

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique  
École Normale Supérieure de l'Enseignement  
Technologique de Skikda



Département de Technologie

Filière : Génie civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme de professeur de  
l'enseignement secondaire

Thème :

**Formulation et caractérisation d'un mortier à  
base de la poudre de l'Os de bœuf et la poudre de  
verre des bouteilles.**

Présenté par :

Encadré par: Pr Laidi BABOURI

- Hadil ATHMANI
- Bouthaina HAMIDANE

Date de soutenance : 24 juin 2024

Heure : 11:15h

Membres du jury

Nom et Prénom	Grade	Université	Qualité
<b>MOUDJARI Maroua</b>	Maître de Conférences Classe B	ENSET Skikda	Présidente du jury
<b>BABOURI Laidi</b>	Professeur	ENSET Skikda	Directeur de mémoire
<b>DOB Hanane</b>	Maître de Conférences Classe B	ENSET Skikda	Examinatrice

Année Universitaire : 2023-2024

## Remerciements

*Ce mémoire est le fruit de notre travail à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda.*

*Nous tenons à remercier Dieu le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé et la force de mener à bien ce travail.*

*Remplis d'une immense reconnaissance, nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements à notre directeur de mémoire, Monsieur **Laidi BABOURI**, professeur à l'École Normale Supérieure d'Enseignement Technologique de Skikda. Sa patience à toute épreuve, ses conseils avisés et son soutien indéfectible ont été des éléments essentiels tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Nous lui sommes profondément reconnaissants de nous avoir ouvert les portes de son savoir et d'avoir suivi l'évolution de ce travail avec une rigueur exemplaire, malgré ses nombreuses responsabilités administratives."*

*Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail de recherche.*

- *Madame le docteur **Marwa MOUDJARI**, présidente du jury.*
- *Madame le docteur **Hanene DOB**, membre examinatrice.*

*Nous adressons notre plus profonde reconnaissance au Dr **Yasmina BISKRI** pour leurs interactions scientifiques enrichissantes qui ont grandement contribué à la compréhension des implications des résultats de notre recherche.*

*Aussi, nous tenons à remercier le département de Technologie pour nous avoir permis d'y mener une partie des travaux nécessaires à la réalisation de ce mémoire, en particulier le chef de département, Docteur **Salih RAHMOUNI**, et son équipe administrative.*

*Mes remerciements vont également aux personnels :*

- *Monsieur **Kamel MHEGUENI**, **Abd elhamid MEGHAR** du restaurant de la cité universitaire de Azzaba n°2,*
- *Monsieur **Gharib LAOUACHERIA** Ingénieur au laboratoire de Génie Civil de l'usine Hajjar Al-soude.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce projet.*

**Bouthaina HAMIDANE et Hadil ATHMANI**

# *Dédicace 1*

*Avec un énorme plaisir, un cœur ouvert et une immense joie que je dédie ce travail à  
Tous ceux qui sont chers ; A ma très chère maman*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel à ma considération pour le  
sacrifice que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne serai point te remercier comme il se doit. Ton affection me  
couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour  
affronter les différents obstacles.*

*A mon très cher papa*

*Depuis ma tendre enfance, tu es mon plus fort repère, un être unique et magnifique, un exemple à  
suivre, le meilleur des pères, avec tes mots tu m'as montré le chemin à suivre dans ma vie. Tu as  
toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.*

*Vous êtes mon support de la vie qui m'a pris m'a supporté et me dirigé vers la gloire. Que ce travail  
traduise ma gratitude et mon affection. Merci Papa, aujourd'hui je marche sur tes pas de miel.*

*À ces étoiles qui éclairent toujours mon chemin, à mon côté ferme qui ne penche pas et à la sécurité  
de mes jours, à ceux avec qui j'ai eu la chance de me soutenir, mes chers frères.*

*À tous ceux qui m'ont soutenu avec amour et qui m'ont soutenu dans toutes les situations, « mon  
cher mari » et sa famille, que Dieu les protège.*

*À celle qui a fait partie de mes victoires, mon professeur de Quran et éducatrice, «M.Fawzia ».*

*À celle que j'ai rencontrée durant mes années d'école, à celle qui me fait rire quand je ne peux pas,  
et à ma sœur dont je ne souhaite pas me séparer, à ma meilleure amie et compagne dans ce travail,  
Hadil, tu es le plus beau des cadeaux que Dieu m'a fait, puissiez-vous toujours être en bonne  
santé.*

*A ceux dont la séparation m'est chère, aux nombreux amis et proches, à tous ceux avec qui j'ai  
goûté les plus beaux moments, que Dieu a fait comme mes sœurs, Maysoun, Basma Ashwaq,  
Amina, Badiia, Houda, Manel, Radhia, Hasna, Lina, Rihem, Hadjar, Sabrine, Maryem, Soumia,  
Siham, Nihel, Chaima, Yamina et Oumaima.*

**Bouthaina**

## *Dédicace 2*

*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 sincère.*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*Qui je dois ma vie et ma réussite, qui n'ont jamais rejeté mes exigences, n'ont ménagé aucun effort pour me rendre heureuse. Qui n'ont jamais cessé de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes chers frères, Saïf, Amir et Issam*

*A ma chère sœur,*

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études. Que dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A ma chère binôme, Bouthaina*

*Pour son soutien moral, sa entente et sa patience.*

*A mes chères amies, Amina, Basma, Achouak, Maysoun, Hasna, Lina, Manel, Rihem, Radhia, Sabrine, Hadjer, Badiaa, Houda, Ouafa, Mariem, Sihem, Soumia, Oumaima, Rima et Fatima.*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A toute ma famille,*

*Hadil*

# Sommaire

Résumé	
ملخص	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles et abréviations	
Liste des équations	
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Etude bibliographique

Introduction .....	3
I.1 Les mortiers .....	3
I.1.1 Historique .....	3
I.1.2 Définition du mortier .....	3
I.1.3 Constituants du mortier .....	4
I.1.4 Types de mortier .....	10
I.1.5 Domaines d'application du mortier .....	15
I.2 Os de bœuf .....	17
I.2.1 Définition .....	17
I.2.2 Caractéristiques de l'os de bœuf .....	18
I.2.3 Composition de l'os de bœuf .....	19
I.2.4 Applications de l'os de bœuf .....	20
I.3 Le verre .....	21
I.3.1 Historique .....	23
I.3.2 Définition du verre .....	21
I.3.3 Le recyclage du verre .....	22
I.3.4 Constituants d'un verre .....	23
I.3.5 Propriétés du verre .....	23
I.3.6 Composition des verres .....	27
I.3.7 Classification des verres .....	28
I.3.8 Domaines d'application du verre .....	31
Conclusion .....	33
Références bibliographiques du chapitre I .....	34

## Chapitre II : Techniques et procédures expérimentales

Introduction .....	35
II.1 Normes .....	35
II.1.1 Normes utilisées pour la préparation des matériaux .....	35
II.1.2 Normes utilisées pour la confection des pâtes et mortiers à l'état frais .....	35
II.2 Essais et protocoles expérimentaux .....	35
II.2.1 Masses volumiques .....	35
II.2.1.1 Masse volumique apparente .....	35

II.2.1.2 Masse volumique absolue .....	37
II.2.2 La surface spécifique (finesse de Blaine) .....	39
II.2.3 Analyse granulométrique par tamisage .....	41
II.2.4 Equivalent de sable .....	43
II.2.5 Essai à l'état frais .....	44
II.2.6 Essai à l'état durci .....	47
II.2.6.1 Résistance à la traction par flexion .....	47
II.2.6.2 Résistance à la compression .....	48
Conclusion .....	48
Références bibliographiques du chapitre II .....	49

## Chapitre III : Résultats et Discussions

Introduction .....	50
III.1 Identification et caractérisation des matériaux constituant du mortier .....	50
III.1.1 Ciment .....	50
III.1.2 Sable .....	52
III.1.3 Eau de gâchage .....	54
III.1.4 Additions minérales .....	55
A) Poudre de l'os de bœuf .....	56
B) Poudre de verre .....	59
III.2 Etude des propriétés physico-mécaniques des mortiers élaborés .....	63
III.2.1 Formulation et élaboration des mortiers .....	63
III.2.2 Protocole expérimental .....	64
III.2.3 Etude de l'effet du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf .....	67
III.2.3.1 Masse volumique des mortiers élaborés .....	67
III.2.3.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés.....	68
III.2.3.3 Résistance à la compression des mortiers élaborés .....	70
III.2.4 Etude de l'effet du taux de substitution de la poudre de verre .....	72
III.2.4.1 Masse volumique des mortiers élaborés.....	72
III.2.4.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés.....	73
III.2.4.3 Résistance à la compression des mortiers élaborés .....	75
III.2.5 Etude de l'effet du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre.....	76
III.2.5.1 Masse volumique.....	76
III.2.5.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés.....	78
III.2.5.3 Résistance à la compression des mortiers élaborés .....	81
III.2.6 Conclusion.....	81
Références bibliographiques du chapitre III .....	82
Conclusion générale .....	83

## Liste des tableaux

### Chapitre I : Etude bibliographique

<b>Tableau I.1</b> : Exemples de compositions de mortier de ciment .....	<b>11</b>
<b>Tableau I.2</b> : Comparaison des propriétés des mortiers de ciment et de chaux .....	<b>12</b>
<b>Tableau I.3</b> : Quantité des constituants du mortier de chaux .....	<b>13</b>
<b>Tableau I.4</b> : Exemples de mortiers bâtards .....	<b>14</b>
<b>Tableau I.5</b> : Composition en éléments fertilisants de l'os .....	<b>20</b>
<b>Tableau I.6</b> : Composition chimique de l'os de bœuf .....	<b>20</b>
<b>Tableau I.7</b> : Propriétés physiques du verre .....	<b>24</b>
<b>Tableau I.8</b> : Valeurs de densité des différents types de verre .....	<b>25</b>

### Chapitre III : Résultats et Discussion

<b>Tableau III.1</b> : Composition chimique du ciment .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.2</b> : Composition minéralogique du ciment .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.3</b> : Caractéristique physico-mécanique du ciment .....	<b>50</b>
<b>Tableau III.4</b> : Composition chimique du sable normalisé .....	<b>53</b>
<b>Tableau III.5</b> : Caractéristiques physiques du sable Normalisée .....	<b>53</b>
<b>Tableau III.6</b> : Tableau nutritionnel d'ifri .....	<b>54</b>
<b>Tableau III.7</b> : Composition chimique de l'os de bœuf utilisée .....	<b>58</b>
<b>Tableau III.8</b> : Composition chimique de verre utilisée .....	<b>60</b>
<b>Tableau III.9</b> : Compositions et proportions des échantillons de mortiers utilisés .....	<b>62</b>
<b>Tableau III.10</b> : Variation de la masse volumique des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf .....	<b>66</b>
<b>Tableau III.11</b> : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf à différents âges .....	<b>67</b>

<b>Tableau III.12</b> : Variation de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf à différents âges .....	<b>68</b>
<b>Tableau III.13</b> : Variation de la masse volumique des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre .....	<b>69</b>
<b>Tableau III.14</b> : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre à différents âges .....	<b>71</b>
<b>Tableau III.15</b> : Variation de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre à différents âges .....	<b>72</b>
<b>Tableau III.16</b> : Variation de la masse volumique des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution du mélange de de l'os de bœuf et la poudre de verre à différents âges .....	<b>74</b>
<b>Tableau III.17</b> : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre à différents âges .....	<b>77</b>
<b>Tableau III.18</b> : Variation de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre à différents âges .....	<b>79</b>

## Liste des figures

### Chapitre I : Etude bibliographique

<b>Fig. I.1</b> : Mortier .....	4
<b>Fig. I.2</b> : Constituants du mortier .....	4
<b>Fig. I.3</b> : Le ciment .....	6
<b>Fig. I.4</b> : Types de sable .....	7
<b>Fig. I.5</b> : L'eau de gâchage .....	8
<b>Figure I.6</b> : Les adjuvants.....	9
<b>Fig.I.7</b> : Pose de mortier de hourdage .....	15
<b>Fig. I.8</b> : Enduits isolants et enduits de façade .....	16
<b>Fig. I.9</b> : Chapes fluides et chape ciment .....	13
<b>Fig. I.10</b> : Les scellements .....	17
<b>Fig. I.11</b> : Os de bœuf .....	17
<b>Fig. I.12</b> : Déchets de verre .....	22
<b>Fig.I.13</b> : Processus de transformation des déchets de verre .....	22
<b>Fig.I.14</b> : Utilisation de la poudre de verre dans les trottoirs et les pavés .....	32
<b>Fig.I.15</b> : Intégration d'agrégats de verre dans des planchers.....	32
<b>Fig.I.16</b> : Briques et tuiles en verre .....	33
<b>Fig. I.17</b> : Dalle en béton avec poudre de verre.....	33

### Chapitre II : Techniques et procédures expérimentales

<b>Fig. II.1</b> : Schéma du protocole expérimental de la mesure de la masse volumique apparente .....	35
<b>Fig.II.2</b> : Schéma du protocole expérimental de la masse volumique absolue par la méthode de l'éprouvette .....	36
<b>Fig.II.3</b> : (a) : Pycnomètre utilisé (b) : Schéma du protocole expérimental de la mesure de la masse volumique absolue par la méthode de pycnomètre .....	37
<b>Fig.II.4</b> : L'appareil utilisé .....	38
<b>Fig.II.5</b> : Schéma du principe de fonctionnement de la perméabilité de Blaine .....	40
<b>Fig. II.6</b> : Tamiseurs utilisés pour l'analyse granulométrique .....	41
<b>Fig.II.7</b> : Schéma du protocole expérimental de l'essai d'équivalent de sable visuel .....	42
<b>Fig.II.8</b> : Appareil de Vicat .....	44
<b>Fig.II.9</b> : Appareil de Vicat .....	45
<b>Fig.II.10</b> : Photographie de la machine d'essais de résistance mécanique .....	46
<b>Fig.II.11</b> : Schéma représente l'essai de la traction par flexion .....	47
<b>Fig.II.12</b> : Photographie de la partie de l'appareil de la traction par flexion .....	47
<b>Fig.II.13</b> : Schéma représente l'essai de traction par compression .....	48
<b>Fig.II.14</b> : Photographie de la partie de l'appareil de la compression .....	48

### Chapitre III : Résultats et Discussion

<b>Fig.III.1</b> : Sac de ciment utilisé .....	49
<b>Fig.III.2</b> : Courbe typique de résistance à la compression d'un mortier normalisé .....	51
<b>Fig.III.3</b> : Photographie d'un sac de sable normalisé .....	52
<b>Fig.III.4</b> : Courbe granulométrique du sable normalisé .....	52
<b>Fig.III.5</b> : Image d'une bouteille d'eau minérale - IFRI - 1.5 l .....	53
<b>Fig.III.6</b> : Étapes de Préparation de la Poudre d'Os de Bœuf .....	57
<b>Fig.III.7</b> : Diffraction du rayon X de poudre d'os de bœuf .....	58
<b>Fig.III.8</b> : Étapes de Préparation de la Poudre de Verre .....	60
<b>Fig.III.9</b> : Diffraction des rayons X de poudre de verre .....	61
<b>Fig.III.10</b> : Étapes de Préparation du mortier .....	65
<b>Fig.III.11</b> : Variation de la masse volumique des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf .....	66
<b>Fig.III.12</b> : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf à 7 et 28 jours .....	68
<b>Fig.III.13</b> : Graphique de résistance à la compression d'un mortier contenant de la poudre de l'os de bœuf .....	70
<b>Fig.III.14</b> : Variation de la masse volumique des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre .....	71
<b>Fig.III.15</b> : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre à 7 et 28 .....	73
<b>Fig.III.16</b> : Variation de la résistance à la compression par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre à 7 et 28 .....	74
<b>Fig.III.17</b> : Variation de la masse volumique des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre et la poudre de l'os de bœuf .....	76
<b>Fig.III.18</b> : Variation de la résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre à différents âge .....	78
<b>Fig.III.19</b> : Variation de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et de la poudre de verre à différents âges ....	80

# Liste des équations

## Chapitre I : Etude bibliographique

**Eq.I.1** : Réaction chimique de ciment .....4

## Chapitre II : Techniques et procédures expérimentales

**Eq.II.1** : La masse volumique apparente .....41

**Eq.II.2** : La masse volumique absolue " Méthode de l'éprouvette graduée " .....43

**Eq.II.3** : La masse volumique absolue " Méthode du pycnomètre " .....44

**Eq.II.4** : la porosité .....46

**Eq.II.5** : la surface spécifique de Blaine .....46

**Eq.II.6** : Analyse granulométrique par tamisage .....47

**Eq.II.7** : Equivalent de sable .....50

**Eq.II.8** : Résistance à la traction par flexion .....53

**Eq.II.9** : Résistance à la compression       **54**

## Liste des symboles et abréviations

<b>MO</b> : Mortier à base de la poudre le l'Os de bœuf .....
<b>MV</b> : Mortier à base de la poudre de verre .....
<b>CPA</b> : Ciment portland artificiel .....
<b>CPJ</b> : Ciment portland composé .....
<b>CPF</b> : Ciment de haut fourneau .....
<b>CPZ</b> : Ciment pouzzolanique .....
<b>CLC</b> : Ciment au laitier et aux cendres .....
<b>E/C</b> : Rapport d'eau (par rapport du ciment) .....
<b>ISB</b> : Indice de stabilité biologique .....
<b>PH</b> : Potentiel hydrogène .....
<b>DVD-RW</b> : Digital Versatile Disc-Rewritable .....
<b>p<sub>app</sub></b> : La masse volumique apparente .....
<b>p<sub>abs</sub></b> : La masse volumique absolue .....
<b>SSB</b> : Surface spécifique de Blaine .....
<b>ES</b> : Equivalent de sable .....
<b>ESV</b> : Equivalent de sable visuel .....
<b>ESP</b> : Equivalent de sable au piston .....
<b>RF</b> : Résistance en flexion .....
<b>RC</b> : Résistance en compression .....



# **Introduction**

## **Générale**

## Introduction Générale

---

L'industrie de la construction est un secteur majeur de l'économie mondiale, mais elle est également l'un des plus gros contributeurs à la pollution et à l'épuisement des ressources naturelles.

La production de ciment, en particulier, est un processus gourmand en énergie et en eau, et génère des émissions importantes de gaz à effet de serre. De plus, l'industrie de la construction génère une grande quantité de déchets, dont une partie importante finit dans les décharges.

Dans ce contexte, il est urgent de développer des matériaux de construction plus durables et respectueux de l'environnement. L'utilisation de déchets comme matériaux de construction s'avère prometteuse pour réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction. Parmi les déchets potentiels, la poudre d'os de bœuf et la poudre de verre de bouteilles attirent l'attention des chercheurs en raison de leurs propriétés prometteuses.

La poudre d'os de bœuf est un déchet abondant provenant des abattoirs et des industries agroalimentaires. Elle est riche en hydroxyapatite, un composé minéral similaire à celui des granulats de ciment. Elle présente également une porosité intéressante qui peut contribuer à l'isolation thermique des bétons. La poudre de verre de bouteilles, quant à elle, est un matériau inerte et durable qui peut remplacer une partie du sable ou du ciment dans les mortiers.

L'objectif principal de cette étude est de formuler et de caractériser un mortier à base de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre de bouteilles. Plus précisément, nous nous proposons de :

- Développer des formulations de mortier en utilisant différentes proportions de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre de bouteilles et de leur mélange.
- Évaluer les propriétés physicomécaniques mécaniques des mortiers formulés, y compris la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction.

La méthodologie de cette étude comprendra les étapes suivantes :

1. **Collecte et préparation des matériaux :** La poudre d'os de bœuf sera traitée et broyée en une poudre fine. La poudre de verre de bouteilles sera collectée et broyée en une poudre fine.
2. **Formulation des mortiers :** Différentes formulations de mortier seront préparées en utilisant des proportions variables de poudre d'os de bœuf, de poudre de verre de bouteilles, de ciment, de sable et d'eau.
3. **Caractérisation des propriétés physico-mécaniques :** Les propriétés physico-mécaniques des mortiers formulés à l'état frais et à l'état durcis seront évaluées par des tests de compression, de flexion et de traction.

Ainsi, la structure du présent manuscrit traduit cette démarche est divisé en trois (03) chapitres :

Le premier chapitre regroupe une revue bibliographique sur les principaux mots clés de l'étude à savoir : le mortier, déchet, os de bœuf, verre des bouteilles.

Le deuxième chapitre, expose l'ensemble des normes, protocoles expérimentaux et la description des dispositifs utilisés et conditions expérimentales.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et leurs interprétations. Il est divisé en deux (02) parties : La première partie est consacrée à la caractérisation des matériaux utilisés (ciment, sable, os de bœuf en poudre, verre des bouteilles en poudre, eau gâchage). La deuxième partie est réservée à présenter les résultats de l'étude de la formulation et l'élaboration des mortiers, puis la caractérisation des propriétés physico-mécaniques à l'état frais et à l'état durcis.



# Chapitre I

Le premier chapitre est divisé en deux parties principales :

La première partie donne un aperçu des principales connaissances liées aux matériaux utilisés (ciment) et à développer (mortier) pour mener cette étude. Les définitions, les composants, les procédés de fabrication, les types, la classification et les domaines d'utilisation sont les principaux points détaillés dans cette partie.

La deuxième partie était consacrée à la présentation des déchets. Une surface importante a été allouée aux déchets issus des carrières et des mines puisque les déchets utilisés dans notre étude, à savoir les os de veau et le verre vert, font partie de cette catégorie de déchets.

## **I.1 Les mortiers**

### **I.1.1 Historique:**

L'histoire du mortier remonte à l'Antiquité et est étroitement liée à celle de la chaux. Le mortier romain était composé de chaux et de sable fin dans des proportions variables. La présence de la chaux et le phénomène de carbonatation permettaient à ce mortier de durcir avec le temps, lui conférant sa remarquable longévité.

Les Romains ont également développé le mortier de tuileau, un mélange de chaux, de fragments de briques ou de tuiles, et parfois de sable. Constitué d'argile cuite, le tuileau jouait un rôle crucial dans la prise du mortier [1].

### **I.1.2 Définition du mortier:**

Le mortier est un mélange de sable, d'eau et d'un liant, tel que la chaux ou le ciment. Dans certains cas, des polymères peuvent également être ajoutés à sa composition. Ce mélange pâteux est principalement utilisé pour assembler des matériaux de construction. Il ne contient pas de gravier et ses proportions diffèrent de celles du béton. La quantité d'eau utilisée pour la fabrication du mortier est généralement faible, environ 4 litres pour 20 kg de mélange. Il est cependant important de toujours se référer aux instructions du fabricant. Le mortier est ensuite étalé de manière homogène, avec ou sans trous selon les besoins. Lors de l'application, il est important que la surface ne soit pas humidifiée [1].



*FigI.1: Mortier*

### I.1.3 Constituant du mortier :

Le mortier est un mélange composé de trois constituants essentiels : le ciment, le sable et l'eau. Pour améliorer ses propriétés et optimiser ses performances, des adjuvants et des additions peuvent être ajoutés à la composition de base [1].



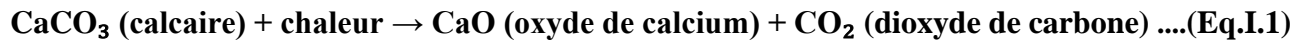
*FigI.2: Constituant du mortier.*

#### I.1.3.1 Ciment:

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement broyée. Il est issu du broyage du clinker, auquel peuvent être ajoutés d'autres matériaux. Mélangé à l'eau, le ciment forme une pâte qui durcit par des réactions et processus d'hydratation. Après durcissement, le ciment conserve sa résistance et sa stabilité même dans l'eau.

Le clinker est produit par la cuisson à 1500°C dans un four rotatif d'un mélange d'argile, de calcaire et de matériaux minéraux. Sa composition minéralogique complexe joue un rôle crucial dans les propriétés physiques et mécaniques du ciment [1].

Le calcaire, principalement composé de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), est transformé en oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ), communément appelée chaux vive, lors d'un processus appelé calcination. Ce processus se déroule généralement dans des fours à chaux à des températures élevées, pouvant atteindre 1500°C. La réaction chimique de décomposition du calcaire en oxyde de calcium est fortement endothermique, ce qui signifie qu'elle absorbe de la chaleur.

**✚ Réaction chimique:**

Les ciments sont classés en cinq types selon la norme NF EN 197-1 [NF\_01]:

**1. Ciment Portland artificiel (CEM I - CPA):**

- Ce type de ciment est composé de clinker de ciment Portland, qui est un mélange de calcaire, d'argile et de gypse chauffé à haute température.
- Il est le type de ciment le plus courant et est utilisé dans une large gamme d'applications, y compris la construction en béton armé, le béton précontraint et le béton préfabriqué.

**2. Ciment portland composé (CEM II - CPJ):**

- Ce type de ciment contient du clinker de ciment Portland ainsi que d'autres matériaux tels que des cendres volantes, du laitier de haut fourneau ou du calcaire broyé.
- Il offre une meilleure résistance aux sulfates et à la chaleur d'hydratation que le ciment Portland artificiel.

**3. Ciment de haut fourneau (CEM III - CPF):**

- Ce type de ciment contient une grande proportion de laitier de haut fourneau, un sous-produit de la fabrication de l'acier.
- Il offre une excellente résistance aux sulfates et à la corrosion, ce qui le rend idéal pour les applications en milieu agressif.

**4. Ciment pouzzolanique (CEM IV - CPZ):**

- Ce type de ciment contient du clinker de ciment Portland ainsi qu'une pouzzolane, un matériau siliceux ou alumineux qui réagit avec la chaux pour former des composés cimentaires.
- Il offre une bonne durabilité et une faible chaleur d'hydratation, ce qui le rend adapté aux climats chauds.

**5. Ciment au laitier et aux cendres (CEM V - CLC):**

- Ce type de ciment contient du clinker de ciment Portland, du laitier de haut fourneau et des cendres volantes.
- Il offre une excellente résistance aux sulfates, à la chaleur d'hydratation et à la corrosion, ce qui le rend idéal pour une large gamme d'applications.



*FigI.3 : Le ciment.*

### **I.1.3.2 Sable:**

Normalement, les sables utilisés dans la construction sont des sables "normalisés", conformes à des normes spécifiques. Ces sables entrent dans la composition des mortiers, des bétons et des matériaux préfabriqués, où ils jouent un rôle crucial dans la résistance à l'écrasement. C'est pourquoi la recherche d'un sable dur et compact est essentielle. En effet, la qualité du sable est un facteur déterminant dans la durabilité des bétons.

Il est primordial que les grains de sable soient plus durs que la pâte de ciment durcie qui les enveloppe. Ils confèrent de la cohésion au mélange, qu'il s'agisse de mortier ou de béton. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se positionnent dans les interstices entre les gros grains pour combler les vides et optimiser la compacité du matériau. Ils jouent un rôle important en réduisant les variations volumiques, les chaleurs dégagées lors de la prise et du durcissement du béton, et même son coût.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est : [1]

#### **I.1.3.2.1 Granulométrie du sable:**

- **Extra-fins** : Jusqu'à 0,8 mm (tamis) ou 1 mm (passoire).
- **Fins** : Jusqu'à 1,6 mm.
- **Moyens** : Jusqu'à 3,15 mm.
- **Gros** : Jusqu'à 5 mm.

