'olive de 1965 cm<sup>2</sup>/g est utilisée. La masse volumique du noyau d'olive est de 1,36 g/cm<sup>3</sup>. L'analyse chimique de noyau d'olive est donnée dans le tableau VI.17.



**Figure VI.2** Noyau d'olive avant broyage



**Figure VI.3** Noyau d'olive après broyage

#### **VI.7.1.4 Analyses chimiques des noyaux d'olive :**

L'analyse chimique des noyaux d'olive a été effectuée avec un appareillage fluorescence X au niveau de CETIM. Les résultats sont illustrés dans le tableau VI.17 qui suit :

**Tableau VI.17** : Analyses chimiques des noyaux d'olive

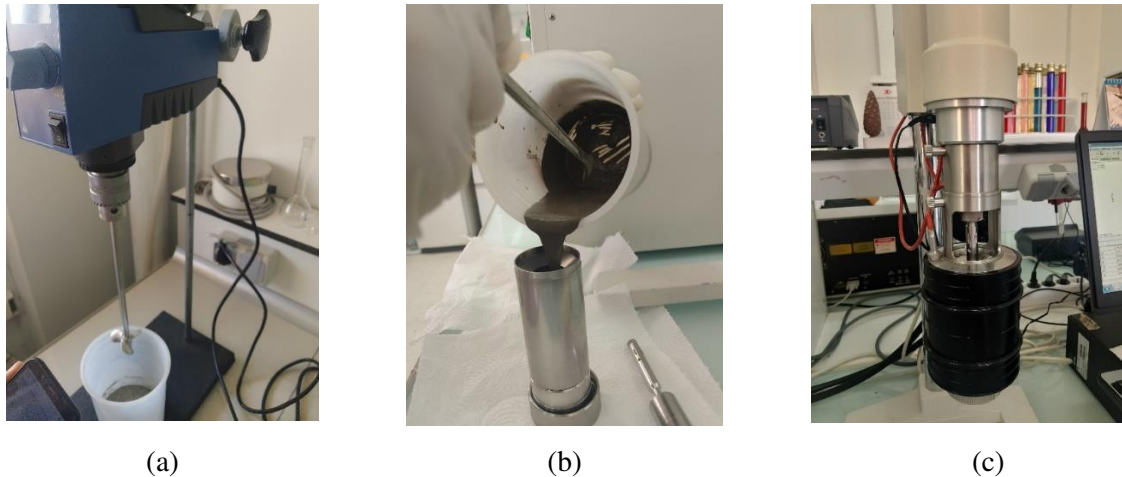
<b>Composant</b>	<b>Teneur</b>
<b>K<sub>2</sub>O</b>	27.5%
<b>CaO</b>	23.7%
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	16.2%
<b>SiO<sub>2</sub></b>	14.8%
<b>SO<sub>3</sub></b>	4.89%
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	3.70%
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2.83%
<b>Cl</b>	1.85%
<b>MgO</b>	1.48%
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	1.17%
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.658%
<b>BaO</b>	0.541%
<b>ZnO</b>	0.226%
<b>MnO</b>	0.176%
<b>CuO</b>	0.167%
<b>NiO</b>	0.0573%
<b>SrO</b>	0.0556%
<b>Rb<sub>2</sub>O</b>	0.0270%

## **VI.8 Etude rhéologique sur la pâte cimentaire du BAP :**

### **VI.8.1 L'effet de l'ajout sur le comportement rhéologique de la pâte de BAP :**

Cette partie se concentre exclusivement sur l'analyse de la pâte cimentaire (ciment + ajout + eau + adjuvant) et vise à évaluer l'impact de l'ajout sur le seuil d'écoulement de la pâte de béton autoplaçants, en utilisant comme ajout la poudre de noyau d'olive avec différents pourcentages.

Les essais rhéologiques ont été réalisés au laboratoire de rhéologie de l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement de l'Université de Boumerdès à l'aide d'un viscosimètre (figure VI.4). Les différents résultats obtenus sont représentés aux graphes ci-après.



**Figure VI.4** Agitateur (a), Pâte cimentaire (b) et Viscosimètre (c)

### VI.8.2 Effet de filler noyau d'olive :

Nous avons préparé une pâte similaire à celle du béton (avec différentes proportions), la composition des pâtes utilisées au laboratoire est représentée dans le tableau ci-dessous :

**Tableau VI.18:** Les constituants de la pâte cimentaires.

Les constituants	pâte
<b>Ciment(g)</b>	100
<b>Eau (ml)</b>	43
<b>Filler noyau d'olive (g)</b>	10 / 15 / 20
<b>Superplastifiant (%)</b>	0.5 / 1 / 1.5 / 2 / 2.5 / 2.6

#### VI.8.2.1 contrainte :

Les figures VI.6, VI.7, VI.8 montrent la variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant de la pâte cimentaire chargées respectivement avec 10%, 15% et 20%

➤ 10% de noyau d'olive :

