

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

**TAZIR Akram**

---

---

**Thème : Une tentative de recherche expérimentale pour la fabrication d'un nouveau matériau de construction dont la principale source est les déchets ménagers et assimilés.**

---

---

Sous la direction de : Dr ; AIDOUUD Assia

---

Jun 2024

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# Remerciement

*Nous louons Allah et le remercions pour les bienfaits qu'Il nous a accordés et pour avoir illuminé notre chemin vers le savoir et la connaissance, et nous avons réussi dans ce travail avec succès.*

*Je remercie Dr. AIDOU Assia, enseignante au Département de Génie Civil et Hydraulique à l'Université de Guelma, qui a supervisé ce travail. Sa confiance et son indépendance envers moi, ses conseils avisés et son orientation précieuse lors des moments critiques, sans oublier son humanité exceptionnelle, son soutien constant et son expérience dont j'ai eu le privilège de bénéficier à maintes reprises.*

*Je désire exprimer toute ma reconnaissance envers ma mère et mon père pour leur soutien indéfectible et leur amour sans limite tout au long de mes années d'études. Leur présence constante et leur disponibilité à chaque instant où j'ai eu besoin d'eux ont été un pilier essentiel de mon parcours. Grâce à leurs conseils éclairés, je me tiens aujourd'hui diplômé, et je leur serai éternellement reconnaissant pour leurs efforts inlassables. Leur dévouement et leur sacrifice ont été d'une valeur inestimable, et je sais pertinemment que sans eux, je n'aurais jamais atteint ce jour. Ils demeurent à jamais gravés dans mon cœur, symboles vivants de l'amour et du soutien familial inconditionnels.*

*Je remercie l'ensemble du corps des enseignants et administratifs et surtout les techniciennes du laboratoire : M<sup>me</sup> Samira KANNAT et M<sup>me</sup> Sihem MAHBOUBI du département de génie civil et d'hydraulique, faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 mai 1945 de Guelma.*

*Je remercie également mes collègues et camarades qui m'ont aidé à achever ce travail.*

*Mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire de la cimenterie de Hadjar-soud, qui ont contribué à la réalisation de ce travail durant la période de mon stage.*

# Dédicace

*C'est avec gratitude et des mots sincères, je dédie ce modeste travail à :  
TAZIR Nafae et ZERARI F. Zohra, mes chers parents qui ont sacrifié leur vie  
pour mon succès et ont éclairé mon chemin avec leurs conseils avisés. Que  
Dieu leur accorde bonheur et longue vie.*

*À ma chère superviseure : M<sup>me</sup>. AIDOUD Assia.*

*À mes deux chères sœurs que j'aime beaucoup et à qui je souhaite bonheur et  
réussite.*

*Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont été en  
contact avec moi et qui m'ont aidé à achever ce travail.*

*TAZIR Akram*

# Résumé

# Résumé

Les déchets ménagers et autres ne cessent d'augmenter avec l'augmentation de la population. Ils menacent l'environnement et la nature, et sont considérés comme une source permanente de pollution malgré les efforts déployés par les autorités concernées pour s'en débarrasser. Chaque chercheur dans son domaine doit donc essayer de les recycler.

Le but de cette dernière étude est de tenter de mener des recherches expérimentales pour pouvoir développer un nouveau ciment en remplaçant des proportions volumiques (0%, 2.5%, 5%, 7.5% et 10%), par des cendres provenant des déchets ménagères et assimilées. Nous avons effectué ce remplacement pour trois cendres de déchets (os de poulet, os de vache et le bois), chacun séparément. La caractérisation physique, chimique et surtout mécanique a été ciblée, en plus la durabilité qu'est considérée comme un cas critique, quand doit l'étudier pour l'adaptation définitif de ce nouveau matériau.

Les résultats ont favorisé l'utilisation des cendres de vaches et même des poulets, et celle du bois préférable pour des améliorations à long terme. En utilisant l'analyse de la variance (ANOVA), nous avons obtenu les mélanges optimaux numériquement, qui été valider expérimentalement.

**Mots clés :** Tentative ; Déchet ménager ; Ciment ; Caractéristiques physiques ; Caractéristiques mécaniques ; Caractéristiques chimiques ; Durabilité ; Surface de Réponse.

# ملخص

تزداد النفايات المنزلية وغيرها بازدياد عدد السكان. وهي تهدد البيئة والطبيعة، وتُعتبر مصدرًا دائمًا للتلوث على الرغم من الجهود التي تبذلها السلطات المعنية للتخلص منها. لذا يجب على كل باحث في مجاله محاولة إعادة تدويرها.

هدف هذه الدراسة الأخيرة هو محاولة إجراء بحوث تجريبية لتطوير أسمنت جديد عن طريق استبدال نسب حجمية (0%، 2.5%، 5%، 7.5% و10%) برماد النفايات المنزلية وما شابهها. قمنا بتنفيذ هذا الاستبدال لثلاثة أنواع من رماد النفايات (عظام الدجاج، عظام البقر والخشب)، كل منها على حدة. تم التركيز على التوصيف الفيزيائي والكيميائي والميكانيكي بشكل خاص، بالإضافة إلى المتانة التي تُعتبر حالة حرجة، ويجب دراستها للتكيف النهائي لهذه المواد الجديدة.

أفضلت النتائج استخدام رماد البقر وحتى رماد الدجاج، وكذلك استخدام الخشب لتحسينات طويلة الأمد. باستخدام تحليل التباين (ANOVA)، حصلنا على المزج الأمثل عددياً، الذي تم التحقق منه تجريبياً.

كلمات مفتاحية: محاولة، نفايات منزلية، أسمنت، خصائص فيزيائية، خصائص ميكانيكية، خصائص كيميائية، متانة، سطح الاستجابة

# Abstract

Household waste and others continue to increase with the population growth. They threaten the environment and nature and are considered a permanent source of pollution despite the efforts made by the relevant authorities to dispose of them. Therefore, every researcher in their field should try to recycle them.

The aim of this latest study is to attempt experimental research to develop a new cement by replacing volumetric proportions (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%) with ashes from household and similar waste. We replaced this for three waste ashes (chicken bones, cow bones, and wood), each separately. Physical, chemical, and especially mechanical characterization was targeted, in addition to durability, which is considered a critical case that must be studied for the definitive adaptation of this new material.

The results favored the use of cow ashes and even chicken ashes, and wood was preferable for long-term improvements. Using analysis of variance (ANOVA), we obtained numerically optimal blends, which were experimentally validated.

**Keywords:** Attempt; Household waste; Cement; Physical characteristics; Mechanical characteristics; Chemical characteristics; Durability; Response Surface.

# Sommaire

Résumé

ملخص

Abstract

Sommaire

Notions et Abréviations.....	i
Liste des tableaux.....	iii
Liste des figures.....	v
Liste des équations.....	ix
Introduction générale.....	1

## **CHAPITRE I : Recherche bibliographique**

I.1. Introduction.....	3
I.2. Le ciment.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.2.2. Composition du ciment.....	4
I.2.3. Les étapes de fabrication du ciment.....	5
I.2.3.1. Principe de fabrication.....	5
I.2.4. Procédés de fabrication du ciment.....	10
I.2.4.1. En voie humide.....	10
I.2.4.2. En voie semi-humide.....	10
I.2.4.3. En voie semi-sèche.....	10
I.2.4.4. En voie sèche.....	10
I.2.5. Les différents types de ciment.....	10
I.2.6. Domaine d'utilisation des différents ciments.....	11
I.2.7. Hydratation du ciment.....	12
I.2.7.1. Hydratation des silicates.....	12
I.2.7.2. Hydratation des aluminates.....	12
I.2.7.3. Mécanismes d'hydratation d'un ciment.....	13

I.3. Généralité sur les déchets .....	14
I.3.1. Définition .....	14
I.3.2. Gestion des déchets .....	15
I.3.3. Textes législatifs .....	15
I.3.4. Classification des déchets .....	16
I.4. Déchets ménagers et assimilés (DMA) .....	17
I.4.1. La quantité des déchets ménagers en Algérie .....	17
I.5. Impact des déchets ménagers et assimilés .....	18
I.6. La décharge publique .....	18
I.7. Valorisation des déchets ménagers et assimilés .....	19
I.7.1. Quelques méthodes de valorisation .....	19
I.7.2. Valorisation dans le domaine du génie civil .....	19
I.7.2.1. Définition de la biomasse .....	20
I.7.2.2. La biomasse des os des poulets .....	21
I.7.2.3. La biomasse des os des vaches .....	21
I.7.2.4. La biomasse des bois .....	22
I.8. Valorisation des trois déchets étudiés .....	23
I.9. Conclusion .....	27

## **CHAPITRE II : Matériaux et méthodes expérimentales**

II.1. Introduction .....	28
II.2. Matériaux utilisés .....	28
II.2.1. Le ciment .....	28
II.2.2. Le sable .....	28
II.2.3. L'eau .....	29
II.2.4. Les Déchets .....	30
II.2.4.1. Préparation des déchets .....	30
II.2.4.2. Préparation des nouveaux ciments .....	32
II.3. Caractéristiques des matériaux et des ciments utilisés .....	33
II.3.1. Description visuelle .....	33
II.3.2. Caractérisation physique .....	33
II.3.2.1. Masse volumique apparente .....	33
II.3.2.2. Masse volumique absolue .....	34
II.3.2.3. Analyse granulométrique à diffraction laser .....	35

II.3.2.4. Surface spécifique de Blaine (SSB) .....	36
II.3.2.5. Consistance normale des ciments .....	36
II.3.2.6. Temps de prise .....	37
II.3.3. Caractérisation chimique .....	38
II.3.3.1. Compositions chimiques par fluorescence X .....	38
II.3.3.2. Perte au feu (PAF) .....	39
II.4. Formulation et caractérisation des nouveaux mortiers .....	40
II.4.1. Confection des éprouvettes (malaxage, mise en place et conservation) .....	40
II.4.1.2. Confection des éprouvettes .....	42
II.4.1.3. Conservation des éprouvettes .....	42
II.4.2. Caractérisation à l'état frais .....	44
II.4.2.1. Masse volumique apparente .....	44
II.4.2.1. Contrôle de la plasticité (étalement) .....	44
II.4.3. Caractérisation à l'état durci .....	45
II.4.3.1. Caractérisation physique .....	45
II.4.3.2. Caractérisation mécanique .....	47
II.4.3.3. Durabilité .....	50
II.5. Méthode du plan d'expérience (optimisation du mélange) .....	51
II.5.1. Choix du modèle .....	51
II.5.2. Validation du modèle .....	51
II.6. Conclusion .....	52

### **CHAPITRE III : Caractérisation et comparaison des ciments élaborés**

III.1. Introduction .....	53
III.2.1. Caractérisation physique .....	53
III.2.1.1. Masse volumique apparente .....	53
III.2.1.2. Masse volumique absolue .....	54
III.2.1.3. Analyse granulométrique .....	54
III.2.1.4. Surface spécifique de Blaine (SSB) .....	55
III.2.1.5. Consistance normale des ciments élaborés .....	55
III.2.1.6. Temps de prise .....	56
III.2.2. Caractérisation chimique .....	57
III.2.2.1. Compositions chimiques par fluorescence X .....	57
III.2.2.2. Perte au feu (PAF) .....	59

III.2.2.3. Indices d'hydraulicité .....	60
III.3. Caractérisation des nouveaux mortiers .....	61
III.3.1. À l'état frais .....	61
III.3.1.1. Masse volumique apparente .....	61
III.3.1.2. L'étalement .....	61
III.3.2. À l'état durci .....	62
III.3.2.1. Caractérisation physique .....	62
III.3.2.2. Caractérisation mécanique .....	68
III.3.2.3. Durabilité .....	72
III.4. Elaboration d'un ciment optimal .....	73
III.4.1. Modèle utilisé .....	73
III.4.2. Validation du modèle .....	75
III.4.2.1. Résultats expérimentaux de validation du modèle .....	76
III.5. Conclusion .....	76
Conclusion générale et perspectives .....	77
Références bibliographiques .....	80
ANNEXE 1 .....	83
ANNEXE 2 .....	91

# Notions et Abréviations

DMA :	Déchets ménagers et assimilés.
EN :	Norme Européenne.
NA :	Norme Algérienne.
NF :	Norme Française.
SN :	Sable normalise.
CPA :	Ciment Portland Artificiel.
COP :	Cendre d'Os de Poulet.
COV :	Cendre d'Os de Vache.
CB :	Cendre de Bois.
LGCH :	Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique.
$M_1$ :	La Masse l'échantillon de ciment.
$V_1$ :	Volume initial de l'alcool chirurgical 70°.
$V_2$ :	Volume après l'introduction de l'échantillon de ciment.
SSB :	Surface Spécifique de Blaine.
PAF :	Perte Au Feu.
D1 et D2 :	Diamètres Perpendiculaires [cm].
F :	La valeur d'étalement [cm].
$M_{\text{eau}}$ :	Masse de l'éprouvette sous l'eau [g].
$M_{\text{air}}$ :	Masse de l'éprouvette imbibée [g].
$M_{\text{sec}}$ :	Masse de l'éprouvette sèche [g].
P :	La porosité accessible à l'eau [%].
Ab :	L'absorption par immersion totale [%].
MVH :	La masse volumique humide [g/cm <sup>3</sup> ].
MVS :	La masse volumique sèche [g/cm <sup>3</sup> ].
V :	Le volume de l'éprouvette.
$\rho_w$ :	La masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 kg/m <sup>3</sup> .
I :	Indices d'hydraulicité.

V :	Vitesse d'ondes ultrasonique [m/s].
$\gamma$ :	La masse volumique du béton exprimé [Kg/m <sup>3</sup> ].
$\nu$ :	Coefficient de poisson du béton.
E <sub>d</sub> :	Le module d'élasticité dynamique [MPa].
R <sub>f</sub> :	Résistance à la flexion en [MPa].
F :	La charge appliquée à la rupture [N].
L :	La distance entre les appuis [mm].
B :	le coté de la section carrée de l'éprouvette [mm].
R <sub>c</sub> :	La résistance à la compression en [MPa].