#### **I.1.3.2.2 Types de sable:**

- **Sables naturels et roulés** : Provenant de rivières, sablières, etc.
- **Sables naturels concassés** : Issus de roches de carrières concassées.
- **Sables spéciaux** : Lourds, réfractaires, légers, etc.

### I.1.3.2.3 Rôles du sable dans les mortiers et bétons:

- **Réduction de la consommation de liant** : Le sable permet de diminuer la quantité de ciment nécessaire sans compromettre la résistance du mélange.
- **Amélioration de la prise** : Le sable favorise la prise du mortier en assurant une porosité adéquate et une bonne aération.
- **Lutte contre le retrait** : Le sable compense le retrait naturel du ciment pur et atténue le gonflement des mortiers à la chaux.

#### Observation :

- La granulométrie du sable est un paramètre crucial pour les propriétés des mortiers et bétons. Un large éventail de granulométries est disponible pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application.
- Le choix du type de sable dépend de l'usage prévu, des performances recherchées et des conditions environnementales.
- Le sable joue un rôle essentiel dans la composition des mortiers et bétons, en influençant leur résistance, leur ouvrabilité, leur durabilité et leur coût. [3]



(a)

(b)

(c)

*FigI.4 : Types de sable: (a) sable de rivière, mer (b) sable de concassage (c) sable de sablière.*

### I.1.3.3 L'eau de gâchage:

L'eau de gâchage est la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de mortier. Elle est indispensable à l'hydratation du ciment, processus essentiel à la prise et au durcissement du mortier. L'eau de gâchage joue également un rôle important dans la maniabilité du mortier à l'état frais, facilitant son application et son compactage.

Pour garantir les performances du mortier, il est crucial d'utiliser une eau de gâchage propre et exempte d'impuretés nuisibles susceptibles d'altérer les propriétés du ciment et du mortier. Les impuretés les plus redoutées incluent les matières organiques, les alcalis excessifs et les sulfates. L'eau potable répond généralement aux exigences de qualité pour l'eau de gâchage.

Le dosage en eau, exprimé par le rapport E/C (Eau/Ciment), est un paramètre crucial qui influence directement la porosité, la résistance et la durabilité du mortier. Un rapport E/C plus faible se traduit généralement par une porosité réduite, une résistance accrue et une durabilité améliorée du mortier. En règle générale, le rapport E/C recommandé pour les mortiers se situe entre 0,4 et 0,6.

La quantité d'eau nécessaire à l'hydratation du ciment représente environ 20 à 25 % de la masse de ciment. Cette eau permet la formation de composés hydratés, responsables de la prise et du durcissement du mortier. L'eau restante contribue à la maniabilité du mortier frais, en lubrifiant les granulats et en facilitant leur mise en place.

Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NF EN 1008:2012 [1].



*Fig1.5: L'eau de gâchage.*

L'eau joue un rôle crucial dans le processus de prise du ciment, étant l'un des réactifs essentiels de la réaction d'hydratation. Elle permet au ciment de s'hydrater et de se transformer en une matrice solide, liant les granulats et conférant au mortier ses propriétés mécaniques. En plus de son rôle dans la prise, l'eau influence également la maniabilité du mortier, communément appelée ouvrabilité. La quantité et la qualité de l'eau employée ont donc une influence directe sur la qualité du mortier final [1].

#### **I.1.3.4 Adjuvants:**

La norme NF EN 934-2 définit un adjuvant pour mortier comme un produit qui modifie certaines propriétés du mortier, que ce soit à l'état frais ou durci. Il est ajouté au mortier lors du malaxage ou avant sa mise en œuvre, à une dose généralement inférieure à 5 % de la masse de ciment [1].

Chaque adjuvant est caractérisé par une fonction principale, pouvant s'accompagner d'une ou plusieurs fonctions secondaires. Les adjuvants sont ajoutés aux mortiers en fonction des besoins spécifiques de l'application envisagée. Parmi les principales catégories d'adjuvants, on peut citer :

✚ **Plastifiants (réducteurs d'eau):**

Les plastifiants permettent de réduire la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance donnée du mortier, améliorant ainsi sa maniabilité et sa ouvrabilité. Ils réduisent également la porosité du mortier durci, augmentant ainsi sa résistance et sa durabilité.

✚ **Entraîneurs d'air:**

Les entraîneurs d'air introduisent de minuscules bulles d'air dans le mortier frais, améliorant sa résistance au gel et sa plasticité. Ils peuvent également contribuer à réduire la ségrégation des granulats et à améliorer la workabilité du mortier.

✚ **Modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs):**

Les modificateurs de prise influencent le temps de prise du mortier, soit en le retardant, soit en l'accélérant. Les retardateurs de prise sont utiles lorsqu'un délai de mise en œuvre plus long est nécessaire, tandis que les accélérateurs de prise sont utilisés pour des applications où un durcissement rapide est souhaité.

✚ **Hydrofuges**

Les hydrofuges réduisent la perméabilité du mortier durci, le rendant plus résistant à l'eau et à l'humidité. Ils sont particulièrement utiles dans les applications où le mortier est exposé à des conditions d'humidité élevées.



*Fig1.6 : Les adjuvants.*

### I.1.4 Types des mortiers :

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres suivants :

- **Liant (type et dosage):** Le choix du type de liant (ciment, chaux, liant hydraulique) et son dosage ont une influence majeure sur les propriétés du mortier, telles que sa résistance, sa durabilité et sa maniabilité.
- **Adjuvants :** Les adjuvants sont des produits ajoutés au mortier en faible quantité pour modifier certaines de ses propriétés, comme la plasticité, le temps de prise, la résistance à l'eau ou à l'air.
- **Ajouts:** Les ajouts sont des matériaux inertes, tels que le sable ou les graviers, qui sont incorporés au mortier pour améliorer ses propriétés mécaniques et réduire son coût.
- **Dosage en eau:** La quantité d'eau utilisée joue un rôle crucial dans l'hydratation du ciment et dans la maniabilité du mortier. Un dosage en eau excessif peut entraîner une perte de résistance et de durabilité, tandis qu'un dosage insuffisant peut rendre le mortier difficile à travailler.

En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux ne sont pas utilisables de manière indifférente. Le choix du liant et son dosage doivent être adaptés à l'ouvrage à réaliser et à son environnement. Par exemple, un mortier à base de ciment sera privilégié pour une construction structurelle, tandis qu'un mortier à base de chaux sera plus adapté pour une restauration de patrimoine.

On distingue différents types de mortiers selon leur composition et leur utilisation :

- **Mortiers de maçonnerie:** Utilisés pour assembler des éléments de maçonnerie, tels que des briques ou des parpaings.
- **Mortiers de jointoiement:** Utilisés pour remplir les joints entre les carreaux ou les pierres.
- **Mortiers de ragréage:** Utilisés pour réparer des surfaces dégradées ou pour niveler un support avant la pose d'un revêtement.
- **Enduits :** Appliqués sur les murs ou les façades pour les protéger et les décorer.

#### I.1.4.1 Les mortiers de ciment:

Les mortiers de ciment sont des matériaux de construction obtenus par le mélange de ciment, d'eau, de sable et éventuellement d'adjuvants. Ils sont caractérisés par leur résistance mécanique élevée, leur durabilité et leur adhérence aux supports. Les mortiers de ciment sont utilisés dans une large gamme d'applications, notamment :

- **Maçonnerie:** Assemblage de briques, parpaings, blocs de béton, etc.
- **Jointoiement:** Remplissage des joints entre les carreaux, pierres, etc.
- **Ragréage:** Réparation de surfaces dégradées, nivellement de supports avant la pose de revêtements.
- **Enduits:** Protection et décoration des murs et façades.

La composition des mortiers de ciment varie en fonction de l'application prévue et des propriétés souhaitées. Cependant, les constituants essentiels sont les suivants :

- **Ciment:** Le ciment est le liant du mortier. Il assure la cohésion des différents constituants et confère au mortier sa résistance mécanique après durcissement.
- **Eau:** L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment, processus essentiel à la prise et au durcissement du mortier.
- **Sable:** Le sable est un granulat inerte qui joue un rôle important dans la texture, l'ouvrabilité et la résistance du mortier.
- **Adjuvants:** Les adjuvants sont des produits ajoutés au mortier en faible quantité pour modifier certaines de ses propriétés, comme la plasticité, le temps de prise, la résistance à l'eau ou à l'air.

*Tableau I.1: Exemples de compositions de mortier de ciment.*

Application	Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Sable (kg/m <sup>3</sup> )	Eau (L/m <sup>3</sup> )	Adjuvants
<b>Mortier de maçonnerie</b>	350	1500	200	Plastifiant
<b>Mortier de jointoiement</b>	400	1200	180	Hydrofuge
<b>Mortier de ragréage</b>	500	1000	150	Fibres
<b>Enduit extérieur</b>	300	1700	220	Imperméabilisant

**Observation :** Ces exemples de compositions sont donnés à titre indicatif et peuvent varier en fonction des caractéristiques des matériaux utilisés et des exigences spécifiques de l'application.

Les propriétés des mortiers de ciment dépendent de leur composition et des conditions de mise en œuvre. Les principales propriétés des mortiers de ciment sont les suivantes :

- **Résistance mécanique:** Les mortiers de ciment présentent une résistance mécanique élevée à la compression et à la flexion. Cette résistance est essentielle pour assurer la durabilité des structures construites avec ces mortiers.
- **Durabilité:** Les mortiers de ciment sont résistants aux intempéries, aux agressions chimiques et à l'usure. Cette durabilité permet aux structures construites avec ces mortiers de conserver leurs performances sur le long terme.
- **Adhérence:** Les mortiers de ciment adhèrent fortement aux supports, ce qui garantit une liaison solide et durable entre les éléments de construction.
- **Ouvrabilité:** Les mortiers de ciment sont généralement faciles à mettre en œuvre et à travailler. Leur ouvrabilité peut être améliorée par l'utilisation d'adjuvants [3].

### I.1.4.2 Les mortiers de chaux:

Les mortiers de chaux sont des matériaux de construction obtenus par le mélange de chaux hydraulique ou aérienne, de sable, d'eau et éventuellement d'adjuvants. Ils sont appréciés pour leur souplesse d'emploi, leur perméabilité à la vapeur d'eau et leur caractère écologique [4]. Les mortiers de chaux sont couramment utilisés dans les applications suivantes :

- **Maçonnerie ancienne:** Construction et restauration de murs en pierre, briques de terre cuite, etc.
- **Enduits intérieurs et extérieurs:** Protection et décoration des murs et façades.
- **Revêtements de sol:** Réalisation de chapes et de dallages.

Les propriétés des mortiers de chaux diffèrent de celles des mortiers de ciment par plusieurs aspects:

- **Mise en œuvre:** Les mortiers de chaux sont généralement plus faciles à mettre en œuvre et à travailler que les mortiers de ciment. Ils offrent une meilleure plasticité et un temps de prise plus long, permettant une application plus aisée.
- **Durcissement:** Le durcissement des mortiers de chaux est un processus plus lent que celui des mortiers de ciment. Ce phénomène est dû à la carbonatation de la chaux, qui requiert du temps et une exposition au dioxyde de carbone présent dans l'air.
- **Résistance mécanique:** La résistance mécanique des mortiers de chaux est généralement inférieure à celle des mortiers de ciment. Cependant, ils offrent une bonne flexibilité et une résistance à la compression suffisante pour de nombreuses applications en maçonnerie ancienne et en rénovation.
- **Perméabilité à la vapeur d'eau:** Les mortiers de chaux sont perméables à la vapeur d'eau, ce qui permet aux murs et aux façades de respirer. Cette propriété est particulièrement importante pour les bâtiments anciens construits avec des matériaux naturels.
- **Durabilité:** Les mortiers de chaux ont une longue histoire d'utilisation et ont démontré leur durabilité dans le temps. Ils sont particulièrement adaptés aux environnements humides ou salins.
- **Caractère écologique:** La fabrication de la chaux produit moins d'émissions de CO<sub>2</sub> que celle du ciment, ce qui fait des mortiers de chaux un choix plus écologique.

*Tableau I.2: Comparaison des propriétés des mortiers de ciment et de chaux.*

Propriété	Mortier de ciment	Mortier de chaux
Mise en œuvre	Plus difficile	Plus facile
Durcissement	Rapide	Lent
Résistance mécanique	Élevée	Moyenne
Perméabilité à la vapeur d'eau	Faible	Haute
Durabilité	Bonne	Excellente
Caractère écologique	Moins écologique	Plus écologique

*Tableau I.3: Quantité des constituants du mortier de chaux.*

Chaux	Sable	Eau	Nature de mélange
40 kg	110 à 120 kg	50 litres	Onctueux

**I.1.4.3 Les mortiers bâtards (ciment + chaux):**

Le liant des mortiers bâtards est constitué d'un mélange de ciment et de chaux. Cette combinaison permet d'allier la résistance mécanique du ciment à la souplesse d'emploi et à la perméabilité à la vapeur d'eau de la chaux. Les mortiers bâtards sont appréciés pour leurs propriétés intermédiaires entre les mortiers de ciment et les mortiers de chaux.

Cependant, il est important de noter que le temps de durcissement des mortiers bâtards est généralement plus long que celui des mortiers de ciment. Ce phénomène est dû à la présence de chaux dans le liant, qui ralentit la prise et le durcissement du ciment. Il est donc crucial de prendre en compte ce facteur lors de la mise en œuvre de ces mortiers, en particulier dans des conditions climatiques défavorables, comme par exemple en cas de risque de gel [4].

Voici quelques points clés à retenir concernant les mortiers bâtards:

- **Composition du liant:** Mélange de ciment et de chaux.
- **Propriétés:** Résistance mécanique intermédiaire, souplesse d'emploi, perméabilité à la vapeur d'eau.
- **Temps de durcissement:** Plus long que les mortiers de ciment.
- **Mise en œuvre:** Prendre en compte le temps de durcissement, surtout en cas de risque de gel.

**Applications des mortiers bâtards:**

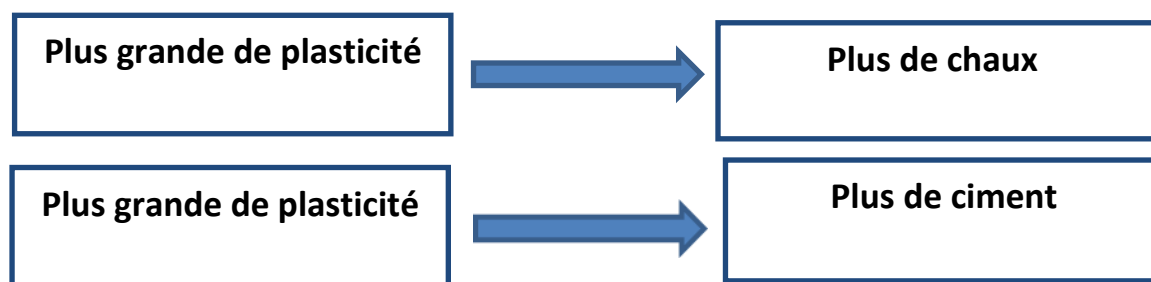
- Maçonnerie ancienne et restauration.
- Enduits intérieurs et extérieurs.
- Revêtements de sol.
- Travaux de rénovation.

**Avantages des mortiers bâtards:**

- Combinaison des avantages du ciment et de la chaux.
- Bonne résistance mécanique et durabilité.
- Souplesse d'emploi et perméabilité à la vapeur d'eau.
- Caractère écologique (réduction du ciment).

**Inconvénients des mortiers bâtards:**

- Temps de durcissement plus long.
- Sensibilité au gel pendant la phase de durcissement.



*Tableau I.4: Exemples de mortiers bâtards.*

Application	Composition (proportions ciment: chaux)	Adjuvants	Propriétés
Maçonnerie ancienne	1:1	Plastifiant	Bonne résistance mécanique, souplesse d'emploi, perméabilité à la vapeur d'eau.
Enduit intérieur	2:1	Hydrofuge	Bonne résistance à l'humidité, perméabilité à la vapeur d'eau, finition lisse.
Revêtement de sol	3:1	Fibres	Haute résistance mécanique, résistance à l'usure, bonne adhérence au support.
Restauration de pierre	1:2	Agent de protection contre les sels	Bonne résistance aux intempéries, perméabilité à la vapeur d'eau, compatibilité avec les matériaux anciens.

#### **I.1.4.4 Mortier réfractaire:**

Le ciment fondu est un matériau de construction aux propriétés uniques qui le rendent indispensable pour des applications exigeant une résistance exceptionnelle à la chaleur, aux produits chimiques et aux contraintes mécaniques. Sa rapidité de prise et de durcissement permet une mise en œuvre efficace, tandis que sa durabilité garantit la longévité des structures construites. Cependant, il est important de prendre en compte son coût élevé, sa mise en œuvre délicate et sa sensibilité à l'humidité lors de son utilisation. Le choix du ciment fondu doit être soigneusement étudié en fonction des exigences spécifiques de chaque projet [4].

#### **I.1.4.5 Mortier colle:**

Le mortier-colle est un matériau de construction polyvalent et performant qui offre une solution efficace pour le collage de divers matériaux. Ses propriétés d'adhérence, de flexibilité et de résistance à l'eau en font un choix judicieux pour une large gamme d'applications. Il est important de choisir le type de mortier-colle adapté au support et à l'usage prévu, et de respecter les instructions du fabricant lors de sa préparation et de sa mise en œuvre [4].

#### **I.1.4.6 Mortier rapide:**

Le mortier prompt est un matériau de construction aux propriétés uniques qui le rendent idéal pour des applications exigeant une rapidité de mise en œuvre et une haute performance. Sa prise et son durcissement rapides, sa forte adhérence et sa résistance mécanique élevée en font un choix judicieux pour les scellements, les réparations, les ancrages, l'étanchéité et la pose de revêtements. Cependant, il est important de prendre en compte son coût élevé, son temps de travail court et sa mise en œuvre délicate lors de son utilisation [4].

#### **I.1.4.7 Mortier industriel:**

Les mortiers industriels représentent une solution moderne et efficace pour la construction. Leur facilité d'utilisation, leur qualité constante et leur large gamme d'applications en font un choix judicieux pour les professionnels et les bricoleurs. Que vous soyez en train de réaliser des travaux de rénovation, de construction neuve ou d'aménagement, il existe un mortier industriel adapté à vos besoins.

### **I.1.5 Domaines d'application du mortier:**

Comme mentionné précédemment, le mortier est un élément essentiel dans le domaine de la construction. Il joue un rôle crucial dans l'assemblage, le collage et la protection des matériaux de construction, garantissant la solidité, la durabilité et l'esthétique des ouvrages [4].

Les principales applications du mortier se déclinent en plusieurs catégories :

#### **I.1.5.1 Le hourdage de maçonnerie:**

Le hourdage de maçonnerie est un élément essentiel pour la construction de structures solides, durables et étanches. Le choix du mortier approprié et une mise en œuvre soignée garantissent la performance et la longévité de la construction [4].



*FigI.7: Pose de mortier de hourdage.*

### I.1.5.2 Les enduits:

Le domaine des enduits offre une large palette de solutions pour répondre aux besoins variés de la construction, de la protection et de la décoration des murs et des plafonds. Les enduits traditionnels en trois couches, les enduits monocouches épais et les enduits isolants représentent chacun des choix pertinents en fonction des exigences spécifiques de chaque projet. L'innovation et le développement de nouveaux produits continuent d'enrichir ce domaine, offrant aux professionnels et aux particuliers des solutions toujours plus performantes et esthétiques [4].



*FigI.8: Enduits isolants et enduits de façade.*

### I.1.5.3 Les chapes:

Les chapes jouent un rôle crucial dans la construction de sols, en garantissant leur planéité, leur résistance et leur durabilité. Elles peuvent servir de finition à elles seules ou de support pour divers revêtements de sol. La variété des chapes disponibles permet de répondre aux besoins spécifiques de chaque projet, qu'il s'agisse d'une habitation résidentielle ou d'un environnement industriel [4].



*FigI.9: Les chapes fluides et chape ciment*

### I.1.5.4 Les scellements et les calages:

Les mortiers de scellement spécialisés s'imposent comme une solution efficace et performante pour répondre aux exigences variées des travaux de scellement et de calage. Leur large éventail d'applications et leurs propriétés optimisées garantissent la durabilité et la fiabilité des ouvrages, tant dans le domaine de la construction que de l'aménagement urbain. Que vous soyez un professionnel chevronné ou un bricoleur amateur, un mortier de scellement spécialisé existe pour répondre à vos besoins spécifiques [4].

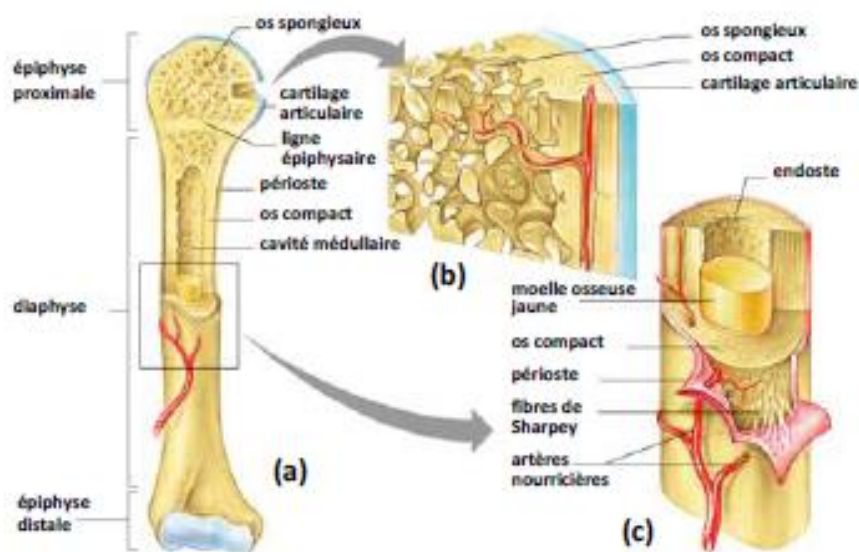


*FigI.10: Les scellements.*

## I.2 Os de bœuf:

### I.2.1 Définition:

L'os est un matériau fascinant et complexe, souvent assimilé à un simple tissu rigide. En réalité, il s'agit d'un matériau composite étonnamment sophistiqué, composé d'une matrice minérale à base de phosphate de calcium (environ 69%) intimement liée à une phase organique (environ 22%) et à de l'eau (environ 9%). La proportion de ces éléments peut varier légèrement selon le type d'os.



*FigI.11: Os de bœuf.*

## I.2.2 Caractéristiques de l'os de bœuf:

### ✚ L'os : un matériau composite complexe

L'os est un matériau fascinant et complexe, souvent assimilé à un simple tissu rigide. En réalité, il s'agit d'un matériau composite étonnamment sophistiqué, composé d'une matrice minérale à base de phosphate de calcium (environ 69%) intimement liée à une phase organique (environ 22%) et à de l'eau (environ 9%). La proportion de ces éléments peut varier légèrement selon le type d'os.

### ✚ La matrice organique : un squelette flexible

La matrice organique, synthétisée en premier lors de la formation de l'os, joue un rôle crucial dans la structure et les propriétés mécaniques de l'os. Elle est composée majoritairement (environ 90%) de collagène de type I, une glycoprotéine fibreuse et rigide qui forme une triple hélice d'une longueur d'environ 3000 Ångströms (Å) et d'un diamètre d'environ 50 Å. Cette structure hélicoïdale confère au collagène une grande résistance à la traction et à la compression, tout en lui permettant une certaine flexibilité.

### ✚ Minéralisation de la matrice organique : un renforcement essentiel

Au cours de la formation osseuse, la matrice organique se minéralise progressivement par dépôt de phosphate de calcium, principalement sous forme d'hydroxyapatite. Ce processus de minéralisation renforce considérablement la matrice, lui conférant sa rigidité caractéristique et sa capacité à supporter des charges mécaniques importantes. L'hydroxyapatite, un minéral cristallin de type apatite, représente environ 69% de la composition osseuse et joue un rôle essentiel dans la résistance et la dureté de l'os [5].

### ✚ L'eau : un élément indispensable

Bien que représentant une faible proportion de la composition osseuse (environ 9%), l'eau joue un rôle crucial dans le fonctionnement de l'os. Elle est essentielle pour maintenir l'hydratation de la matrice organique, assurant ainsi sa flexibilité et sa résilience. De plus, l'eau intervient dans les processus de remodelage osseux, permettant l'adaptation de l'os aux contraintes mécaniques et aux changements physiologiques [5].

### ✚ L'os : un matériau composite aux propriétés remarquables

La combinaison de la matrice organique flexible et de la phase minérale rigide confère à l'os des propriétés mécaniques remarquables. Il est à la fois solide et résistant, capable de supporter des charges importantes tout en conservant une certaine flexibilité. Cette combinaison unique de propriétés permet à l'os de remplir ses fonctions essentielles dans le corps humain, notamment la protection des organes vitaux, le soutien du corps et le mouvement [5].

### ✚ Caractéristiques de la matière organique

- **Rapport C/N : 4,7**

Le rapport C/N est un indicateur de la facilité avec laquelle l'azote de la matière organique peut être minéralisé et rendu disponible pour les plantes. Un rapport C/N inférieur à 25 est généralement considéré comme favorable à la minéralisation, tandis qu'un rapport supérieur à 25 peut indiquer une minéralisation plus lente. Dans le cas présent, le rapport C/N de 4,7 suggère que l'azote de la poudre de viande et d'os est potentiellement minéralisable à un rythme modéré.

- **Indice de stabilité biologique (ISB) : non déterminé (faible)**

L'ISB est une mesure de la résistance de la matière organique à la dégradation microbienne. Un ISB élevé indique une matière organique stable qui se décomposera lentement et libérera ses nutriments sur une longue période de temps, tandis qu'un ISB faible indique une matière organique labile qui se décomposera rapidement et libérera ses nutriments plus rapidement. Le fait que l'ISB de la poudre de viande et d'os n'ait pas été déterminé suggère qu'il pourrait s'agir d'une matière organique labile.

### ✚ Caractéristiques physico-chimiques

- **pH : 6,1 (légèrement acide)**

Le pH est une mesure de l'acidité ou de l'alcalinité d'un sol. Un pH optimal pour la plupart des cultures se situe entre 6,0 et 7,0. Le pH légèrement acide de la poudre de viande et d'os (6,1) ne devrait pas avoir d'effet négatif sur la plupart des cultures.

### ✚ Coefficients d'équivalence engrais

Les coefficients d'équivalence engrais permettent de comparer la teneur en éléments fertilisants d'un engrais organique à celle d'un engrais minéral de référence. Dans le cas présent, les coefficients d'équivalence engrais pour la poudre de viande et d'os sont les suivants :

- **N : 0,7**
- **P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> : 1**
- **K<sub>2</sub>O : 1**
- **CaO : 1**
- **MgO : 1**

Ces coefficients indiquent que la poudre de viande et d'os est une source relativement riche en phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) et potassium (K<sub>2</sub>O), mais qu'elle contient des quantités modérées d'azote (N) et de calcium (CaO) et une faible quantité de magnésium (MgO).

### ✚ Composition en éléments fertilisants

La composition en éléments fertilisants de la poudre de viande et d'os, exprimée en kg par tonne de produit brut, est la suivante :

- ✚ Azote (N) : 700 kg
- ✚ Phosphore pentoxyde (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) : 1000 kg
- ✚ Potassium (K<sub>2</sub>O) : 1000 kg
- ✚ Calcium (CaO) : 1000 kg
- ✚ Magnésium (MgO) : 100 kg

Ces données confirment que la poudre de viande et d'os est une source relativement riche en phosphore et potassium, mais qu'elle contient des quantités modérées d'azote et de calcium et une faible quantité de magnésium.