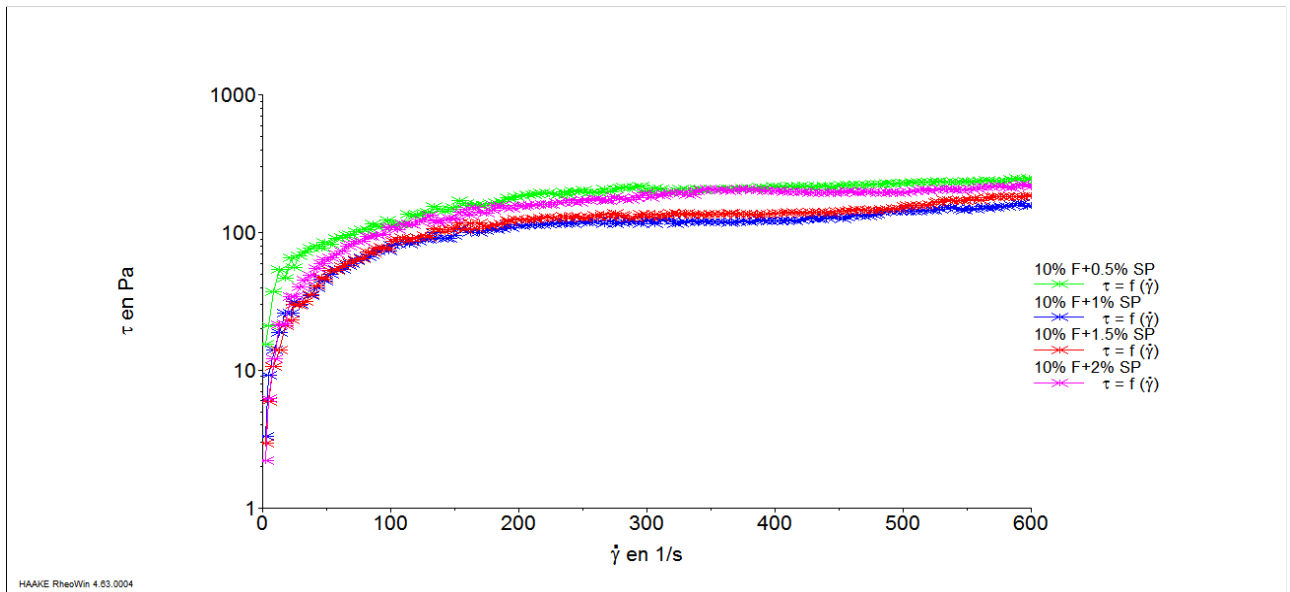


Figure VI.5 : Variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant

➤ 15 % de noyau d'olive :

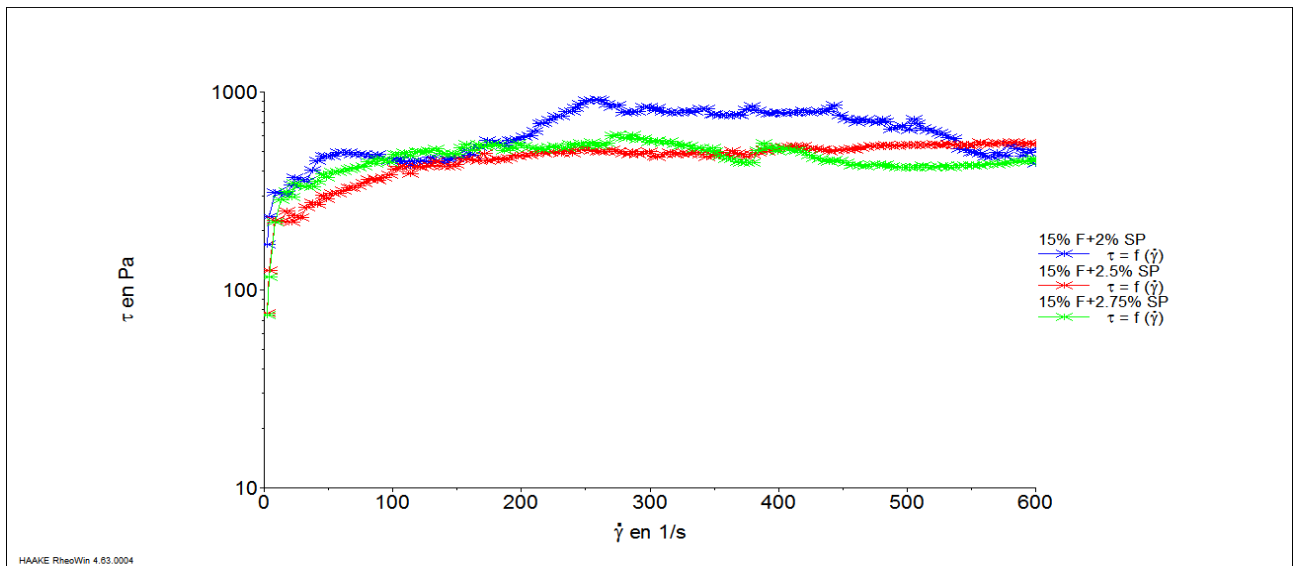
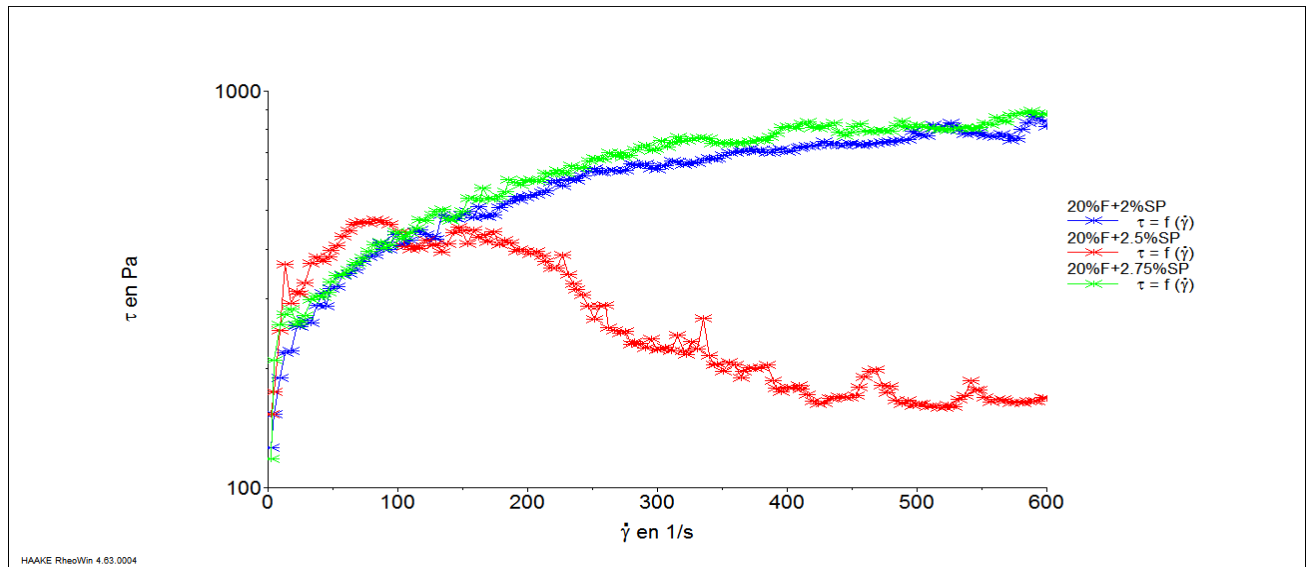


Figure VI.6 : variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant

## ➤ 20 % de noyau d'olive :



**Figure VI.7** : variation de la contrainte en fonction du pourcentage en superplastifiant

### Interprétation :

Les figures (VI.5), (VI.6) et (VI.7) présentent la variation de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de cisaillement. On remarque que plus la concentration de superplastifiant augmente, plus la contrainte de cisaillement diminue. On peut également noter que, plus la teneur en superplastifiant augmente, plus l'écoulement devient facile.