# Liste des tableaux

<b>Réf tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	Les différents types de ciment	<b>11</b>
<b>Tableau I.2</b>	Quelques travaux récents sur l'utilisation des déchets (os des poulets, os de vache et bois)	<b>23</b>
<b>Tableau II.1</b>	Composition granulométrique du sable normalisé	<b>29</b>
<b>Tableau II.2</b>	Désignation et dosage des ciments élaborés	<b>33</b>
<b>Tableau II.3</b>	Composition des mortiers étudiés	<b>40</b>
<b>Tableau II.4</b>	Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion	<b>48</b>
<b>Tableau II.5</b>	Composition des mélanges optimaux étudiés	<b>51</b>
<b>Tableau III.1</b>	Masse volumique apparente des déchets	<b>53</b>
<b>Tableau III.2</b>	Masse volumique absolue des déchets	<b>54</b>
<b>Tableau III.3</b>	Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés	<b>55</b>
<b>Tableau III.4</b>	Consistance normale des ciments élaborés	<b>55</b>
<b>Tableau III.5</b>	Temps de prise des ciments élaborés	<b>56</b>
<b>Tableau III.6</b>	Composition chimique des cendres utilisés	<b>58</b>
<b>Tableau III.7</b>	Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)	<b>58</b>

<b>Tableau III.8</b>	Classification selon le degré de réactivité	<b>59</b>
<b>Tableau III.9</b>	Perte au feu des ciments élaborés	<b>60</b>
<b>Tableau III.10</b>	Indice d'hydraulicité des ciments élaborés	<b>60</b>
<b>Tableau III.11</b>	Masse volumique apparente des mortiers normalisés à l'état frais	<b>61</b>
<b>Tableau III.12</b>	Etalement des mortiers normalisés de ciments élaborés	<b>62</b>
<b>Tableau III.13</b>	Perte de masse des mortiers soumises à l'acide sulfurique	<b>72</b>
<b>Tableau III.14</b>	Analyse de l'ANOVA du modèle	<b>74</b>
<b>Tableau III.15</b>	Statistiques d'ajustement des réponses	<b>74</b>
<b>Tableau III.16</b>	Les équations du modèle quadratique	<b>74</b>
<b>Tableau III.17</b>	Ciblassions des mélanges de validation	<b>75</b>
<b>Tableau III.18</b>	Résultats des premières solutions sélectionnées des mélanges de validation	<b>76</b>
<b>Tableau III.19</b>	Résultats expérimentaux des mélanges de validation	<b>76</b>

# Liste des figures

<b>Réf figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Le ciment, un liant hydraulique	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b>	Stades de fabrication du ciment	<b>5</b>
<b>Figure I.3</b>	Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment	<b>6</b>
<b>Figure I.4</b>	Extraction de la matière première	<b>7</b>
<b>Figure I.5</b>	Hall de pré-homogénéisation	<b>7</b>
<b>Figure I.6</b>	Broyeur cru	<b>8</b>
<b>Figure I.7</b>	Four rotatif et préchauffage	<b>8</b>
<b>Figure I.8</b>	Silo de stockage du clinker	<b>9</b>
<b>Figure I.9</b>	Broyeur du ciment	<b>9</b>
<b>Figure I.10</b>	Courbe de calorimétrie isotherme d'un ciment	<b>13</b>
<b>Figure I.11</b>	Recyclage des déchets	<b>15</b>
<b>Figure II.1</b>	Ciment CEM I 42.5 R	<b>28</b>
<b>Figure II.2</b>	Sable normalise ISO 679	<b>29</b>
<b>Figure II.3</b>	Os de poulet	<b>30</b>
<b>Figure II.4</b>	Charbon d'os de poulet	<b>30</b>
<b>Figure II.5</b>	Cendre d'os de poulet	<b>31</b>

<b>Figure II.6</b>	Os de vache	<b>31</b>
<b>Figure II.7</b>	Cendre d'os de vache	<b>32</b>
<b>Figure II.8</b>	Cendre de bois	<b>32</b>
<b>Figure II.9</b>	Les cendres des déchets	<b>33</b>
<b>Figure II.10</b>	Essai de la masse volumique apparente	<b>34</b>
<b>Figure II.11</b>	Essai de la masse volumique absolue	<b>35</b>
<b>Figure II.12</b>	Description d'un appareil de mesure granulométrique	<b>35</b>
<b>Figure II.13</b>	Appareil d'analyse granulométrique : Mastersizer 2000 Malvern	<b>36</b>
<b>Figure II.14</b>	Appareil de Blaine (SSB)	<b>36</b>
<b>Figure II.15</b>	Essai de la consistance normale des ciments	<b>37</b>
<b>Figure II.16</b>	Prisomètre (Vicat automatique)	<b>38</b>
<b>Figure II.17</b>	Préparation de l'échantillon	<b>39</b>
<b>Figure II.18</b>	Four de calcination pour PAF	<b>39</b>
<b>Figure III.19</b>	Les étapes de préparation de la pâte du mortier normalisé	<b>41</b>
<b>Figure II.20</b>	Les étapes de préparation de la pâte des nouveaux mortiers	<b>41</b>
<b>Figure II.21</b>	Lubrification des moules (4 x 4 x 16) cm <sup>3</sup>	<b>42</b>
<b>Figure II.22</b>	Vibration des moules	<b>42</b>
<b>Figure II.23</b>	Dernière vibration et rasage	<b>42</b>

<b>Figure II.24</b>	Démolition des éprouvettes	<b>43</b>
<b>Figure II.25</b>	Cure des éprouvettes à l'eau pendant (2, 7, 28 et 56) jours	<b>43</b>
<b>Figure II.26</b>	Tests d'étalement	<b>45</b>
<b>Figure II.27</b>	Balance hydrostatique	<b>46</b>
<b>Figure II.28</b>	Essai de mesure directe du temps de propagation d'onde par Ultrasons	<b>48</b>
<b>Figure II.29</b>	Machine et dispositif de l'essai de la traction par flexion	<b>49</b>
<b>Figure II.30</b>	Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression	<b>50</b>
<b>Figure II.31</b>	La bouteille de l'Acide H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> utilisée	<b>50</b>
<b>Figure II.32</b>	Eprouvettes soumises à l'acide sulfurique H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (5%)	<b>51</b>
<b>Figure III.1</b>	Courbes granulométriques des trois cendres et du CPA	<b>52</b>
<b>Figure III.2</b>	Temps et fin de prise des ciments élaborés	<b>57</b>
<b>Figure III.3</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur l'absorption par immersion totale des mortiers	<b>63</b>
<b>Figure III.4</b>	Evolution de l'absorption par immersion totale des mortiers en fonction du temps	<b>63</b>
<b>Figure III.5</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la porosité accessible à l'eau des mortiers	<b>64</b>
<b>Figure III.6</b>	Evolution de la porosité accessible à l'eau des mortiers en fonction du temps	<b>65</b>
<b>Figure III.7</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la MVH des mortiers	<b>66</b>

<b>Figure III.8</b>	Evolution de la masse volumique humide des mortiers en fonction du temps	<b>66</b>
<b>Figure III.9</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la MVS des mortiers	<b>67</b>
<b>Figure III.10</b>	Evolution de la masse volumique sèche des mortiers en fonction du temps	<b>67</b>
<b>Figure III.11</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur le module d'élasticité dynamique des mortiers	<b>68</b>
<b>Figure III.12</b>	Evolution du module d'élasticité dynamique des mortiers en fonction du temps	<b>69</b>
<b>Figure III.13</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la résistance à la flexion des mortiers	<b>70</b>
<b>Figure III.14</b>	Evolution de la résistance de la flexion des mortiers en fonction du temps	<b>70</b>
<b>Figure III.15</b>	Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la résistance à la compression des mortiers	<b>71</b>
<b>Figure III.16</b>	Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du temps	<b>72</b>
<b>Figure III.17</b>	Dégradation des différents mortiers élaborés	<b>73</b>

# Liste des équations

Réf équation	Titre	Page
<b>1</b>	La masse volumique apparente [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>34</b>
<b>2</b>	La masse volumique absolue [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>34</b>
<b>3</b>	La valeur d'étalement [cm]	<b>44</b>
<b>4</b>	La porosité accessible à l'eau [%]	<b>46</b>
<b>5</b>	L'absorption d'eau par immersion [%]	<b>46</b>
<b>6</b>	La masse volumique humide [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>47</b>
<b>7</b>	La masse volumique sèche [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>47</b>
<b>8</b>	Le volume de l'éprouvette [cm <sup>3</sup> ]	<b>47</b>
<b>9</b>	Le module d'élasticité dynamique [MPa]	<b>48</b>
<b>10</b>	Résistance à la flexion en [MPa]	<b>49</b>
<b>11</b>	L'indice d'hydraulicité	<b>60</b>
<b>12</b>	Equation de la résistance à la compression	<b>74</b>
<b>13</b>	Equation du module d'élasticité dynamique	<b>75</b>
<b>14</b>	Equation de la résistance à la flexion	<b>75</b>

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

Le problème des déchets ménagers constitue l'un des plus grands défis de notre société, en raison de l'augmentation de la population, de la croissance de la production et de la consommation, ce qui entraîne une utilisation intensive des ressources et le rejet de quantités énormes de déchets dans l'environnement. Avec le temps, ces déchets ont provoqué de graves impacts négatifs sur notre environnement. Pour atténuer ces effets, il est crucial d'exploiter et de valoriser ces déchets dans divers domaines.

Les déchets ménagers représentent une source importante de déchets en Algérie et dans le monde entier. Ils incluent des restes d'animaux, tels que les poulets et les bovins, ainsi que des débris de bois provenant de meubles et d'autres matériaux en bois jetés. Les déchets d'os d'animaux, considérés comme une source significative de déchets provenant de l'industrie de la viande, peuvent être valorisés de plusieurs manières : production d'engrais organiques, production de fumier animal, fabrication de gélatine et recyclage pour la production de matériaux comme le ciment et le béton.

Les déchets de bois représentent une part importante des déchets de construction et de démolition. Ils peuvent être réutilisés dans la fabrication de panneaux de particules, la production de papier, la génération d'énergie thermique ou électrique, ainsi que dans l'industrie du ciment et du béton comme matériau supplémentaire. L'utilisation des déchets domestiques dans divers domaines offre des avantages environnementaux et économiques, en contribuant à la réduction des déchets, à la promotion du développement durable et à l'amélioration des performances économiques.

L'utilisation et la valorisation des déchets dans les matériaux de construction offrent des perspectives prometteuses pour une gestion plus durable des ressources et une réduction significative de l'impact environnemental. Dans le domaine de la construction et du génie civil, l'exploitation de ces déchets est devenue une question très intéressante et attire l'attention des ingénieurs et des investisseurs. Ces déchets sont utilisés dans le développement du ciment et du béton, car ils sont moins coûteux et mieux adaptés aux conditions locales.

Dans ce travail de fin d'études, nous nous intéressons à l'utilisation des cendres issues de deux types de déchets ménagers, tels que les os d'animaux (poulet et vache), ainsi que d'un déchet assimilé, à savoir le bois. Ces cendres, après avoir été soigneusement broyées, sont utilisées comme substitution volumique du ciment CPA, dans le but de valoriser ces déchets. Nous envisageons également l'utilisation des cendres provenant de la décharge publique pour la fabrication de différents types de ciments. Les teneurs en cendres utilisées sont de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% et 10%. Une caractérisation physique et chimique des éco-ciments élaborés est indispensable, ainsi qu'une caractérisation physique et mécanique des mortiers correspondants à différents âges.

Le mémoire est structuré en trois chapitres.

Le premier chapitre consiste en une analyse bibliographique du thème de l'étude, incluant la méthode de fabrication du ciment (composition, classification, normes, fabrication et hydratation), ainsi que les résultats de recherches sur la valorisation des déchets d'os de poulet, de bœuf et de menuiserie dans la production de ciment et de béton, en plus des impacts potentiels des additions brûlées.

Le deuxième chapitre détaille la procédure expérimentale utilisée, y compris la préparation des échantillons et le mode opératoire suivi pour la caractérisation du produit final.

Le troisième chapitre présente les résultats complets des essais de caractérisation effectués, notamment la caractérisation chimique, physique et mécanique. Une discussion et une comparaison de ces résultats avec ceux de l'échantillon de référence sont également incluses.

En conclusion, le manuscrit se termine par une synthèse générale récapitulant les résultats obtenus et les principaux axes pour les futures études expérimentales. Deux annexes regroupent les fiches techniques des matériaux utilisés et les tableaux des résultats.

# CHAPITRE I

## Recherche bibliographique

## **CHAPITRE I : Recherche bibliographique**

### **I.1. Introduction :**

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés et les plus coûteux à fabriquer. En plus de l'utilisation excessive des ressources naturelles et de l'énergie à cet effet. Il a donc fallu rechercher des moyens de fabrication peu coûteux, ni naturels ni énergétiques. Pour faire face au problème des déchets et de tout ce qui en résulte, notamment les déchets ménagers et assimilés, il convient de considérer ces derniers comme une solution alternative, même partielle, au ciment.

### **I.2. Le ciment :**

#### **I.2.1. Définition :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le ciment gâché et mélangé avec des granulats et de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve une ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance donnés et aussi présenter une stabilité de volume à longue échéance.

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation de silicates de calcium, mais d'autres composés chimiques peuvent également intervenir dans le processus de durcissement, tels que, par exemple, les aluminates. La somme des proportions d'oxyde de calcium (CaO) et de dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse, dans les ciments.

Les ciments sont constitués de petits grains individuels de différentes matières, mais ils doivent être statistiquement homogènes en composition. Un haut degré de régularité dans toutes les propriétés du ciment est obtenu par un procédé continu de production en masse et, en particulier, par des procédés convenables de broyage et d'homogénéisation. [1]



**Figure I.1 :** Le ciment, un liant hydraulique

### **I.2.2. Composition du ciment :**

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles.

Les argiles et calcaires sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker portland (Figure I.2)

Les oxydes se combinent en début de fusion pour former des silicates et aluminates hydrauliques :

- Le silicate tricalcique :  $3\text{CaO SiO}_2$ , que l'on écrit C<sub>3</sub>S et qui représente 50 à 70 % du clinker,
- Le silicate bicalcique :  $2\text{CaO SiO}_2$ , que l'on écrit C<sub>2</sub>S (10 à 30 %),
- L'aluminate tricalcique :  $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3$ , que l'on écrit C<sub>3</sub>A (2 à 15 %),
- L'alumino-ferrite tétracalcique :  $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3$  que l'on écrit C<sub>4</sub>AF (5 à 15%).

Le clinker, auquel on ajoute quelques pourcentages de gypse, est ensuite finement broyé (moins de 1/10<sup>e</sup> de mm) de manière à obtenir une poudre dont la masse volumique absolue varie de 3,0 à 3,2 g/cm<sup>3</sup>. [2]