*Tableau I.5 : Composition en éléments fertilisants de l'os.*

	Phosphore total (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Potassium total (K <sub>2</sub> O)	Calcium total (CaO)	Magnésium total (MgO)	Somme des matières minérales	Matière sèche	Matière organique
<b>Moyenne</b>	42.2	8.7	52	3.4	205	979	858
<b>Ecart</b>	17.7 - 108	6.5 – 9.9	16.3-151	1.7 – 6.1	108 – 389	968 - 995	697 – 917
<b>Variabilité</b>	Très forte	Faible	Très forte	Moyenne	Forte	Très faible	Très faible

### I.2.3 Composition chimique de l'os de bœuf: [4]

*Tableau I.6 : Composition chimique de l'os de bœuf.*

Elément	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	Autres
%	48.21	37.77	1.29	0.12	12.61

### I.2.4 Applications de l'os de bœuf:

#### 1. Valorisation des eaux usées traitées : applications multiples

Le traitement des eaux usées, loin de se limiter à une simple épuration, ouvre la voie à de nombreuses valorisations bénéfiques pour l'environnement et l'économie. Voici quelques exemples concrets :

#### 2. Élimination du fluorure de la masse d'eau:

Le fluorure, présent naturellement dans certains sols et roches, peut s'accumuler dans les eaux usées, notamment provenant des industries manufacturières et électroniques. Un traitement spécifique permet d'éliminer efficacement le fluorure de la masse d'eau, contribuant ainsi à protéger la santé humaine et l'environnement.

### **3. Élimination du plomb en solution aqueuse :**

Le plomb, un métal lourd toxique, peut contaminer les eaux usées provenant de diverses sources, telles que les industries métallurgiques et les batteries usagées. Le traitement des eaux usées permet d'éliminer le plomb de la solution aqueuse, réduisant ainsi les risques de pollution environnementale et de contamination des ressources en eau.

### **4. Traitement des eaux usées industrielles à haute résistance:**

Les eaux usées industrielles, souvent chargées en polluants organiques et inorganiques, nécessitent un traitement spécifique adapté à leur composition complexe et à leur haute concentration en contaminants. Les stations d'épuration industrielles mettent en œuvre des technologies avancées pour traiter efficacement ces effluents, les rendant conformes aux normes environnementales et permettant leur rejet ou leur réutilisation.

### **5. Valorisation en engrais organique et alimentation animale:**

Les boues issues du traitement des eaux usées, après stabilisation et traitement adéquat, peuvent être transformées en engrais organique riche en nutriments. Cet engrais, valorisé en agriculture, permet d'améliorer la fertilité des sols et de réduire l'utilisation d'engrais chimiques. De plus, certaines fractions des boues traitées peuvent être utilisées dans l'alimentation animale, notamment comme complément alimentaire pour le bétail [6].

## **I.3 Le verre:**

### **I.3.1 Historique:**

Le verre, bien que connu dès l'Antiquité (3500 avant J.-C. en Égypte), n'a trouvé son application comme matériau de vitrage qu'à partir du 17<sup>ème</sup> siècle. Auparavant, il était principalement utilisé pour la fabrication de vases, de bijoux et d'objets décoratifs. L'industrie de la miroiterie, particulièrement florissante à Venise puis en France, développa des techniques de fabrication délicates et secrètes, aujourd'hui dépassées par des procédés industriels plus modernes et performants [7].

### **I.3.2 Définition:**

Le verre, loin d'être un simple matériau, est une substance à la fois dure et fragile, transparente à la lumière visible et dotée de propriétés uniques qui en font un matériau aux multiples applications. Sa composition chimique est généralement basée sur l'oxyde de silicium (silice,  $\text{SiO}_2$ ), le composant principal du sable. Parmi les différents types de verre, le verre sodocalcique est le plus répandu [7].



*FigI.12: Déchet de verre.*

### I.3.3 Le recyclage du verre:

Le verre est omniprésent dans notre quotidien, des emballages ménagers aux fenêtres en passant par les objets décoratifs. En conséquence, il constitue une composante importante des déchets ménagers et industriels, en raison de son poids et de sa densité. Les déchets de verre comprennent généralement des bouteilles cassées, de la verrerie, des ampoules et divers autres articles.

Le recyclage du verre est un processus qui consiste à transformer des déchets de verre en nouveaux produits utilisables (Figure I.1). Ce processus vise à donner une seconde vie à ce matériau précieux et à réduire son impact environnemental [8].



*FigI.13: Processus de transformation de déchets de verre.*

### I.3.4 Constituants d'un verre:

- **Les trois grandes catégories de constituants du verre**

La composition du verre varie en fonction de ses propriétés et de ses applications souhaitées. Cependant, on peut identifier trois grandes catégories de constituants qui entrent généralement dans sa fabrication : [7]

#### 1. Les fondants: le squelette du verre

Les fondants sont des composés majoritaires, généralement des oxydes, qui assurent la formation du réseau vitreux. Le fondant le plus commun est la silice ( $\text{SiO}_2$ ), présente sous forme de sable dans la plupart des verres. D'autres fondants peuvent être ajoutés, tels que la soude ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), la chaux ( $\text{CaO}$ ) ou la magnésie ( $\text{MgO}$ ), pour modifier les propriétés du verre, comme sa dureté, sa résistance chimique ou son point de fusion.

#### 2. Les stabilisants: la solidité du verre

Les stabilisants, également appelés agents stabilisateurs, sont des oxydes ajoutés en petites quantités pour conférer au verre sa solidité et sa résistance à la cristallisation. Ils empêchent la formation de structures cristallines dans le verre, qui le rendraient cassant et fragile. Les stabilisants les plus courants sont l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et la chaux ( $\text{CaO}$ ).

#### 3. Les modificateurs: pour des propriétés spécifiques

Les modificateurs, ajoutés en faibles proportions, permettent de moduler les propriétés du verre en fonction des besoins spécifiques. Ils peuvent influencer la couleur du verre, sa transparence, sa viscosité ou sa résistance aux chocs thermiques. Parmi les modificateurs les plus utilisés, on trouve les alcalins (soude, potasse), les alcalino-terreux (chaux, magnésie), les oxydes de plomb, de bore ou de titane.

### I.3.5 Propriétés du verre:

Parmi les innombrables matériaux que la nature nous offre, le verre se distingue par ses propriétés uniques qui le rendent indispensable dans de nombreux domaines. Sa caractéristique la plus remarquable est sa transparence, qui lui permet de laisser passer la lumière visible sans distorsion. Cette propriété, combinée à sa solidité et à sa durabilité, fait du verre un matériau idéal pour la fabrication de fenêtres, de miroirs et d'autres éléments optiques [9].

## I.3.5.1 Propriétés physiques:

Tableau I.7: Propriétés physiques du verre.

Propriété	Description	Unités
Masse volumique	Masse par unité de volume	kg/m <sup>3</sup>
Densité	Synonyme de masse volumique	kg/m <sup>3</sup>
Module de Young	Mesure de la rigidité du matériau	GPa
Module de cisaillement	Mesure de la résistance du matériau à la déformation par cisaillement	GPa
Module de Poisson	Ratio de la déformation transversale à la déformation longitudinale	-
Dureté Brinell	Résistance à la pénétration d'un pénètreur	HB
Dureté Vickers	Résistance à la pénétration d'une pyramide en diamant	HV
Dureté Shore	Résistance à la pénétration d'un stylet	Shore A/D
Résistance à la flexion	Capacité du matériau à résister à la rupture sous une charge appliquée	MPa
Résistance à la traction	Capacité du matériau à résister à la rupture par étirement	MPa
Allongement à la rupture	Pourcentage d'allongement du matériau avant rupture	%
Ténacité à la fracture	Résistance du matériau à la propagation de fissures	J/m <sup>2</sup>
Point de fusion	Température à laquelle le matériau passe de l'état solide à l'état liquide	°C
Point de ramollissement	Température à laquelle le matériau commence à se déformer sous son propre poids	°C
Conductivité thermique	Capacité du matériau à transférer la chaleur	W/mK
Capacité calorifique	Quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température du matériau d'un degré	J/kgK
Indice de réfraction	Mesure de la façon dont le matériau courbe la lumière	-
Transmittance lumineuse	Proportion de lumière visible qui traverse le matériau	%
Réfectivité lumineuse	Proportion de lumière visible qui est réfléchi par le matériau	%
Couleur	Perception visuelle du matériau due à la lumière qu'il diffuse ou réfléchit	-

## I.3.5.2 La densité:

La densité du verre est une propriété fondamentale qui détermine son poids par rapport à son volume. Elle varie en fonction de sa composition chimique et, dans une certaine mesure, de son histoire thermique [9].

**Tableau I.8:** Valeurs de densité des différents types de verre.

Type de verre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )
Verre sodocalcique	2,4 à 2,6
Verre borosilicate	2,2 à 2,3
Verre plombé	2,7 à 3,2
Verre cristallin	3,4 à 4,0

**La porosité et l'absorption de l'eau:**

Les valeurs de ces caractéristiques physiques, déterminées suivant la procédure européenne normalisée NF EN 1097-6, sont indiquées dans le Tableau II.3 [9].

La porosité et l'absorption d'eau sont deux propriétés physiques importantes du verre qui influencent sa résistance à la corrosion, sa durabilité et son isolation thermique. Ces propriétés sont déterminées par la structure poreuse du verre, qui peut contenir des microcavités et des fissures.

**La surface spécifique:**

La mesure de la surface spécifique est importante car de nombreux processus physiques et chimiques se déroulent à la surface des solides. Elle peut servir d'indicateur de la réaction alcali-silice ou pouzzolanique, selon sa valeur. Une surface spécifique petite est généralement associée à une taille de granulats grande, favorisant la réaction alcali-silice, tandis qu'une surface spécifique grande est associée à une taille de granulats très petite, favorisant la réaction pouzzolanique [9].

**La morphologie des grains:**

Le temps de broyage influence la morphologie des granulats de verre. En effet, plus les particules sont broyées, plus elles s'éloignent de leur forme allongée initiale et deviennent arrondies, adoptant un faciès sans arêtes vives [9].

**I.3.5.2 Les propriétés thermiques:**

- **La dilatation:**

Elle s'exprime par un coefficient mesurant l'allongement par unité de longueur pour une variation de 1°C.

- **Coefficient de dilatation linéaire du verre:**  $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Cela signifie qu'un vitrage de 2 mètres de longueur s'échauffant de 30°C s'allongera de 0,54 mm

Le verre peut se briser s'il subit un brusque changement de température car les différentes parties du verre ne se réchauffent pas au même rythme [9].

- **La chaleur spécifique:**

La quantité d'énergie à apporter par échange thermique pour élever d'un kelvin la température de l'unité de masse d'une substance.

- **Exemple:** Le coefficient de dilatation linéaire du verre ( $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) signifie qu'une plaque de verre d'un mètre de long soumise à une augmentation de température de  $100^\circ\text{C}$  se dilate de 0,9 mm. Pour l'aluminium, la valeur analogue serait de 2,4 mm. Ce coefficient varie selon la composition du matériau [9].

- **La conductivité:**

Le verre est un mauvais conducteur thermique (environ 500 fois moins que le cuivre), c'est donc un isolant électrique et acoustique. Cependant, à chaud, il devient conducteur à partir de  $250^\circ\text{C}$  [9].

### I.3.5.3 Propriétés chimiques:

Étant donné que les verres sont des silicates minéraux, les produits organiques n'ont pratiquement aucun effet sur eux (un avantage par rapport à de nombreuses matières plastiques). En revanche, ils sont attaqués par les réactifs minéraux tels que l'eau, les acides et les bases.

#### 1. Eau:

Il y aura toujours des échanges chimiques entre l'eau et le verre. Les cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ... sont dans un état de mobilité relativement grande dans le réseau de silice, ce qui explique la possibilité de leur passage dans les solutions aqueuses qui se trouvent au contact du verre.

#### 2. Acides:

Les acides attaquent les verres en hydrolysant les liaisons oxygène-métal, mais l'attaque n'est pas profonde car il se forme une pellicule de silice hydratée insoluble qui protège le verre d'une attaque plus importante.

#### 3. Bases alcalines:

Les bases alcalines ont une action plus énergique car elles dissolvent la silice elle-même. Elles détruisent les liaisons Si-O qui forment le réseau semi-organisé du verre.

### I.3.5.4 Propriétés électriques:

Les verres ne sont pas conducteurs d'électrons comme les métaux, mais ils peuvent conduire des ions. Le constant diélectrique d'un verre ordinaire se situe généralement entre 5 et 7.

À l'état solide et sec, les verres sont d'excellents isolants et diélectriques. Cependant, la résistance électrique du verre peut diminuer et une conductivité superficielle peut apparaître si sa surface entre en contact avec de la vapeur d'eau, ne serait-ce qu'un instant. Ce phénomène est particulièrement notable pour les verres riches en alcalis.

De  $200$  à  $300^\circ\text{C}$ , la conductivité électrique du verre augmente considérablement. Aux températures élevées, elle atteint des valeurs très élevées [9].

### I.3.5.5 Propriétés mécaniques:

Le verre est un matériau fragile qui ne peut supporter des déformations importantes causées par la pression, les chocs ou les coups. La résistance du verre varie grandement en fonction de sa composition et de son traitement thermique.

On suppose que la structure du verre comporte des défauts microscopiques, appelés failles de réseau, qui agissent comme des points faibles et diminuent considérablement la résistance locale du matériau. Même des rayures et des fissures à peine visibles peuvent réduire significativement la résistance du verre.

La durée et la vitesse de l'application de la force exercée sur le verre ont également une influence notable sur sa résistance. Un chargement soudain et rapide aura un effet plus important qu'une force appliquée lentement et graduellement [9].

### I.3.6 Composition des verres:

Le verre est un matériau inorganique composé de plusieurs oxydes, mais il est généralement élaboré à partir de trois constituants de base :

- **Oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) ou silice:** C'est l'élément majoritaire et le véritable formateur du réseau vitreux.
- **Oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ ):** Appelé fondant, il provient de la décomposition de carbonates synthétiques et transforme la silice en silicate par attaque chimique.
- **Oxyde de calcium ( $\text{CaO}$ ):** Appelé stabilisant, il est issu de la décomposition de  $\text{CaCO}_3$ .

Pour de nombreux verres industriels (verre d'emballage et verre plat), ces trois éléments représentent environ 95 % de leur composition pondérale. Cela permet de définir le verre sur un plan chimique comme un silicate de sodium et de calcium.

En réalité, l'oxyde de sodium est souvent accompagné d'oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ ), et l'oxyde de calcium par l'oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ ). D'autres éléments, appelés additifs, sont ajoutés au verre pour lui conférer des propriétés spécifiques en fonction des applications envisagées :

- **Oxyde d'aluminium ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ):** Accroît la résistance à l'hydrolyse.
- **Oxyde de plomb ( $\text{PbO}$ ):** Augmente la densité, l'indice de réfraction et la brillance du verre.
- **Oxyde de bore ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ):** Formateur de réseau, comme la silice, mais apporte une plus grande stabilité thermique.
- **Oxydes métalliques des éléments de transition ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{CuO}$ , etc.) et certains lanthanides ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ...):** Colorent ou décolorent le verre.
- **Additifs d'oxydo-réduction :** Ajustent le pouvoir rédox du bain de fusion, un paramètre important pour la transmission du verre dans l'infrarouge et sa teinte finale.

Les plus utilisés sont le carbone pour son pouvoir réducteur et l'oxyde de soufre ( $\text{SO}_3$ ) obtenu par décomposition de sulfate de sodium, pour son pouvoir oxydant.

À titre d'exemple, voici les compositions chimiques (en poids %) d'un verre courant utilisé pour la fabrication de bouteilles, d'un verre cristal pour la fabrication d'objets de luxe et d'un verre borosilicate très résistant chimiquement et thermiquement pour la pharmacie :

*Tableau I.9: Compositions chimiques de quelques verres industriels.*

Constituant	Verre à bouteilles	Verre cristal	Verre borosilicate
SiO <sub>2</sub>	72,0 %	59,6 %	74,8 %
Na <sub>2</sub> O	13,2 %	10,9 %	7,5 %
CaO	11,0 %	1,3 %	0,5 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,7 %	6,2 %	2,2 %
K <sub>2</sub> O	0,4 %	10,9 %	0,8 %
MgO	1,0 %	-	-
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10,5 %	13,0 %
PbO	-	24,4 %	-
SO <sub>3</sub>	0,1 %	-	-

### I.3.7 Classification des verres:

Bien que de nombreuses substances puissent former des verres, seul un nombre restreint d'entre eux ont acquis une importance pratique. On distingue, selon le domaine d'application, plusieurs grandes familles de verres : [10]

#### I.3.7.1 Verres sodocalciques:

L'appellation "sodocalcique" s'applique à plus de 80 % du verre produit industriellement. Il serait plus précis d'utiliser l'expression "verre alcali-alcalinoterreux", mais par souci de simplicité, on a tendance à les appeler tous "sodocalciques", même lorsque l'oxyde alcalin est en partie constitué de K<sub>2</sub>O et que CaO est accompagné d'autres oxydes alcalino-terreux.

Le rôle essentiel de Na<sub>2</sub>O (ou de K<sub>2</sub>O) est de former avec la silice des silicates à bas point de fusion. Cependant, les silicates alcalins ont l'inconvénient d'être solubles dans l'eau. Les silicates de calcium, bien que moins fusibles, ne sont pas solubles [10].

#### I.3.7.2 Verres au plomb:

Le plomb(PbO) que RAVENSCROFT a introduit dans son verre pour le stabiliser le rendait également plus fusible qu'un verre sodocalcique et plus facile à travailler à chaud. Le plomb augmente aussi l'indice de réfraction et la dispersion de la lumière, des propriétés mises en valeur dans les objets en verre taillé. Des verres riches en plomb sont également utilisés pour absorber les rayonnements gamma ou X dangereux. Ils ont d'abord été produits pour réaliser les écrans de protection nécessaires en radioscopie, puis dans les hublots d'observation pour l'industrie nucléaire. Les enveloppes des tubes à rayons cathodiques doivent également absorber les rayons X générés par la haute tension. Ainsi, les premiers tubes TV étaient entièrement fabriqués en verre contenant du PbO. Un très faible jaunissement de ces verres, qui ne posait pas de problème pour l'image en noir et blanc, n'était pas acceptable pour le tube couleur [10].

### I.3.7.3 Verres borosilicatés:

OTTO Schott a effectivement découvert la faible dispersion des borosilicates ( $B_2O_3$ ), qui sont aujourd'hui couramment utilisés. Il a également constaté que cet oxyde permettait l'élaboration de verres résistants aux chocs thermiques.

Cette résistance aux chocs thermiques a été développée par Corning pour répondre à un besoin spécifique des chemins de fer. Il s'agissait d'éviter la casse des verres des lampes de signalisation en cas de tempête de neige. À la silice, on a ajouté un maximum de  $B_2O_3$  ainsi qu'un peu d'alumine ( $Al_2O_3$ ) tout en gardant un minimum d'alcalin. Le coefficient de dilatation de cette composition est d'environ  $32 \times 10^{-7} K^{-1}$  (moins de la moitié de celui d'un verre sodocalcique) et il semble qu'il ne soit guère possible de faire mieux en ce qui concerne les verres élaborés de façon classique.

Jesse Littleton (de la firme Corning) a imaginé une troisième application pour ce type de verre, peut-être la plus connue, dans l'art culinaire. C'est en découpant le fond d'un bac d'accumulateur nickel-cadmium et en le passant au four qu'il a créé le premier plat de cuisson en verre. Ce verre est connu sous le nom de Pyrex. Son utilisation est devenue universelle en cuisine, mais également dans les laboratoires et dans l'industrie chimique [10].

### I.3.7.4 Verres d'oxydes:

La famille des verres d'oxydes est la plus répandue, représentant actuellement plus de 90 % des verres produits. Cette prédominance s'explique par des raisons économiques évidentes : faible coût des matières premières et température de fabrication modérée.

On distingue trois types principaux de verres d'oxydes :

- **Les verres à un seul oxyde formateur de réseau** :  $SiO_2$  (silice),  $B_2O_3$  (borosilicate),  $P_2O_5$  (phosphate),  $GeO_2$  (germanate).
- **Les verres binaires** : formés par l'association de deux oxydes formateurs de réseau, tels que  $SiO_2$ - $B_2O_3$  (verre borosilicate),  $SiO_2$ - $GeO_2$  (verre germanosilicate),  $SiO_2$ - $TiO_2$  (verre titanosilicate).
- **Les verres ternaires ou plus complexes** : formés par l'association de plusieurs oxydes formateurs de réseau avec d'autres oxydes modificateurs, tels que  $Na_2O$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ , etc. L'adjonction de ces oxydes modificateurs permet de moduler dans de larges limites les propriétés des verres obtenus [10].

### I.3.7.5 Verre de silice:

On pourrait considérer la silice vitreuse comme un verre spécial dans le sens où elle est irremplaçable pour certaines applications. Sa composition n'était pas à inventer, mais plutôt les moyens de son élaboration. Ce verre est intéressant pour sa résistance au choc thermique, sa transparence aux rayonnements et son inertie chimique. On l'utilise notamment pour les gaines d'éléments chauffants, les ampoules de lampes halogènes, les pièces d'optique pour l'ultraviolet et le proche infrarouge, les récipients pour la préparation des semi-conducteurs, les hublots de la navette spatiale. Il est difficile à obtenir non seulement à cause de sa température de fusion élevée ( $1710^\circ C$ ), mais surtout à cause de la viscosité très élevée (105 Pas) du liquide à cette température [10].

### I.3.7.6 Vitrocéramiques:

Les vitrocéramiques sont des matériaux très modernes, dont la découverte ne remonte qu'à 1954. Le point de départ est l'invention de la photo-opalisation par S.D. Stookey de Corning. Cette technologie a trouvé quelques applications dans le domaine du vitrage sous le nom de "Totalité". Les recherches qui ont suivi cette découverte ont mis au jour d'autres nucléants plus efficaces que les colloïdes métalliques, notamment le  $\text{TiO}_2$  et le  $\text{ZrO}_2$ .

Une vitrocéramique est obtenue par le traitement thermique d'un verre, appelé verre précurseur. Ce verre est ainsi transformé en un matériau microcristallin. La nature des cristaux dépend de la composition du verre précurseur. Pour que la cristallisation homogène ait lieu, il faut la présence d'une forte densité de points de nucléation microscopiques. Ces points de nucléation peuvent être créés par l'introduction d'une solution d'un constituant en faible concentration dans le liquide verrogène. Une première famille de nucléants est constituée par certains constituants qui, comme les métaux nobles, sont solubles à haute température dans le liquide verrogène mais précipitent lors du refroidissement sous forme d'agrégats de quelques nanomètres. Parmi ces constituants, on trouve l'or, le cuivre, l'argent, le sulfure de sélénium, le sulfure de cadmium et les sels fluorés [10].

### I.3.7.7 Verre photochromique:

Les lunettes qui s'assombrissent au soleil et s'éclaircissent à nouveau à l'ombre sont une invention de Corning, fruit d'une observation de W.H. Armisted suivie de travaux de S.D. Stookey. Le premier avait observé des changements de couleur dans des verres contenant un précipité de chlorure d'argent ( $\text{AgCl}$ ). Le second, en réduisant la taille des particules d' $\text{AgCl}$ , a réussi à conserver la transparence du verre et, en les dopant avec du cuivre (agissant comme photo sensibilisateur), il a obtenu l'effet photochromique maintenant bien connu.

La transformation de  $\text{Ag}^+$  en argent métallique est similaire à la réaction qui se produit sur un film photographique. Il est à noter que le degré d'assombrissement dépend de la vitesse relative des deux réactions : la photo réduction d' $\text{Ag}^+$  et l'oxydation d' $\text{Ag}$ . La première dépend de l'intensité de la lumière, la seconde de la température. Ainsi, pour un éclairage donné, l'assombrissement diminue lorsque la température augmente. Cette caractéristique limite l'utilisation de ce verre dans d'autres applications, comme celles du bâtiment par exemple [10].

### I.3.7.8 Verres fluorés:

La capacité de  $\text{BeF}_2$  à former un verre analogue à  $\text{SiO}_2$  est connue depuis longtemps, mais elle ne représente qu'un intérêt théorique. En revanche, les verres à base de  $\text{ZrF}_4$ , découverts en laboratoire en 1974, ont rapidement attiré une grande attention pour des raisons technologiques. Pour obtenir un verre de ce type, il faut combiner le  $\text{ZrF}_4$  avec d'autres fluorures. Une composition connue sous le nom de ZBLAN est composée de 55 % de  $\text{ZrF}_4$ , 18 % de  $\text{BaF}_2$ , 5 % de  $\text{LaF}_3$ , 4 % d' $\text{AlF}_3$  et 18 % de  $\text{NaF}$ . Outre  $\text{ZrF}_4$ , il existe au moins trois autres "formateurs" de verres fluorés :  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{GaF}_3$  et  $\text{InF}_3$  [10].

Le grand intérêt de ces verres réside dans le fait que leur seuil d'absorption IR est repoussé au-delà de  $2 \mu\text{m}$ . En effet, comparativement aux silicates, les liaisons plus faibles formées entre des atomes plus lourds vibrent à une fréquence plus basse. Cela permet d'envisager le développement de fibres optiques utilisant des longueurs d'onde plus grandes.

Une autre particularité des verres fluorés réside dans leur utilité comme verre laser. Étant donné qu'ils contiennent déjà des lanthanides (à quelques pourcents), il n'y a pas de problème de dopage.

### **I.3.7.9 Verres de chalcogénures :**

Les éléments du groupe VI (S, Se, Te) forment des verres lorsqu'ils sont mélangés à un ou plusieurs éléments des groupes IV (Ge, Si) ou V (Sb, As) ou avec des halogènes. Ces verres sont appelés verres chalcogénures. D'une manière générale, leur structure locale peut être décrite soit comme un alliage désordonné des éléments, soit comme un arrangement d'unités chimiques ordonnées.

Les verres chalcogénures sont utilisés pour fabriquer des éléments d'optique pour les caméras infrarouges. Sous forme de fibres optiques, ils permettent de transférer le rayonnement du laser CO<sub>2</sub> et sont également employés en spectroscopie infrarouge à distance. L'application la plus remarquable de ces verres réside dans les DVD-RW (Digital Versatile Disc-Rewritable). Les verres Ge-As-Si, en raison de leur indice de réfraction élevé et de leurs faibles pertes acoustiques, sont susceptibles d'applications acousto-optiques comme modulateurs et défecteurs de faisceaux infrarouges. Il en est de même des verres Ge-As-Se [10].

### **I.3.7.10 Verres métalliques:**

Les verres métalliques sont des matériaux relativement récents, produits depuis 1960 sous forme de rubans d'épaisseur d'environ 0,1 mm par trempe sur roue (melt spinning en anglais) et depuis environ 20 ans sous forme massive. Ces matériaux présentent des caractéristiques uniques, liées à leur structure amorphe, et font l'objet d'intenses recherches, aussi bien par des approches théoriques qu'expérimentales. Les premiers travaux sur les verres métalliques datent de la fin des années 1950 et sont l'œuvre d'un chercheur du Caltech, Pol Duwez. Il a découvert le moyen de refroidir uniformément un métal à la vitesse vertigineuse de 1 000 000 K par seconde. En une durée aussi brève, les atomes de l'alliage n'ont pas le temps de former un réseau cristallin mais adoptent une structure désordonnée, vitreuse donc, rappelant celle des liquides.