### VI.8.2.2 Viscosité :

Les figures VI.8, VI.9, VI.10 montrent la variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant de la pâte cimentaire chargées respectivement avec 10%, 15% et 20%

➤ 10% de noyau d'olive :

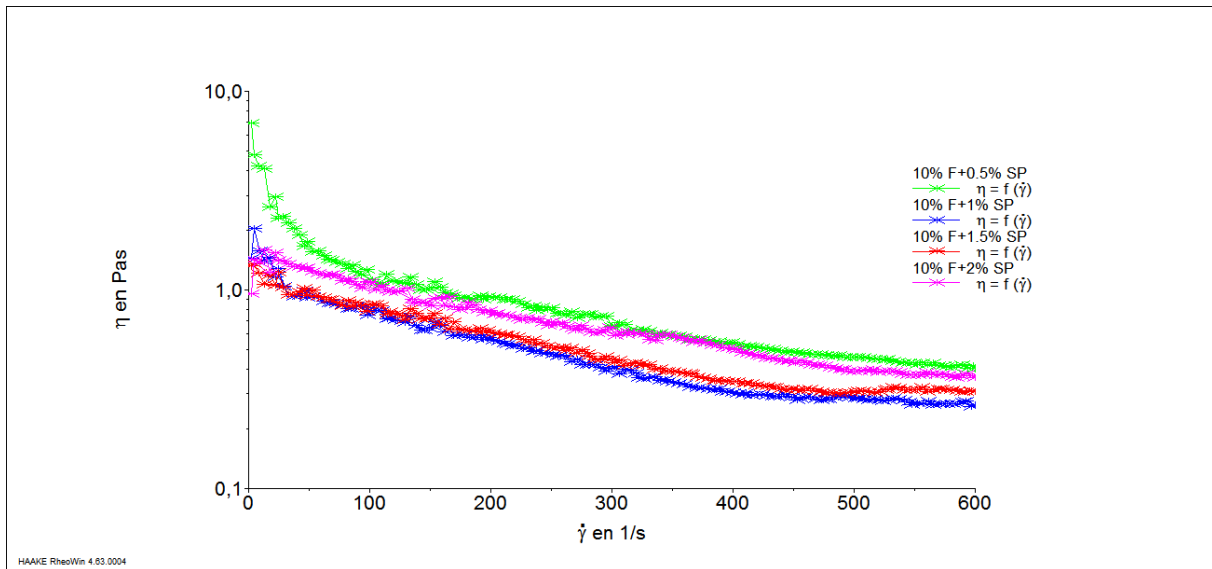


Figure VI.8 : Variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant.

➤ 15% de noyau d'olive :

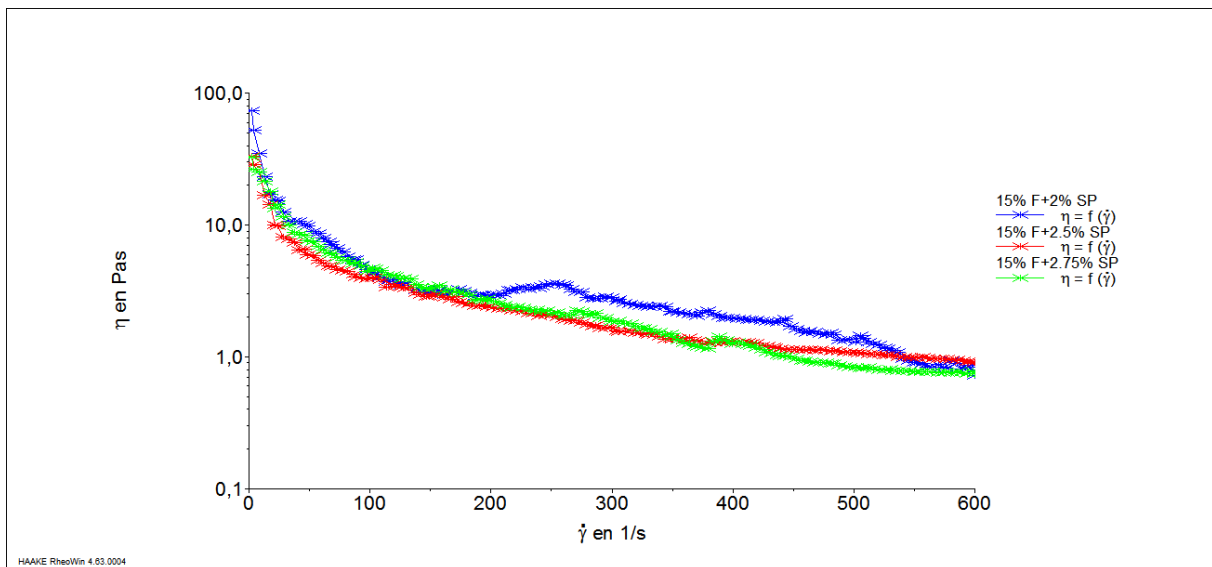
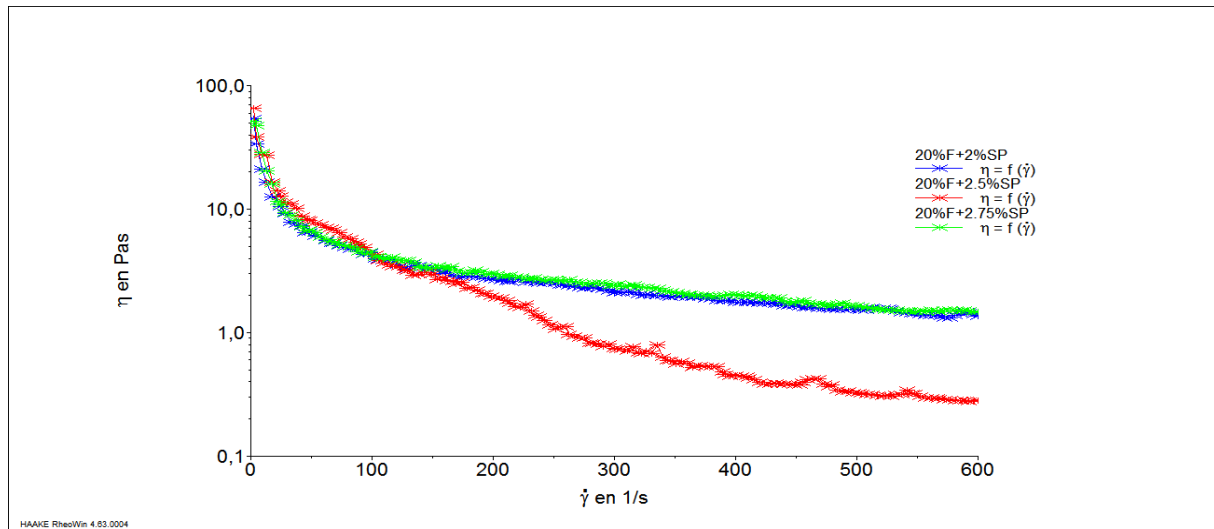


Figure VI.9 : Variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant.