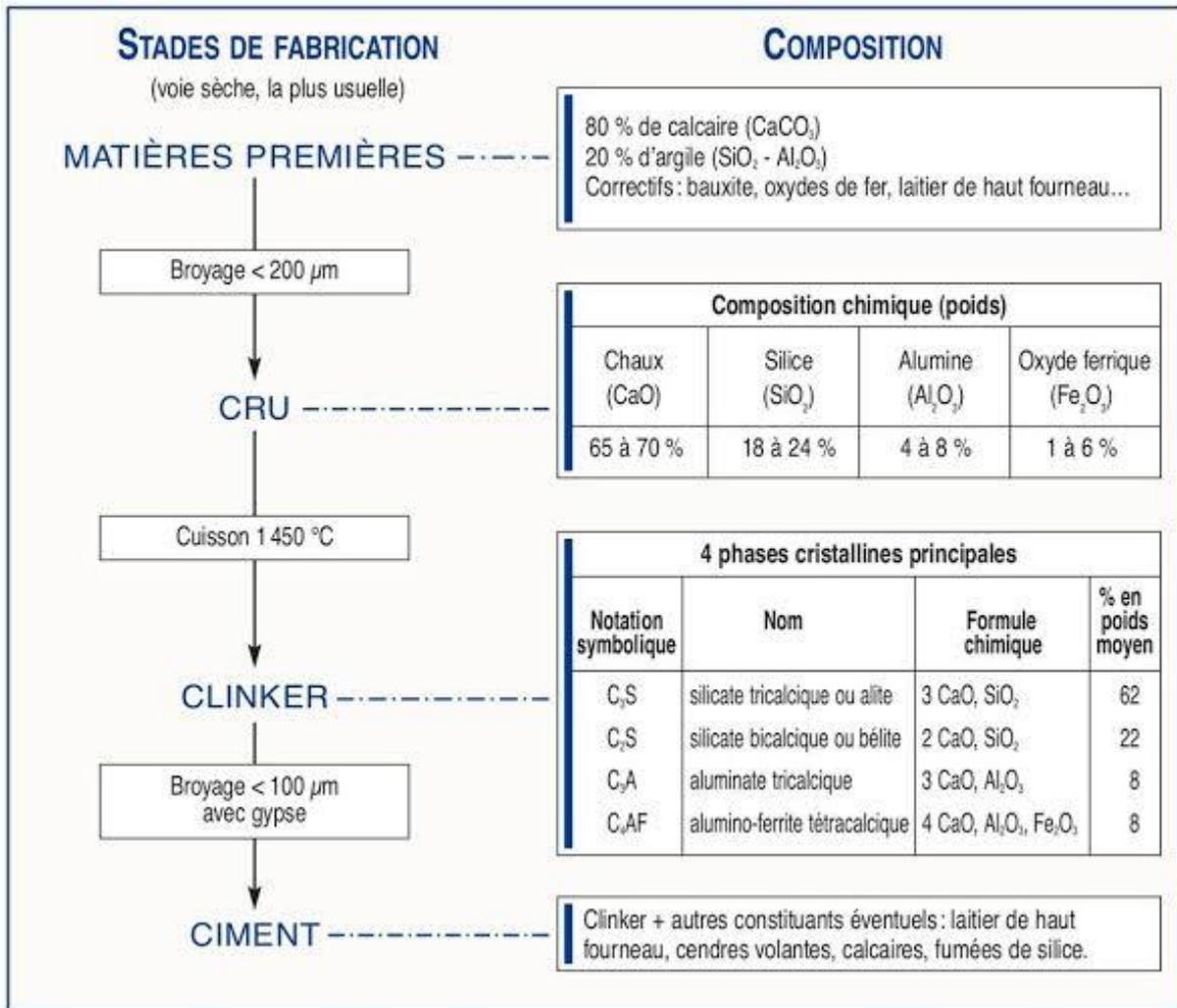


Figure I.2 : Stades de fabrication du ciment

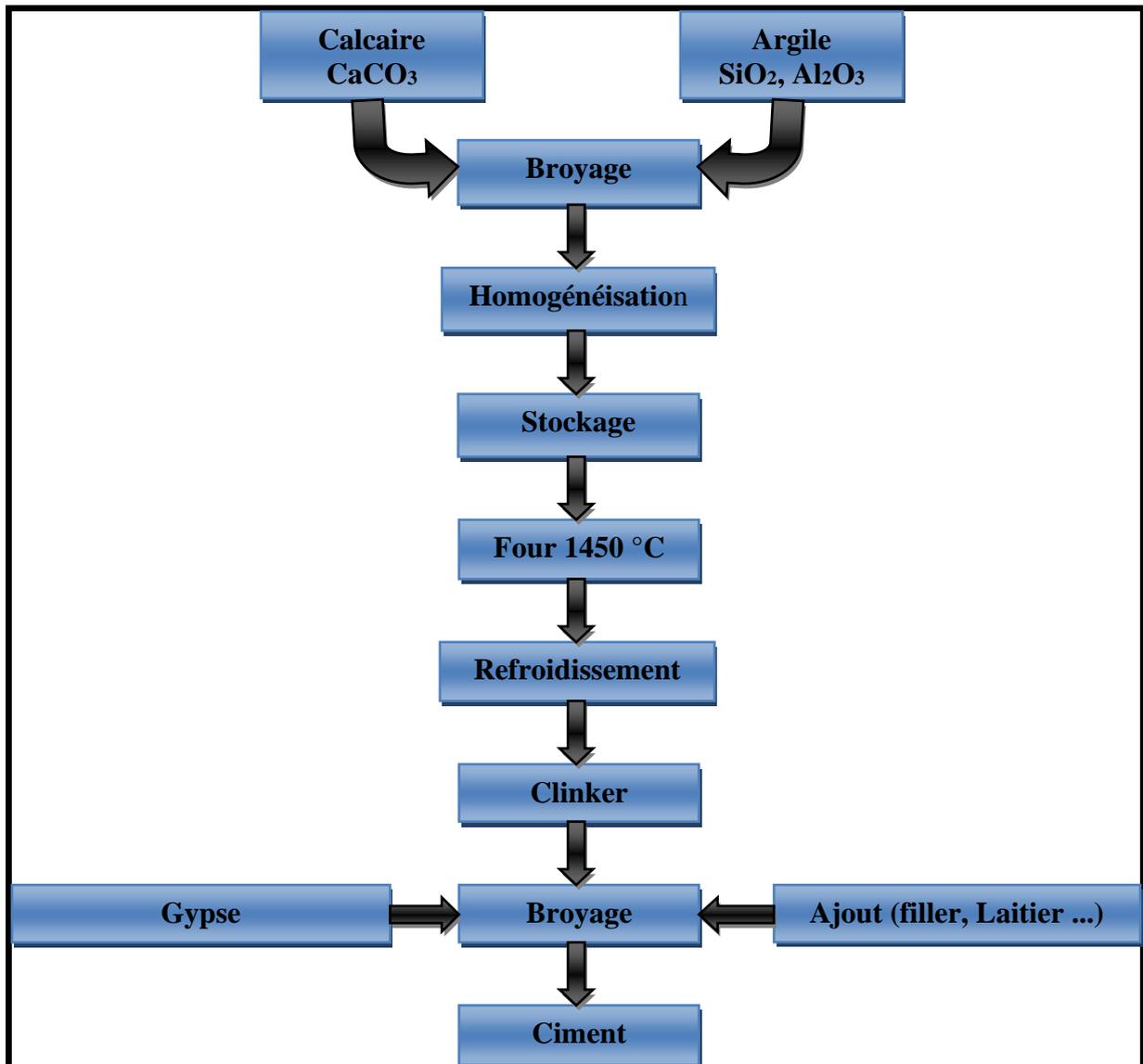
### I.2.3. Les étapes de fabrication du ciment :

#### I.2.3.1. Principe de fabrication :

La fabrication de ciment, Elle est basée sur les trois opérations suivantes :

- ❖ Préparation de cru.
- ❖ Cuisson.
- ❖ Broyage et conditionnement. [3]

**I.2.3.2. Technique de fabrication :**



**Figure I.3 :** Organigramme de la chaîne de fabrication du ciment

**1. Extraction :**

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps. [4]

**2. Concassage :**

Le concassage, fait sur les lieux de l'extraction, réduit la granulométrie des matériaux à environ 25 mm. [5]



**Figure I.4 :** Extraction de la matière première

### **3. Pré-homogénéisation :**

La matière première est étendue en couches horizontales successives, qui finissent par former un tas, dont la composition globale est celle désirée. Les couches sont ensuite reprises verticalement, ce qui permet de prélever en permanence une matière de composition identique.

La matière crue est reprise dans les tas de pré-homogénéisation par des roues pelles la pré-homogénéisation de la matière première se fait à l'aide d'un bras râteau, tournant autour d'un axe dans un hall. [3]



**Figure I.5 :** Hall de pré-homogénéisation

### **4. Broyage du cru :**

Le but de broyage est la conversion de grosses particules en poudre.

Après avoir déterminé par une consigne la teneur des différents composants, les trémies doseurs envoient le mélange obtenu dans le broyeur vertical par une bande de transport. La farine, dont le principe d'obtention (le broyage). [3]



**Figure I.6 : Broyeur cru**

### **5. Filtration (Séparation Gaz-matière) :**

Avant le stockage passant par quatre cyclones pour séparer la matière crue du gaz et poussière.

### **6. Stockage et Homogénéisation :**

Dans le silo, deux types de processus se produisent, qui sont un bon mélange de la matière crue et un stockage.

### **7. Préchauffage :**

La tour de préchauffage est équipée de cinq étages de cyclones qui permettent de préchauffer la matière à environ 800°C, de la déshydrater car la farine (autre nom donné à la matière) tombe par gravité tandis que les gaz remontent la tour pour se diriger vers le filtre. [3]

### **8. Four rotatif :**

Une fois le cru préparé, il sera acheminé directement à l'entrée du four, qui est souvent constitué d'un grand cylindre d'environ 3 à 6m de diamètre et de 50 à 150m de longueur, incliné par rapport à l'horizontale de 3 à 5% de façon à permettre une descente progressive des matières en rotation autour de son axe. La partie inférieure du four est équipée d'une flamme entretenant une température de l'ordre de 1450°C ; en s'approchant de cette zone, le cru subi des transformations successives qui le conduisent au produit fini qui est le clinker. [3]



**Figure I.7 : Four rotatif et préchauffage**

### **9. Refroidisseur :**

A la sortie du four, le clinker tombe sur une grille de refroidissement rapide à travers laquelle est soufflé par l'air froid (la trempe). Le refroidissement après cuisson joue un rôle important sur la forme et la réactivité des constituants du clinker. [2]

### **10. Stockage du clinker :**

Après refroidissement, le clinker se présente sous la forme de grosses pierres et est dirigé vers le silo par tapis métallique pour le stocké. [4]



**Figure I.8 :** Silo de stockage du clinker

### **11. Broyage du clinker :**

Le clinker additionné de gypse (retardateur de prise) et éventuellement d'ajouts (calcaire, pouzzolane ...) sont broyés de manière à obtenir des particules de taille plus fines. Les modes de broyage utilisés en cimenterie sont adaptés au caractère dur, et abrasif du clinker. [4]



**Figure I.9 :** Broyeur du ciment

### **12. Stockage du ciment :**

Après le broyage de clinker, gypse et ajout est dirigé le produit fini vers le silo de stockage.

### **13. Ensachage et expédition :**

Le produit est commercialisé de deux manières en sacs et en vrac.

**I.2.4. Procédés de fabrication du ciment :**

Il y a quatre méthodes de fabrication qui existe dans le milieu cimentaire est qui sont :

**I.2.4.1. En voie humide :**

Cette voie est utilisée depuis longtemps, la plus simple mais qui requiert le plus d'énergie. Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont broyés finement et mélangés avec l'eau de façon à constituer une pâte assez liquide (environ 42 % d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 mètres de diamètres. Elle est continuellement malaxée et homogénéisée, ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite acheminée à l'entrée d'un four rotatif. Le clinker, à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs pour subir une trempe.

Quelle que soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on obtient un même clinker qui est encore chaud. [6]

**I.2.4.2. En voie semi-humide :**

Dans la voie semi-humide, la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres presses. Le gâteau de filtre-pressé est ensuite extrudé sous forme de granules et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru. [7]

**I.2.4.3. En voie semi-sèche :**

Dans la voie semi-sèche, la farine mélangée à de l'eau forme des granules qui sont introduites dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons. [7]

**I.2.4.4. En voie sèche :**

La matière première broyée et séchée passera d'abord dans un préchauffeur à cyclone avec ou sans précalcinateur (de type AT 'air- th rough' ou AS 'air séparé'), puis dans un four tubulaire de 80 m. C'est le procédé le plus récent et le plus répandu car il est moins énergivore, mais il nécessite la mise en œuvre de moyen importants de captation des poussières (électro filtres, filtres cyclones et multi cyclones, dépoussiéreurs électrostatiques...). [8]

**I.2.5. Les différents types de ciment :**

Les ciments peuvent être classés suivant leur résistance, leur composition (Tableau I.1).

Ainsi, il est divisé en plusieurs catégories :

- **Le CEM I (ciment Portland)** est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.
- **Les CEM II A ou B (ciment Portland composé)** ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.

- **Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau)** sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- **Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzzolanique)** sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques. Absents en France.
- **Les CEM V A ou B (ciment composé)** ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants. [12]

**Tableau I.1 : Les différents types de ciment**

Désignations	Notation	Clinker	Autres constituants	Constituants secondaires
<b>Ciment Portland</b>	CPA -CEM I	95 - 100	---	0-5
<b>Ciment Portland composé</b>	CPJ-CEM II/A	80 - 94	6 - 20	---
	CPJ-CEM II/B	65 - 79	21 - 35	---
<b>Ciment de haut fourneau</b>	CHF-CEM III/A	35 - 64	36 - 65	0 - 5
	CHF-CEM III/B	20 - 34	66 - 80	0 - 5
	CLK-CEM III/C	5 - 19	81 - 95	0 - 5
<b>Ciment pouzzolanique</b>	CPZ-CEM IV/A	65 - 89	11 - 35	0 - 5
	CEM-CPZ IV/B	45 - 64	36 - 55	0 - 5
<b>Ciment composé</b>	CLC-CEM V/A	40 - 64	18 - 30	0 - 5
	CLC-CEM V/B	20 - 38	31 - 50	0 - 5

### **I.2.6. Domaine d'utilisation des différents ciments :**

Le domaine d'utilisation des différents types de ciments est varié et dépend des caractéristiques spécifiques de chaque type de ciment. Voici un aperçu des domaines d'utilisation des principaux types de ciments :

1. **CEM I (Ciment Portland)** : Principalement utilisé dans la fabrication de béton courant pour une large gamme d'ouvrages tels que fondations, structures, murs, ouvrages industriels, ponts, etc.
2. **CEM II (Ciments composés)** : Adaptés pour les travaux massifs, ces ciments sont utilisés dans diverses applications de construction nécessitant des caractéristiques spécifiques.
3. **CEM III (Ciment de Haut-Fourneau)** : Obtenu par le mélange de clinker avec du laitier de haut-fourneau, ce type de ciment est utilisé dans des applications spécifiques où une meilleure résistance est requise.
4. **CEM V (Ciments hydrauliques spéciaux)** : Ces ciments sont adaptés aux travaux hydrauliques, souterrains, fondations, injections, etc., offrant des propriétés spécifiques pour ces applications.

Chaque type de ciment est conçu pour répondre à des besoins particuliers en fonction des contraintes d'utilisation et des exigences spécifiques de chaque projet de construction. [6]

### **I.2.7. Hydratation du ciment :**

La pâte de ciment hydraté est le résultat de réactions chimiques entre l'eau et les composés du ciment. Il s'agit d'un processus complexe dans lequel les principaux composés du ciment  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ , et  $C_4AF$  réagissent pour former de nouveaux composés insolubles qui entraînent la prise et le durcissement progressif du matériau

L'étude des réactions d'hydratation des composants du ciment dissocie artificiellement des mécanismes dont le déroulement est, dans les faits, simultané. [10]

#### **I.2.7.1. Hydratation des silicates :**

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques ( $Ca_3SiO_5$ ) et les silicates bicalciques ( $Ca_2SiO_4$ ) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ( $Ca(OH)_2$ ). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du  $C_2S$ , la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible.

Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, leur formule générale est la suivante :



Leur composition moyenne est proche de  $(CaO)1.7(SiO_4)(H_2O)_4$ .

L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains.

Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années. [10]

#### **I.2.7.2. Hydratation des aluminates :**

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

##### **Étape 1 : Formation d'ettringite (phase AFt)**

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté) :  $((CaO)_6(Al_2O_3)(SO_3)_3, 32H_2O)$ . Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

## Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté

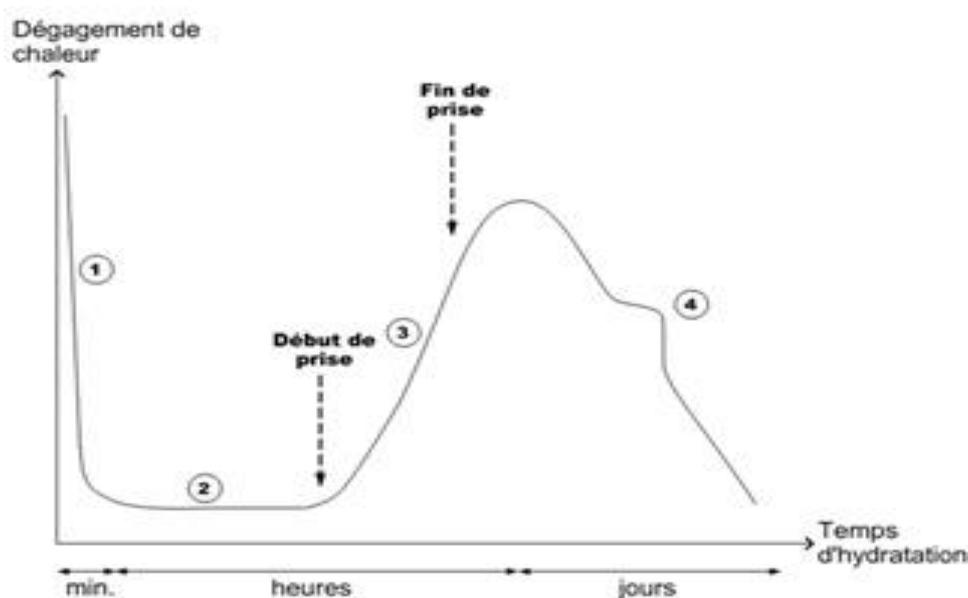
Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté (appelé AFm) :  $((CaO)_3(Al_2O_3)(CaSO_4), 12H_2O)$ . Les réactions chimiques s'intensifient.

## Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfato-aluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate ( $C_3A$ ) et l'aluminoferrite ( $C_4AF$ ) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du  $C_3A$ , l'aluminoferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé. [7]

### I.2.7.3. Mécanismes d'hydratation d'un ciment :

L'hydratation du ciment Portland implique, nous venons de le voir, la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Comme le ciment est composé principalement de  $C_3S$ , c'est l'hydratation du  $C_3S$  qui contrôle la cinétique globale de l'hydratation. Il existe cependant une synergie entre les différentes réactions.



**Figure I.10 :** Courbe de calorimétrie isotherme d'un ciment

La courbe caractéristique de calorimétrie isotherme d'un ciment qui peut être découpée en quatre périodes :

### **Période 1 : réactions initiales**

Cette période débute dès le contact entre l'eau et le ciment et dure quelques minutes. Le  $C_3S$  et le  $C_3A$  des grains de ciment réagissent immédiatement avec l'eau, formant de l'ettringite et des C-S-H (métastables) : les ions entrent en solution.

### **Période 2 : période dormante**

Le dégagement de chaleur est faible. Aucune évolution de la pâte ne semble se produire. Les réactions chimiques ont pourtant commencé : des ions passent en solution dans l'eau durant cette phase (ions calcium, silicates, hydroxydes et sulfates). Quand l'eau de gâchage est saturée en ions, le début de la prise se produit. Le pH de la solution augmente, ce qui ralentit la dissolution des constituants.

### **Période 3 : période d'accélération**

Cette période débute lorsque la concentration en ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  de la solution devient critique, la conductivité électrique de la solution étant alors à son maximum. Cette sursaturation induit la précipitation de la portlandite. Il s'ensuit alors les mécanismes de dissolution, de nucléation et de précipitation des différentes phases, permettant la formation des hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). Cette activité chimique dégage beaucoup de chaleur. Les hydrates formés commencent à s'enchevêtrer et créent donc un solide.

### **Période 4 : période de ralentissement**

Les grains anhydres se trouvent recouverts d'une couche d'hydrates qui s'épaissit de plus en plus. Pour que l'hydratation se poursuive, il faut que l'eau diffuse à travers les pores de gel.

La chaleur dégagée diminue.

Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment n'est jamais atteinte et donc ne sera jamais hydratée. C'est pendant cette période que l'ettringite de type AFt se dissout afin de se transformer en type AFm.

Les mécanismes complexes à l'origine de la création des différents produits de l'hydratation que sont les silicates et les aluminates sont l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la solvatation et la cristallisation.

## **I.3. Généralité sur les déchets :**

### **I.3.1. Définition :**

Un déchet correspond à tout matériau, substance ou produit jeté ou abandonné parce qu'il n'a plus d'utilisation précise.

Selon le cadre d'environnement un déchet est : tous des résidus d'un processus de production ou transformation ou l'utilisation, toute substance matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon. Autrement dit, tout élément qui est abandonné est un déchet. [9]



**Figure I.11 : Recyclage des déchets**

### **I.3.2. Gestion des déchets :**

La gestion des déchets regroupe la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets généralement issus des activités humaines. L'accent a été mis, ces dernières décennies, sur la réduction de l'effet des déchets sur la nature et l'environnement et sur leur valorisation.

La gestion des déchets concerne tous les types de déchets, qu'ils soient solides, liquides ou gazeux, chacun possédant sa filière spécifique. Les manières de gérer les déchets diffèrent selon qu'on retrouve dans un pays développé ou en voie de développement, dans une ville ou dans une zone rurale, que l'on ait affaire à un particulier, un industriel ou à un commerçant.

### **I.3.3. Textes législatifs :**

La gestion des déchets en Algérie est basée sur plusieurs textes législatifs, dont on cite quelques-uns [13] :

- Décret exécutif n° 07-205 du 30 juin 2007 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés. (2007).
- Décret exécutif n° 04-410 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations. (2004)
- Décret exécutif n°04-409 fixant les modalités de transport des déchets spéciaux dangereux. (2004)
- Décret exécutif n° 05-314 fixant les modalités d'agrément des groupements de générateurs et/ou détenteurs de déchets spéciaux. (2005)
- Décret exécutif n° 05-315 fixant les modalités de déclaration des déchets spéciaux dangereux. (2005)
- Décret exécutif n° 02-372 relatif aux déchets d'emballages. (2002)
- Décret exécutif n° 02-175 portant création, organisation et fonctionnement de l'Agence nationale des déchets. (2002)

- Décret exécutif n° 03-477 fixant les modalités et les procédures d'élaboration, de publication et de révision du plan national de gestion des déchets spéciaux. (2003)
- Décret exécutif n° 03-478 définissant les modalités de gestion des déchets d'activités de soins. (2003)
- Décret exécutif n° 04-210 définissant les modalités de détermination des caractéristiques techniques des emballages destinés à contenir directement des produits alimentaires ou des objets destinés à être manipulés par les enfants. (2004)
- Décret exécutif n° 19-10 du 16 Joumada El Oula 1440 correspondant au 23 janvier 2019 réglementant l'exportation des déchets spéciaux dangereux. (2019)

### **I.3.4. Classification des déchets :**

La classification des déchets est un processus essentiel pour gérer efficacement les déchets et minimiser leur impact sur l'environnement. Voici une classification générale des déchets [9] :

#### **1. Déchets ménagers et assimilés :**

Ce sont les déchets générés par les activités domestiques, tels que les emballages, les papiers, les plastiques, les déchets organiques, etc.

#### **2. Déchets industriels :**

Ils proviennent des processus de fabrication, de transformation ou de production industrielle. Ils peuvent être solides, liquides ou gazeux et peuvent être dangereux ou non dangereux.

#### **3. Déchets commerciaux :**

Générés par les activités commerciales et de service, tels que les déchets de bureaux, les emballages commerciaux, etc.

#### **4. Déchets de construction et de démolition (BTP) :**

Résultant des activités de construction, de rénovation et de démolition des bâtiments et des infrastructures.

#### **5. Déchets agricoles :**

Générés par les activités agricoles, tels que les déchets de récolte, les emballages agricoles, etc.

#### **6. Déchets dangereux :**

Ils présentent des risques pour la santé humaine ou l'environnement en raison de leurs propriétés physiques, chimiques ou biologiques. Ils comprennent les déchets chimiques, les déchets médicaux, les déchets radioactifs, etc.

#### **7. Déchets électroniques et électriques (DEEE) :**

Produits en fin de vie des équipements électriques et électroniques, tels que les ordinateurs, les téléphones portables, les appareils électroménagers, etc.

## **8. Déchets organiques :**

Matériaux biodégradables, tels que les déchets alimentaires et les résidus de jardinage.

## **9. Déchets inertes :**

Ils ne subissent pas de transformation physique, chimique ou biologique importante au fil du temps et ne se décomposent pas facilement. Ils comprennent des matériaux comme la terre, les gravats, etc.

## **10. Déchets recyclables :**

Matériaux qui peuvent être recyclés pour produire de nouveaux produits, tels que le papier, le verre, le plastique, le métal, etc.

## **I.4. Déchets ménagers et assimilés (DMA) :**

Les déchets ménagers et assimilés sont une catégorie de déchets générés par les activités quotidiennes des ménages. Ils comprennent une variété de matériaux tels que les déchets alimentaires, le papier, le plastique, le verre, le métal, les textiles, les produits électroniques et électriques, les piles, les produits chimiques ménagers, les déchets de jardinage, etc. Ces déchets sont généralement collectés par les services municipaux de gestion des déchets et traités selon différentes méthodes, telles que le recyclage, le compostage, l'incinération ou l'enfouissement. La gestion efficace des déchets ménagers et assimilés est cruciale pour réduire les impacts environnementaux et promouvoir la durabilité.

### **I.4.1. La quantité des déchets ménagers en Algérie :**

La quantité des déchets ménagers et assimilés (DMA) en Algérie, estimée à 13 millions de tonnes en 2018, devra dépasser les 20 millions de tonnes en 2035, selon une étude récente réalisée par le ministère de l'environnement.

Cette augmentation est due à une conjugaison de la croissance de la population, qui atteindra 50 millions d'habitants en 2035 d'une part, et du développement du potentiel économique, d'autre part », selon la même étude.

Tout en relatant le rapport sur la stratégie nationale à l'horizon 2035 (SNGID 2035), l'étude a démontré que la production des DMA passera de 0,8 Kg/hab/jour en 2016 à plus de 1,23 kg /hab/jour en 2035.

" Le taux de valorisation en recyclage et compostage reste à un niveau bas, ne dépassant pas 10 % (2018) pour les DMA. Si cette situation reste inchangée, elle entraînera inévitablement une augmentation substantielle des déchets destinés à l'enfouissement, explique la même source.

Parmi les objectifs stratégiques de la SNGID 2035, figure la limitation de la génération des DMA à 1,1 Kg/hab/jour, la prévention des déchets des autres flux et l'encouragement du tri sélectif et du tri à la source de manière à recycler ou composter 30% des DMA, 30 % des déchets spéciaux (dangereux) et 50 % des déchets inertes. [14]

### **I.5. Impact des déchets ménagers et assimilés :**

Les déchets ménagers et assimilés ont un impact significatif sur l'environnement, la santé publique et les ressources naturelles. Voici quelques-uns des principaux impacts :

**Pollution de l'environnement :** L'accumulation de déchets ménagers dans les décharges et les sites d'enfouissement peut entraîner la contamination des sols, des eaux souterraines et des cours d'eau par des substances toxiques provenant de la décomposition des déchets. Les déchets plastiques, en particulier, peuvent se décomposer en micro plastiques qui pollue les écosystèmes terrestres et aquatiques.

**Émissions de gaz à effet de serre :** La décomposition des déchets organiques dans les décharges produit du méthane, un puissant gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique. De plus, les processus de traitement des déchets, tels que l'incinération, peuvent également émettre des gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques.

**Épuisement des ressources naturelles :** La production de biens de consommation entraîne souvent une utilisation intensive des ressources naturelles telles que l'eau, les combustibles fossiles, les métaux et les minéraux. La gestion des déchets implique également l'utilisation de ressources pour la collecte, le transport, le traitement et le recyclage, ce qui peut contribuer à l'épuisement des ressources.

**Impact sur la biodiversité :** La pollution causée par les déchets peut avoir des effets néfastes sur la biodiversité en perturbant les habitats naturels, en introduisant des substances toxiques dans les écosystèmes et en affectant les populations animales et végétales.

**Risques pour la santé publique :** Les déchets non traités peuvent constituer des habitats pour les vecteurs de maladies tels que les moustiques, les rats et les parasites, augmentant ainsi les risques de propagation de maladies infectieuses. De plus, l'exposition aux substances toxiques présentes dans les déchets peut avoir des effets nocifs sur la santé humaine, notamment des problèmes respiratoires, des troubles neurologiques et des cancers.

### **I.6. La décharge publique :**

La décharge publique est un site où les déchets sont stockés sans traitement préalable, ce qui peut entraîner des problèmes environnementaux tels que la pollution du sol, de l'air et de l'eau. Les déchets sont simplement déposés sur le site sans tri ni valorisation, ce qui peut poser des risques pour la santé publique et l'environnement en raison de la possible contamination des sols et des nappes phréatiques par des substances toxiques présentes dans les déchets.

## I.7. Valorisation des déchets ménagers et assimilés :

### I.7.1. Quelques méthodes de valorisation :

La valorisation des déchets ménagers et assimilés consiste à traiter ces déchets de manière à en récupérer des matériaux ou de l'énergie, plutôt que de simplement les envoyer en décharge. Voici quelques méthodes de valorisation des déchets ménagers :

- **Recyclage :** Le recyclage consiste à collecter, trier et traiter les déchets afin de récupérer les matériaux recyclables, tels que le papier, le plastique, le verre et le métal, pour les réutiliser dans la fabrication de nouveaux produits. Le recyclage permet de réduire la consommation de ressources naturelles, d'économiser de l'énergie et de réduire les émissions de gaz à effet de serre.
- **Compostage :** Le compostage est le processus de décomposition des déchets organiques, tels que les restes de cuisine et les déchets de jardin, pour produire du compost, un amendement organique riche en nutriments pour les sols. Le compostage réduit la quantité de déchets envoyés en décharge, améliore la santé des sols et contribue à la conservation des ressources naturelles.
- **Incinération avec récupération d'énergie :** L'incinération des déchets ménagers peut être utilisée pour produire de la chaleur ou de l'électricité en brûlant les déchets à haute température. Cette méthode permet de réduire le volume des déchets à éliminer et de récupérer de l'énergie à partir des déchets.
- **Méthanisation :** La méthanisation est un processus biologique qui convertit les déchets organiques en biogaz, principalement du méthane et du dioxyde de carbone, ainsi qu'en digestat, un résidu riche en nutriments. Le biogaz peut être utilisé comme source d'énergie renouvelable pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburant, tandis que le digestat peut être utilisé comme engrais.
- **Valorisation énergétique des déchets non recyclables :** Certains déchets non recyclables peuvent être utilisés comme combustible pour la production d'énergie, soit par incinération, soit par gazéification ou pyrolyse. [11]

### I.7.2. Valorisation dans le domaine du génie civil :

La valorisation des déchets ménagers et assimilés dans le domaine du génie civil implique l'utilisation de ces déchets dans la construction, la réhabilitation ou l'entretien d'infrastructures. Voici quelques exemples de valorisation des déchets ménagers dans le génie civil :

- **Utilisation comme matériau de construction :** Certains déchets, tels que les déchets plastiques, le verre recyclé, les pneus usagés et les déchets de construction et de démolition (gravats), peuvent être transformés en matériaux de construction pour les routes, les chaussées, les murs de soutènement, les dalles, etc. Par exemple, les agrégats recyclés provenant de déchets de construction peuvent remplacer les matériaux traditionnels tels que le gravier ou le sable dans la construction de routes.
- **Utilisation comme remblai :** Les déchets inertes, tels que les déchets de construction et de démolition, peuvent être utilisés comme remblai pour les terrassements dans la

construction d'infrastructures routières, ferroviaires ou de bâtiments. Cela permet de réduire la quantité de matériaux vierges nécessaires et de valoriser les déchets inertes.

- **Utilisation comme combustible alternatif** : Certains déchets non recyclables peuvent être utilisés comme combustible alternatif dans les cimenteries et les installations de production d'énergie. Par exemple, les déchets solides récupérés (CSR) issus de la valorisation des déchets ménagers peuvent être utilisés comme substitut partiel ou total des combustibles fossiles dans les processus de fabrication.
- **Utilisation comme matériau de filtration ou d'isolation** : Certains déchets, tels que les pneus recyclés, peuvent être transformés en matériaux de filtration pour les applications de drainage ou de purification de l'eau. De plus, certains matériaux isolants, tels que la laine de verre recyclée, peut être fabriqués à partir de déchets ménagers pour une utilisation dans l'isolation thermique des bâtiments.
- **Utilisation comme matériau de renforcement** : Les fibres de certains déchets, tels que les fibres de papier recyclé ou les fibres de plastique, peuvent être utilisées comme renfort dans la fabrication de matériaux composites pour les applications de génie civil, telles que les panneaux de construction ou les produits de stabilisation des sols.