Les matériaux obtenus présentent alors des propriétés remarquables. Ils peuvent être plus résistants que le titane, plus élastiques que la céramique, tout en présentant une excellente résistance à la corrosion et à l'usure ainsi qu'une bonne biocompatibilité. De plus, ils fondent à basse température (environ 400 K) et peuvent être moulés aussi facilement que le plastique. Cependant, en raison de leur faible conductivité thermique, il est difficile d'obtenir autre chose que des rubans métalliques de faible épaisseur [10].

## **I.3.8 Domaines d'application du verre:**

### **I.3.8.1 Le verre et les routes:**

#### **Glasphalt (Enrobés bitumineux au verre):**

L'utilisation de déchets de verre dans les enrobés bitumineux en remplacement d'une partie du granulat (gravier ou petits cailloux) a connu un grand succès en Amérique. Cette technique s'est avérée très efficace pour conserver la température de la chaussée, améliorer ses propriétés et accroître la résistance au glissement [11].

#### ✚ Matériau de réparation:

Ce matériau est un mélange de verre broyé, d'huile et de ciment. Il est utilisé pour effectuer des réparations ponctuelles sur les routes, telles que le remplissage de trous ou de tranchées [9].

#### ✚ Trottoirs et pavés:

La poudre de verre peut être utilisée en remplacement d'une partie du ciment dans les mélanges de béton pour la fabrication de trottoirs et de pavés [11].



*FigI.14: Utilisation de la poudre dans les trottoirs et les pavés*

### I.3.8.2 Le verre et les bâtiments:

#### ✚ (Terrazzo):

Le terrazzo est un matériau composite composé de fragments de verre, de marbre et de ciment Portland gris ou blanc. Il est utilisé pour la fabrication de sols, de dalles et de murs [11].



*FigI.15: Intégration d'agrégats de verre dans des planchers.*

✚ (Brique et tuiles en verre):

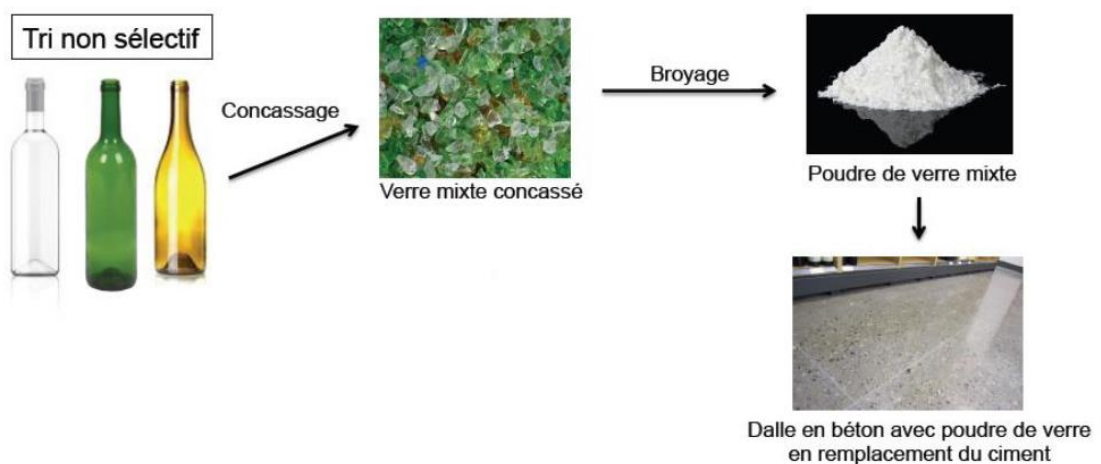
Ce matériau est constitué d'un mélange de verre et d'un additif en caoutchouc à faible densité. Des agents chimiques sont également ajoutés pour conférer au matériau des propriétés de résistance à la température et d'insonorisation [11].



*FigI.16: Brique et tuiles en verre.*

✚ (Dalle en béton avec poudre de verre):

Ce type de dalle est fabriqué à partir de mélanges de béton dans lesquels une partie du ciment est remplacée par de la poudre de verre [11].



*FigI.17: Dalle en béton avec poudre de verre.*

**I.4. Conclusion:**

Dans cette revue bibliographique notre objectif était de définir les différents constituants : matériaux cimentaires, mortiers et déchets utilisés pour la fabrication des matériaux objet de notre étude.

## Références bibliographiques du chapitre I

- [1] : ATHAMNIA HICHAM & BENHAMIDA BILAL ; [bétons Caractérisation de l'ouvrabilité des mortiers et des (Wilaya de Guelma)] ; l'Université de Guelma ; **Juin 2013**
- [2] : Wikipédia. (2024, 26 avril). Chaux (chimie). In Wikipédia.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/La\\_Chaux-de-Fonds](https://en.wikipedia.org/wiki/La_Chaux-de-Fonds)
- Consulté le : **15/03/2024**.
- [3] : AFNOR. (2012). Ciments - Ciments hydrauliques - Spécifications et critères de conformité. In Norme française homologuée NF EN 197-1. AFNOR.
- [4] : GHRIGA GHANIA OULAD SAID NIHAD ; [(Étude physico-mécanique d'un mortier à base de sable de carrière et déchets industriels (déchets de brique et déchets de plastique PET) (Wilaya de Ghardaïa)] ; Université de Ghardaïa ; Promotion **2021/2022**
- [5] : P-F.Chabalier.P-F,Kerchove.V-V,MacaryH-S,fiche-poudre-de-viande-et-os,chamber d'agriculture de la reunion, Cirad, **2006**.url:<http://www.cirad.fr>.
- [6] : Kotb.M, Assas.M ,Abd-Elrahman.M, Effect of grounded bone powder addition on the mechanical properties of cement mortar, WIT Transactions on Ecology and the Environment, **2010**, Vol. 138, ISSN 1743-3541, Doi:10.2495/DN10018.
- [7] : BEN ZAUCHE NADIA ; [Etude expérimentale d'un béton à base de déchets de verre non coloré confiné avec des matériaux composites. (Wilaya DE TIZI OUZOU)] ; UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU ; Promotion **2019/2020**
- [8] : RADJAI Oussama & BOUREZG Djamel ; [Effet Combiné des Fumées de Silice et des Fines de Verre sur les Propriétés du Mortier à base de Sable de dune. (Wilaya DE M'SILA)] ; UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; Promotion **2018 /2019**
- [9] : AMIROUCHE Ahmed Razik ; [Étude du verre Float de l'industrie verrière Mediteranean Float Glass "MFG" Algérie. (Wilaya DE Guelma)] ; Université 8 Mai 1945 Guelma ; Promotion **2020/2021**
- [10] : KHELFA AMIR & BOUDJEMIA REDOUANE ; [Etude physico-chimique de la durabilité du verre. (Wilaya DE Bejaïa)] ; Université Abderrahmane Mira de Bejaïa ; Promotion **2018 / 2019**
- [11] : Walid BOUROUDI & Ammar AMIOUR;[Avantages Et Applications De La Poudre De Verre Recyclé en Liants Activés : Etude Critique. (Wilaya DE JIJEL)] ; UNIVERSITÉ DE JIJEL ; Promotion **Juin 2018**.



# Chapitre

## II

Ce chapitre est consacré à la présentation des normes qui ont guidé la réalisation des essais et la caractérisation des matériaux et les essais mis en œuvre pour analyser les caractéristiques physiques, mécaniques et physico-chimiques des matériaux de composition, des pâtes de ciment et des mortiers préparés. Il est important de préciser que les essais expérimentaux décrits dans ce chapitre ont été réalisés au niveau du laboratoire du Département de Contrôle Qualité à la Cimenterie Hadjar El-Soud à Skikda.

**II.1 Normes**

Les travaux et les manipulations en laboratoire ont été réalisés conformément aux exigences des normes suivantes :

**II.1.1 Normes utilisées pour la préparation des matériaux**

- Analyse granulométrique : [EN 933-1]
- Equivalent de sable : [NF P 933-8]
- Eau de gâchage : [EN 1008]
- Surface spécifique de Blaine : [NF EN 196-6]
- Masses volumiques : [NF EN 1097-6]

**II.1.2 Normes utilisées pour la confection des pâtes et mortiers à l'état frais**

Mortiers

- Résistance à la traction par flexion : [EN 196-1]
- Résistance à la compression : [EN 196-1]

Pâtes de ciment

- Consistance normale : [EN 196-3]
- Début et fin de prise : [EN 196-3]

**II.2 Essais et protocoles expérimentaux**

Les différents essais réalisés sur matériaux de composition, des pâtes de ciment et des mortiers préparés sont décrits ci-dessous :

**II.2.1 Masses volumiques [1]**

**II.2.1.1 Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules. Elle est tributaire de la forme et de la granulométrie des grains ainsi que le degré de compactage et d'humidité. Elle est appelée aussi densité, notée  $\rho_{ap}$  est exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, kg/dm<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup>).

$$\rho_{ap} = \frac{M}{V} \dots\dots\dots (Eq.II.1)$$

Ou :

$\rho_{ap}$  : Masse volumique apparente.

$M$  : Masse de matériau.

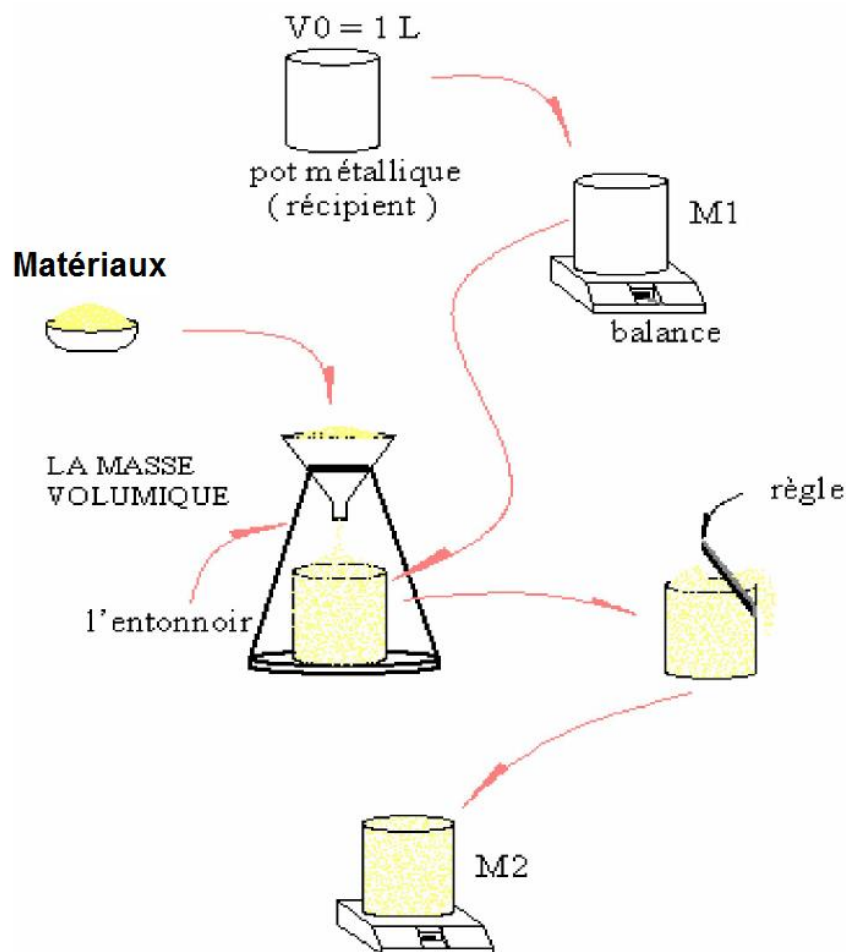
**V** : Volume de récipient.

La mesure de cette grandeur est réalisée au moyen du matériel suivant :

- Une Balance technique avec une précision de 1 g.
- Un récipient de 1L de volume.
- Un entonnoir.
- Une petite règle plate métallique.
- Un tamis de 0.08mm pour le ciment.
- Un tamis de 3.5mm pour le sable.

La réalisation de cet essai suit le protocole opératoire ci-dessous :

- Tamiser le sable dans le tamis de 3.5mm (cas de sable et gravier) et 0.08mm (cas du ciment).
- Peser le récipient de 1L de volume vide, soit **M<sub>1</sub>**.
- Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15cm (cas de sable et gravier) et 5cm (cas du ciment).
- Araser la couche supérieure du récipient à l'aide d'une règle que l'on anime d'un mouvement de « va et vient », peser ensuite le récipient plein : soit sa masse **M<sub>2</sub>**.



**Fig.II.1:** Schéma du protocole expérimental de la mesure de la masse volumique apparente.

**II.2.1.2 Masse volumique absolue**

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. La masse volumique absolue, notée  $\rho_s$  est exprimée en (g/cm<sup>3</sup>, kg/dm<sup>3</sup>, t/m<sup>3</sup>).

La mesure de cette grandeur est réalisée à l'aide du matériel ci-dessous :

- Une balance technique avec une précision de 1 g.
- Une éprouvette graduée.
- Un entonnoir.
- Un pycnomètre.
- Un tamis de 0.08 mm (cas du ciment) et de 3.5mm (cas du sable).

La détermination de la masse volumique absolue peut-être réalisée par deux méthodes :

**1. Méthode de l'éprouvette graduée**

Cette méthode utilise un matériel courant du laboratoire pour la détermination de la masse volumique absolue, dont le mode opératoire utilisé est le suivant:

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume d'eau, soit **V1**.
- Peser un échantillon sec de granulats, soit **M** (environ 300 g pour le cas du sable) et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air.
- Le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume, soit **V2**.

La masse volumique est alors donnée par la relation :

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1} \dots\dots\dots \text{(Eq.II.2)}$$

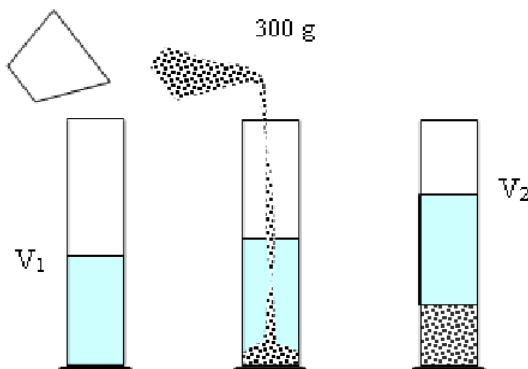
Où :

$\rho_s$  : Masse volumique absolue.

**M** : Masse d'échantillon.

**V1** : L'ancien volume d'eau.

**V2** : Le nouveau volume.



**Fig. II.2 :** Schéma du protocole expérimental de la masse volumique absolue par la méthode de l'éprouvette.

## 2. La méthode du pycnomètre

Le principe de cette méthode consiste à mesurer le déplacement du niveau du liquide contenu dans un récipient à col étroit lors qu'on introduit la poudre (cas du ciment), dont on cherche le volume absolu. Cette méthode nécessite l'utilisation d'une balance précise et un liquide inerte vis à vis de la poudre (pour le cas du ciment, on utilise le pétrole ou le benzène).

Le mode opératoire utilisé pour la détermination de la masse volumique absolue est le suivant :

- Verser le benzène dans le pycnomètre (**Figure II.3**) jusqu'au niveau **A** qui correspondant au volume **V1** du benzène à la température ambiante.
- Peser 50 g du ciment, soit **M0**.
- Verser le ciment dans le pycnomètre peu à peu jusqu'au moment où le niveau du benzène atteint le trait **B** quel conque.
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec un volume, soit **V2**.

La valeur de la masse volumique absolue du ciment est déterminée suivant la relation ci-dessous :

$$\rho_s = \frac{M_0}{V_p - (V_1 + V_2)} \dots\dots\dots (\text{Eq.II.3})$$

Où :

$\rho_s$  : Masse volumique absolue

**M0**: Masse de ciment.

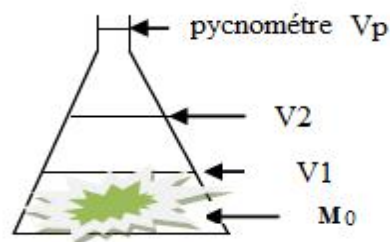
**Vp** : Volume du pycnomètre.

**V1** : Volume initial de Benzène.

**V2**: Volume complétant le remplissage du pycnomètre.



(a)



(b)

**Fig.3** : (a) : Pycnomètre utilisé. (b) : Schéma du protocole expérimental de la mesure de la masse volumique absolue par la méthode de pycnomètre.

### II.2.2 Surface spécifique de Blaine [2]

La surface spécifique (finesse de Blaine) permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment. Elle est notée, **SSB** et s'exprime en  $\text{cm}^2/\text{g}$ . La valeur de la surface spécifique de Blaine est fonction du type de ciment. Elle est généralement comprise entre 2800 et 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

La mesure de cette grandeur est réalisée en utilisant le matériel suivant :

- Un appareil appelé Perméabilimètre de Blaine (**figure II.4**). Il est composé de :
  - ✓ Une cellule équipée d'une grille en sa partie inférieure dans laquelle est placé le ciment à tester.
  - ✓ Un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U, rempli jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère.
  - ✓ Un piston qui sert à tasser le ciment dans la cellule d'un volume défini.
- Une balance précise à 0,001 g.
- Un chronomètre précis à 0,2 s près.
- Des rondelles de papier filtrant adaptées au diamètre de la cellule.
- Du mercure pour mesurer le volume de la couche tassée  $v$ .
- Un thermomètre précis à 0,1 °C près pour mesurer la température de l'air.



*Fig. II.4: L'appareil utilisé.*

Le protocole opératoire utilisé est résumé selon les étapes suivantes :

- Peser une masse de la matière (ciment, poudre de l'os de bœuf, poudre de verre). Cette matière qui doit être de porosité égale à 0,500 est calculée en utilisant la formule mathématique (Eq.II.4):

$$m = (1 - e)\eta v \dots \dots \dots \text{(Eq.II.4)}$$

Où :

**m**: Masse de la matière.

**η**: Masse volumique.

**v** : Volume utile de la cellule.

- Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier-filtre.
- Verser la matière pesée dans la cellule en utilisant un entonnoir.
- Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure de la matière, puis placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre.
- Tasser avec une précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la matière au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.
- Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).
- Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur.
- Enduire la partie ronde de la cellule avec de la vaseline et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.
- Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur.
- Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.
- L'arrêter quand le niveau du liquide atteint le troisième trait.
- Noter le temps écoulé t.

Le calcul de la surface spécifique de Blaine est déterminé par la formule mathématique (Eq.II.5):

$$S = K \frac{\sqrt{e^3 \sqrt{t}}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \dots \dots \dots \text{(Eq.II.5)}$$

Où :

**S** : Surface spécifique en (cm<sup>2</sup>/g).

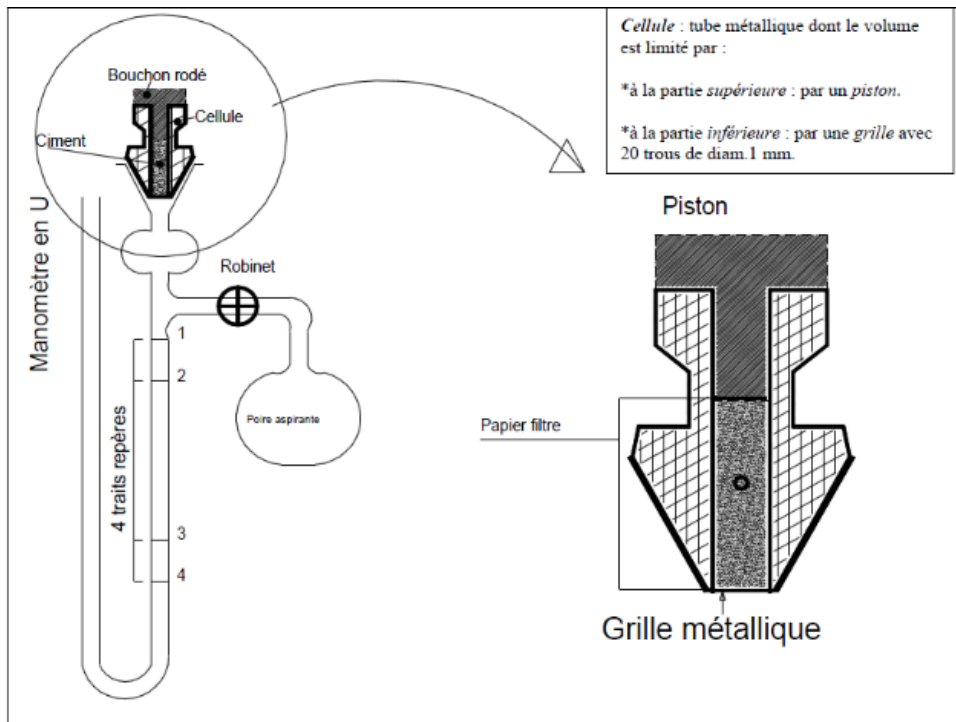
**ρ** : Masse volumique en (g/cm<sup>3</sup>).

**K** : Constante de l'appareil.

**η** : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

**e** : Porosité de la couche tassée.

**t** : Temps mesuré en secondes.



**Fig.II.5:** Schéma du principe de fonctionnement de la perméabilité de Blaine.

### II.2.3 Analyse granulométrique par tamisage [3]

L'analyse granulométrique est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques (poids, taille, etc.). L'analyse granulométrique fournit les proportions des grains de différents diamètres. Cette analyse peut se faire aussi bien par tamisage que par sédimentation dans l'eau en appliquant de la loi de Stokes :

$$\mathbf{v} = \frac{2r^2g\Delta(\rho)}{9\mu} \dots\dots\dots (\text{Eq.II.6})$$

Où :

**v** : Vitesse limite de chute (m/s).

**rr** : Rayon de la sphère (m).

**g** : Accélération de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>).

**Δ(ρ) = ρ<sub>p</sub> - ρ<sub>f</sub>**; **Δ(ρ) = ρ<sub>p</sub> - ρ<sub>f</sub>**: Différence de masse volumique entre la sphère et le fluide (kg/m<sup>3</sup>).

**μμ**: Viscosité dynamique du fluide (Pa·s).

La mesure de cette grandeur est réalisée en utilisant l'appareillage ci-dessous :

- Une série de tamis de maillage métallique carré compris entre d et D, avec un fond et un couvercle. Les tamis sont de dimensions de 0.063 mm; 0.125mm; 0.250 mm; 0.500 mm; 1mm; 2 mm; 4mm; 8 mm; 16 mm; 31.5 mm; 63 mm .
- Une balance de précision à ± 0,1%.
- Une étuve ventilée.

- Matériaux utilisés (Sable, Scories de Nickel cas de notre étude).

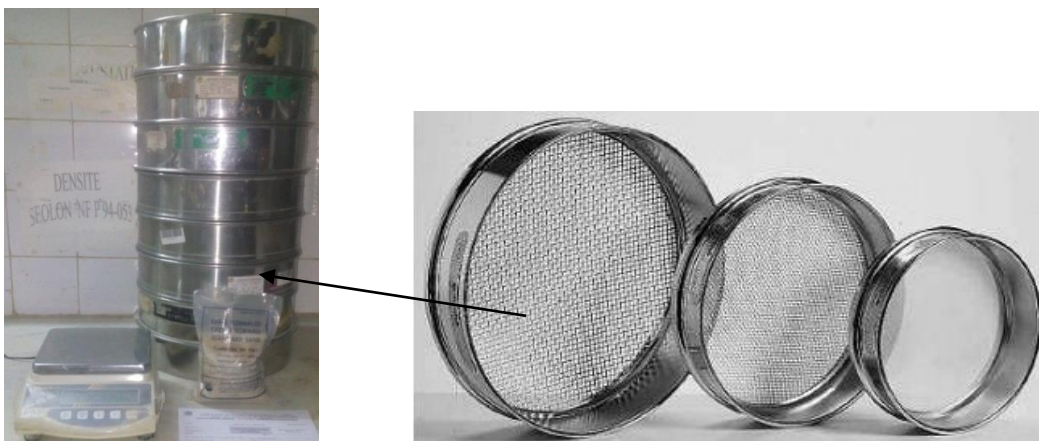
L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas autres (**Figure II.6**).

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et les classements des grains s'obtiennent par vibration de la colonne des tamis, pendant cinq minutes pour le sable et sept minutes pour le gravier puis on prélève les différents refus de chaque tamis et on les pèse.

- Le matériau sera séché à l'étuve à une température maximale de 105 °C.
- Emboîter les tamis les uns sur les autres, dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut.
- En partie inférieure, on dispose un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers.
- En haut un couvercle empêchant toute perte de matériau. Le matériau étudié est versé en haut de la colonne du tamis. La fin de l'opération du tamisage est effectuée lorsque les refus ne varient pas de plus de 1 % entre deux séquences de vibrations de la tamiseuse (pour notre étude le tamisage est effectué manuellement).

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit  $R_1$  la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit  $R_2$  la masse du deuxième refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés  $R_n$  aux différents niveaux de la colonne du tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne du tamis est également pesé.

La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond (fillers) doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne.



**Fig.II.6** : Tamiseurs utilisés pour l'analyse granulométrique.

### II.2.4 Equivalent de sable [4]

La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons telles que l'essai au bleu de méthylène, d'équivalent de sable à 10 % de fines, mais dans ce travail pratique, on va parler que sur l'essai d'équivalent de sable. Il s'agit là aussi d'une expérience normalisée dont chaque carrier doit pouvoir fournir les résultats pour ses sables. Elle permet de déterminer le pourcentage de fines dans le sable.

On met, dans une éprouvette à deux repères conçus spécialement, une solution lavante (vendue toute prête) jusqu'au premier repère.

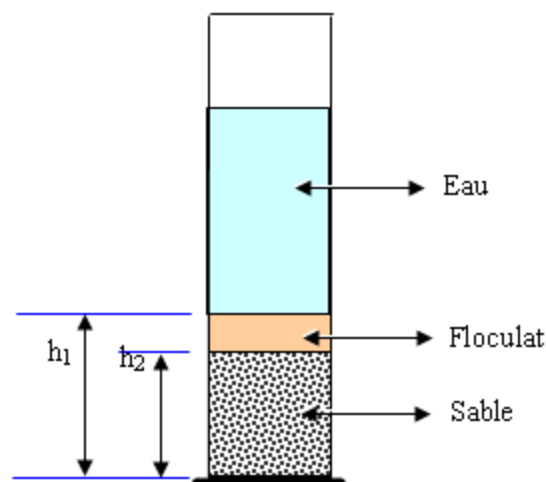
On ajoute alors une quantité de sable se cet on attend 10 minutes. Ensuite on agite l'éprouvette (à raison de 90 coups en 1 minute avec des battements de 30 cm) et on la remplit de solution lavante jusqu'au deuxième repère.

Au bout de 20 minutes, le sable s'est déposé au fond et les fines forment une couche de « boue » pardessus. On mesure donc la hauteur totale (sable + fines) et la hauteur du sable propre, et on calcule le pourcentage que représente ce dernier. Ce pourcentage est appelé équivalent sable (E.S).