➤ 20% de noyau d'olive :



**Figure VI.10 :** Variation de la viscosité en fonction du pourcentage en superplastifiant.

**Interprétation :**

Ces graphiques illustrent l'influence du superplastifiant sur la viscosité de la pâte cimentaire. Plus la quantité de superplastifiant augmente, plus la viscosité de la pâte diminue. Cela est expliqué par l'effet dispersant du superplastifiant qui s'adsorbe à l'interface des grains du ciment, créant ainsi des forces répulsives entre les particules, réduisant ainsi ou même éliminant complètement l'adhésion entre les particules voisines (agglomération).

La viscosité de la pâte se stabilise à une concentration du superplastifiant de 1,5% pour 10% de noyau d'olive, et de 2,5% pour 15% de noyau d'olive, et de 2,6% pour 20% de noyau d'olive. Donc on peut conclure que le point de saturation en superplastifiant est de 1,5% pour le dosage de 10% de noyau d'olive, et de 2,5% avec dosage de 15% de noyau d'olive, et 2,6% pour un dosage de 20% de noyau d'olive.

**VI.9 Formulation Japonaise des bétons :**

Plusieurs méthodes de formulations des bétons autoplaçants existent aujourd'hui dont un grand nombre a été publié dans les différents congrès dédiés aux BAP. La méthode Japonaise est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants à étalement d'au moins 65cm. La méthode préconise l'augmentation du volume de pâte au détriment du volume de granulats.

Ce principe vise à éviter tout problème de blocage des gravillons en imposant un volume de gravillons inférieur à 50% au volume solide du béton et un volume de sable de diamètre

supérieur à 90 $\mu$ m est égal à 40% du volume total du mortier du béton. Au final, la méthode conduit à des volumes de pâte très élevés, une surestimation du liant et donc à des bétons très onéreux.

La méthode proposée préconise en premier lieu d'étudier le volume de pâte. Ils considèrent un volume de pâte égal à la porosité du squelette granulaire du béton augmenté d'une valeur qui conduira à une bonne lubrification du squelette en évitant les risques de blocage. Ils supposent que la pâte pénètre tous les vides inter-granulaires du squelette empilés d'une façon lâche sans aucune surpression extérieure. Ce volume est à priori de l'ordre de 42 à 48% du volume total de l'échantillon.

### VI.9.1 Formulation préliminaire d'un béton autoplaçants :

#### Selon la méthode japonaise :

Volume de gravillons est limite en fonction de G/S qui est proche de 1.

- Volume de la pâte est 330 à 400 Kg/m<sup>3</sup>.
- La masse de ciment :  $M_c = 300$  à 450 Kg/m<sup>3</sup>.
- Le dosage en superplastifiant est proche de son dosage de saturation.

#### Optimisation de la composition de BAP :

- Gravier (G) + Sable (S) + Ciment (C) + Eau (E) + Filler (F) = Volume de la pâte.
- On fixe le dosage en ciment à 400 Kg/m<sup>3</sup> et on prend  $E/C = 0.43$
- Superplastifiant proche au point de saturation
- $G/S = 0.90$

Tableau VI.19 : composition des bétons autoplaçants

formulation	Ciment (Kg/m <sup>3</sup> )	Le filler noyau d'olive (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (l/m <sup>3</sup> )	Sable (0/1) (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (0/3) (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 3/8 (kg/m <sup>3</sup> )	Gravier 8/15 (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)	E/C (%)
<b>Béton témoin</b>	400	0	186.5	161.54	690.62	327.27	400	1	0.50
<b>10%</b>	400	40	185.2	145.7	623.04	706	711.27	1.5	0.50
<b>15%</b>	400	60	182.5	140.29	599.80	680.96	686.08	2.5	0.50

20%	400	80	182.3	135.35	578.68	655.42	660.35	2.6	0.50
-----	-----	----	-------	--------	--------	--------	--------	-----	------

## VI.10 Caractérisation du béton à l'état frais :

### VI.10.1 Essai d'étalement :

Le tableau VI.20 montre variation de l'étalement des différents bétons étudiés en fonction de taux de la poudre d'olive

**Tableau VI.20 :** variation de l'étalement des différentes formulations étudiées.

Formulation	Béton témoin	Béton dosé à 10%	Béton dosé à 15%	Béton dosé à 20%
Etalement (cm)	63	59	55	51

#### Interprétation :

D'après le tableau VI.20 on remarque que l'étalement diminue avec l'augmentation du pourcentage de poudre des noyaux d'olive.

### VI.10.2 Essai de boîte en L :

Le tableau VI.21 montre variation de l'écoulement en milieu confiné des différentes formulations étudiées en fonction de taux de la poudre d'olive

**Tableau VI.21 :** Variation de l'écoulement en milieu confiné des différentes formulations étudiées

Formulation	Béton témoin	Béton dosé à 10%	Béton dosé à 15%	Béton dosé à 20%
Boit en L $H_2/H_1$	0.90	0.85	0.83	0.81

#### Interprétation :

Cet essai permet de tester la mobilité dans un milieu confiné et les résultats sont exprimés en fonction de taux de remplissage  $H_2/H_1$ . On remarque que le rapport de remplissage diminue de 2 à 5% avec l'augmentation du pourcentage de poudre d'olive.

### VI.10.3 Essai de stabilité de tamis :

Le tableau VI.22 montre variation de stabilité au tamis des différentes formulations étudiées en fonction de taux de la poudre d'olive

**Tableau VI.22 :** Variation de stabilité au tamis des différentes formulations étudiées

Formulation	Béton témoin	Béton dosé à 10%	Béton dosé à 15%	Béton dosé à 20%
Stabilité au tamis (%)	3	2.1	1.8	1.4

#### Interprétation :

Les résultats d'essai de stabilité au tamis utilisé pour mesurer la capacité des bétons autoplaçants à résister à la ségrégation dynamique. On remarque que plus le pourcentage des fillers est faible, plus la stabilité à la ségrégation statique est grande.