#### **I.7.2.1. Définition de la biomasse :**

La biomasse est la source énergie la plus ancienne utilisée par l'humanité. Il s'agit de toute matière organique, végétale ou issue des êtres vivants. Le terme de biomasse recouvre un champ très large de matières : bois, déchets des industries de transformation du bois, déchets agricoles (pailles, lisiers, etc.) et tous autres sortes de déchets organiques. La biomasse est la 2<sup>ème</sup> énergie renouvelable dans le monde. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques végétales ou animales. Elle est très utilisée, notamment 10% de l'énergie primaire mondiale et souvent dans les circuits non commerciaux. Pour environ 2.6 milliards d'habitants, elle représente quasiment la seule source d'énergie. [22]

Dans le domaine du génie civil, la biomasse est de plus en plus considérée comme une ressource précieuse et une alternative durable pour plusieurs applications. Voici quelques-unes des façons dont la biomasse est utilisée dans le génie civil :

- **Construction écologique** : Les matériaux de construction traditionnels tels que le béton et l'acier ont un impact environnemental significatif en raison de leur fabrication intensive en énergie. La biomasse peut être utilisée pour produire des matériaux de construction écologiques tels que le bois lamellé-collé, les panneaux de fibres de bois et les matériaux composites à base de plantes. Ces matériaux sont renouvelables et peuvent réduire l'empreinte carbone des projets de construction.
- **Génie hydraulique** : Les plantes aquatiques et les déchets organiques peuvent être utilisés dans les systèmes de filtration naturelle et les zones tampons végétalisées pour le traitement des eaux usées et la protection des berges. Ces solutions basées sur la biomasse sont non seulement écologiques, mais elles peuvent également être plus rentables que les méthodes conventionnelles de traitement des eaux.
- **Énergie renouvelable** : La biomasse est utilisée pour produire de l'énergie sous forme de biogaz, de biomasse solide (comme les pellets de bois) et de biocarburants. Ces sources

d'énergie peuvent être utilisées pour alimenter les équipements de construction, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles et réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

- **Érosion et stabilisation des sols :** Les techniques de génie civil utilisent souvent des produits à base de biomasse tels que des tapis de fibres de coco ou de jute pour stabiliser les sols, contrôler l'érosion et favoriser la croissance des plantes dans les zones de construction ou de restauration écologique.
- **Isolation thermique et acoustique :** Les matériaux isolants à base de biomasse, tels que la ouate de cellulose, sont utilisés dans la construction pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en fournissant une isolation thermique et acoustique efficace.

#### **I.7.2.2. La biomasse des os des poulets :**

La biomasse des os de poulet, bien que moins couramment exploitée que d'autres formes de biomasse, peut également être utilisée dans divers domaines, notamment :

**Énergie renouvelable :** Les os de poulet peuvent être transformés en biocarburants ou en biogaz par des processus de conversion thermochimique ou biochimique. Par exemple, la pyrolyse des os de poulet peut produire du biochar, un combustible solide à haute teneur énergétique, tandis que la digestion anaérobie peut produire du biogaz utilisable comme source d'énergie.

**Fertilisant organique :** La cendre d'os de poulet peut être utilisée comme engrais organique riche en phosphore et en calcium. Ces éléments nutritifs sont essentiels à la croissance des plantes, et l'utilisation de la biomasse des os de poulet comme engrais peut aider à réduire la dépendance aux engrais chimiques synthétiques.

**Industrie alimentaire et pharmaceutique :** Les os de poulet peuvent être transformés en produits à valeur ajoutée tels que la gélatine, le collagène et le calcium. La gélatine est utilisée dans la fabrication de bonbons, de desserts et de produits pharmaceutiques, tandis que le collagène est utilisé dans les cosmétiques et les produits de soins de la peau. Le calcium extrait des os de poulet peut être utilisé comme supplément alimentaire.

**Matériaux de construction :** La cendre d'os de poulet peut être utilisée comme composant dans la fabrication de matériaux de construction tels que les briques et le béton. Ces matériaux peuvent bénéficier des propriétés de renforcement et de stabilisation apportées par les minéraux contenus dans la cendre d'os.

#### **I.7.2.3. La biomasse des os des vaches :**

La biomasse des os de vache peut également être exploitée de différentes manières, offrant des possibilités similaires à celles des os de poulet, bien que les volumes et les propriétés puissent varier. Voici quelques utilisations potentielles :

**Énergie renouvelable :** Comme pour les os de poulet, les os de vache peuvent être utilisés comme matière première pour la production de biocarburants ou de biogaz. Les os peuvent être convertis en combustible solide ou liquide par pyrolyse, gazéification ou d'autres

méthodes de conversion thermochimique. De plus, la digestion anaérobie des os peut produire du biogaz utilisable pour la production d'électricité ou de chaleur.

**Engrais organique :** La cendre d'os de vache est riche en éléments nutritifs tels que le calcium, le phosphore et le magnésium, ce qui en fait un excellent engrais organique. L'utilisation de la cendre d'os de vache comme engrais peut améliorer la fertilité des sols et favoriser la croissance des cultures.

**Industrie alimentaire et pharmaceutique :** Les os de vache sont une source de collagène et de gélatine, qui sont largement utilisés dans l'industrie alimentaire pour la fabrication de produits tels que les bonbons, les desserts et les soupes. De plus, le collagène est utilisé dans l'industrie pharmaceutique pour la fabrication de capsules et d'autres produits médicaux.

**Matériaux de construction :** Comme pour les os de poulet, la cendre d'os de vache peut être utilisée comme matériau de construction dans la fabrication de béton et d'autres produits de construction. La cendre d'os de vache peut agir comme un liant ou un renforcement dans les matériaux de construction, améliorant ainsi leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

#### **I.7.2.4. La biomasse des bois :**

La biomasse issue du bois est l'une des formes les plus largement utilisées de biomasse dans de nombreux domaines, y compris le génie civil. Voici quelques-unes des utilisations de la biomasse du bois dans le génie civil :

**Construction :** Le bois est largement utilisé comme matériau de construction dans le génie civil. Les produits en bois tels que le bois d'œuvre, les panneaux de particules, le contreplaqué et le bois lamellé-collé sont utilisés dans la construction de maisons, de ponts, de bâtiments commerciaux et industriels, de routes et d'autres infrastructures. Le bois présente des avantages tels que sa légèreté, sa résistance, sa durabilité et son aspect esthétique.

**Énergie :** Le bois est une source d'énergie renouvelable largement utilisée dans le génie civil. Il peut être utilisé comme combustible pour la production de chaleur et d'électricité dans des installations telles que les centrales thermiques au bois, les chaudières à biomasse et les poêles à bois. De plus, le bois peut être transformé en biocarburants liquides tels que le bioéthanol et le biodiesel.

**Génie hydraulique :** Le bois est utilisé dans la construction de structures de génie hydraulique telles que les barrages, les écluses, les systèmes d'irrigation et les ouvrages de protection contre les inondations. Les propriétés naturelles du bois, telles que sa résistance à la corrosion et sa capacité à absorber les chocs, en font un matériau idéal pour de telles applications.

**Aménagement paysager :** Le bois est utilisé dans l'aménagement paysager pour la construction de structures telles que les ponts, les pavillons, les bancs et les clôtures. Les produits en bois peuvent également être utilisés pour la stabilisation des sols, la création de zones tampons végétalisées et la restauration des écosystèmes naturels.

**Isolation** : Le bois est également utilisé comme matériau d'isolation thermique et acoustique dans la construction. Les produits en bois tels que la ouate de cellulose, les panneaux de fibres de bois et le liège sont utilisés pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en réduisant les pertes de chaleur et en atténuant les bruits indésirables.

### I.8. Valorisation des trois déchets étudiés :

Le tableau ci-dessous (Tableau I.2) regroupe quelques travaux récents qui ont utilisé un des déchets étudiés (os des poulets, os de vache et bois), à différents cas et à différents taux de substitution ou autres.

**Tableau I.2** : Quelques travaux récents sur l'utilisation des déchets (os des poulets, os de vache et bois)

Type	Matériau composite et échantillons	Préparation et taille	Granulat remplacé : taux de remplacement	Résultats	Réf
<b>Cendres d'os de bétail (CBA)</b>	Ciment pour Béton. Cubiques de 15 cm × 15 cm × 15 cm	Brûlé à une température de 900°C, fraisé à l'aide d'une fraiseuse à disques. Pour obtenir 75 micromètres.	Ciment : 0%, 5%, 10%, 15%, 20%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teneur élevée en oxyde de calcium (43,26 %).</li> <li>- La consistance normale, l'absorption et le temps de prise augmentent en fonction de l'augmentation de la teneur de la cendre d'os.</li> <li>- L'affaissement diminue de 0% à 10% et augmente de 15 % à 20 %.</li> <li>- Diminution progressive de la résistance à la compression.</li> <li>- La densité diminue à mesure que le pourcentage de cendres osseuses augmente.</li> </ul>	[15]
<b>Les cendres</b>	Ciment pour Béton à haute	Brûler et tamiser à la	Ciment : 0%, 5%, 10%,	- Le poids, la résistance à la	[16]

<p><b>d'os d'animaux (BA)</b></p>	<p>température (300 °C, 600 °C et 900 °C). Cylindriques</p>	<p>taille du ciment.</p>	<p>15%, 20%</p>	<p>traction et à la compression diminuait avec une augmentation de la température et leurs valeurs dépendaient du choix des méthodes de refroidissement.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le refroidissement rapide a présenté une perte de résistance supplémentaire de 35 % par rapport au refroidissement naturel à l'air.</li> <li>- La résistance résiduelle à la compression diminue fortement au-delà de 10 % de remplacement.</li> <li>- La valeur seuil optimale du remplacement du ciment par les cendres osseuses (BA) dans le béton à température élevée est de 10 %.</li> </ul>	
<p><b>Cendres de bois et fibres de banane traitées et des polymères de styrène butadiène.</b></p>	<p>Mortier de ciment. Prismatiques 200mm* 50mm* 5mm pour la flexion et cylindriques 50mm* 150mm pour la traction par</p>	<p>Les cendres de bois de combustion (WBA) utilisées provenaient d'une chaudière à biomasse. Séché au four</p>	<p>Ciment : 0%, 10, 15, 20 et 25 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La valeur optimale des performances du composite peut être obtenues lorsque le ciment est remplacé par jusqu'à 10 %</li> </ul>	<p>[17]</p>

	fendage.	à 90 °C puis tamisé à un diamètre inférieur à 95 µm.		du fond en bois de cendres, 1,5% de fibres de banane et 0,3% d'émulsion de polymère styrène-butadiène. Développé offrait de bonnes propriétés d'isolation thermique et pourrait être utilisé dans certains produits à base de ciment sélectionnés.	
<b>Cendres de déchets de bois (WWA)</b>	Ciment pour béton. Cubiques (150x150x150) mm <sup>3</sup> pour la résistance à la compression, cylindres (150x300) mm <sup>2</sup> pour la résistance à la traction et prismatiques (150x150x500) mm <sup>3</sup> pour la résistance à la flexion	Brûlé à 500°C, et tamiser à la taille du ciment.	Ciment : 0%, 5%, 10%, 15% et 20%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'absorption d'eau, la densité et la maniabilité diminuaient avec l'augmentation de la teneur en cendres de bois.</li> <li>- Les valeurs de résistance ont augmenté à un taux de remplacement de 10 %.</li> <li>- Cette étude suggère que 10 % de WWA peuvent être utilisés à la place de ciment pour structures en béton.</li> </ul>	[18]
<b>L'os poudre (BP)</b>	Mortier de ciment, pour la résistance à l'abrasion cylindriques (25,4 × 25,4) mm <sup>2</sup> , la	Broyer à la taille du ciment.	Additif au ciment : 0, 5, 10 et 15% (% en poids de ciment)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Des performances élevées basées sur la résistance à la compression, et la résistance à</li> </ul>	[19]

	compression cubiques (de 70,7 mm de côté) et résistances à la traction cylindriques (75×150) mm <sup>2</sup>			<p>la traction lors de l'ajout de 5% BP.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- L'ajout de 10% ou 15 % BP n'est pas recommandé.</li> <li>- L'amélioration de la résistance à l'abrasion à 10 % à l'âge de 7 jours, et de 15 % à l'âge de 28 jours.</li> <li>- L'os agit comme un agent de remplissage ou agent de nucléation, ce qui accélère l'hydratation de ciment.</li> </ul>	
<b>Poudre d'os de vache</b>	Blocs creux en béton de sable. Des blocs de dimensions de (450 mm x 225 mm x 225 mm)	Classé au moyen d'une analyse par tamisage des granulats fins se situaient entre le gravier et le sable fin.	Ciment : 0%, 5%, 10%, 15% et 20%.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La résistance à la compression et le taux d'absorption d'eau ont révélé que l'adoption d'un remplacement partiel de 10 % donnait les meilleures performances parmi les remplacements en pourcentage.</li> <li>- Les valeurs de la résistance à la compression à 28 jours se sont avérées efficaces pour les murs non-porteurs. A l'inverse, les valeurs de résistance se sont révélées</li> </ul>	[20]

				inefficaces pour les murs porteurs lorsque le pourcentage partiel de remplacement du ciment par de la poudre d'os de vache dépassait 10 %.	
<b>Os de vache</b>	Béton : Cubiques (15*15*15) cm <sup>3</sup> et cylindriques (15*30) cm <sup>2</sup>	Brûlé à 700°C, concassé manuellement à la taille du sable et du gravier.	Béton : 0%, 50% et 100% les deux parts du sable et 0%, 50% et 100% les quatre parts du gravier.	- Le remplacement de 50% de sable et du gravier augmente la résistance à la compression du béton de 50% par rapport à la résistance du béton témoin.	[21]

### I.9. Conclusion :

Concernant ce premier chapitre, nous pouvons conclure que la connaissance des méthodes et des matériaux nécessaires à la fabrication du ciment est considérée comme incontournable afin de permettre d'étudier les solutions que nous tenterons de présenter dans ce travail. Sans oublier que connaître les différents déchets et leur classification, notamment comment les éliminer, peut nous aider à choisir le meilleur pour ce travail.

# CHAPITRE II

## Matériaux et méthodes expérimentales

## **CHAPITRE II : Matériaux et méthodes expérimentales**

### **II.1. Introduction :**

Le choix des matériaux qui seront utilisés pour atteindre l'objectif souhaité de ce travail fait partie des nécessités pour lesquelles une explication détaillée et claire doit être fournie, avec parfois des preuves fournies par les images et les données nécessaires. Il ne faut pas oublier que connaître les propriétés de ces matériaux et les expériences utilisées pour les trouver font partie des impératifs, c'est pourquoi nous avons essayé de rassembler et de présenter tout cela dans ce chapitre.

### **II.2. Matériaux utilisés :**

Dans notre étude, nous avons utilisé les matériaux de base pour les caractérisations d'un ciment et d'un mortier normalisé (sable normalisé, Ciment CEM I), dans leurs provenances est détaillées ci-après. Et pour atteindre l'objectif de notre travail des déchets ménagers et assimilés ont été choisis (os d'animaux, restes de bois).

#### **II.2.1. Le ciment :**

Dans cette étude, nous avons utilisé un ciment de type : ciment portland CEM I 42.5 R qui est délivré par la société BISKRIA CIMENT (Figure II.1), Il est conforme à la norme Algérienne (NA442-2013 voir l'annexe 1) inspirée de la norme européenne EN197-1.



**Figure II.1 : Ciment CEM I 42.5 R**

#### **II.2.2. Le sable :**

Dans notre étude, on a utilisé le sable Normalise qui provient de la France (Figure II.2). Ce sable est utilisé selon le code dans le contrôle des résistances mécaniques des ciments, de la mesure de la chaleur d'hydratation des ciments et de la détermination de la macro-texture des chaussées (Voir annexe 1).