On mesure la hauteur du sable propre avec une règle, on parle d'E.S.V. (E.S. à vue). Si on utilise un piston (plus précis), on parle d'E.S.P (E.S. au piston).

Le matériel utilisé pour la détermination de l'équivalent de sable est le suivant :

- Tamis de 3,16 mm d'ouverture de mailles avec fond.
- Spatule.
- Balance de précision.
- Chronomètre.
- Réglette de 500mm.
- Eprouvettes.
- Un piston taré.
- Entonnoir à large ouverture.
- Une machine d'agitation.
- Solution lavante.



*Figure II.7: Schéma du protocole expérimental de l'essai d'équivalent de sable visuel.*

Pour ce faire, on doit suivre le protocole opératoire ci-dessus :

- Verser la solution au tube (éprouvette en plexiglas) jusqu'au trait inférieure.
- Verser la quantité de sable (120g) dans le tube pendant 10 minutes pour absorber l'eau.
- Fermer l'éprouvette et on met dans l'agitateur pendant 30secondes.
- Laissé l'éprouvette 20 minute sans vibration.
- Lire la hauteur  $H_1$  et  $H_2$  par la règle  $H_2$  par le piston.
- On refait la même expérience une autre fois.
- Calculer « ES » en remplaçant  $h_1$  et  $h_2$  dans la formule suivante :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \dots\dots\dots (Eq.II.7)$$

Où :

**ES** : Équivalent de sable

**h1** : Hauteur de sable propre + hauteur imputée.

**h2** : Hauteur de sable propre déterminée visuellement.

### II.2.5 Essai à l'état frais

#### II.2.5.1 Essai de consistance normale [5]

L'essai de la consistance normale caractérisant le degré de fluidité a été réalisé sur la pâte de ciment à l'aide de l'appareil de Vicat.

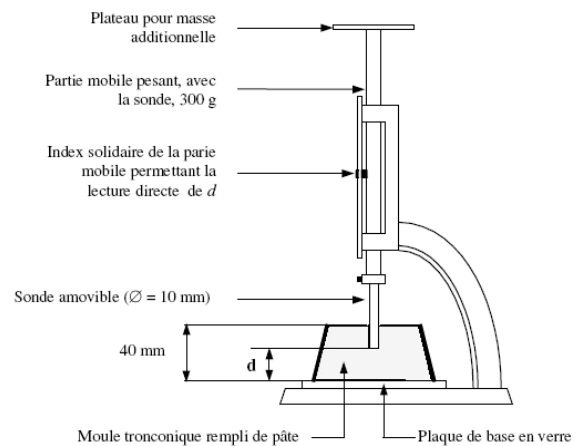
La consistance est évaluée en mesurant l'enfoncement dans la pâte, d'une tige cylindrique sous l'effet d'une charge constante. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide.

Le matériel nécessaire pour la réalisation de cet essai est le suivant :

- Un malaxeur avec une cuve de 5 litres de contenance et d'une pale de malaxage pouvant, tourné à 2 vitesses (lentes et rapides) de marque Toni Technic.
- Un appareil de Vicat de marque Controlab (**Figure II.8 (a et b)**), composé d'un moule tronconique de 40 mm de hauteur et d'une tige coulissante équipée à son extrémité d'une sonde d'un diamètre de 10 mm La partie coulissante a une masse totale de 300 g (y compris la sonde amovible).
- Une balance permettant de peser à 1 g près.
- Un chronomètre précis à 1s près.



(a)



(b)

**Figure II.8 : Appareil de Vicat.**

(a) : Photographie de l'appareil de Vicat utilisé dans l'étude.

(b) : Schéma des éléments constituant l'appareil de Vicat.

Le mode opératoire utilisé pour obtenir la pâte de ciment en vue d'effectuer l'essai de consistance normale est présenté comme suit :

- Peser 500 g de ciment et l'introduire dans la cuve du malaxeur, puis y ajouter une quantité d'eau au ciment en un temps compris entre 5 et 10 s.
- Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s.
- Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans le gâchage avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au de la zone de malaxage.
- Remettre la machine en route pour une durée de 90 s à vitesse lente.

La pâte de ciment obtenue est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibrations excessifs; Il faut enlever l'excès de la pâte par un mouvement de va-et-vient effectué avec une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule. Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat. Quatre (04) minutes après le début de malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de la pâte et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), on mesure la distance  $d$  séparant l'extrémité de la sonde et le fond du moule. Les mesures de la distance permettent d'apprécier et caractériser la consistance de la pâte étudiée.

- Si  $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$ , la consistance de la pâte étudiée est normalisée.
- Si  $d < 5\text{mm}$  ou  $d > 7\text{mm}$ , la consistance n'est pas normale et il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport  $E/C$  jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

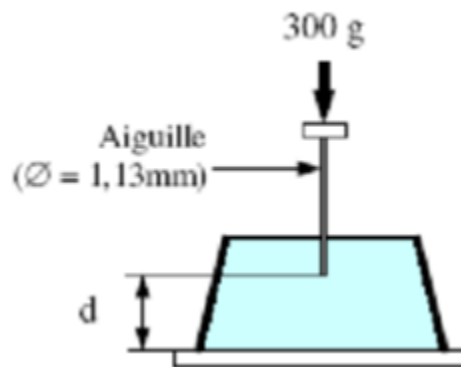
### II.2.5.2 Essai de prise [5]

L'essai de prise de la pâte de ciment est nécessaire pour pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des mortiers qui seront ensuite confectionnés. La réalisation de ces essais utilisent le même matériel et le mode opératoire concernant l'essai de consistance normale (appareil de Vicat) à l'exception de la sonde qui cisaille l'échantillon (on utilise une aiguille de diamètre plus petit, soit  $\Phi = 1.13 \text{ mm}$  (**Figure II. 9 (a et b)**)).

Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés ( $\sim 10\text{-}15 \text{ mn}$ ) jusqu'à ce que  $d = 4\text{mm} \pm 1\text{mm}$ . Cet instant mesuré à 5 mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé. Il est recommandé de reporter les résultats obtenus sur un graphique (minimum 3 points) en vue de déterminer le temps de début de prise avec précision.



(a)



(b)

**Figure II.9 :** Appareil de Vicat

(a) : Photographie de l'appareil de Vicat utilisé dans l'étude.

(b) : Schéma des éléments constituant l'appareil de Vicat.

### II.2.6 Essai à l'état durci

Les essais de performances mécaniques sur des éprouvettes de mortiers confectionnées à l'état durci sont réalisés, conformément à la norme [EN 196-1]. Les essais de performances mécaniques sont représentés par la mesure des résistances mécaniques. Elles sont effectuées au moyen d'une machine de marque Toni-Technik pourvu d'un dispositif de flexion par trois points illustrés par (**Figure II.10**).



*Figure II.10 : Photographie de la machine d'essais de résistance mécanique.*

Selon le type de résistance mécanique le mode opératoire est présenté comme suit :

#### **II.2.6.1 Résistance à la traction par flexion [6]**

- Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci.
- Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de  $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$ , jusqu'à rupture.
- Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression.

La résistance en flexion (en  $\text{N/mm}^2$ ) est calculée selon la formule :

$$\mathbf{Rf} = \frac{1.5 \times Ff \times l}{b^3} \dots\dots\dots \mathbf{(Eq.II.8)}$$

Où :

**Rf:** Résistance en flexion, en ( $\text{N/mm}^2$ ) ou (MPa).

**b:** Côté de la section carrée du prisme, en (mm).

**Ff:** Charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en (N).

**l:** Distance entre les appuis, en (mm).

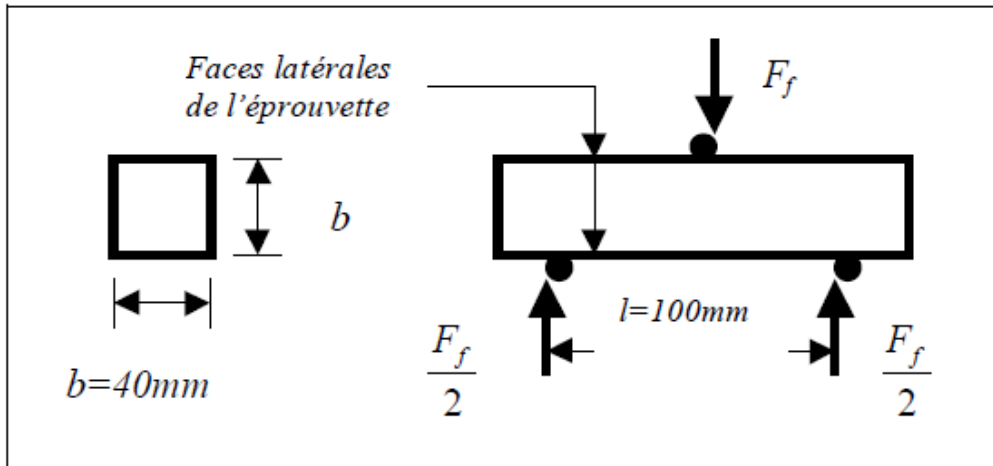


Figure II.11: Schéma représente l'essai de la traction par flexion.



Figure II.12 : Photographie de la partie de l'appareil de la traction par flexion.

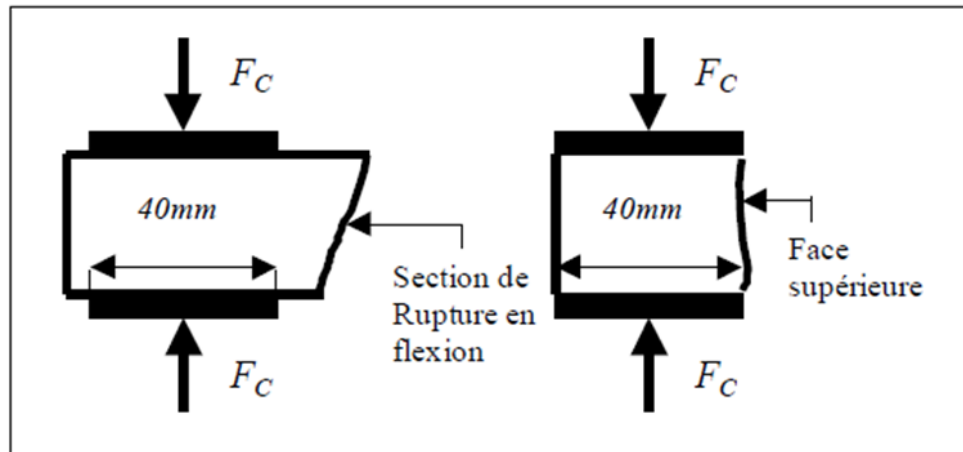
**II.2.6.2 Résistance à la compression [6]**

- Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à ± 0.5 mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm
- Augmenter la charge avec une vitesse de 2400 N/s ± 1 200 N/s durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).
- La résistance en compression en (N/mm<sup>2</sup>) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \dots \dots \dots \text{(Eq.II.9)}$$

**R<sub>c</sub>**: Résistance en compression, en (N/mm<sup>2</sup>) ou en (MPa).

**F<sub>c</sub>**: Charge maximale à la rupture, en (N).



*Figure II.13: Schéma représente l'essai de traction par compression.*



*Figure II.14 : Photographie de la partie de l'appareil de la compression.*

### II.3. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les normes et les différents protocoles expérimentaux ayant permis d'atteindre les objectifs fixés dans notre étude.

## Références bibliographiques du chapitre II

- **Norme** : NF EN 1097-6 Méthode d'essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, Janvier 2014
- **Norme** : NF EN 196-6 Méthode d'essai des ciments - Partie 6 : Détermination de la finesse, Avril 2012
- **Norme** : NF EN 933-1 Méthode d'essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, Mai 2012
- **Norme** : NF EN 933-8 Méthode d'essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : Évolution des fines - Equivalent de sable, Mars 2012.
- **Norme** : EN 196-3 Détermination du temps de prise et de la stabilité, Janvier 2009.
- **Norme** : NF P15-471, NF EN 196-1 Méthode d'essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique.



**Chapitre**  
**III**

Le troisième chapitre est divisé en deux parties principales :

La première partie sera consacrée à la présentation des matériaux constituant le mortier, en mettant l'accent sur leurs principales caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. Une attention particulière sera portée aux additions, notamment la poudre d'os de bœuf et la poudre de verre, en raison de leur importance dans le cadre de cette étude.

La deuxième partie de cette étude sera consacrée à l'évaluation de l'effet de la substitution d'une fraction du ciment par la poudre d'os de bœuf, la poudre de verre et le mélange des deux sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers élaborés à l'état frais et durcis.

---

### III.1. Identification et caractérisation des matériaux constituant le mortier

Dans cette étude, des essais ont été réalisés sur des éprouvettes de mortier. Les mélanges étudiés ont été fabriqués conformément à la spécification standard (NF EN 196-1) [1].

Le mélange de référence était constitué, en masse, d'une part de ciment CEM I 42,5 R, de trois parts de sable normalisé CEN et d'une demi-part d'eau (rapport eau-ciment = 0,5).

Les mortiers modifiés à base de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre ont été élaborés dans les mêmes conditions que le mélange de référence, en remplaçant une fraction massique (taux de remplacement) du ciment par l'additif minéral correspondant (poudre d'os de bœuf ou poudre de verre). Les quantités de sable et d'eau sont restées inchangées.

#### III.1.1 Ciment

Le ciment utilisé dans cette étude est un ciment Portland artificiel de type CEM I 42,5 N. Il est conforme à la norme (NF EN 197-1) et est composé d'au moins 95 % de clinker et d'un maximum de 5 % de gypse ou d'anhydrite, ajoutés comme régulateur de prise [2].



*Fig.III.1: Sac de ciment utilisé.*

#### A. Analyse chimique et minéralogique :

Les **tableaux III.1 et III.2** présentent la composition chimique et minéralogique du ciment utilisé dans cette étude.

*Tableau III.1: Composition chimique du ciment.*

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	CaO (Libre)	SO <sub>3</sub>	Résidu Insoluble	PAF
%	22.00	5.30	3.38	65.16	1.77	2.32	1.28	1.40	0.48

*Tableau III.2: Composition minéralogique du ciment.*

Elément	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
%	61.00	14.50	02.40	15.22

### B. Caractéristiques physico-mécaniques :

Le **tableau III.3** résume les caractéristiques physico-mécaniques du ciment utilisé dans cette étude.

*Tableau III.3: caractéristique physico-mécanique du ciment.*

Classe de résistante	Résistance à la compression (MPa)			Temps de début de prise (min)	Stabilité (expansion) mm	Masse volumique apparente	Masse volumique absolue	Surface spécifique	Densité
	Résistance à court terme		Résistance courante						
	2 jours	7 jours	28 jours						
42.5 N	≥ 10	-	≥ 42.5 ≤ 62.5	≥ 60	≤ 10	1130 kg/m <sup>3</sup>	3100 kg/m <sup>3</sup>	3180 cm <sup>2</sup> /g	3,13

La courbe typique de résistance à la compression d'un mortier normalisé (**FigIII.2**) présente une allure générale en forme de "S", caractérisée par trois phases distinctes :

1. **Phase de croissance linéaire** : Dans cette phase initiale, la résistance à la compression augmente graduellement avec le temps, à mesure que les produits d'hydratation du ciment se développent et que la structure du mortier se densifie.
2. **Phase de croissance parabolique** : Au-delà d'un certain âge, la croissance de la résistance à la compression s'accélère, suivant une courbe parabolique. Cette phase correspond à la

maturation continue des produits d'hydratation et à l'établissement d'une liaison intergranulaire plus forte entre les grains de sable et de ciment.

3. **Phase de stabilisation** : À un âge avancé, la croissance de la résistance à la compression ralentit et tend vers une valeur asymptotique, appelée "résistance à la compression maximale". Cette phase correspond à la stabilisation de la microstructure du mortier et à l'atteinte d'un état d'équilibre dans les processus d'hydratation.

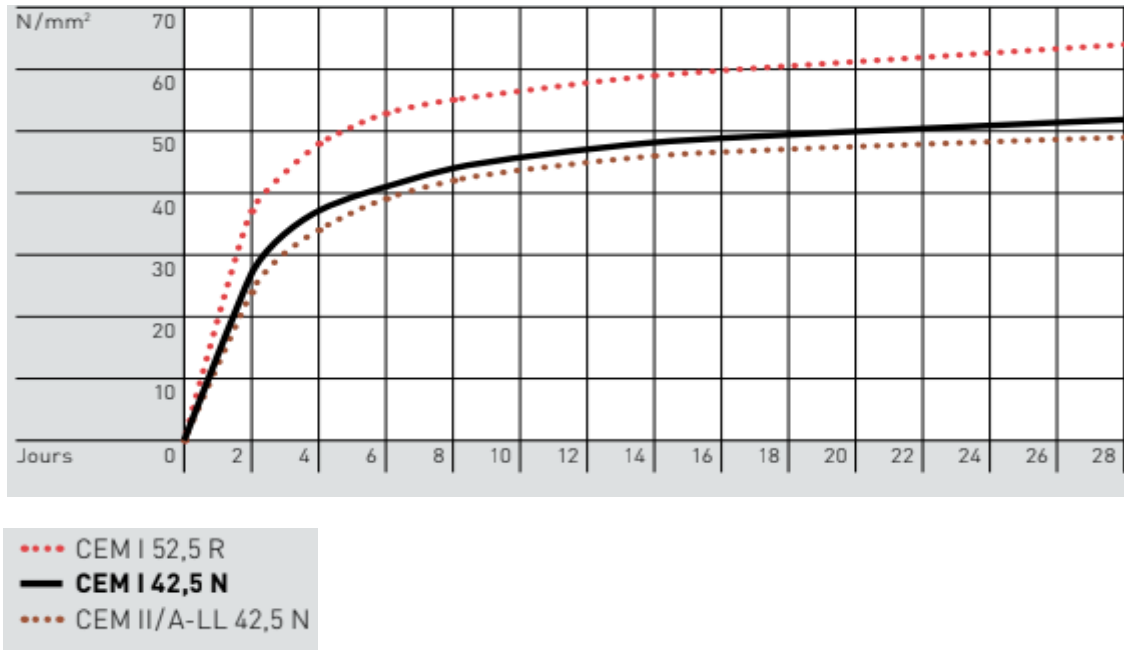


Fig.III.2 : Courbe typique de résistance à la compression d'un mortier normalisé.

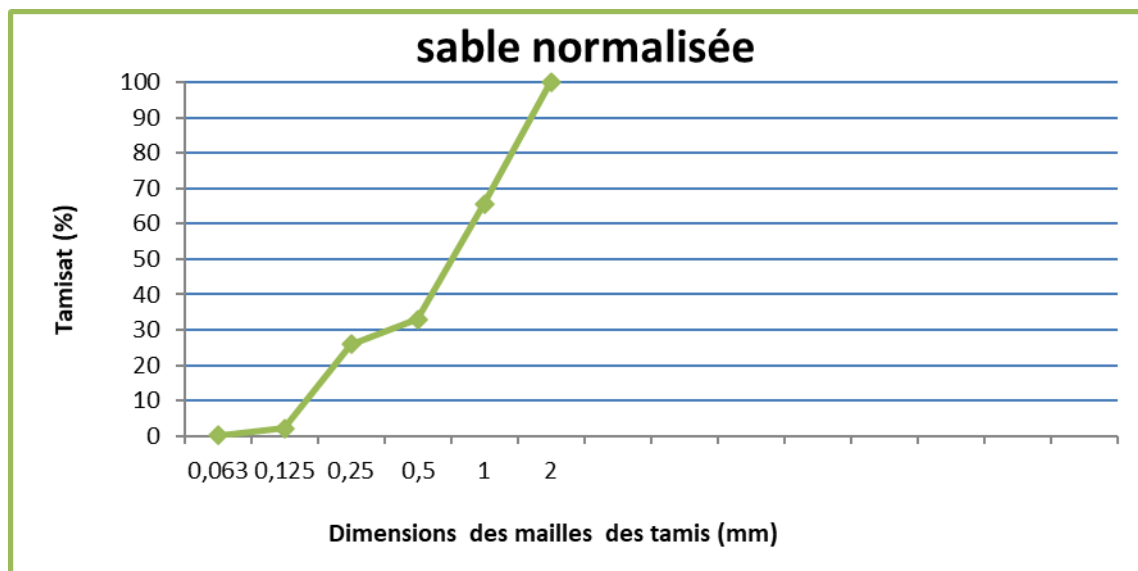
### III.1.2 Sable

Dans tous les mélanges de notre étude, nous avons utilisé un sable normalisé, fabriqué par le Laboratoire des Essais des Matériaux de la Ville de Paris (LEMVP) et fourni au laboratoire de l'usine Hadjar Soud-Skikda. Le sable était conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun 1350 g (Fig.III.3).



*Fig.III.3: Photographie d'un sac de sable normalisé.*

L'analyse granulométrique effectuée sur le sable donne la courbe présentée à la **Fig.III.4**. Il est à noter que la courbe granulométrique de notre sable se situe dans le fuseau recommandé pour les mortiers.



*Fig.III.4 : Courbe granulométrique du sable normalisé.*

La composition chimique et les caractéristiques physiques du sable utilisé sont résumées dans les **tableaux III.4 et III.5**.

*Tableau III.4 : Composition chimique du sable normalisé.*

Composant	CaCO <sub>3</sub>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>
Teneur (%)	60	38	Traces	Traces

*Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du sable normalisé*

Caractéristique physique	Valeur	Unité
Masse volumique absolue	2,73	g/cm <sup>3</sup>
Masse volumique apparente	1,63	g/cm <sup>3</sup>
Equivalent du sable visuel (ESV)	80	%
Equivalent du sable piston (ESP)	77	%
Module de finesse (MF)	2,64	-
Valeur au bleu de méthylène (MB)	0,35	-
Nature	Silico-calcaire	-

### III.1.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour gâcher le mortier est de l'eau minérale d'Ifri, commercialisée sous la marque Ifri. Les qualités physico-chimiques de cette eau sont conformes à la norme (EN 1008) [3].



*Fig.III.5: Image d'une bouteille d'eau minérale - IFRI - 1.5 l*

#### A. Caractéristiques :

- **Marque** : Ifri
- **Quantité** : 1,5 litre
- **Conditionnement** : Bouteille en plastique
- **Origine** : Algérie
- **Lieux de fabrication** : Algérie
- **Site web du fabricant** : <https://ifri-dz.com/>
- **Pays de vente** : Algérie

#### B. Composition :

L'eau minérale **Ifri** est une eau naturelle pauvre en minéraux. Sa composition nutritionnelle est détaillée dans le tableau ci-dessous :

*Tableau III.6: Tableau nutritionnel d'Ifri.*

Élément	Teneur pour 100 ml
---------	--------------------

Énergie	0 kcal
Matières grasses	0 g
Glucides	0 g
Sucres	0 g
Fibres alimentaires	0 g
Protéines	0 g
Sel	0,04 g
Calcium	9,9 mg
Magnésium	2,4 mg
Potassium	2 mg
Sodium	33 mg
Bicarbonates	265 mg
Sulfates	68 mg
Chlorures	72 mg
Nitrates	15 mg
Nitrites	< 0,02 mg
Résidu sec	550 mg
Ph	7,2

### C. Qualités physico-chimiques :

L'eau minérale Ifri est conforme aux exigences de la norme (EN 1008) pour les eaux de gâchage du béton. Les principales caractéristiques physico-chimiques de cette eau sont les suivantes [3]:

- **Masse volumique** : 1 g/cm<sup>3</sup>
- **pH** : 7,2
- **Conductivité électrique** : < 10 µS/cm
- **Teneur en chlorures** : < 50 mg/l
- **Teneur en sulfates** : < 250 mg/l
- **Teneur en matières en suspension** : < 5 mg/l

#### III.1.4 Additions minérales

Les ajouts utilisés dans notre étude sont constitués de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre, obtenues à partir de déchets bruts non valorisés. L'objectif de l'utilisation de ces ajouts est de valoriser les déchets de ces matières et, par conséquent, de protéger l'environnement.

#### A. Poudre de l'Os de bœuf :

- a) Le processus de préparation de la poudre d'os de bœuf est réalisé selon les étapes suivantes (Fig.III.6).

#### Étape 1: Collecte et nettoyage des os de bœuf (Fig.III.6-a)

1. **Source** : Obtenir des os de bœuf auprès d'un restaurant local, comme celui de la cité Universitaire d'Azzaba-SKIKDA, en Algérie.
2. **Nettoyage initial** : Laver soigneusement les os à l'eau chaude pour éliminer toute saleté, graisse ou débris visible.

#### Étape 2: Ebullition et élimination des débris (Fig.III.6-b-c-d-e)

1. **Ébullition initiale** : Placer les os lavés dans une grande casserole et les couvrir d'eau. Porter à ébullition et maintenir une ébullition vigoureuse pendant environ 7 jours.
2. **Renouvellement de l'eau et nettoyage** : Pendant la période d'ébullition de 7 jours, renouveler périodiquement l'eau et frotter les os pour éliminer toute matière organique ou impureté restante.

#### Étape 3: Ébullition ultérieure et élimination des impuretés (Fig.III.6-f-g)

1. **Coupe des Os** : Demander l'aide d'un boucher pour couper les os en deux à l'aide d'une machine spécialisée.
2. **Deuxième ébullition** : Remettre les os coupés dans la casserole et les couvrir d'eau. Porter à ébullition et maintenir une ébullition vigoureuse pendant 7 jours supplémentaires.
3. **Nettoyage continu** : Tout au long de la deuxième période d'ébullition, continuer à nettoyer les os et à éliminer toute impureté. S'assurer que l'eau reste claire, indiquant l'élimination des sécrétions graisseuses.

#### Étape 4: Séchage au soleil et broyage (Fig.III.6-h-i-j-k)

1. **Séchage au soleil** : Étaler les os bouillis en une seule couche sur une surface propre et les exposer à la lumière directe du soleil pendant environ 7 jours. Les laisser sécher complètement.
2. **Broyage** : Une fois les os secs, utiliser une machine à couper du boucher pour les casser en petits morceaux.

#### Étape 5 : Broyage et tamisage (Fig.III.6-l-m-n)

1. **Broyage** : Transporter les morceaux d'os broyés dans une cimenterie, comme la cimenterie Hadjar Al-Soud à Skikda, pour un traitement ultérieur.
2. **Broyage en poudre fine** : Utiliser les broyeurs de la cimenterie pour broyer les morceaux d'os en une poudre très fine.
3. **Tamisage** : Passer la poudre d'os broyée au tamis d'un diamètre de 80 micromètres pour obtenir une granulométrie uniforme et fine.