### VI.11 Caractérisation du béton à l'état durci :

#### VI.11.1 Masse volumique :

Le tableau VI.23 montre variation de la masse volumique des différents bétons étudiés en fonction de taux de la poudre d'olive

**Tableau VI.23 :** Masse volumique des différentes formulations étudiées.

Formulation	Masse volumique ( $10^3 \times \text{g/m}^3$ )	
	7 jours	28 jours
Béton témoin	2.51	2.55
10%	2.52	2.57
15%	2.55	2.58
20%	2.57	2.60

#### Interprétation :

Les résultats montrent que la masse volumique des différents bétons augmente avec l'augmentation de pourcentage de la poudre des noyaux d'olives.

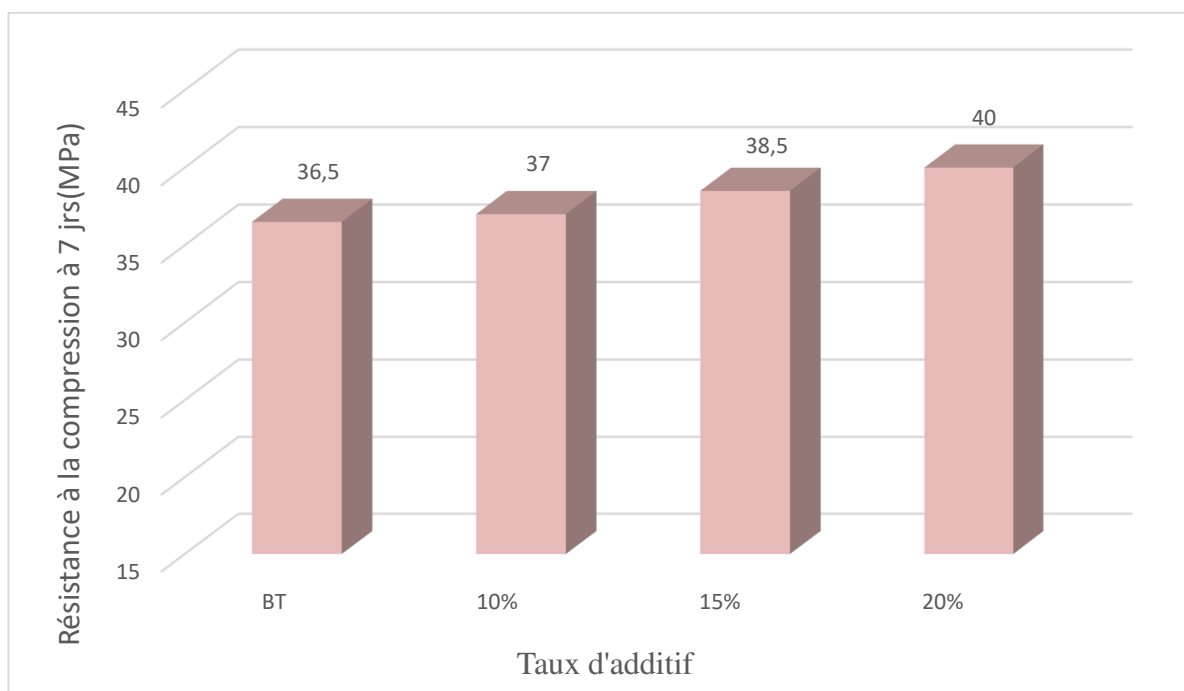
### VI.11.2 Résistance à la compression :

#### Résistance à 7 jours :

Le tableau VI.24 et l'histogramme de la figure VI.11 montrent la variation de la résistance à la compression en fonction de taux d'additif à jeune âge (à 7 jours)

**Tableau VI.24** : la résistance à la compression des différentes formulations étudiées.

Formulation	Résistance à la compression (MPa)
	7 jours
Béton témoin	36,5
10% de filler	37
15% de filler	38,5
20% de filler	40



**Figure VI.11** Variation de la résistance de compression en fonction de taux d'additif à 7 jrs

#### Interprétation :

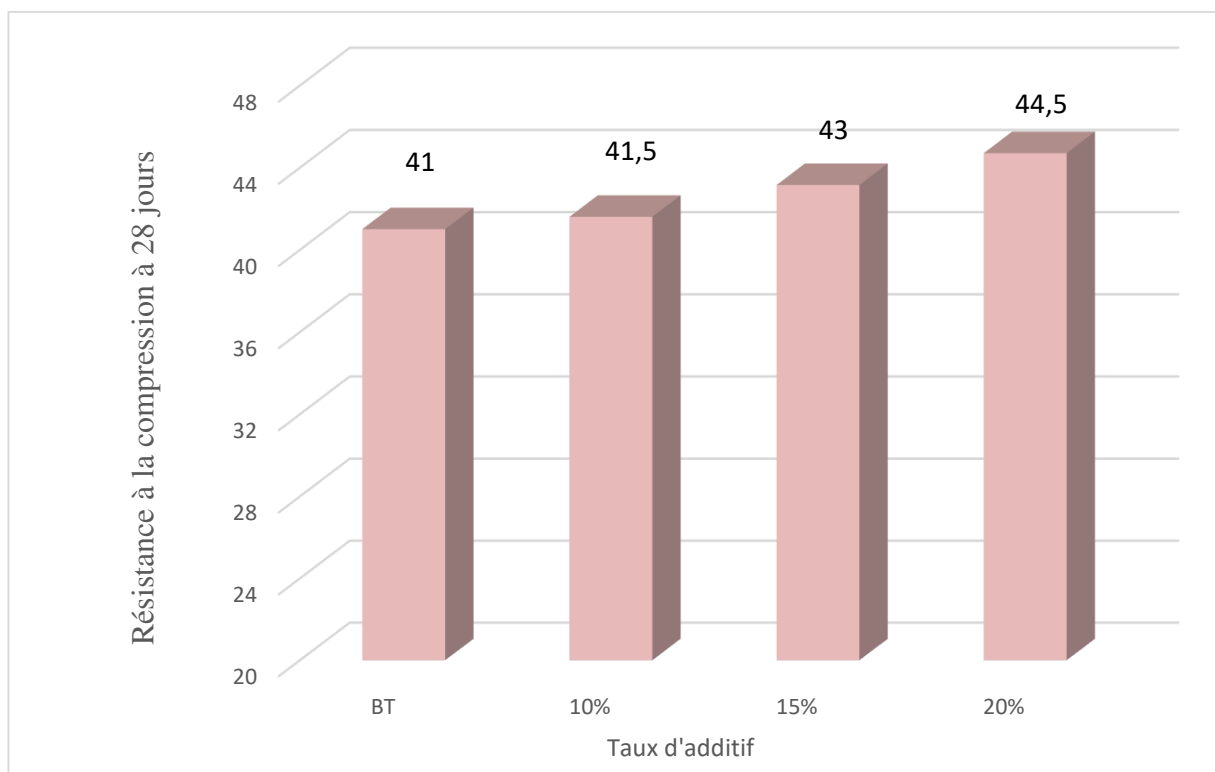
Les résultats de la résistance mécanique à la compression des bétons préparés (témoin, 10%,15%,20% de noyau d'olive), montrent une évolution de la résistance à 7 jours, cette dernière varie entre 0.5 et 4 MPa.