Ce sable normalisé CEN (sable normalisé ISO) est un sable naturel, siliceux notamment dans ses fractions les plus fines. Il est propre, les grains sont de forme généralement isométrique et arrondie. Il est séché, criblé et préparé dans un atelier moderne offrant toutes garanties de qualité et de régularité. Il est conditionné en sachets de polyéthylène contenant chacun  $1\,350 \pm 5$  g. [23]

Sa composition granulométrique déterminée par tamisage est conforme aux exigences des normes EN 196-1 (§ 5) et ISO 679 : 2009 (§ 5). [23]

**Tableau II.1** : composition granulométrique du sable normalisé [23]

Tamis ouverture des mailles (mm)	Refus cumulés (%)
0.08	$99 \pm 1$
0.16	$87 \pm 5$
0.50	$67 \pm 5$
1.00	$33 \pm 5$
1.60	$7 \pm 5$
2.00	0

Ces analyses sont complétées par des contrôles de masse des sachets, des mesures du taux d'humidité et des contrôles de résistances mécaniques, selon les exigences des normes EN 196-1 (§ 11) et ISO 679 : 2009 (§ 11). [23]



**Figure II.2** : Sable normalise ISO 679

### II.2.3. L'eau :

Pour la confection du mortier, nous avons utilisé l'eau potable du laboratoire Pédagogique du département de Génie Civil et d'Hydraulique.

## **II.2.4. Les Déchets :**

Afin d'essayer d'atteindre notre objectif souhaité, qui est d'utiliser les déchets ménagers et assimilés dans une tentative de recherche expérimentale pour fabriquer un nouveau matériau de construction, nous avons constaté que le processus de tri qui a lieu au niveau des ordures publiques n'était pas en mesure d'atteindre son plan prévu. Même dans une décharge publique. Outre le manque de temps pour réaliser ce travail, nous a conduit à choisir trois déchets, deux du même type (os d'animaux) et le troisième d'un type complètement différent (déchets de bois).

### **II.2.4.1. Préparation des déchets :**

Le choix de la méthode de préparation des trois déchets sélectionnés s'est basé sur le fait qu'une des méthodes d'élimination de ces déchets est leur combustion. Nous avons donc suivi les méthodes de préparation décrites ci-dessous pour chaque déchet.

#### **A/ Os des poulets :**

- D'abord, nous collectons les os de poulet (ailes, poitrines, cuisses, ...), puis nous les nettoyons des restes de viande.



**Figure II.3 : Os de poulet**

- Deuxièmement, nous les plaçons dans le four à une température comprise entre 100 et 105°C pour éliminer les résidus organiques.
- Ensuite, nous les brûlons dans le four jusqu'à ce qu'elles se transforment en charbon.



**Figure II.4 : Charbon d'os de poulet**

- Enfin, nous les broyons soigneusement jusqu'à ce qu'ils se transforment en cendres, puis nous les passons à travers un tamis de 80  $\mu\text{m}$  de maille.



**Figure II.5 :** Cendre d'os de poulet

**B/ Os des vaches :**

- D'abord, nous collectons les os de bœuf (côtes, crâne, pattes, ...), puis nous les nettoyons des restes de viande.



**Figure II.6 :** Os de vache

- Deuxièmement, nous les plaçons dans le four à une température comprise entre 100 et 105°C pour éliminer les résidus organiques.
- Troisièmement, nous les cassons et les transformons en petits morceaux pour faciliter leur combustion.
- Quatrièmement, nous les brûlons dans le four jusqu'à ce qu'elles se transforment en charbon.
- Enfin, nous les broyons soigneusement jusqu'à ce qu'ils se transforment en cendres, puis nous les passons à travers un tamis de maille 80  $\mu\text{m}$ .



**Figure II.7 :** Cendre d'os de vache

**C/ Déchet de bois :**

- D'abord, nous rassemblons les débris de bois (copeaux de menuiserie, morceaux de bois).
- Deuxièmement, nous les plaçons dans un four à une température comprise entre 100 et 105°C pour les sécher.
- Troisièmement, nous les brûlons dans le feu.
- Quatrièmement, nous collectons les cendres de la combustion.
- Enfin, nous les broyons soigneusement jusqu'à ce qu'ils se transforment en cendres, puis nous les passons à travers un tamis de 80 µm de maille.



**Figure II.8 :** Cendre de bois

**II.2.4.2. Préparation des nouveaux ciments :**

Le nouveau ciment est obtenu par homogénéisation du ciment CEM I 42 R et des trois déchets de cendres sélectionnés séparément. Cette homogénéité est réalisée en remplaçant un volume de ciment par les cendres de chaque déchet individuel dans des proportions allant de 0% à 10% avec un pas de 2,5%.

Après dosage et homogénéisation, nous avons élaboré cinq échantillons de ciments composés pour chaque cendre de déchet, comme suit :

**Tableau II.2 :** Désignation et dosage des ciments élaborés

Ciment	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
CEM I 42 R [g]	450.00	438.75	427.50	416.25	405.00
Cendre Os de Poulet [g]	0.00	11.34	22.68	34.02	45.36
Ciment	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
Cendre Os de Vache [g]	0.00	10.31	20.61	30.92	41.23
Ciment	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
Cendre de Bois [g]	0.00	5.59	11.18	16.77	22.35

### II.3. Caractéristiques des matériaux et des ciments utilisés :

#### II.3.1. Description visuelle :



**Figure II.9 :** Les cendres des déchets

- La cendre d'os de poulet se distingue par sa couleur gris clair.
- La cendre d'os de vache se distingue par sa couleur gris foncé.
- La cendre de bois se caractérise par sa couleur noir foncé, ainsi que par sa légèreté et sa propension à se disperser rapidement.

#### II.3.2. Caractérisation physique :

##### II.3.2.1. Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente, également appelée densité apparente, est une mesure de la masse d'une substance par unité de volume, indépendamment de tout effet de pression ou de

température. Elle est définie comme la masse d'une substance contenue dans un volume donné et est généralement exprimée en unités telles que g/cm<sup>3</sup> (grammes par centimètre cube).

La formule générale pour calculer la masse volumique apparente est :

$$\text{Masse volumique apparente} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volume}} \quad (1)$$

Avec :

- La **masse** est la quantité de matière présente.
- Le **volume** est l'espace occupé par cette matière.



**Figure II.10 :** Essai de la masse volumique apparente

### II.3.2.2. Masse volumique absolue :

Les masses volumiques sont mesurées sur poudre de ciment anhydre conformément à la norme NA2595 équivalente à la norme En 1097-7 :1999 P 18-650- 7 [24]. La masse volumique absolue est mesurée à l'aide de densimètre Le Chatelier en utilisant l'alcool chirurgical 70° comme solution inerte. La masse volumique absolue est mesurée avec l'équipement illustré dans la Figure II.11, en utilisant la formule suivante :

$$\text{Masse volumique absolue} = \frac{M_1}{V_2 - V_1} \quad (2)$$

$M_1$  : Masse de l'échantillon de ciment ;

$V_1$  : Volume initial de l'alcool chirurgical 70° ;

$V_2$  : Volume après l'introduction de l'échantillon de ciment.



Figure II.11 : Essai de la masse volumique absolue

### II.3.2.3. Analyse granulométrique à diffraction laser :

La granulométrie est l'étude de la distribution de la taille des particules présentes au sein d'échantillons secs (poudres, farines, sables, etc.) ou liquides (sirops, émulsions, suspensions, etc.). La granulométrie à diffraction laser est une technique qui utilise le principe de diffraction et de diffusion d'un faisceau laser frappant une particule.

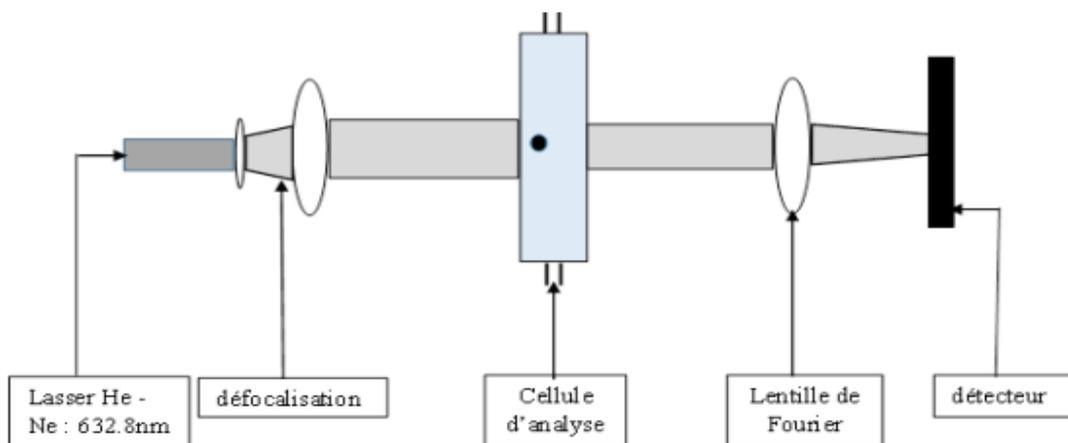


Figure II.12 : Description d'un appareil de mesure granulométrique

Les particules passent à travers un rayon laser fixe. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est en fonction de sa taille. La lumière diffractée est recueillie par un détecteur multiélément. L'image de diffraction obtenue est transformée en utilisant un modèle optique et une procédure mathématique appropriés (théorie de Mie ou théorie de Fraunhofer). Le résultat, illustré sous forme de courbe semi-logarithmique, est une distribution de particules en volume (diamètre d'une sphère de volume équivalent).

L'Analyse de la taille des particules est effectuée par un granulométrie LASER de type Mastersizer 2000 Malvern d'une gamme de  $0,02\mu\text{m}$  à  $2\text{ mm}$  (Figure II.13). La distribution granulométrique est déduite de l'interaction entre un ensemble de particules et le faisceau laser incident par l'analyse de diffraction du faisceau.



**Figure II.13 :** Appareil d'analyse granulométrique : Mastersizer 2000 Malvern

#### **II.3.2.4. Surface spécifique de Blaine (SSB) :**

La Surface Spécifique de Blaine SSB est la surface totale en  $\text{cm}^2$  développée par  $1\text{ g}$  de liant, elle est mesurée conventionnellement selon la norme NF-P 15 442 [25], et exprimée en  $\text{cm}^2/\text{g}$ .

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé « Perméable mètre de Blaine » (Figure II.14). Il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur (N° 4) d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure.

Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume  $V$  défini.



**Figure II.14 :** Appareil de Blaine (SSB)

#### **II.3.2.5. Consistance normale des ciments :**

C'est la détermination de la consistance normalisée de la pâte de ciment selon les spécifications de la norme algérienne NA 229/1990 [26] équivalente à la norme européenne

NE 2-1-003 :1984. Dans cet essai, la consistance est caractérisée par le temps que met le mortier pour s'écouler sous l'effet de la vibration.



**Figure II.15 :** Essai de la consistance normale des ciments

#### **II.3.2.6. Temps de prise :**

Le "temps de prise" des mortiers fait référence à la durée nécessaire pour que le mortier passe de l'état plastique (malléable et façonnable) à un état rigide (durcissement initial). Cette période est cruciale pour les travaux de construction car elle détermine le temps dont les ouvriers disposent pour travailler le mortier avant qu'il ne commence à durcir et perde sa maniabilité.

Il existe deux phases principales dans le processus de prise du mortier :

- a) **Temps de prise initiale** : C'est le temps nécessaire pour que le mortier commence à perdre sa plasticité et à devenir rigide. Durant cette phase, le mortier est encore manipulable, mais il commence à durcir. Le temps de prise initiale est essentiel pour le placement et le façonnage du mortier.
- b) **Temps de prise finale** : C'est le moment où le mortier atteint une rigidité suffisante pour ne plus être déformé par des forces externes normales. À ce stade, le mortier a durci de manière significative, bien qu'il continue à se renforcer et à durcir au fil du temps.



Figure II.16 : Prisomètre (Vicat automatique)

### **II.3.3. Caractérisation chimique :**

#### **II.3.3.1. Compositions chimiques par fluorescence X :**

L'analyse des compositions chimiques par fluorescence X (XRF) est souvent utilisée pour évaluer la composition des matériaux de construction tels que le béton, les mélanges d'asphalte, les agrégats, les pierres, les céramiques et d'autres matériaux utilisés dans les infrastructures et les structures de génie civil. Voici quelques applications spécifiques de la fluorescence X dans ce domaine :

- **Analyse des éléments constitutifs du béton :** La fluorescence X peut être utilisée pour déterminer la composition des matériaux constitutifs du béton, tels que les granulats, les ciments et les adjuvants. Cela permet de contrôler la qualité des matériaux utilisés dans la construction de routes, de ponts, de bâtiments et d'autres infrastructures en béton.
- **Identification des contaminants :** La fluorescence X peut être utilisée pour détecter la présence de contaminants dans les matériaux de construction, tels que les métaux lourds dans les agrégats ou les produits chimiques indésirables dans les matériaux de construction recyclés. Cela permet de s'assurer que les matériaux utilisés dans la construction répondent aux normes de qualité et de sécurité requises.
- **Évaluation de la durabilité des matériaux :** En analysant la composition chimique des matériaux de construction, notamment la teneur en éléments tels que le calcium, le silicium, l'aluminium, le fer et d'autres, la fluorescence X peut fournir des informations sur la durabilité et la résistance des matériaux à long terme.
- **Contrôle qualité sur site :** La fluorescence X est une méthode rapide et non destructive, ce qui en fait un outil idéal pour le contrôle qualité sur site des matériaux de construction.



**Figure II.17 : Préparation de l'échantillon**

**II.3.3.2. Perte au feu (PAF) :**

La perte au feu est l'élimination de  $\text{CO}_2$ , l'eau de constitution et les matières organiques. La PAF a été déterminée en atmosphère oxydante (air) et conduite selon les prescriptions de la norme Algérienne NA235/2005 [27] et sa vérification est faite selon la norme NA442, 2013.



**Figure II.18 : Four de calcination pour PAF**

## **II.4. Formulation et caractérisation des nouveaux mortiers :**

Salon la norme NA 234 équivalente à la norme NF EN 196-1 septembre 2016 [28], qui détermine les méthodes d'essais des ciments - Détermination des résistances mécaniques. Pour cela la confection des mortiers normalisés est demandée, cette dernière qui se traduit par une portion de ciment (450 g), trois portions de sable normalisé (1350 g), avec un rapport E/C = 0.5.

Dans ce travail, la composition du nouveau mortier à étudier est la même que celle du mortier normalisé, le ciment étant modifié par le nouveau ciment élaboré (voir Tableau II.3), en tenant compte des changements de poids du ciment et non de volume. Les formulations obtenues sont regroupées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau II.3 :** Composition des mortiers étudiés

<b>Teneur en cendre [%]</b>	<b>0</b>	<b>2.5</b>	<b>5</b>	<b>7.5</b>	<b>10</b>
<b>Ciment CEM I 42.5 R [g]</b>	450	438.75	427.50	416.25	405
<b>Sable normalisé [g]</b>	1350	1350	1350	1350	1350
<b>Eau [g]</b>	225	225	225	225	225
<b>COP [g]</b>	0	11.34	22.68	34.02	45.36
<b>COV [g]</b>	0	10.31	20.61	30.92	41.23
<b>CB [g]</b>	0	5.59	11.18	16.77	22.35

### **II.4.1. Confection des éprouvettes (malaxage, mise en place et conservation) :**

Dans ce travail nous avons confectionnés 189 éprouvettes de dimensions (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup> dans des moules de dimensions respectives.

#### **II.4.1.1. Préparation de la pâte :**

Nettoyage et séchage parfait des instruments (malaxeur, cuve...).

- Introduire 450 g de ciment pour le mortier témoin ou le poids équivalant selon la cendre du déchet (os poulet, os vache ou bois).
- Introduire 1350g de sable normalisé (Mettre le malaxeur en route, vitesse lente pendant 60 s, l'introduire régulièrement du sable se fait entre la 30<sup>ème</sup> et la 60<sup>ème</sup> Seconde).
- Stopper le malaxeur, mettre la vitesse rapide et relancer le malaxeur pendant 30 s.
- Stopper le malaxeur pendant 1 min 30 s et nettoyer les parois du récipient pendant les 15 premières secondes.
- Ajoutez de l'eau et remettre le malaxeur en route, vitesse rapide durant 60 s.