**Étape 6: Analyse chimique**

1. **Analyse par rayons X :** Utiliser un spectromètre à fluorescence X (XRF) pour analyser la composition chimique de la poudre d'os de bœuf préparée. Identifier les différents éléments présents et leurs concentrations respectives.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



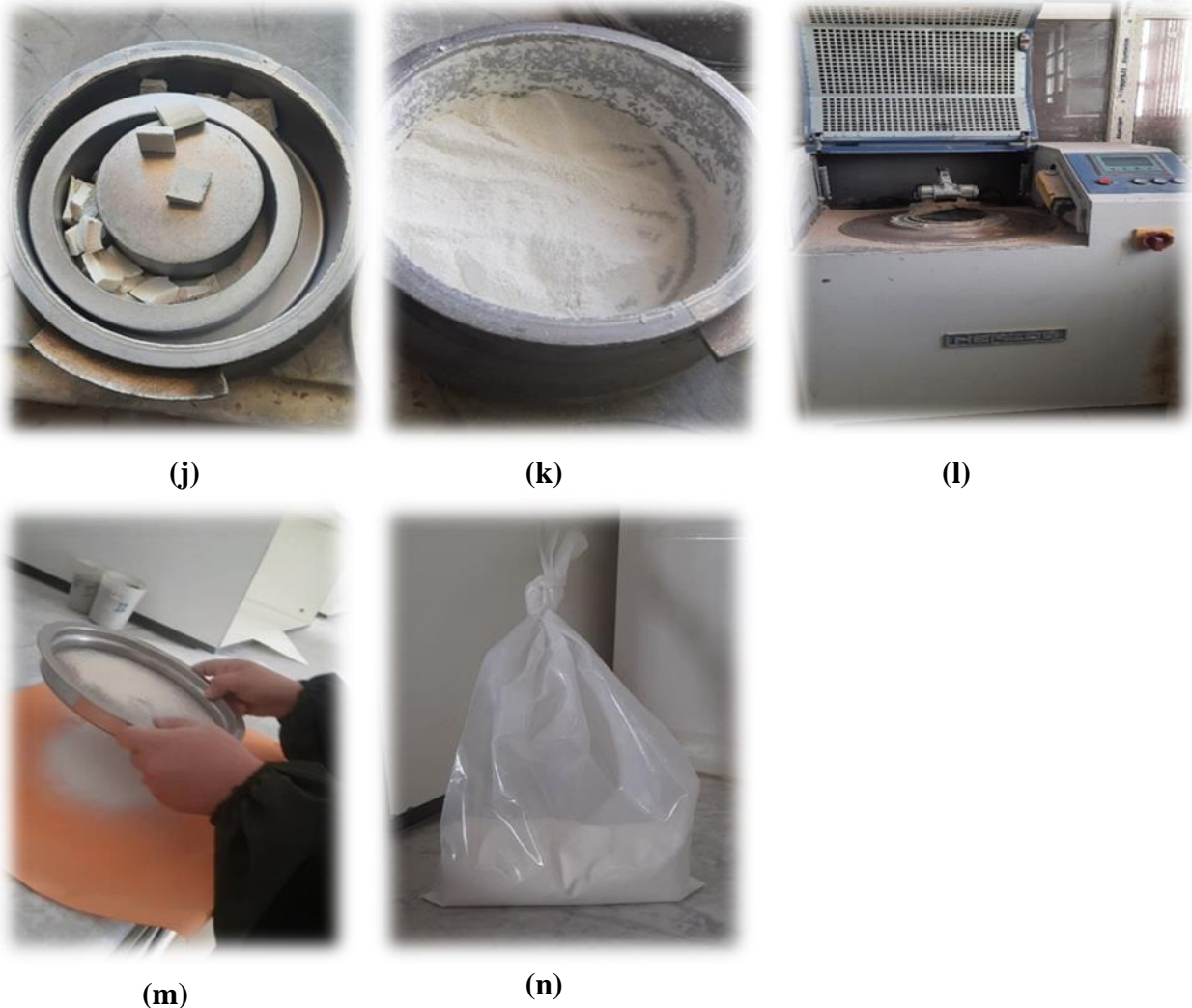
(g)



(h)



(i)



**Fig.III.6:** Étapes de Préparation de la Poudre d'Os de Bœuf :

(a) Os de bœuf brut (b) Os bouillants (c) Os après cuisson initiale (d) Nettoyage des os (e) Renouvellement de l'eau (f) Os après la dernière cuisson (g) Moelle osseuse extraite (h) Séchage des os au soleil (i) Coupage des os en petits morceaux (j) Broyage initial des os (k) Broyage fin des os (l) Machine de broyage (m) Tamisage de la poudre d'os (n) Poudre d'os finale.

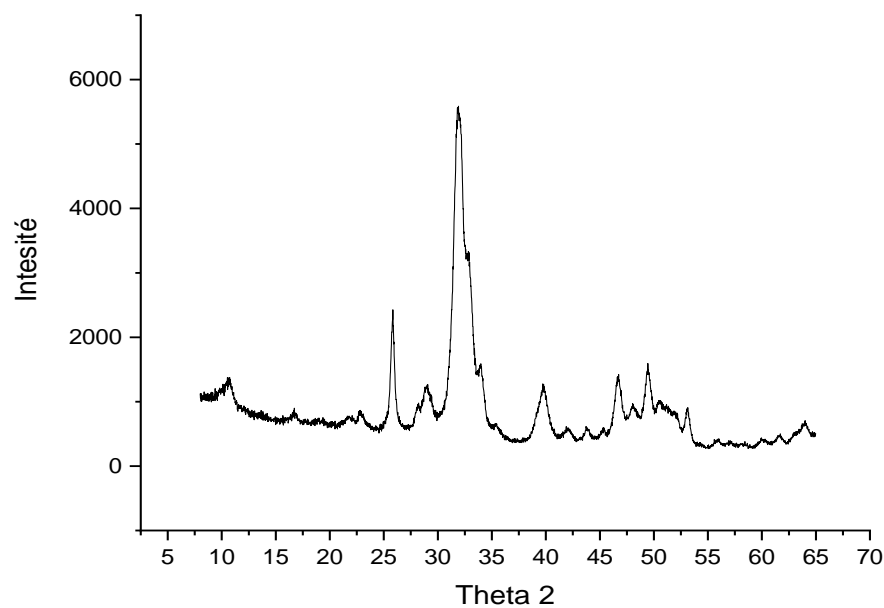
### b) Composition chimique

Le tableau III.7 présente la composition chimique de l'os de bœuf utilisé dans l'étude. Les éléments principaux sont le calcium (CaO) et le phosphore (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), qui constituent environ 80% de la masse totale de l'os. Ces éléments sont essentiels à la formation et à la structure de l'os. Les autres éléments présents dans l'os de bœuf incluent le silicium (SiO<sub>2</sub>), l'aluminium (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), le fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), le magnésium (MgO), le soufre (SO<sub>3</sub>), le potassium (K<sub>2</sub>O), et le sodium (Na<sub>2</sub>O). Ces éléments jouent des rôles importants dans les fonctions métaboliques et structurelles de l'os.

**Tableau III.7:** Composition chimique de l'os de bœuf utilisée.

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CL
%	0.65	0.01	0.08	42.93	0.64	0.35	0.00	0.33	0.00

Les données de composition chimique et de diffraction des rayons X (**Fig.III.6**) confirment que l'os de bœuf est un matériau naturel composé de phases cristallines bien définies, principalement de l'hydroxyapatite et de la  $\beta$ -tricalcium phosphate. Ces phases confèrent à l'os de bœuf des propriétés mécaniques et bioactives intéressantes, ce qui en fait un matériau potentiel pour des applications en génie biomédical, telles que la régénération osseuse et les implants osseux.

**FigIII.7 :** Diffraction des rayons X de poudre d'os de bœuf.

### B. Poudre de verre :

- a) Le processus de préparation de la poudre de Verre est réalisé selon les étapes suivantes (**Fig.III.8**):

#### Étape 1 : Collecte et nettoyage des bouteilles en verre (**Fig.III.8-a**)

- 1. Source :** Rassembler des bouteilles en verre vert auprès de sources appropriées, telles que des centres de recyclage ou des commerces locaux.
- 2. Nettoyage initial :** Laver soigneusement les bouteilles en verre collectées pour éliminer toute saleté, débris ou étiquettes. S'assurer qu'elles sont complètement sèches avant de passer à l'étape suivante.

**Étape 2 : Broyage des bouteilles en verre**

1. **Équipement de protection** : Se munir d'un équipement de protection des yeux, comme des lunettes de sécurité ou des lunettes de protection, pour protéger les yeux des éclats de verre volants.
2. **Processus de broyage** : Utiliser un marteau ou un outil dédié au broyage du verre pour briser les bouteilles en verre en morceaux plus petits. Viser une taille uniforme d'environ 1 à 2 centimètres.

**Étape 3 : Broyage des morceaux de verre (Fig.III.8-b)**

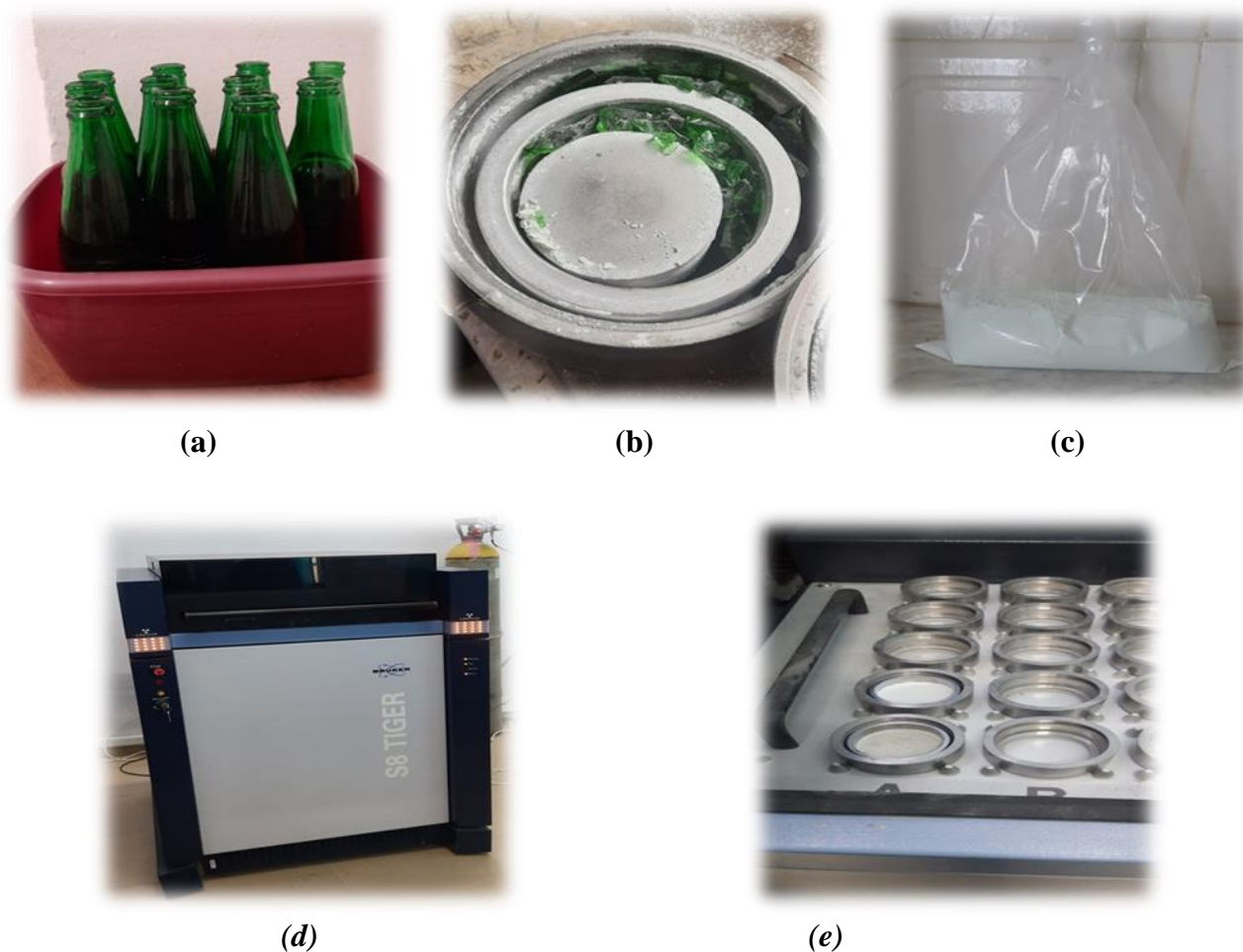
1. **Équipement de broyage** : Transporter les morceaux de verre broyés dans une installation de broyage, comme le moulin à pierres noires, pour un traitement ultérieur.
2. **Broyage fin** : Utiliser les machines de broyage de l'installation pour broyer les morceaux de verre en une poudre fine. S'assurer que la poudre passe à travers un tamis d'un diamètre de 60 micromètres pour obtenir la granulométrie souhaitée.

**Étape 4 : Tamisage et finalisation de la poudre de verre (Fig.III.8-c)**

1. **Processus de tamisage** : Tamiser la poudre de verre broyée à travers un tamis de 60 micromètres pour éliminer les particules plus grosses et obtenir une consistance uniforme de poudre fine.
2. **Stockage** : Stocker la poudre de verre vert préparée dans un récipient hermétique pour éviter la contamination et maintenir sa qualité.

**Étape 5: Analyse chimique (Fig.III.8-d-e)**

1. **Analyse par rayons X** : Utiliser un spectromètre à fluorescence X (XRF) pour analyser la composition chimique de la poudre de verre préparée. Identifier les différents éléments présents et leurs concentrations respectives.



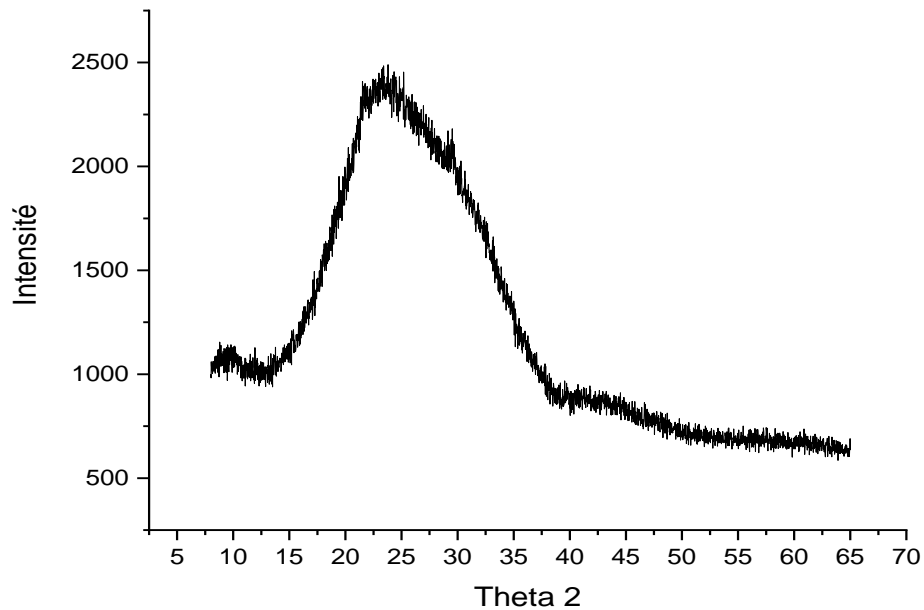
**Fig.III.8:** Étapes de Préparation de la Poudre de Verre : (a) Bouteille en verre brut (b) Broyage du verre (c) Poudre de verre tamisée (d)(e) Photographie du dispositif aux RX.

### b) Composition chimique

Le **tableau III.8** présente la composition élémentaire du verre employé pour la fabrication de la poudre de verre. Les éléments et leurs proportions respectives sont les suivants :

**TableauIII.8:** Composition chimique de verre utilisée.

Élément	Pourcentage
Silice ( $\text{SiO}_2$ )	63.36 %
Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	0.65 %
Oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	0.00 %
Chaux ( $\text{CaO}$ )	8.89 %
Oxyde de magnésium ( $\text{MgO}$ )	0.70 %
Trioxyde de soufre ( $\text{SO}_3$ )	0.05 %
Oxyde de potassium ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0.25 %
Oxyde de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	8.98 %
Somme	82.88 %



*Fig.III.9 : Diffraction des rayons X de poudre de verre.*

L'analyse de cette composition et du diagramme de diffraction des rayons X (XRD) présenté sur la **Fig.III.10** permet de confirmer la nature amorphe du verre broyé.

La composition du verre, riche en silice ( $\text{SiO}_2$ ) avec 63,36%, et en oxydes alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) avec un total de 9,23%, est caractéristique d'un verre susceptible de se vitrifier, c'est-à-dire de se solidifier dans un état amorphe [4].

La silice, élément principal du verre, forme des réseaux tridimensionnels de liaisons Si-O-Si. Ces réseaux, rigides et désordonnés, empêchent la formation de structures cristallines ordonnées lors de la solidification, favorisant ainsi l'état amorphe [5].

Les oxydes alcalins ( $\text{Na}_2\text{O}$  et  $\text{K}_2\text{O}$ ) agissent comme des modificateurs de réseau, réduisant la viscosité du verre fondu et facilitant sa solidification rapide avant qu'il n'ait le temps de s'organiser en cristaux [5].

Le diagramme XRD de la poudre de verre (**Fig.III.10**) présente des halos larges et diffus, caractéristiques d'un matériau amorphe [6].

L'absence de pics nets et bien définis dans le diagramme confirme que la structure du verre est désordonnée et non cristalline. Les pics nets, caractéristiques des matériaux cristallins, apparaissent lorsque les rayons X sont diffractés par des plans atomiques ordonnés à des distances interatomiques spécifiques [6].

## III.2. Etude des propriétés physico-mécaniques des mortiers élaborés

### III.2.1 Formulation et élaboration des mortiers :

Le **Tableau III.9** fournit une description détaillée de la composition et des proportions des échantillons de mortier élaborés dans l'étude. Ces informations sont essentielles pour comprendre les résultats des tests et les propriétés des différents types de mortier.

*Tableau III.9: Compositions et proportions des échantillons de mortiers utilisés.*

Désignation	Composition
<b>MT</b>	Ciment (100%) + sable normalisé + eau
<b>MV5</b>	Ciment (95%) + Verre (5%) + sable normalisé + eau
<b>MOB5</b>	Ciment (95%) + Os de boeuf (5%) + sable normalisé + eau
<b>MV4OB1</b>	Ciment (95%) + Verre (4%) + Os de boeuf (1%) + sable normalisé + eau
<b>MV3OB2</b>	Ciment (95%) + Verre (3%) + Os de boeuf (2%) + sable normalisé + eau
<b>MV2OB3</b>	Ciment (95%) + Verre (2%) + Os de boeuf (3%) + sable normalisé + eau
<b>MV1OB4</b>	Ciment (95%) + Verre (1%) + Os de boeuf (4%) + sable normalisé + eau
<b>MV5OB5</b>	Ciment (100%) + Verre (5%) + Os de boeuf (5%) + sable normalisé + eau
<b>MOB10</b>	Ciment (100%) + Os de boeuf (10%) + sable normalisé + eau
<b>MV10</b>	Ciment (100%) + Verre (10%) + sable normalisé + eau
<b>MV10OB10</b>	Ciment (100%) + Verre (10%) + OB (10%) + sable normalisé + eau
<b>MV15</b>	Ciment (100%) + Verre (15%) + sable normalisé + eau

#### Proportions de la composition du Mortier :

- 3 parties de sable (1350 g)
- 1 partie de ciment ( $450 \pm 2$  g)
- 1/2 partie d'eau ( $225 \pm 2$  g)

### III.2.2 Protocole expérimental:

Les mortiers ainsi obtenus ont été réalisés, selon les étapes suivantes :

#### 1. Pesage et mélange initial :

- À l'aide d'une balance, peser jusqu'à 450 g de ciment.
- Mesurer environ 225 g d'eau à l'aide d'une éprouvette graduée.
- Mélanger mécaniquement chaque lot de pâte de ciment à l'aide d'un malaxeur.

#### 2. Consolidation et mélange :

- Verser soigneusement le ciment dans l'eau, en évitant toute perte d'eau ou de ciment.
- Placer le récipient sur le malaxeur et ajouter le mélange de sable dans la cuve du malaxeur.
- Démarrer le malaxeur conformément à la norme (NF EN 196-1-3) [7].

#### 3. Période de repos et raclage :

- Après 90 secondes, arrêter le malaxeur pendant 30 secondes.
- Pendant ces 30 secondes, utiliser un grattoir en caoutchouc ou en plastique pour retirer toute la pâte de ciment collée aux parois et au fond du bol.
- Remettre la pâte grattée au centre du bol.

#### 4. Mélange final :

- Redémarrer le malaxeur à basse vitesse pendant 90 secondes.
- La durée totale de mélange doit être de 3 minutes.

#### 5. Préparation des moules :

- Préparer les moules en acier sur la table à chocs.

#### 6. Remplissage des moules avec la première couche de mortier :

- Placer la moitié du mortier préparé dans chacun des trois moules légèrement huilés.

#### 7. Nivellement du mortier :

- Utiliser un outil en forme de T spécialement conçu pour niveler le mortier dans les moules, en s'assurant qu'il remplit la moitié de la capacité du moule.

#### 8. Compactage initial :

- Activer la table à chocs pendant 60 cycles.

**9. Ajout de la deuxième couche de mortier :**

- Ajouter du mortier supplémentaire dans les moules pour renforcer l'adhérence de la deuxième couche.
- Remplir les moules jusqu'au bord.

**10. Deuxième compactage :**

- Activer la table à chocs pendant 60 cycles supplémentaires.

**11. Lissage de la surface :**

- Utiliser une règle plate pour enlever l'excès de mortier avec un léger mouvement d'étalement.
- Cela permet de s'assurer que le mortier remplit complètement le moule et crée une surface supérieure lisse.

**12. Démoulage :**

- Retirer soigneusement les moules de la table à chocs.

**13. Curage :**

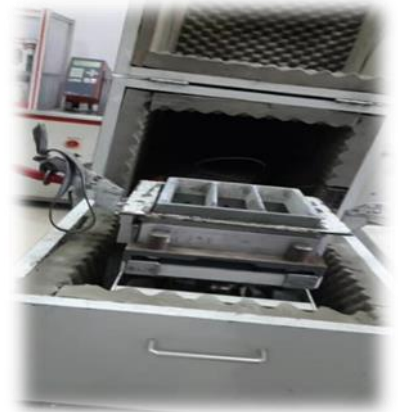
- Placer les moules remplis dans une chambre de cure ou sous un réservoir d'eau pour maintenir une humidité et une température constantes pendant la période de cure spécifiée



(a)

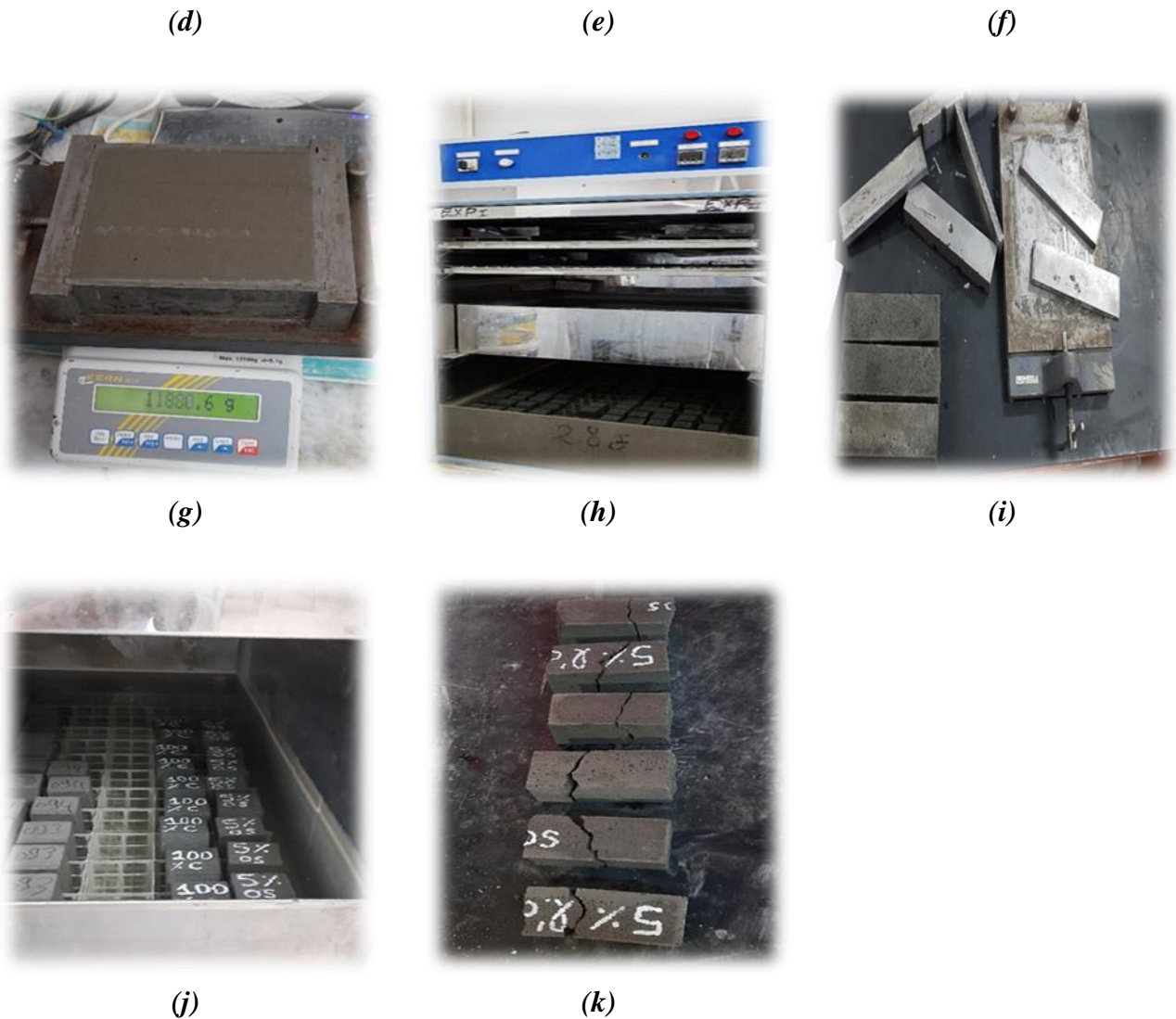


(b)



(c)





**Fig.III.10:** Étapes de Préparation du mortier: (a)Préparation des échantillons dans des sacs en plastique (b)Malaxeur (c)Table à chocs (d)Remplissage du mortier dans le moitié de moule (e)Moule après avoir été extrait de la table à chocs (f)(g)Poids du moule avant et après remplissage (h)Etuve climatisée (i)Démoulage (j)Placement des éprouvettes dans l'eau (k)Les éprouvettes après la compression.