### Résistance à 28 jours :

Le tableau VI.25 et l'histogramme de la figure VI.12 montrent la variation de la résistance à la compression en fonction de taux d'additif à long terme (à 28 jours)

**Tableau VI.25** : la résistance à la compression des différentes formulations étudiées.

Formulation	Résistance à la compression (MPa)
	28 jours
<b>Béton témoin</b>	41
<b>10% de filler</b>	41,5
<b>15% de filler</b>	43
<b>20% de filler</b>	44,5



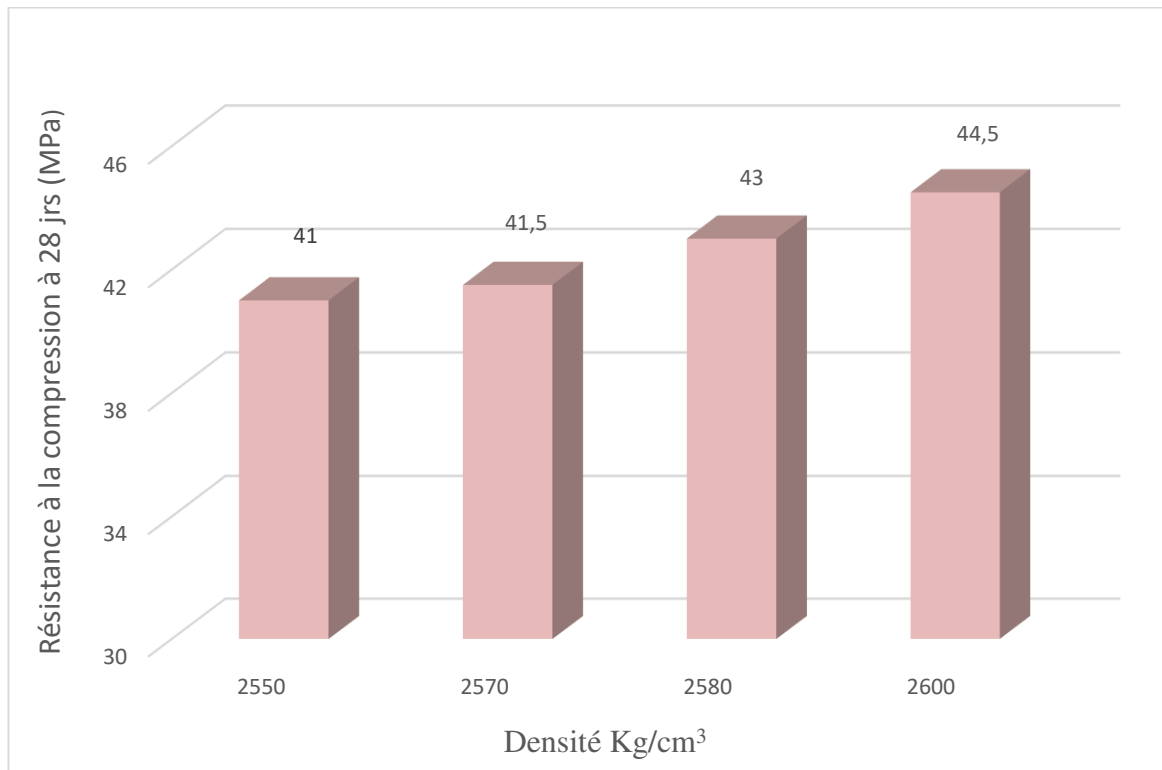
**Figure VI.12** Variation de la résistance de compression en fonction de taux d'additif à 28 jrs

### Interprétation :

Les résultats de la résistance mécanique à la compression des échantillons préparés (témoin, 10%,15%,20% de noyau d'olive), montrent une augmentation remarquable de la résistance à la compression. Cette augmentation varie entre 0.5 et 3.5 MPa .

### Résistance à la compression en fonction de densité :

L'histogramme de la figure VI.13 montre la variation de la résistance à la compression des échantillons en fonction de leurs densités .



**Figure VI.13** Variation de la résistance de compression en fonction de densité à 28 jours

### Interprétation :

L'histogramme de la figure VI.13 montre une évolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de densité. On remarque que les échantillons les plus denses présentent une meilleure résistance à la compression. Cela est principalement dû à une meilleure compacité des grains de ciment et des agrégats, ce qui améliore la résistance inter granulaire et réduit les vides et les porosités.

### **Conclusion générale :**

Les bétons autoplaçants représentent une avancée significative dans l'industrie du béton, offrant des avantages économiques et techniques considérables. En éliminant le besoin de vibration, ils permettent de réduire les coûts de production et de construire des structures complexes fortement armées. De plus, l'utilisation des BAP contribue à diminuer les nuisances sonores sur les chantiers et simplifie la mise en œuvre.

Cependant, chaque année, une quantité importante de noyaux d'olive est générée, constituant une source notable de déchets néfaste pour l'environnement. Le recyclage de ces déchets permet non seulement de préserver l'environnement, mais aussi d'améliorer certaines propriétés mécaniques des matériaux. Dans ce cadre, notre principal objectif est de valoriser ces déchets de noyaux d'olive en les réutilisant dans la fabrication des bétons autoplaçants.

Notre étude pratique nous a permis de comprendre la formulation, la caractérisation de béton autoplaçants BAP (à l'état frais et durci), l'effet de superplastifiant et l'influence de noyaux d'olives sur les propriétés rhéologiques et physico-mécaniques

La formulation des BAP a été étudiée par la méthode japonaise s'est révélée très efficace pour l'obtention des caractéristiques rhéologiques et physico-mécaniques.

L'étude rhéologique nous a permis de comprendre clairement l'influence des noyaux d'olive sur le comportement rhéologique et physico-mécanique de BAP.