Figure II.19 : Les étapes de préparation de la pâte du mortier normalisé



Figure III.20 : Les étapes de préparation de la pâte des nouveaux mortiers

### **II.4.1.2. Confection des éprouvettes :**

À effectuer immédiatement après préparation du mortier.

- Les moules sont bien nettoyés, et bien montés.
- Enduire les parois latérales des moules d'une légère couche d'huile de décoffrage avant chaque confection des éprouvettes (Figure II.21).
- Introduire la première des deux couches de mortier dans chaque compartiment.
- Etaler la couche en utilisant la plus grande spatule tenue verticalement.
- Serrer la première couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine).
- Introduire la seconde couche de mortier.
- Etaler la couche en utilisant la petite spatule tenue verticalement.
- Serrer la deuxième couche de mortier par 60 chocs (réglage de la machine) (Figure II.22).
- Ôter la hausse et enlever l'excédent de mortier avec la règle plate à araser (Figure II.23).
- Etiqueter les moules pour identifier les éprouvettes (noms, date, caractéristiques).



**Figure II.21 :** Lubrification des moules (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup>



**Figure II.22 :** vibration des moules



**Figure II.23 :** Dernière vibration et rasage

### **II.4.1.3. Conservation des éprouvettes :**

- Poser une plaque en verre ou en acier sur le périmètre du moule.
- Placer le moule dans une pièce humide pendant 24 heures.
- Démouler ensuite les éprouvettes avec précautions et marquer les éprouvettes (Figure II.24).
- Conserver les éprouvettes dans l'eau à (20 ± 1) °C (Figure II.25).



Figure II.24 : Démolition des éprouvettes



Figure II.25 : Cure des éprouvettes à l'eau pendant (2, 7, 28 et 56) jours

**II.4.2. Caractérisation à l'état frais :****II.4.2.1. Masse volumique apparente :**

La masse volumique apparente à l'état frais fait référence à la masse par unité de volume d'un matériau de construction en vrac, tel que le béton, le mortier ou le sol, au moment de sa mise en place ou de sa mise en forme. Cette mesure est importante car elle permet d'évaluer la compacité et la densité du matériau lorsqu'il est fraîchement préparé avant son durcissement ou sa consolidation.

Voici quelques points importants concernant la masse volumique apparente à l'état frais :

- **Détermination :** La masse volumique apparente à l'état frais est généralement mesurée en laboratoire ou sur le chantier à l'aide d'un cylindre ou d'un moule de volume connu. Le matériau est placé dans le cylindre ou le moule de manière standardisée, puis sa masse est mesurée à l'aide d'une balance, tandis que le volume est mesuré à partir des dimensions du cylindre ou du moule.
- **Influence sur la performance :** La masse volumique apparente à l'état frais est un indicateur de la compacité et de la consistance du matériau. Une masse volumique apparente élevée peut indiquer une bonne compacité et une réduction des vides, ce qui peut contribuer à une meilleure résistance, durabilité et performance globale du matériau une fois durci.
- **Contrôle qualité :** La mesure de la masse volumique apparente à l'état frais est souvent utilisée comme un élément du contrôle qualité des matériaux de construction. Elle permet de vérifier que le matériau est correctement dosé, mélangé et mis en place selon les spécifications requises pour assurer des performances optimales.
- **Paramètre de conception :** Dans la conception de structures en béton ou en sol, la masse volumique apparente à l'état frais peut être un paramètre important à prendre en compte pour garantir que les propriétés mécaniques et le comportement du matériau correspondent aux exigences de conception.

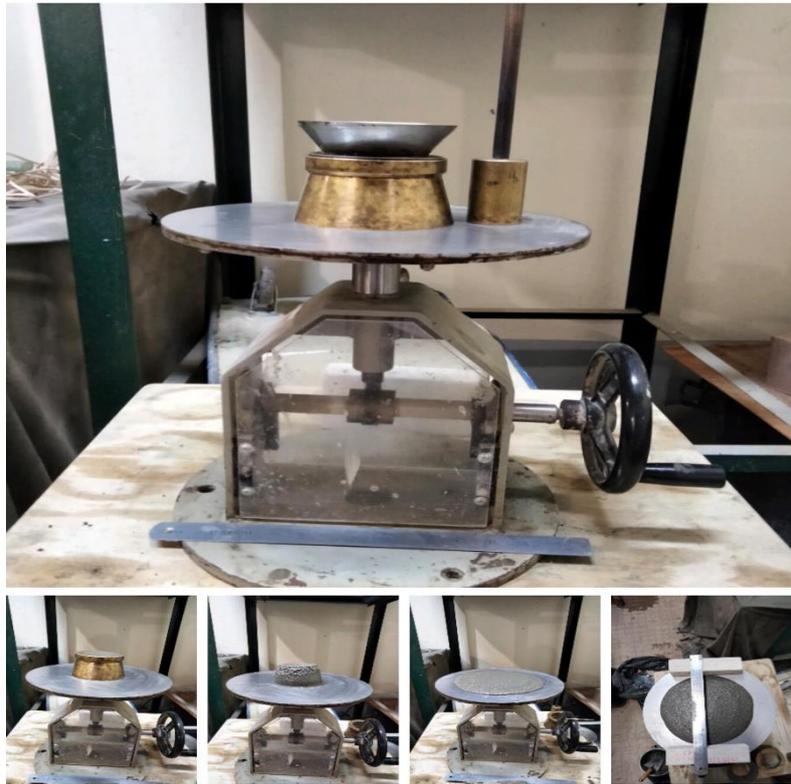
**II.4.2.1. Contrôle de la plasticité (étalement) :**

L'essai d'étalement est utilisé pour comprendre le comportement des fines des cendres d'os des poulets, des vaches ou du bois lors de leur mélange avec le ciment. La mesure des diamètres d'étalement des pâtes fraîches sur une surface plane permet le contrôle de la consistance et le suivi de la maniabilité des formulations.

L'essai d'étalement est basé sur la norme NF EN 1015-3 d'octobre 1999 [29]. Il est réalisé à température ambiante, avec un malaxage pendant 3.5 min, puis un coulage à deux couches de la pâte du mortier dans un cône standard (Figure II.26) ayant un diamètre intérieur de 10 cm et un diamètre supérieur de 7 cm. 15 secousses de la table puis le soulèvement du cône et l'étalement de la pâte, deux mesures sur deux diamètres perpendiculaires ( $D_1$  et  $D_2$ ) sont effectuées. La valeur d'étalement est donnée par la formule :

$$F = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (3)$$

Avec  $D_1$  et  $D_2$  les deux diamètres perpendiculaires (en cm).



**Figure II.26 :** Tests d'étalement

### **II.4.3. Caractérisation à l'état durci :**

#### **II.4.3.1. Caractérisation physique :**

##### **II.4.3.1.1. Porosité accessible à l'eau :**

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF P18-459 août 2022 [30]. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes ( $4 \times 4 \times 16$ ) cm<sup>3</sup> dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de (7, 28 et 56) jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. L'essai comprend les étapes suivantes :

##### **a) Pesée hydrostatique :**

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision 0.01g) pour obtenir  $M_{\text{eau}}$  de l'éprouvette immergée dans l'eau.

##### **b) Pesée à l'air :**

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à

l'air à 0.01g près. On obtient de cette manière, la masse  $M_{\text{air}}$  de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un mortier, l'essai est réalisé sur 3 échantillons.

**c) Pesée à sec :**

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 48 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05%. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche  $M_{\text{sec}}$ . On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau P :

$$P = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \quad (4)$$



**Figure II.27 :** Balance hydrostatique

**II.4.3.1.2. Absorption par immersion totale :**

L'absorption par immersion totale est une méthode utilisée pour mesurer la capacité d'un matériau à absorber l'eau. Cette méthode est souvent employée pour évaluer la porosité et la perméabilité des matériaux poreux tels que le béton, les céramiques, les pierres naturelles, les briques, les carreaux, et d'autres matériaux de construction. L'absorption d'eau par immersion totale est déterminée selon la norme NBN B 15-215 : 2018 [31], L'absorption d'eau par immersion  $A_b$  est exprimée en pourcentage de la masse sèche et est calculée par la relation suivante :

$$A_b = \frac{M_{\text{eau}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{sec}}} 100\% \quad (5)$$

**II.4.3.1.3. Masse volumique humide et sèche :**

La masse volumique humide et sèche se réfère à la densité d'un matériau ou d'une substance lorsque celle-ci est mesurée dans un état humide (avec une certaine teneur en eau) et dans un état sec (après évaporation de l'eau). Cette différence est souvent importante pour des

matériaux comme les sols, les matériaux de construction et autres substances contenant de l'eau.

- **Masse volumique humide** : Il s'agit de la densité d'un matériau tel qu'il est trouvé dans la nature ou tel qu'il est utilisé, avec une certaine quantité d'eau présente.
- **Masse volumique sèche** : C'est la densité d'un matériau après que toute l'eau libre ou interstitielle a été éliminée par évaporation ou par d'autres moyens.

Les masses volumiques humide (MVH) et sèche (MVS) sont calculées par les expressions ci-après :

$$MVH = \frac{M_{air}}{V} \quad (6)$$

$$MVS = \frac{M_{sec}}{V} \quad (7)$$

Le volume V de l'éprouvette est calculé par la relation suivante :

$$V = \frac{M_{air} - M_{eau}}{\rho_w (=1000)} \quad (8)$$

Avec :  $\rho_w$ , la masse volumique de l'eau considérée égale à 1000 kg/m<sup>3</sup>.

#### **II.4.3.2. Caractérisation mécanique :**

##### **II.4.3.2.1. Module d'élasticité dynamique :**

Dans le contexte du béton, le module d'élasticité dynamique est souvent mesuré à l'aide de techniques de test non destructif telles que la méthode des ondes ultrasonores ou la rhéologie dynamique. Ces méthodes permettent de déterminer comment les propriétés élastiques du béton varient en fonction de la fréquence et de l'amplitude des charges appliquées.

##### **A/ Essai d'ultrasons :**

Pour les corps d'épreuve « support-mortier », les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester en mode directe (Figure II.28). Cet essai est réalisé conformément à la spécification de la norme NA 5027 sur des éprouvettes de dimension (4x4x16) cm<sup>3</sup> à différents âges (2, 7, 28 et 56) jours. La vitesse sonique est un paramètre qui permet d'obtenir une information qualitative sur le matériau et sur la structure. La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le mortier résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton et le mortier. Le principe de la méthode des ultrasons consiste à mesurer le temps de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le mortier.



**Figure II.28 :** Essai de mesure directe du temps de propagation d'onde par Ultrasons

**B/ Relation entre vitesse de propagation et module d'élasticité :**

A partir de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, il est possible de calculer le module d'élasticité dynamique ( $E_d$ ) l'expression suivante :

$$E_d = V^2 \gamma \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (9)$$

Dans laquelle :

$V$  : La vitesse des ondes, exprimée en Km/s ;

$\gamma$  : La masse volumique du béton exprimé en Kg/m<sup>3</sup> ;

$\nu$  : Coefficient de poisson du béton, dont la valeur est de 0.15 pour un béton de haute résistance et de 0.3 pour un béton de faible résistance (valeur usuelle pour les mortiers).

$E_d$  : Module d'élasticité dynamique, exprimé en MPa.

Les mesures ultrasoniques peuvent être interprétées selon les critères décrits dans le tableau II.4 ci-dessous.

**Tableau II.4 :** Relation générale entre la qualité du béton et la vitesse d'impulsion

Vitesse du son (m/s)	Appréciation de la qualité
> 4500	<b>Excellent</b>
3500 à 4500	<b>Bon</b>
3000 à 3500	<b>Assez bon</b>
2000 à 3000	<b>Médiocre</b>
< 2000	<b>Très mauvais</b>

**II.4.3.2.2. Résistance à la flexion :**

Les essais de la résistance à la traction par flexion 3 points ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (4x4x16) cm<sup>3</sup> selon la norme NF P.18-407, il s'agit de calculer la résistance à la flexion 3 points (équation 10) de l'éprouvette à (2, 28 et 56) jours, soumise à un effort centré déterminer à l'aide d'une presse hydraulique (Figure II.29). La résistance à la traction par flexion est calculée à partir de la formule suivante :

$$R_f = \frac{1.5FL}{B^3} \quad (10)$$

$R_f$  : résistance à la flexion en [MPa]

F : la charge appliquée à la rupture en [N]

L : la distance entre les appuis (L = 100 mm)

B : le coté de la section carrée de l'éprouvette (B = 40 mm)



**Figure II.29** : Machine et dispositif de l'essai de la traction par flexion

**II.4.3.2.3. Résistance à la compression :**

La résistance à la compression est un paramètre primordial qui indique la qualité du Béton et du mortier. L'essai de la résistance à la compression a été effectué par une presse de la marque CONTROLS, à vérin hydraulique équipée d'un écran LCD asservi qui permettent de configurer les paramètres de l'essai et la lecture numérique des mesures. Sa capacité maximale en charge est de 500 MPa (Figure II.30).

La valeur finale de la résistance représente la moyenne de trois mesures. Les essais de la résistance à la compression sont effectués à (2, 7, 28 et 56) jours pour toutes les compositions.



**Figure II.30 :** Machine et dispositif de mesure de la résistance à la compression

### **II.4.3.3. Durabilité :**

#### **II.4.3.3.1. Durabilité à l'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> :**

La durabilité du béton dans des environnements acides est évaluée conformément à la norme ASTM C-1012, avec une solution acide couramment utilisée, telle que l'acide sulfurique à 5% (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) voir (Figure II.31), pour simuler des conditions agressives. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour mesurer et comparer les déficiences, notamment :

- La perte de masse ;
- D'autres critères de résistance.



**Figure II.31 :** La bouteille de l'Acide H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> utilisée

Les essais de durabilité ont été effectués pour tous les mortiers étudiés, sur des semi-échantillons de dimension (4x4x16) cm<sup>3</sup> récupérés après l'essai de traction par flexion à l'âge de 28 jours (Figure II.32). Cet essai a duré 60 jours après l'âge de 28 jours.



**Figure II.32 :** Epreuves soumises à l'acide sulfurique  $H_2SO_4$  (5%)

### **II.5. Méthode du plan d'expérience (optimisation du mélange) :**

L'objectif de ce travail est une tentative d'utiliser des déchets ménagers et assimilés pour la fabrication d'un nouveau matériau de construction. Une nouvelle méthode pour l'optimisation des caractéristiques des nouveaux ciments soit des nouveaux mortiers, il s'agit donc de l'utilisation des plans d'expériences numériques, en se basant sur les essais expérimentaux réalisés pour chaque déchet choisis. L'approche consiste à utiliser les plans d'expériences des surfaces de réponses comme technique d'optimisation, en utilisant la catégorie de la centrale composite à l'aide du logiciel Design 13.

#### **II.5.1. Choix du modèle :**

Le modèle quadratique est le modèle adapté pour l'optimisation des mélanges à validés, ce choix s'est basé sur des déterminant  $R^2$  proche de 1 pour chaque réponse (Résistance à la compression  $R_c$ , Résistance à la flexion  $R_f$  et Module d'élasticité dynamique  $E_d$ ). Les trois mélanges optimaux montrés sur le tableau II.5 ci-dessous présentent les premières solutions pour chaque ciblassions des variables d'entrée avec une désirabilité proche de 1.