### III.2.3 Etude de l'effet du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf

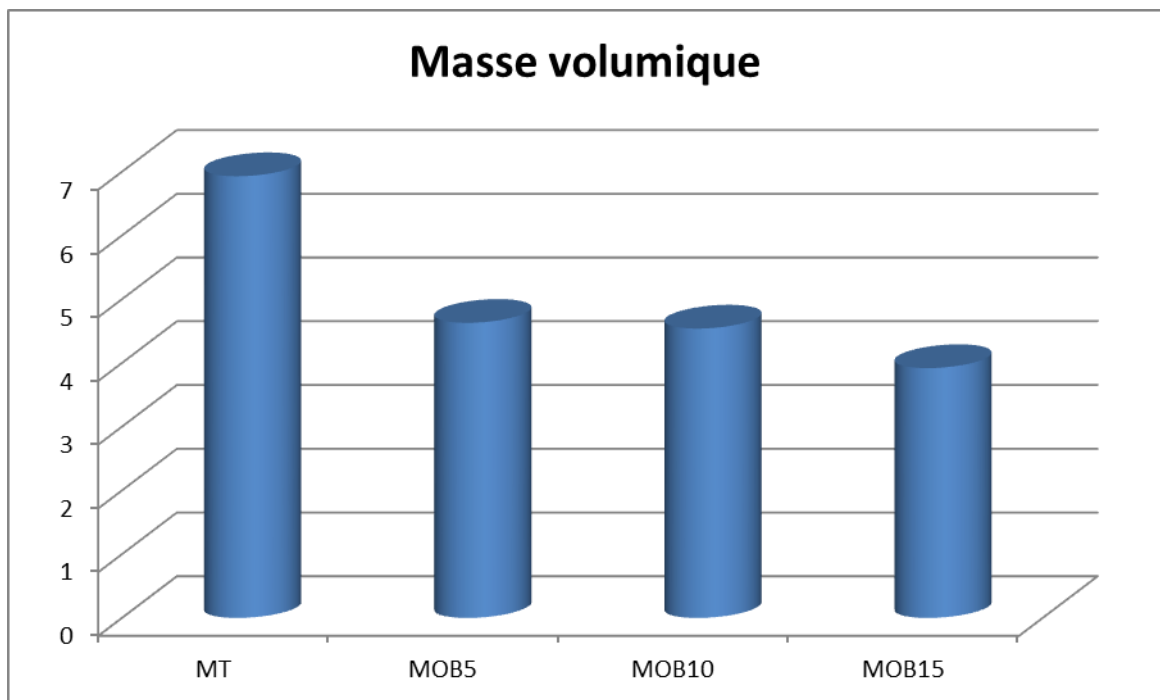
Afin d'évaluer l'impact de la substitution partielle du ciment par de la poudre d'os de bœuf sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci, une série d'essais de contrôle a été réalisée. Ces essais portaient sur les paramètres suivants : la **Masse volumique**, la **Résistance à la traction par flexion** et la **Résistance à la compression**.

#### III.2.3.1. Masse volumique des mortiers élaborés

Les résultats de la masse volumique des mortiers à l'état frais, en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf, sont présentés dans le **Tableau III.10** et la **Figure III.11**.

**Tableau III.10 :** Masse volumique des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf.

Mortier	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
MT	6.93
MOB15	4.63
MOB10	4.54
MOB5	3.92



**Fig. III.11 :** Évolution de la masse volumique des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf.

L'analyse des résultats des mortiers élaborés met en évidence une diminution graduelle de la masse volumique avec l'augmentation de la proportion d'os de bœuf. En effet, les valeurs de masse volumique des mortiers à base d'os de bœuf s'avèrent inférieures à celle du mortier témoin. Cette diminution s'explique principalement par la densité intrinsèquement plus faible de la poudre d'os de bœuf ( $\rho$  poudre d'os de bœuf  $\approx 2,79$  g/cm<sup>3</sup>) par rapport au ciment ( $\rho$  ciment  $\approx 2,97$  g/cm<sup>3</sup>), comme le confirment plusieurs études [8].

La diminution de la masse volumique des mortiers à base d'os de bœuf peut avoir plusieurs conséquences :

- **Réduction du poids propre des structures en béton** : Ce point est positif car il permet de diminuer les charges supportées par les fondations et les éléments structuraux, ce qui peut s'avérer crucial dans certains projets de construction [8].
- **Amélioration des propriétés d'isolation thermique** : L'os de bœuf étant un matériau isolant, son incorporation dans le béton peut effectivement améliorer les propriétés d'isolation thermique de la structure [9]. Cela peut être particulièrement bénéfique pour les bâtiments situés dans des régions climatiques extrêmes.
- **Modification du comportement mécanique** : Il est important de nuancer cette affirmation. La diminution de la masse volumique peut avoir un impact sur la résistance à la compression et à la traction du mortier, mais l'effet réel dépend de plusieurs facteurs, tels que la teneur en os de bœuf, la granulométrie de la poudre, la nature du ciment et les conditions de mise en œuvre.

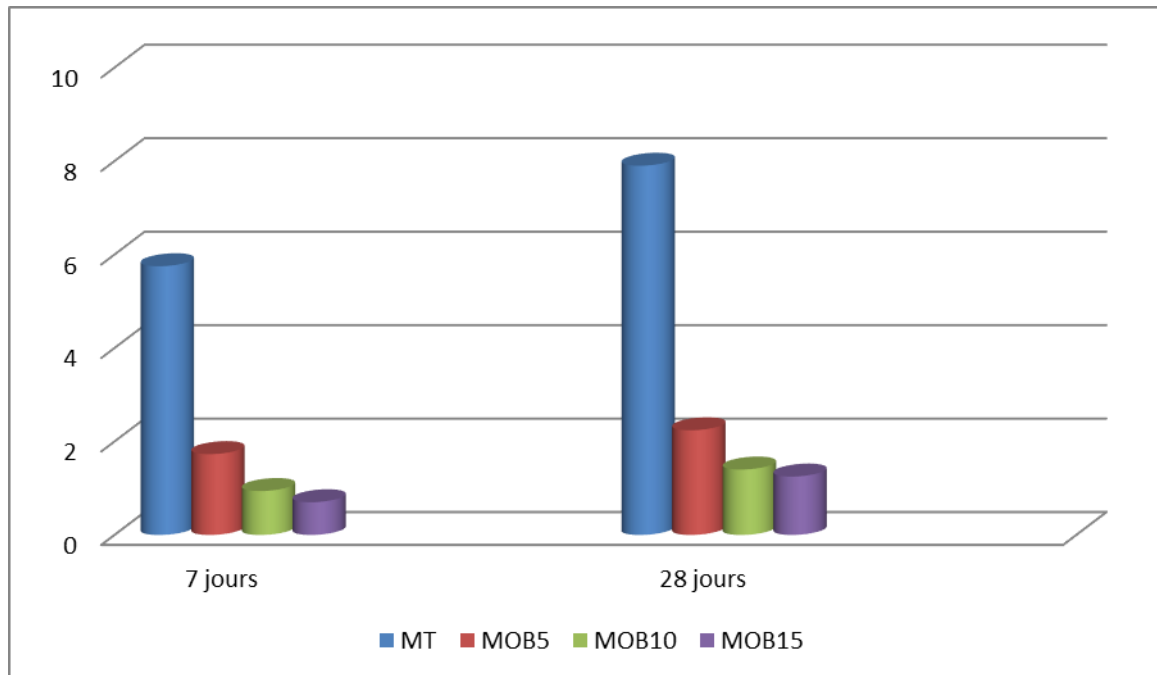
### III.2.3.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés

Les résultats des tests d'écrasement de la résistance à la traction par flexion, réalisés à 7 et 28 jours (moyenne de trois éprouvettes) sur les mortiers élaborés, sont présentés dans le **Tableau III.11**.

Les évolutions de la résistance à la traction par flexion à 7 et 28 jours sont illustrés sous forme d'histogrammes dans la **Figure III.12**.

*Tableau III.11 : Résistance à la traction par flexion des mortiers à différents âges en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf.*

Mortier	Résistance à la Traction par Flexion à 7 jours (MPa)	Résistance à la Traction par Flexion à 28 jours (MPa)	Évolution (7J et 28 j) en MPa	Pourcentage d'évolution (%)
MT	5.75	7.90	2.15	37.39
MOB5	1.73	2.24	0.51	29.48
MOB10	0.94	1.40	0.46	48.94
MOB 15	0.70	1.25	0.55	78.57



**Figure III.12 :** Évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf à 7 et 28 jours.

L'analyse des résultats concernant l'impact de la substitution du ciment par de la poudre d'os de bœuf sur les propriétés mécaniques des mortiers met en évidence les points suivants :

1. Diminution de la résistance à la traction par flexion à 7 et 28 jours pour tous les mortiers MOB par rapport au mortier de référence (MT) [10, 11]. La diminution de la résistance est d'autant plus importante que le taux de substitution est élevé, suivant l'ordre  $MOB15 > MOB10 > MOB5$ .
2. Augmentation de la résistance entre 7 et 28 jours pour tous les mortiers, avec la meilleure performance pour MOB15 [10, 11].

Le mécanisme de diminution de la résistance à 7 et 28 jours pour les mortiers MOB par rapport au MT peut s'expliquer principalement par :

- **La dilution du ciment (E/C) :** La substitution d'une partie du ciment par du MOB, un matériau inerte, dilue la phase cimentaire, ce qui peut affecter la formation du réseau de liant et la résistance mécanique du mortier [12, 13].
- **La microstructure poreuse :** La poudre d'os de bœuf peut introduire une microstructure poreuse plus importante dans le mortier, ce qui peut fragiliser la matrice et réduire la résistance à la traction par flexion [12, 13].
- **L'hydratation retardée :** La présence de MOB peut affecter l'hydratation du ciment, ce qui peut retarder le développement de la résistance mécanique initiale [12, 13].

Par ailleurs, le mécanisme de l'augmentation de la résistance à long terme des mortiers MOB entre 7 et 28 jours peut être attribuée à :

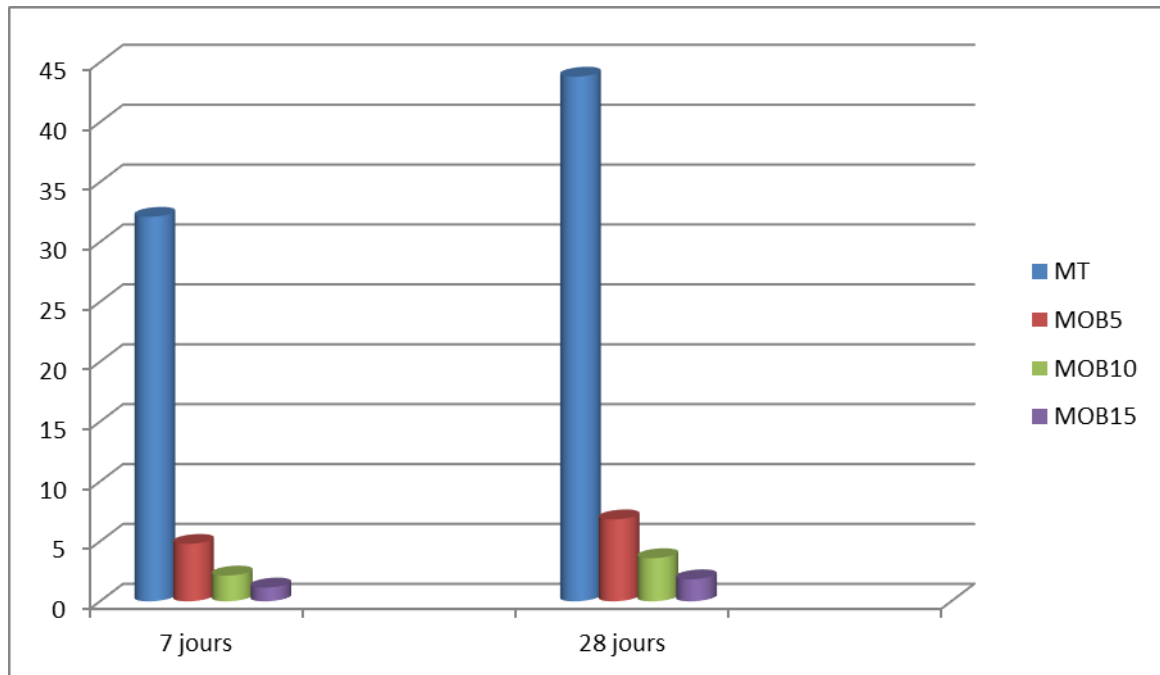
- **L'hydratation continue et réactions pouzzolaniques entre le MOB et la chaux libérée par l'hydratation du ciment [14, 15] :** Le MOB peut réagir avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment pour former des produits de réaction pouzzolaniques. Ces produits de réaction pouzzolaniques remplissent les pores du mortier et renforcent la matrice, ce qui contribue à l'augmentation de la résistance à long terme. L'effet est plus important pour les taux de substitution élevés (MOB10 et MOB15), car il y a plus de MOB disponible pour réagir avec la chaux.
- **L'effet synergique entre le ciment et le MOB :** Le MOB peut favoriser la formation de produits de réaction pouzzolaniques et améliorer l'évolution de la résistance à long terme [16, 17]. Cela s'explique par le fait que le MOB peut:
  - **Fournir des sites de nucléation pour la précipitation des produits de réaction pouzzolaniques:** Le MOB offre une surface rugueuse sur laquelle les produits de réaction pouzzolaniques peuvent se nucléer et se développer.
  - **Améliorer la microstructure du mortier:** Le MOB peut affiner la microstructure du mortier, ce qui peut également contribuer à l'augmentation de la résistance.

### III.2.3.3 Résistance à la compression des mortiers élaborés

Les résultats de la résistance à la compression des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf à l'état durcis sont reportés dans le **Tableau III.12** et la **Figure III.12**.

*Tableau III.12 : Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf à différents âges.*

Mortier	Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Évolution (7J et 28 j) en MPa	Pourcentage d'évolution (%)
MT	32.10	43.8	11.7	36,45
MOB5	4.79	6.84	2.05	39,76
MOB10	2.15	3.60	1.45	39,74
MOB15	1.15	1.84	0.69	40,42



**Figure III.13 :** Évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf à 7 et 28 jours.

L'analyse de l'impact de la substitution du ciment par du MOB sur les propriétés mécaniques des mortiers en termes de résistance à la compression fait ressortir ce qui suit :

- Une légère diminution de la résistance à 7 jours pour MOB5 et MOB10 (respectivement 3,4% et 8,5%) par rapport au mortier de référence (MT) [10, 11].
- Diminution de la résistance à 7 jours pour MOB15 (18,6%) par rapport au MT [10, 11].
- Une tendance similaire à 28 jours : diminution pour MOB5 et MOB10 (respectivement 6% et 11,2%) et diminution pour MOB15 (22,4%) par rapport au MT [10, 11].
- Une augmentation de la résistance entre 7 et 28 jours de tous les mortiers MOB. La plus importante étant observée pour MOB15 (40,42%), suivie des mortiers MOB10 (39,74%) et MOB5 (39,76%). Le mortier MT, sans substitution de MOB, présente une évolution de 36,45% [10, 11].

Les observations concernant la résistance à la compression des mortiers MOB sont similaires à celles concernant la résistance à la traction par flexion.

La légère diminution de la résistance initiale pour les mortiers MOB5 et MOB10 peut s'expliquer par une microstructure poreuse plus fine et une hydratation du ciment favorisée par la présence de MOB [14-15].

Le mortier MOB15 présente une diminution de la résistance initiale, mais une augmentation de la résistance plus importante entre 7 et 28 jours, suggérant un effet retardateur sur l'hydratation du ciment aux premiers âges suivi d'une formation accrue de produits de réaction pouzzolaniques à long terme [14-15].

### III.2.4 Etude de l'effet du taux de substitution de la poudre de verre

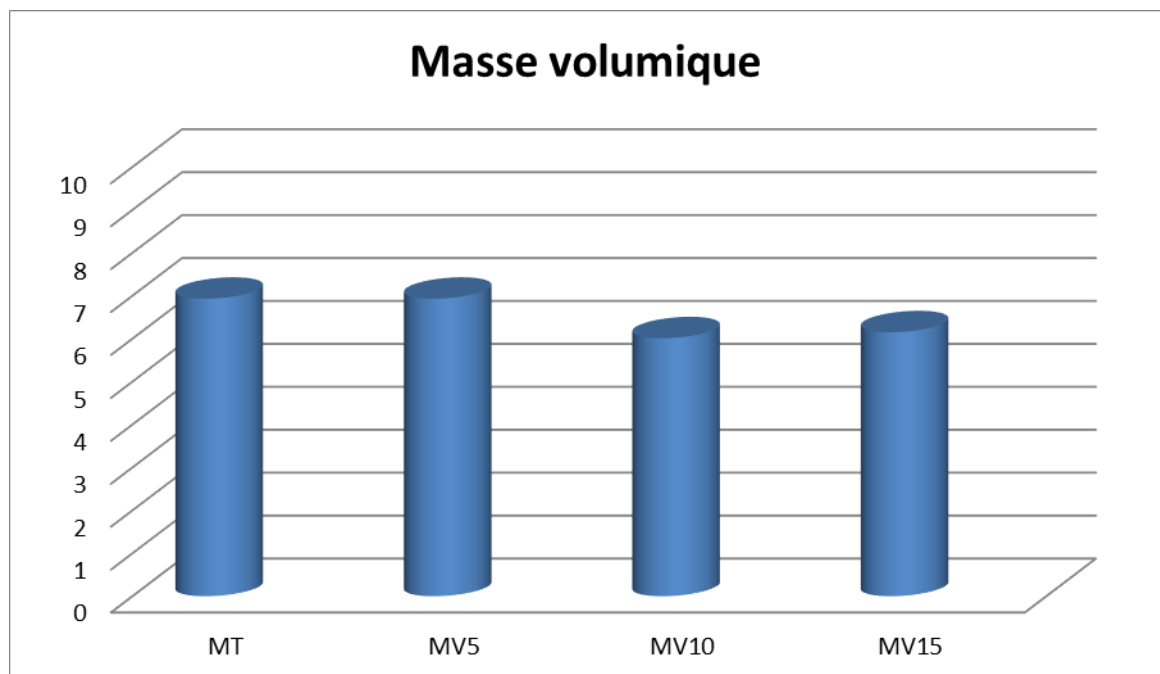
Afin d'évaluer l'impact de la substitution partielle du ciment par de la poudre de verre des bouteilles sur les propriétés des mortiers à l'état frais et durci, une série d'essais de contrôle a été réalisée. Ces essais portaient sur les paramètres suivants : la **Masse volumique**, la **Résistance à la traction par flexion** et la **Résistance à la compression**.

#### III.2.4.1. Masse volumique des mortiers élaborés

Les résultats de la masse volumique des mortiers à l'état frais, en fonction du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf, sont présentés dans le **Tableau III.13** et la **Figure III.14**.

*Tableau III.13 : Masse volumique des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre des bouteilles.*

Mortier	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
MT	6.93
MV5	6.93
MV10	6.01
MV15	6.15



*Fig. III.14 : Évolution de la masse volumique des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre des bouteilles.*

L'analyse des résultats présentés a permis d'observer une diminution de la masse volumique des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution de la poudre de verre, comme le confirment plusieurs études [12]. Il s'agit de :

- Diminution graduelle de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution de la poudre de verre, conforme aux observations d'autres études [12].
- Le mortier MV5 (5% de substitution) présente la même masse volumique que le mortier de référence MT, indiquant une compensation entre la densité de la poudre de verre et l'effet de remplissage des vides entre les granulats [13].
- Les mortiers MV10 (10%) et MV15 (15%) présentent des diminutions de masse volumique de 13,2% et 11,2% respectivement par rapport au MT.

Cette diminution s'explique par deux facteurs principaux :

- Densité intrinsèquement plus faible de la poudre de verre (environ 2,5 g/cm<sup>3</sup>) par rapport au ciment (environ 3,1 g/cm<sup>3</sup>) et au sable (environ 2,65 g/cm<sup>3</sup>), réduisant la densité moyenne des constituants du mortier [13].
- Volume occupé par la poudre de verre potentiellement plus important que le ciment et le sable qu'elle remplace, contribuant à la diminution de la masse volumique [12].

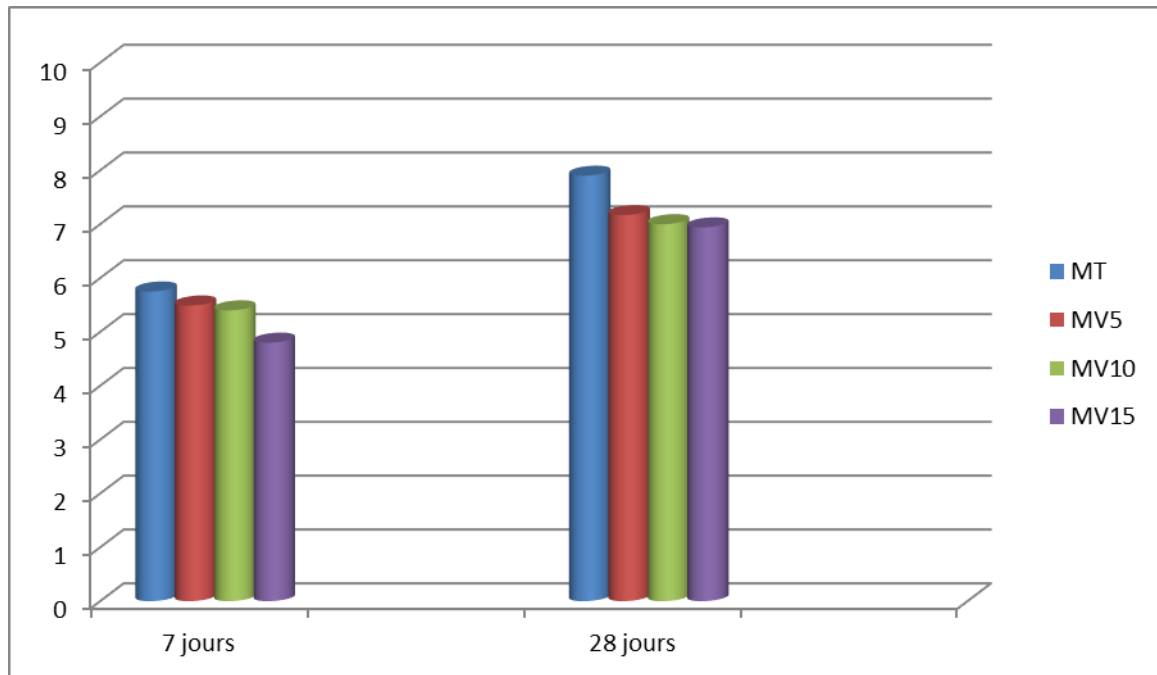
La diminution de la masse volumique des mortiers à base de poudre de verre peut avoir plusieurs conséquences : la diminution du poids propre des structures, l'augmentation de l'isolation thermique, la modification du comportement mécanique [12-13].

#### III.2.4.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés

On peut voir la résistance à la flexion des mortiers à 7 et 28 jours dans le **Tableau III.14** et sa variation selon le verre ajouté et le temps dans la **Fig.III.15**.

**Tableau III.14** : Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre des verres de bouteilles à différents âges.

Mortier	Résistance à la Traction par Flexion à 7 jours (MPa)	Résistance à la Traction par Flexion à 28 jours (MPa)	Évolution (7J et 28 j) (MPa)	Évolution en %
MT	5.75	7.90	2.15	37.39%
MV5	5.49	7.17	1.68	30.60%
MV10	5.40	7.00	1.60	29.63%
MV15	4.80	6.94	2.14	44.58%



**Figure III.15 :** Évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre des bouteilles à 7 et 28 jours.

D'après les données présentées dans le **Tableau III.14** et la **Fig.III.15**, l'incorporation de poudre de verre dans les mortiers a fait enregistrer l'impact suivant :

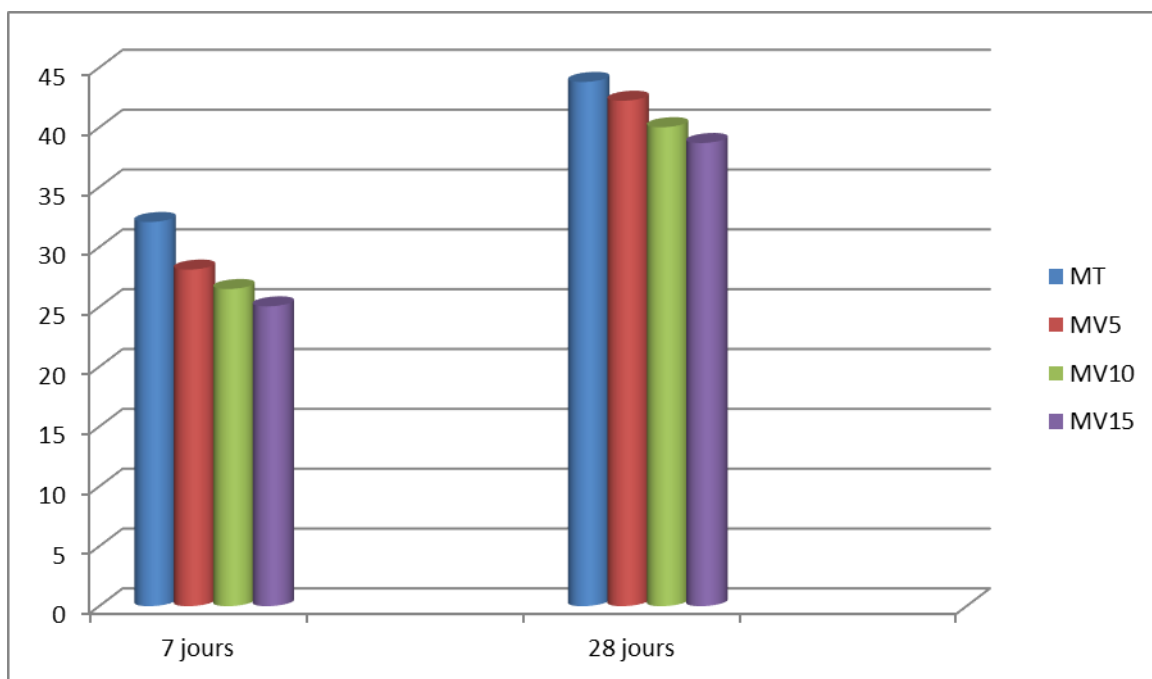
- 1) Diminution modérée de la résistance à 7 jours pour tous les taux de substitution qui s'explique par :
  - Dilution de la matrice cimentaire [13].
  - Microstructure poreuse plus importante [12].
  - Cinétique d'hydratation ralentie [13].
- 2) Récupération et légère diminution de la résistance à 28 jours pour certains mortiers qui s'explique par :
  - Diminution de l'effet de dilution de la matrice cimentaire avec l'hydratation [12].
  - Effet bénéfique de la microstructure poreuse sur la ductilité [13].
  - Microstructure plus dense et meilleure liaison entre la poudre de verre et la matrice cimentaire [14].
- 3) Évolution similaire de la résistance entre 7 et 28 jours pour tous les mortiers qui peut être suggéré par l'effet de la poudre de verre sur la résistance à la flexion est principalement lié à la microstructure et à la cinétique d'hydratation, et non à des réactions chimiques spécifiques [14].

### III.2.4.3 Résistance à la compression des mortiers élaborés

La résistance à la compression du mortier de ciment incorporant de la poudre de verre broyée est illustrée sur la **Fig.III.16**. L'ajout de la poudre de verre était de 0%, 5%, 10% et 15% en poids de ciment. La résistance à la compression du mortier a été mesurée aux âges de 7 et 28 jours.

**Tableau III.15:** Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre de bouteilles à différents âges.

Mortier	Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Évolution (7J et 28 j) en MPa	Pourcentage d'évolution (%)
MT	32.10	43.8	11.70	36.45
MV5	28.12	42.23	14.11	50.16
MV10	26.50	40.02	13.52	51.36
MV15	25.05	38.70	13.65	54.50



**Fig.III.16:** Variation de la résistance à la compression par flexion des mortiers élaborés en fonction du taux de substitution de la poudre de verre à 7 et 28.