À partir des résultats obtenus, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- La variation des pourcentages de noyaux d'olive dans les formulations de BAP entraîne des variations dans les propriétés rhéologiques et mécaniques.
- Une augmentation du pourcentage de noyaux d'olive améliore le comportement rhéologique du béton.
- L'augmentation de la teneur en superplastifiant avec les noyaux d'olive facilite l'écoulement du béton autoplaçants, réduisant ainsi la contrainte de cisaillement.
- L'utilisation de noyaux d'olive comme additif dans les BAP réduit la fluidité par rapport au béton ordinaire, mais assure une bonne mise en place sans vibration ni ségrégation.
- La masse volumique de béton autoplaçants augmente progressivement avec l'augmentation du pourcentage des noyaux d'olive.

## *Conclusion générale*

---

- Les résistances à la compression des bétons formulés avec différents pourcentages de noyaux d'olive augmentent proportionnellement à l'augmentation du pourcentage d'ajout.
- L'incorporation de poudre de noyaux d'olive améliore légèrement la résistance mécanique par rapport au béton témoin, avec des variations observées entre 0,5% et 4% de dosage.
- L'augmentation de la densité avec différents pourcentages de noyaux d'olive donne une meilleure résistance à la compression à 28 jours, grâce à la compacité des grains de ciment et des granulats.

En conclusion, l'incorporation de poudre de noyaux d'olive dans les bétons autoplaçants montre une amélioration des caractéristiques rhéologiques et physico-mécaniques par rapport au béton traditionnel, comme en témoignent les résultats des essais comparatifs réalisés à différentes proportions.

**Références bibliographique :**

- [1] Boeraeve.D, (1994). «Technologie du béton ».
- [2] Khélifa.R.,(2001). «Influence des ciments à base d'ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques des mortiers et des bétons», Thèse de Magistère en Génie Civil, Université Mentouri de Constantine.
- [3] Mohamadi.S,(2013-2014) .Cours de matériaux et ouvrages de Génie Civil. Chapitre 1. LE BETON ET SES CONSTITUANTS. 2013-2014.p.2.
- [4] Boutouata, S., Haouam, C., & Encadre par Messabhia, A. (2020). Etude de l'influence des ajouts des adjuvants et le mode de séchage sur la résistance du béton .Mémoire fin d'étude master académique.
- [5] Bouakaz, F., & Atmimou, N. (2021). Etude expérimentale d'un béton à base de granulats recyclés . Mémoire fin d'étude , Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).
- [6] Manai, K. (1996). Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons autonivelants. Mémoire de maîtrise en sciences appliquées ,Université de Sherbrooke,Canada.
- [7] Gmira, A. (2003). Etude texturale et thermodynamique d'hydrates modèles du ciment. Thèse de doctorat ,Université D'ORLEANS.
- [8] Norme Française XP P 18-540 ,« Granulats –Définitions, conformité, spécifications, indice de classement : P 15-540 », (1997).
- [9] « Récupérés », lorsqu'ils sont issus de la destruction d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réemployés.
- [10] Maillot, R. (2001). Mémento technique des granulats, les presses de l'école des Mines ,Paris,166p.
- [11] Baron.J , et SAUTREY.R,(1982). "Le béton hydraulique", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 560 p.
- [12]: Neville.A.M.,(2000). "Propriétés des bétons", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p.

- [13] Descantes.Y, GUEDON.J, AUSSÉDAT.S , DUPONT.G,(2007). Les granulats courants pour béton, Ed. Techniques Ingénieur, p. 1-21.
- [14] Balapgol.B, Kulkarni.S.A, Bajoria.K.M,(2002). Strength and durability of concrete with Crushed sand. In: 27th Conference on our world in concrete & structures. p. 179-189.
- [15] COLLECTION TECHNIQUE CIMBETON. Les bétons formulation. fabrication et mise en œuvre. Tome 2. Centre d'information sur le ciment et ses applications (France). CIM béton, 2005, p.36-94.
- [16] FICHE 4.1 : L'UTILISATION DES GRANULATS ISSUS DU RECYCLAGE – DECEMBRE 2010 RAPPORT TECHNIQUE" BATIMENTS EXEMPLAIRES "
- [17] Boulay, V., GAGNÉ, R., & MORIN, R. (2014). Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel (Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke).
- [18] Ammari. M , Abdelouahad.S,(2006). « thèse sur L'effet des fillers de marbres sur la réponse mécanique d'un béton recyclé à base de ciment CRS» .
- [19] [Chakradhara .R et al., 2011; de Juan et Gutierrez, 2009; Fathifazl et al., 2009; Padmini et al., 2009; Sagoe-Crentsil et al., 2001]
- [20] Mohellebi, S. (2015). Caractérisation et modélisation des paramètres physico-hygro-mécaniques d'un béton léger à base granulats composites (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [21] Mesbah, H. A. (1997). Amélioration du comportement des mortiers à base de granulats recyclés par adjonction de fibres. These de Doctorat, Universited'Artois, France.
- [22] Bourmatte, N., & Houari, H. (2017). *Granulats recyclés de substitution pour bétons hydrauliques* (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- [23] . Debieb, F. (1999). Valorisation des déchets de briques et béton de démolition comme agrégats de béton (Doctoral dissertation, Blida).
- [24] Norme Française XP P 18-573, "Granulats - Essai Los-Angeles", AFNOR, (1990)
- [25] Phoummavong, V. (2015). Cours en ligne matériaux de construction. Université Nationale du Laos, <http://www.la.refer.org/materiaux>.

- [26] Dupain, R., Lanchon, R., & Saint-Arroman, J. C. (2000). Granulats, sols, ciments et bétons. Editions Casteilla, 75005, 122-136.
- [27] Norme NA430. Bétons - Détermination de la résistance à la traction par fendage des éprouvettes. Institut Algérien de la normalisation.
- [28] Baron, J. (1996). Les bétons-bases et données pour leur formulation.
- [29] Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil Option : Structure et Matériau Thème : Influence du type de ciment et du type de superplastifiant sur la viscosité des coulis Présenté par :SELLAMI TAREK UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE .
- [30] De Larrard, F. (2002). Construire en béton: l'essentiel sur les matériaux. Presses des Ponts.
- [31] NF ISO 14577-4 "Metallic materials instrumented indentation test for harness and other materials
- [32] Nanthagopalan, P., & Santhanam, M. (2009). Experimental investigations on the influence of paste composition and content on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3443-3449.
- [33] N.G. S.G. Ladkany, V.K. Doli, T.K. McEwan, High strength self-consolidating concrete for practical applications, 5th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, 3-5 Septembre, Ghent, Belgium. (2007) 1065–1070.
- [34] Okamura, H., M. Ouchi, Self-compacting concrete, *Adv. Concr. Technol.* 1 (2003) 5–15. doi:10.1016/B978-075065686-3/50295-0.
- [35] Kouider Djelloul, O. (2018). Performance structural d'un béton autoplaçant à base de granulats recyclés et laitier, Thèse de doctorat, Université de BLIDA 1.
- [36] Bétons Autoplaçants-Monographie d'ouvrages en BAP, B.52, 2003, collection technique CimBéton, 152 pages.
- [37] Le béton autoplaçant édité par HOLCIM, Suisse, version 2004, 32 pages,
- [38] Turcry, P. (2004). Retrait et fissuration des bétons autoplaçants: Influence de la formulation. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- [39] Association Française de Génie Civil, "Bétons auto-plaçants -Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.

- [40] AFGC (Association Française de Génie Civil). (2008). Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants.
- [41] R'mili, A., & Ben Ouezdou, M. (2007). Caractéristiques et propriétés des bétons autoplaçants (BAP). In Conférence: Matériaux Sols et Structures MS2 (Vol. 7, pp. 25-31).
- [42] EN, N. (2010). 12350-11. Essai pour béton frais–Partie 11: béton auto-plaçant–Essai de stabilité au tamis [Test for fresh concrete–Part 11: self-compacting concrete-sieve stability test].
- [43] Bethmont, S. (2005). Mécanismes de ségrégation dans les bétons autoplaçants (BAP): Etude expérimentale des interactions granulaires. Thèse de doctorat de l'école Nationale des ponts et chaussées, spécialité: structures et matériaux.
- [44] SEDRAN, T. (1995). Les bétons autonivelants (BAN). Synthèse bibliographique. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, 196, 53-60.
- [45] Association Française de Génie Civil, "Bétons auto-plaçants -Recommandations provisoires", documents scientifiques et techniques, AFGC, juillet 2000.
- [46] Proust, E. (2002). Retraits et fluages des bétons auto-plaçants: vers une meilleure compréhension des comportements différés, Thèse de doctorat de INSA de Toulouse.
- [47] Assié, S. (2004). Durabilité des bétons auto-plaçants, Thèse de doctorat de INSA de Toulouse.
- [48] Fares, H. (2009). Propriétés mécaniques et physico-chimiques de bétons autoplaçants exposés à une température élevée. Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise.
- [49] Petersson, O. (2001, October). «Limestone powder as filler in self-compacting concrete-frost resistance and compressive strength». In Proceeding of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Tokyo, Japan (pp. 277-284).
- [50] König, G., Holschemacher, K., Dehn, F., & Weibe, D. (2001, October). Self-Compacting Concrete–Time Development of Material Properties and Bond Behavior. In Proceedings of 2nd International Symposium on Self-Compacting Concrete (pp. 507-516).
- [51] ARAB.A, Rafai .H.(2016). «Elaboration et étude des caractéristiques physicomécaniques des Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performance avec ajout de pouzzolane naturelle et de fumée

de silice » Mémoire de Master Option : Contrôle qualité des matériaux- Université M'Hamed Bougera de Boumerdes .

[52] Document en ligne/ site : <http://www.guidebeton.com/differents-types-beton>

[53] Meziane, L. (2019). Etude Expérimentale d'un Béton Fibré à Ultra Haute Performances (BFUP) à base de sable de dune .Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.

[54] « Recommandations pour l'emploi des bétons autoplaçants ». Documents scientifiques et techniques. Janvier 2008.

[55] Bourema, M. (1955). Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci. mémoire de master, Université, 20.

[56] SAITI, I. (2014). Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire à base de sable de dune de la région de GHARDAIA , mémoire de master , Université KASDI MERBAH –OUARGLA .

[57] Jos Cox , Jacques Sizaire , Pascal Meulders , Elly Van Overmeire, AlbertIngelaere : FeBeCel. Bruxelles.

[58] Christian Guegan, Philippe Legras, Jean Francois Mazzoleni, Christian Colin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier : «Mémento du béton cellulaire» (2005).

[59] Tada, S. (1992). Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials. Advance in Autoclaved Aerated Concrete.

[60] Kaci Z, Merhoum S, 2020, Emploi du béton cellulaire pour la construction d'un bâtiment R08 + 1ss implante à Blida, université Blida -1-

[61] Cox, J., Sizaire, J., Meulders, P., Van Overmeire, E., & Ingelaere, A. (2005). Le béton cellulaire, matériau d'avenir. Fédération belge Béton Cellulaire.

[62] BARKI, H., OUARED, N., & HERIHIRI, O. (2020). Elaboration D'un Béton Cellulaire. Mémoire de master , Université MEDEA.

[63] Mazhoud, B. (2017). Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites bio-sourcés (Doctoral dissertation, INSA de Rennes).

[64] Bouloc, P. (2006). Le chanvre industriel: production et utilisations (France Agricole Editions).

[65] Guettala, S. Bétons Innovants II.

[66] Cérézo, V. (2005). Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique. THhèse de doctorat en génie civil, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

- [67] Nozahic, V., & Amziane, S. (2012). Influence of sunflower aggregates surface treatments on physical properties and adhesion with a mineral binder. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(11), 1837-1849.
- [68] Pagea, J., Sonebib, M., & Amzianec, S. (2016). Étude expérimentale des propriétés d'un béton de chanvre incorporant un adjuvant viscosant. *Revue des composites et des matériaux avancés*, 26(3-4), 349-366.
- [69] De Larrard 2000. Structures granulaires et formulation des bétons, traduit de l'anglais par LECOMTE A, études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 414 p.
- [70] Pr.Ghomari.F Université Aboubekr Belkaid Faculté de technologie département de Génie Civil Matériaux de Construction.
- [71] Benamrane, D. Z. (2017). L'effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton. mémoire fin d'étude université Ouargla .
- [72] De Larrard, F. (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press.
- [73] De Larrard, F. et AL. (1994). « prévision de la compacité des mélanges Granulaires le model de suspension solide n°1-fondements théoriques et calibration du model », *Bulletin du laboratoire central des ponts et Chaussées n° 194*.
- [74] Turcry, P. (2004). *Retrait et fissuration des bétons autoplacants: Influence de la formulation*. Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- [75] Dupain, R., Lanchon, R., et Saint-Arroman, J. C. (2000). *Granulats, sols, ciments et bétons*. Editions Casteilla, 75005, 122-136.
- [76] Dreux, G., et Festa, J. (1998). *Nouveau guide du béton et de ses constitutants*. Eyrolles.