D'après les données présentées dans le **Tableau III.15**, l'incorporation de poudre de verre dans les mortiers a un impact positif sur la résistance à la compression, à la fois à 7 jours et à 28 jours, pour tous les taux de substitution. L'impact de la substitution du ciment par de la poudre de verre sur la résistance à la compression est :

1. Diminution significative de la résistance à la compression à 7 et 28 jours pour tous les taux de substitution dû :
  - **Effet de remplissage** : La poudre de verre fine remplit les vides entre les granulats, améliorant la compacité et réduisant la porosité du mortier, ce qui se traduit par une meilleure liaison entre les particules et une matrice cimentaire plus dense [11, 18].
  - **Réaction pouzzolanique** : La silice et l'alumine réactives de la poudre de verre réagissent avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment, produisant des gels de C-S-H qui densifient la matrice et renforcent la liaison entre les particules, augmentant la résistance à la compression [13-14].
2. Augmentation plus importante entre 7 jours et 28 jours, indiquant un développement continu de la réaction pouzzolanique.
3. Efficacité optimale pour les faibles taux de substitution (MV5 et MV10): L'effet bénéfique de l'effet de remplissage et de la réaction pouzzolanique est contrebalancé par l'effet de dilution du ciment à des taux de substitution élevés (MV15) [12].

### III.2.5 Etude de l'effet du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre des bouteilles

Afin d'évaluer l'impact de la substitution partielle du ciment par un mélange de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre sur les caractéristiques des mortiers à l'état frais et durci, une série d'essais a été réalisée. Ces essais portaient sur : La masse volumique, La résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression.

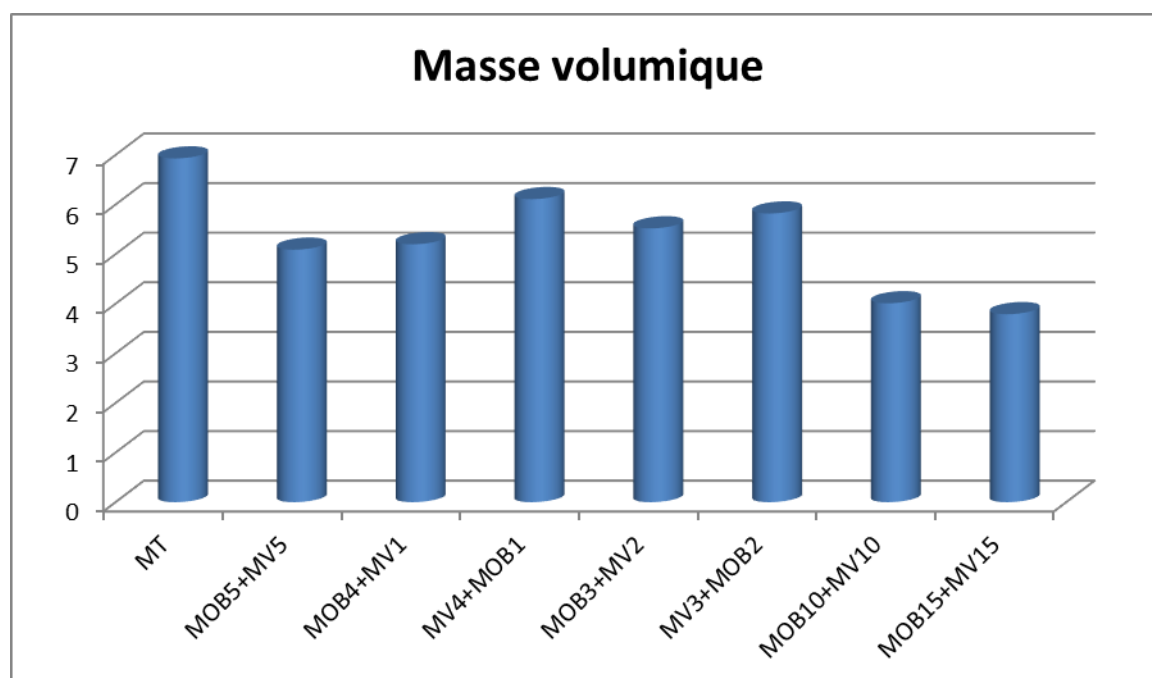
#### III.2.5.1 Masse volumique

La masse volumique, ou densité, est un paramètre crucial des mortiers, influençant directement leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Dans cette section, nous analysons l'effet de la substitution partielle du ciment par un mélange de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre sur la masse volumique des mortiers.

Les valeurs de la masse volumique des mortiers préparés avec différentes proportions de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre sont présentées dans le tableau **III.16** et illustrées par la figure **III.17**.

**Tableau III.16 :** Évolution de la masse volumique des mortiers en fonction du taux de substitution du mélange poudre d'os de bœuf et poudre de verre des bouteilles

Mortier	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )
MT	6.93
MOB5 + MV5	5.09
MOB4 + MV1	5.20
MV4 + MOB1	6.11
MOB3 + MV2	5.52
MV3 + MOB2	5.82
MOB10 + MV10	4.01
MOB15 + MV15	3.79



**Fig.III.17 :** Évolution de la masse volumique des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre des bouteilles.

L'analyse des données révèle une diminution significative de la masse volumique des mortiers avec l'augmentation du taux de substitution du mélange d'os de bœuf et de poudre de verre, pour tous les âges considérés.

Cette diminution peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- **Densité des matériaux constitutifs** : La densité de l'os de bœuf (environ  $1,5 \text{ g/cm}^3$ ) est inférieure à celle du ciment (environ  $3,1 \text{ g/cm}^3$ ) et de la poudre de verre (environ  $2,5 \text{ g/cm}^3$ ) [8]. En substituant une partie du ciment et de la poudre de verre par de l'os de bœuf, on diminue la densité moyenne des constituants du mortier, ce qui entraîne une diminution de la masse volumique globale.
- **Volume occupé par l'os de bœuf** : L'os de bœuf, de par sa forme et sa structure poreuse, peut occuper un volume plus important que le ciment et la poudre de verre qu'il remplace. Cela contribue également à la diminution de la masse volumique du mortier [9].

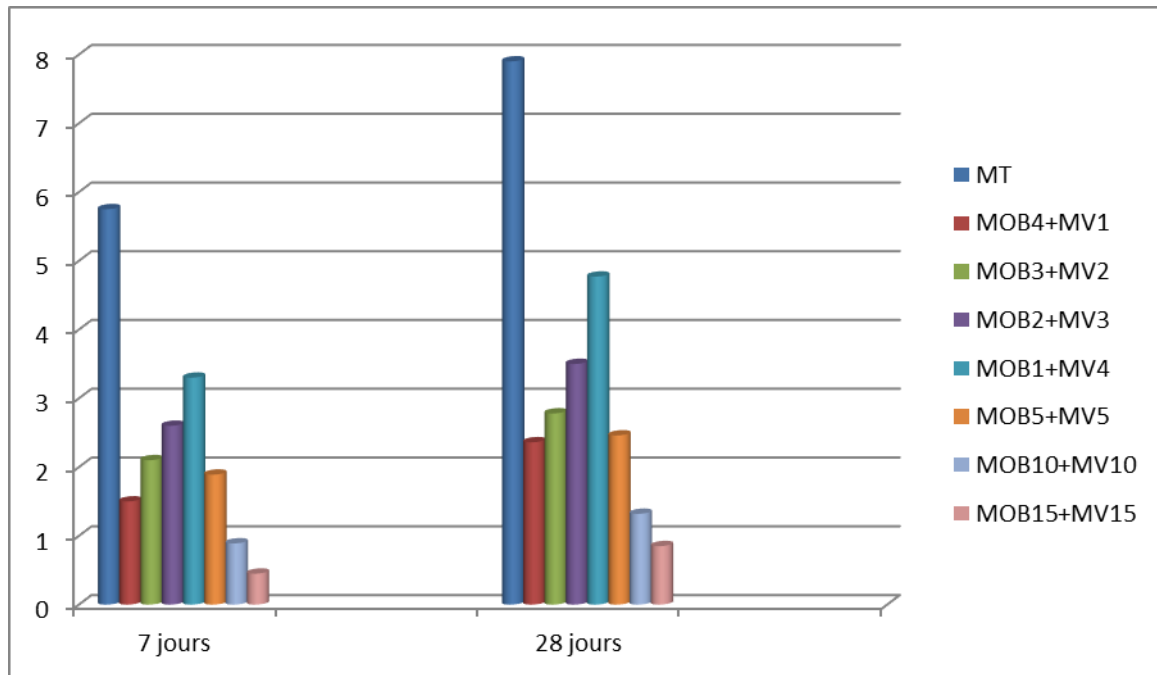
L'impact de la substitution sur la masse volumique est plus important pour les mortiers à taux de substitution élevé (MOB10 et MOB15) que pour les mortiers à faible taux de substitution. Cela s'explique par le fait qu'à des taux de substitution élevés, la proportion d'os de bœuf, matériau moins dense, devient plus importante, ce qui accentue la diminution de la masse volumique globale.

### III.2.5.2 Résistance à la traction par flexion des mortiers élaborés

Les résultats des tests d'écrasement de la résistance à la traction par flexion réalisés à 7 et 28 jours (la moyenne de trois éprouvettes) des mortiers élaborés sont illustrés dans le **Tableau III.17** et les évolutions correspondantes sont présentées sous forme d'histogrammes donnés par la **FigIII.17**.

**Tableau III.17** : Résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de verre des verres de bouteilles à différents âges.

Mortier	Résistance à la Traction par Flexion à 7 jours (MPa)	Résistance à la Traction par Flexion à 28 jours (MPa)	Évolution (7J et 28 j) (MPa)	Évolution en %
MT	5.75	7.90	2.15	37.37%
MOB4 + MV1	1.50	2.36	0.86	57.33%
MOB3 + MV2	2.10	2.78	0.68	32.38%
MOB2 + MV3	2.60	3.50	0.90	34.62%
MOB1 + MV4	3.30	4.77	1.47	44.55%
MOB5 + MV5	1.89	2.46	0.57	30.11%
MOB10+MV10	0.89	1.32	0.43	48.33%
MOB15+MV15	0.45	0.85	0.40	50.15%



*Fig.III.18 : Évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre à différents âges.*

L'analyse des résultats de l'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers en fonction du taux de substitution du mélange de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre à différents âges fait ressortir ce qui suit :

### 1. Résistance à la flexion à 7 jours

Les mortiers élaborés avec de la poudre d'os de bœuf et de la poudre de verre présentent une diminution générale de la résistance à la flexion à 7 jours par rapport au mortier de référence (MT). Cette baisse s'explique par plusieurs facteurs :

- **Dilution du ciment** : La substitution d'une partie du ciment par des matériaux moins résistants (poudre d'os de bœuf et poudre de verre) affaiblit la matrice cimentaire, réduisant sa capacité à résister aux contraintes de flexion [11].
- **Microstructure poreuse accrue** : L'introduction de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre peut augmenter la porosité de la matrice, la rendant plus fragile et sujette aux fissures, réduisant ainsi la résistance à la flexion [12].
- **Ralentissement de l'hydratation** : Ces substituts peuvent ralentir l'hydratation du ciment, retardant le développement de la résistance mécanique, ce qui se traduit par une résistance à la flexion plus faible à 7 jours [11].

L'impact de ces facteurs est plus important pour les mortiers à taux de substitution élevé (MOB10 et MOB15), car la proportion de matériaux moins résistants est plus importante.

## 2. Résistance à la flexion à 28 jours

Si tous les mortiers élaborés présentent une augmentation de la résistance à la flexion entre 7 et 28 jours, elle reste généralement inférieure à celle du mortier de référence (MT) pour la plupart des compositions. Cette évolution variable s'explique par :

- **Hydratation continue du ciment** : La progression de l'hydratation du ciment au cours du temps contribue à densifier la matrice cimentaire, améliorant sa résistance mécanique, y compris la résistance à la flexion [12].
- **Amélioration de la liaison entre les particules** : La liaison entre les particules de ciment, de poudre de verre et d'os de bœuf s'améliore avec le temps, renforçant la matrice et augmentant la résistance à la flexion [11].

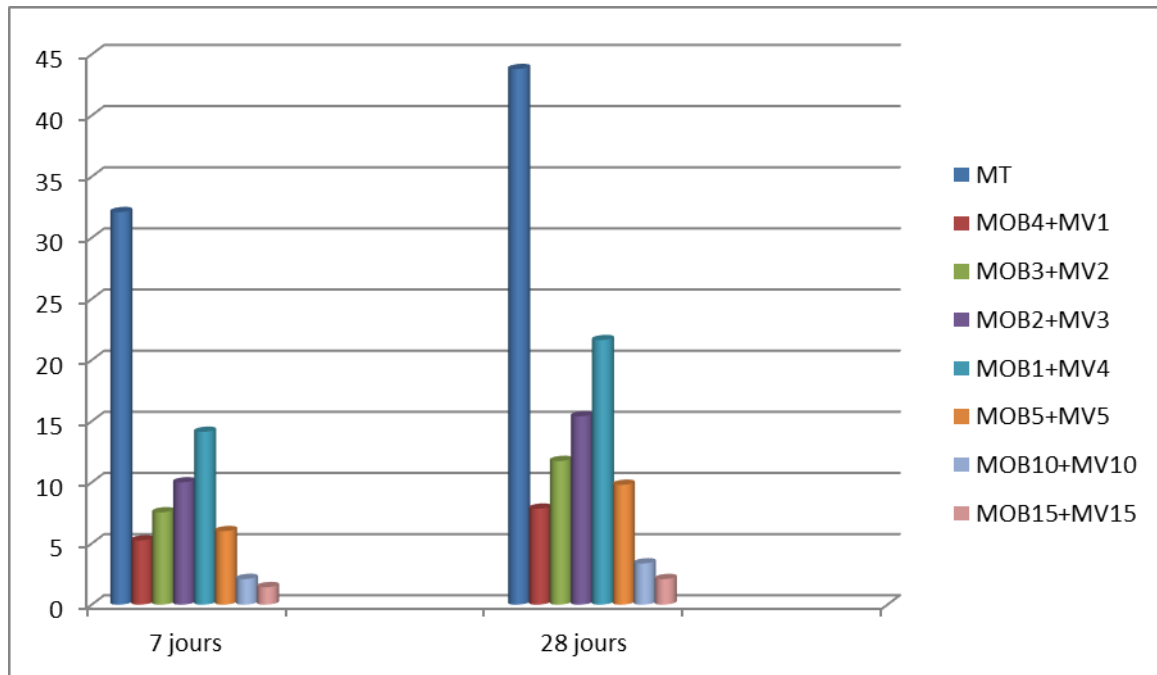
Certains mortiers à base d'os de bœuf et de poudre de verre présentent une diminution notable de la résistance à la flexion à 28 jours, suggérant un potentiel d'utilisation à long terme.

### III.2.5.3 Résistance à la compression des mortiers élaborés

Parallèlement à l'essai de la traction par flexion, des essais d'évaluation de la résistance à la compression ont été réalisés. Les résultats obtenus des mortiers élaborés sont enregistrés dans le **Tableau III.18** et les évolutions correspondantes sont présentées sous forme d'histogrammes donnés par la **Fig.III.19**.

**Tableau III.18** : Résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre de bouteilles à différents âges.

Mortier	Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	Évolution (7J et 28 j) en MPa	Pourcentage d'évolution (%)
MT	32.10	43.8	11.70	36.16%
MOB4 + MV1	5.25	7.85	2.60	49.54%
MOB3 + MV2	7.55	11.75	4.20	55.69%
MOB2 + MV3	10.00	15.40	5.40	54.00%
MOB1 + MV4	14.13	21.63	7.50	53.12%
MOB5 + MV5	6.01	9.80	3.79	63.08%
MOB10 + MV10	2.10	3.37	1.27	60.48%
MOB15 + MV15	1.43	2.09	0.66	46.23%



*Fig.III.19 : Évolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du taux de substitution de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre des bouteilles à différents âges.*

L'analyse des données de résistance à la compression des mortiers élaborés à base de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre, présentées dans le **Tableau III.18** et la Figure **III.19**, permet de compléter l'analyse de la résistance à la traction par flexion réalisée précédemment. Cette analyse met en lumière des observations importantes quant à l'impact de ces substitutions sur les propriétés mécaniques des mortiers.

### Évolution de la résistance à la compression

Tous les mortiers élaborés présentent une augmentation de la résistance à la compression entre 7 et 28 jours, comme attendu pour le béton et les mortiers cimentaires. Cette augmentation est liée à la progression de l'hydratation du ciment, qui densifie la matrice et renforce les liaisons entre les particules.

L'impact des substitutions de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre sur la résistance à la compression est variable selon le taux de substitution. On observe :

- **Augmentation notable pour les faibles taux de substitution (MOB4, MOB3, MOB2) :** Pour les faibles taux de substitution (jusqu'à 5% de poudre d'os de bœuf et 10% de poudre de verre), une diminution de la résistance à la compression est observée à 28 jours par rapport au mortier de référence (MT). Cela suggère que ces faibles substitutions peuvent avoir un effet positif sur la compacité et la microstructure du mortier, améliorant ainsi sa résistance à la compression [11, 15].

- **Diminution pour les taux de substitution élevés (MOB10, MOB15) :** Pour les taux de substitution élevés (10% et 15% de poudre d'os de bœuf et 20% de poudre de verre), une diminution de la résistance à la compression est observée à 28 jours par rapport au MT [12-13]. Cela s'explique par la dilution du ciment et l'introduction d'une microstructure poreuse plus importante, comme observé pour la résistance à la traction par flexion [11, 12].

L'évolution de la résistance à la compression diffère de celle de la résistance à la traction par flexion. La résistance à la compression augmente pour tous les mortiers entre 7 et 28 jours, tandis que la résistance à la flexion reste généralement inférieure au MT pour la plupart des compositions [13-14]. Cette différence de comportement peut s'expliquer par la nature des contraintes mises en jeu dans les deux types d'essais. La résistance à la compression reflète la capacité du matériau à résister à des forces d'écrasement, tandis que la résistance à la flexion reflète sa capacité à résister à des forces de flexion [18, 16]. Les substitutions de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre semblent affecter différemment ces deux types de résistance [14-15].

### III.3. Conclusion

En résumé, l'incorporation de poudre d'os de bœuf, de poudre de verre ou de leur mélange dans les mortiers peut avoir des impacts positifs et négatifs sur leurs propriétés mécaniques, selon le type de poudre, le taux de substitution et l'âge du mortier. Des recherches plus approfondies sont nécessaires pour optimiser l'utilisation de ces poudres de substitution et pour évaluer leur performance à long terme.

## Références bibliographiques du chapitre III

- [1]: Norme, « NF EN 196-1 Méthode d'essai de ciment pour déterminer la résistance à la compression et, facultativement, la résistance à la flexion d'un mortier ».
- [2]: Norme, « NF EN 197-1 Définit 27 ciments courants regroupés en cinq types selon leur composition ».
- [3]: Norme, « EN 1008 Spécifie les critères d'acceptation de l'eau pour une utilisation en eau de gâchage pour béton conforme à la NF EN 206-1 »
- [4]: Vogel, W. (2009). *Science of glass*. Springer.
- [5]: McMillan, P. (2002). *Glass: The story of a material*. Penguin Books.
- [6]: Jones, D., & Molony, P. (2005). *X-ray diffraction for beginners*. IUCr Books.
- [7]: Norme, « NF EN 196-1-3 Spécifie les méthodes pour déterminer la consistance normalisée, les temps de prise et la stabilité des ciments ».
- [8]: Cordeiro, G. M. C., Toledo Filho, R. D., Oliveira, M. D. A., & Silva Filho, F. C. A. (2014). Mechanical properties of cement mortars with fine bone aggregate from chicken waste. *Materials Research*, 17(2), 389-396.
- [9]: Chen, B., Li, Z., & Xiao, B. (2016). Use of waste animal bones in cement mortar and concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 116, 536-547.
- [10] : E.K. Omamegbe, O.S. Adebayo, M.T. Folorunso, "Influence of Bovine Bone Powder as Partial Replacement for Cement on the Compressive Strength of Concrete", *American Journal of Engineering Research and Development*, Vol. 3, No. 4, 2014, pp. 147-152.
- [11] :H.R. Bhuiyan, M.S. Alam, M.A. Hossain, "Effect of Bone Powder on the Strength and Durability of Cement Mortar", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 3, No. 2, 2013, pp. 237-242.
- [12]: A.M. Neville, "Properties of Concrete", 5th Edition, Pearson Education, 2011.
- [13] : S.K. Mehta, J.M. Monteiro, "Concrete: Microstructure, Properties, and Materials", 4th Edition, McGraw-Hill Education, 2014.
- [14] : F. Pacheco-Torgal, V.M. Monteiro, J.D. Granja, I. Fernandes, "A Review on the Use of Supplementary Cementitious Materials in Concrete", *Construction and Building Materials*, Vol. 116, 2016, pp. 499-521.
- [15] : M.A. Mansour, A.E. El-Feky, M.A. Khalil, "Utilization of Ground Animal Bone as a Partial Replacement for Cement in Concrete", *Journal of American Science*, Vol. 10, No. 3, 2014, pp. 21-28.
- [16] : T.R. Naik, S.S. Mulherkar, "Properties of Concrete with Bone Ash as Fine Aggregate", *Construction and Building Materials*, Vol. 19, No. 2, 2005, pp. 161-166.
- [17] : Li, Z., Ding, Z., & Tang, B. (2010). Pore structure and mechanical properties of concrete containing waste glass powder. *Cement and Concrete Research*, 40(12), 1864-1869
- [18] : A.E. El-Feky, M.A. Mansour, M.A. Khalil, "Flexural and Compressive Strength of Concrete Containing Ground Animal Bone as a Partial Replacement for Cement", *HBRC Journal of Engineering*, Vol. 6, No. 1, 2010, pp. 57-64



# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

---

L'étude réalisée sur les mortiers élaborés à l'état frais et durcis, sans et avec l'addition minérale à base de la poudre de l'os de bœuf et la poudre de verre de bouteilles a permis de noter les conclusions suivantes :

### 1. Etat de l'art :

Faire une revue sur les concepts ayant trait à la thématique traitée par notre mémoire notamment le ciment, le mortier et les déchets à base de l'os de bœuf et la poudre de verre.

### 2. Matériels et méthodes :

Prendre connaissance des outils nécessaires pour identifier les matériaux constituant pour élaborer et caractériser le mortier objet de notre étude à savoir : les normes, la procédure expérimentale à suivre pour traiter et valoriser les déchets de l'os de bœuf et les déchets de verre de bouteilles ainsi que le matériel utilisé.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont le ciment Portland CEM I 42,5 R, le sable fin 0/2 mm, l'eau potable, la poudre d'os de bœuf (MOB) et la poudre de verre de bouteilles (PV). Les mortiers ont été élaborés selon des proportions définies par le plan expérimental et leurs propriétés physico-mécaniques ont été caractérisées à 7 et 28 jours.

### 3. Résultats

#### 1) Effet du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf (MOB)

- Diminution graduelle avec l'augmentation du taux de substitution de la poudre d'os de bœuf.
- Diminution de la résistance à la traction par flexion à 7 et 28 jours pour tous les mortiers MOB par rapport au mortier de référence (MT). Diminution d'autant plus importante que le taux de substitution est élevé.
- Augmentation de la résistance à la traction par flexion entre 7 et 28 jours pour tous les mortiers, avec la meilleure performance pour MOB15.
- Légère augmentation de la résistance à la compression à 7 jours pour MOB5 et MOB10 par rapport au MT.
- Diminution de la résistance à la compression à 7 jours pour MOB15 par rapport au MT.
- Tendance similaire à 28 jours.
- Augmentation de la résistance de compression entre 7 et 28 jours de tous les mortiers MOB.
- Observations similaires à celles de la résistance à la traction par flexion.

#### 2) Effet du taux de substitution de la poudre de verre (PV)

- Diminution graduelle de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution de la poudre de verre.
- Diminution modérée de la résistance à la traction par flexion à 7 jours pour tous les taux de substitution.
- Récupération et légère augmentation de la résistance à la traction par flexion à 28 jours pour certains mortiers.
- Évolution similaire de la résistance à la traction par flexion entre 7 et 28 jours pour tous les mortiers.
- Augmentation de la résistance à la compression significative à 7 et 28 jours pour tous les taux de substitution.
- Augmentation plus importante de la résistance à la compression à 28 jours qu'à 7 jours.
- Efficacité optimale de la résistance à la compression pour les faibles taux de substitution (5% et 10%).

## Conclusion Générale

---

- 3) Effet du taux de substitution du mélange de poudre d'os de bœuf et de poudre de verre**
- Diminution significative de la masse volumique avec l'augmentation du taux de substitution du mélange poudre d'os de bœuf et poudre de verre.
  - Impact plus important sur la masse volumique pour les mortiers à taux de substitution élevé.
  - Diminution significative de la résistance à la traction par flexion à 7 jours pour tous les mortiers MOB-PV.
  - Diminution significative de la résistance à la compression à 7 jours pour tous les mortiers à base de poudre de verre.
  - Augmentation de la résistance à la compression à 28 jours pour tous les mortiers.
  - Augmentation de la résistance à la flexion à 28 jours pour certains mortiers, mais généralement inférieure au mortier de référence.

## **Résumé:**

L'étude s'intéresse à l'utilisation de poudre d'os de bœuf (PB) et de poudre de verre de bouteilles (PV) comme substituts partiels du ciment dans la fabrication de mortiers. L'objectif est d'évaluer l'impact de ces substitutions sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers à l'état frais et durci.

Des mortiers ont été élaborés avec différents taux de substitution de PB et PV. Les propriétés à l'état frais étudiées incluent la masse volumique, les propriétés à l'état durci étudiées incluent la résistance à la traction par flexion et à la compression. Les résultats ont été comparés à ceux d'un mortier de référence sans substitution (MT).

L'utilisation de la poudre d'os de bœuf et de la poudre de verre dans les mortiers peut avoir un impact positif sur la masse volumique et la résistance à la compression, mais peut affecter négativement la résistance à la flexion.

**Mots clés :** Mortier, valorisation, déchet, os de bœuf, verre des bouteilles, propriétés physico-mécaniques

## **Abstract:**

The study focuses on the use of beef bone powder (PB) and bottle glass powder (PV) as partial substitutes for cement in the manufacture of mortars. The objective is to evaluate the impact of these substitutions on the physics-mechanical properties of mortars in the fresh and hardened state.

Mortars were developed with different PB and PV substitution rates. Fresh properties studied include density, hardened properties studied include tensile flexural strength and compressive strength. The results were compared to those of a reference mortar without substitution (MT).

The use of beef bone powder and glass powder in mortars can positively impact density and compressive strength, but can negatively affect flexural strength.

**Key words:** Mortar, recovery, waste, beef bones, bottle glass, physics-mechanical properties

## ملخص:

تركز الدراسة على استخدام مسحوق عظم اللحم البقري (PB) ومسحوق الزجاج الزجاجات (PV) كبديل جزئية للأسمت في صناعة الملاط. الهدف هو تقييم تأثير هذه البدائل على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للملاط في الحالة الطازجة والمتصلبة.

تم تطوير قذائف الهاون بمعدلات استبدال PB و PV مختلفة. تشمل الخصائص الجديدة التي تمت دراستها الكثافة، وتشمل الخصائص المتصلبة التي تمت دراستها قوة الانثناء الشد وقوة الضغط. وتمت مقارنة النتائج بتلك الخاصة بالمونة المرجعية بدون استبدال (MT).

يمكن أن يؤثر استخدام مسحوق عظام اللحم البقري ومسحوق الزجاج في الملاط بشكل إيجابي على الكثافة وقوة الضغط، ولكنه يمكن أن يؤثر سلبيًا على قوة الانثناء.

**الكلمات المفتاحية:** الملاط، استرجاع، النفايات، عظام اللحم البقري، بقايا الزجاج، الخواص الفيزيائية والميكانيكية