**Tableau II.5 :** Composition des mélanges optimaux étudiés

Mélange	Ciment [g]	SN [g]	Eau [g]	COP [g]	COV [g]	CB [g]
MPVB1	405	1350	225	22.68	10.31	5.59
MPVB2	405	1350	225	11.34	20.61	5.59
MPVB3	405	1350	225	11.34	10.31	11.18

#### **II.5.2. Validation du modèle :**

Pour la validation du modèle, on a confection trois éprouvettes de chaque mélange, puis ils ont été tester pour une caractérisation mécanique à l'âge de 15 jours.

## **II.6. Conclusion :**

Connaître les raisons du choix des déchets utilisés, notamment les méthodes utilisées pour les préparer afin de réaliser diverses expériences de caractérisation, est considérée comme une étape incontournable pour l'efficacité des résultats obtenus. En plus identifier et choisir le modèle utilisé pour obtenir le mélange optimal qui atteint l'objectif souhaité, cela fait partie des méthodes utilisées dans de tels travaux.

# CHAPITRE III

## Caractérisation et comparaison des ciments élaborés

## **CHAPITRE III : Caractérisation et comparaison des ciments élaborés**

### **III.1. Introduction :**

Les nouveaux ciments sont élaborés et caractérisés chimiquement et physiquement. Les mortiers correspondants aux différents ciments sont confectionnés et soumis aux essais de caractérisation physiques et mécaniques. Les caractérisations étaient notre premier objectif, pour une classification des ciments élaborés en plus d'une comparaison des différents résultats des trois cendres utilisées, puis une optimisation pour pouvoir atteindre notre objectif principal d'élaborer un nouveau matériau de construction à base des déchets ménagers et assimilés. Les essais ont été réalisés au laboratoire de génie civil et d'hydraulique (pédagogique et recherche) à l'université 8 mai 1945 de Guelma.

### **III.2. Résultats et interprétation :**

Pour la préparation des échantillons de ciment, nous avons d'abord réalisé un broyage et un tamisage séparés des matières premières (CEM I 42.5-CPA, cendre d'os de poulet, cendre d'os de vache et cendre de bois). Une fois dosés, les échantillons de ciment ainsi élaborés ont été homogénéisés avant d'être soumis aux essais.

#### **III.2.1. Caractérisation physique :**

##### **III.2.1.1. Masse volumique apparente :**

Les mesures expérimentales des masses volumiques apparentes des déchets sont regroupées dans le Tableau III.1.

**Tableau III.1 : Masse volumique apparente des déchets**

<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP</b>	<b>COV</b>	<b>CB</b>
<b>Masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1.076</b>	<b>0.630</b>	<b>0.668</b>	<b>0.341</b>

- Le CPA, avec la densité la plus élevée, est le plus compact et le moins poreux, ce qui est typique des ciments Portland.
- Les cendres d'os de poulet et de vache, ayant des densités apparentes similaires mais plus basses que le CPA, sont moins compactes et plus poreuses, ce qui peut affecter leur réactivité dans le ciment.
- La cendre de bois, avec la densité la plus basse, est la plus poreuse et la moins compacte, ce qui peut avoir des implications pour ses propriétés mécaniques et son comportement dans les mélanges de ciment.

Ces différences de masse volumique apparente sont cruciales pour comprendre comment chaque matériau influencera les propriétés finales des mélanges de ciment, y compris la résistance, la durabilité et la réactivité.

**III.2.1.2. Masse volumique absolue :**

Les mesures expérimentales des masses volumiques absolue des déchets sont regroupées dans le Tableau III.2.

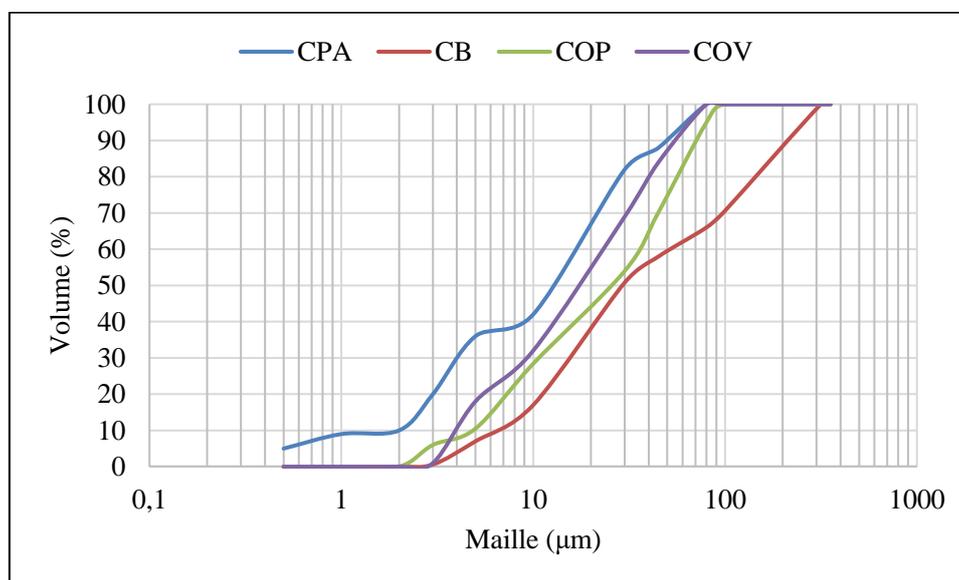
**Tableau III.2 :** Masse volumique absolue des déchets

Echantillons	CPA	Os de poulet	Os de vache	Bois
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.100	3.125	2.840	1.540

- La comparaison entre la masse volumique apparente et la masse volumique absolue donne une idée de la porosité des matériaux.
  - CPA : Dense à la fois en termes de masse volumique apparente et absolue, indiquant un matériau compact avec moins de porosité.
  - COP et COV : Bien que les particules individuelles soient denses (masse volumique absolue élevée), la faible masse volumique apparente indique une structure globale poreuse.
  - CB : La faible densité à la fois apparente et absolue montre que les particules de cendre de bois sont légères et très poreuses.

**III.2.1.3. Analyse granulométrique :**

Les courbes granulométriques fournies montrent la distribution de la taille des particules en termes de pourcentage de volume cumulé pour quatre types de cendres et de ciment : CPA (CEM I 42.5 R-CPA), CB (cendre de bois), COP (cendre d'os de poulet), et COV (cendre d'os de vache).



**Figure III.1 :** Courbes granulométriques des trois cendres et du CPA

- Les courbes montrent que toutes les substances premières (CPA, CB, COP, et COV) ont des distributions granulométriques qui commencent à des tailles de particules très fines (autour de 1 µm) et s'étendent jusqu'à environ 100 µm.

- Les courbes de CPA et CB montrent des distributions plus distinctes, avec le CPA ayant une gamme de tailles de particules plus large et le CB ayant une gamme plus étroite.
- Les courbes de COP et COV sont assez similaires, suggérant des distributions granulométriques comparables pour les cendres d'os de poulet et de vache.

#### **III.2.1.4. Surface spécifique de Blaine (SSB) :**

Le processus de broyage vise à réduire les éléments en une poudre suffisamment fine pour augmenter la réactivité chimique de la matière (une plus grande surface spécifique entraîne une réactivité plus importante). Les mesures de la Surface Spécifique de Blaine des ciments élaborés, effectuées selon la norme NF EN 196-6 [35], sont résumées dans le Tableau III.3.

**Tableau III.3 :** Surface spécifique de Blaine (SSB) des ciments élaborés

<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>2520</b>	<b>2759</b>	<b>2438</b>	<b>2887</b>	<b>2909</b>
<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>2520</b>	<b>2927</b>	<b>2880</b>	<b>1651</b>	<b>2755</b>
<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
<b>SSB (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b>2520</b>	<b>1460</b>	<b>2734</b>	<b>2675</b>	<b>2800</b>

La surface spécifique de Blaine des ciments élaborés indique pour COP une amélioration de la finesse du ciment avec des concentrations plus élevées (7.5% et 10%). Alors que pour COV une meilleure performance à 2.5%, mais une détérioration notable à 7.5%. Tandis que pour CB elle est initialement faible à 2.5%, mais son amélioration continue avec l'augmentation des pourcentages, optimal à 10%.

#### **III.2.1.5. Consistance normale des ciments élaborés :**

L'essai de consistance normale a été effectué conformément à la norme NA 229 [26]. La consistance normalisée d'une pâte de ciment est essentielle pour déterminer les temps de début et de fin de prise. Le Tableau III.4 présente la variation de la demande en eau pour les différents échantillons de ciment en fonction de la teneur en cendre.

**Tableau III.4 :** Consistance normale des ciments élaborés

<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
<b>Consistance (%)</b>	<b>28.40</b>	<b>28.80</b>	<b>30.00</b>	<b>30.00</b>	<b>30.80</b>
<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
<b>Consistance (%)</b>	<b>28.40</b>	<b>28.00</b>	<b>28.20</b>	<b>28.80</b>	<b>30.00</b>
<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
<b>Consistance (%)</b>	<b>28.40</b>	<b>28.40</b>	<b>29.00</b>	<b>32.20</b>	<b>32.40</b>

La consistance normale mesure la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une pâte de ciment d'une fluidité standard, ce qui peut influencer les propriétés de travail et de durabilité du ciment. D'après le Tableau III.4, La consistance des ciments élaborés avec :

- COP : augmente avec l'augmentation du pourcentage, nécessitant plus d'eau pour les pourcentages plus élevés (7.5% et 10%).
- COV : Les pourcentages faibles (2.5% et 5%) montrent une consistance similaire ou légèrement inférieure à CPA, tandis que des pourcentages plus élevés (7.5% et 10%) nécessitent plus d'eau.
- CB : À 2.5%, la consistance est identique à CPA, mais des pourcentages plus élevés (5%, 7.5%, et 10%) nécessitent de plus en plus d'eau, surtout à 7.5% et 10%.

### **III.2.1.6. Temps de prise :**

Le temps de prise d'un ciment est influencé par plusieurs facteurs, notamment la concentration de la solution alcaline, le temps de malaxage, la vitesse de dissolution de la silice et de l'alumine, le rapport massique E/C, la température de traitement et la cristallinité du matériau aluminosilicate. La détermination du temps de début et de fin de prise est réalisée sur des pâtes fraîches de ciment maintenues à la température ambiante du laboratoire ( $21 \pm 1^\circ\text{C}$ ). Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau III.5 et illustrés sur la Figure III.2.

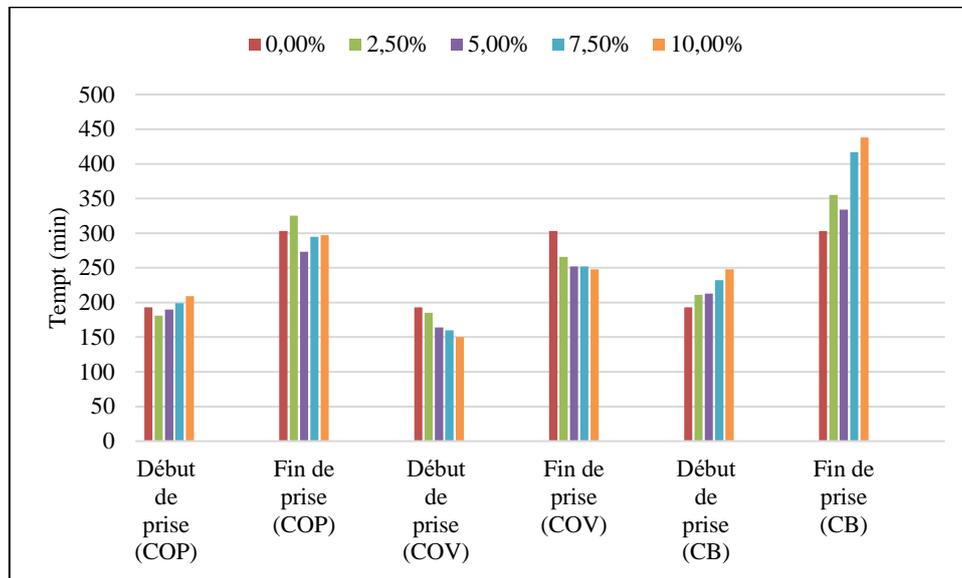
**Tableau III.5 : Temps de prise des ciments élaborés**

Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
T. de début de prise (min)	193	181	190	199	209
T. de fin de prise (min)	303	325	273	295	297
Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
T. de début de prise (min)	193	185	164	160	150
T. de fin de prise (min)	303	266	252	252	248
Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
T. de début de prise (min)	193	211	213	232	248
T. de fin de prise (min)	303	355	334	417	438

Une analyse comparative des résultats regroupés au Tableau III.5 nous a permis de conclure que pour :

- COP : La variation des pourcentages de COP affecte différemment les temps de prise. COP 2.5% accélère le début de prise mais rallonge la fin de prise. COP 5% réduit les deux temps de prise, indiquant une accélération globale du processus. COP 7.5% et COP 10% ralentissent le début de prise et ont des effets variés sur la fin de prise, avec des temps globalement proches du contrôle.

- COV : Tous les pourcentages de COV accélèrent le début et la fin de prise par rapport au contrôle, ce qui suggère que COV est efficace pour réduire le temps de prise global des ciments.
- CB : Tous les pourcentages de CB ralentissent significativement le début et la fin de prise par rapport au contrôle. CB 10% a le plus grand effet de ralentissement, indiquant un processus de prise nettement plus long.



**Figure III.2 :** Temps et fin de prise des ciments élaborés

D'après le Tableau III.5 et la Figure III.2 on peut conclure que pour :

- COP : Varie dans son effet sur le temps de prise. Certains pourcentages (comme 2.5%) peuvent prolonger le processus, tandis que d'autres (comme 5%) peuvent l'accélérer légèrement.
- COV : Accélère de manière uniforme le début et la fin de prise pour tous les pourcentages testés, rendant le processus de prise globalement plus rapide.
- CB : Ralentit de manière uniforme le début et la fin de prise pour tous les pourcentages testés, rendant le processus de prise globalement plus lent.

### **III.2.2. Caractérisation chimique :**

#### **III.2.2.1. Compositions chimiques par fluorescence X :**

La composition chimique des trois cendres utilisés (os de poulet, os de vache et bois), sont déterminée par fluorescence X, est présentée dans le Tableau III.6. En plus est pour une comparaison des composantes chimique du ciment témoin CPA et des ciments élaborés, on a procédé à déterminer et de la même façon par fluorescence X la composition chimique des ciments élaborés à 10% de substitution, qui sont regroupés dans le Tableau III.7.

**Tableau III.6 :** Composition chimique des cendres utilisés

Echantillons	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-
COP	0.33	0.08	0.11	33.34	1.43	0.01	0.4	0.39	-
COV	0.34	0.11	0.07	34.69	1.14	0.01	0.06	0.34	-
CB	9.18	1.89	0.97	25.80	2.14	0.60	1.10	3.40	-

D'après le Tableau III.6 avec une lecture comparative on peut conclure que :

- Les cendres COP et COV ont des compositions chimiques similaires, avec des teneurs en silice, alumine, oxyde de fer, chaux et magnésie relativement proches.
- La principale différence réside dans la teneur en potasse et en soude, qui est plus élevée dans le COP que dans le COV.
- Le CB est riche en silice, en chaux et en magnésie, tandis que le COP et le COV sont plus riches en chaux.
- Le CB, avec sa teneur élevée en chaux et en silice, pourrait avoir des propriétés hydrauliques intéressantes.
- Le COP, avec sa teneur élevée en alcalis, pourrait avoir une influence sur la durabilité du béton.

**Tableau III.7 :** Teneur en oxyde des ciments anhydres (teneur moyenne en masse)

Echantillons	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-
CPA	21,69	5,17	3,74	65,49	2,89	3,46	0,73	0,22	0,037
90% CPA + 10% COP	18,1	4,64	2,55	59,71	2,79	2,44	0,65	0,47	0,07
90% CPA + 10% COV	17,39	4,65	2,52	60,33	2,78	2,54	0,58	0,47	0,04
90% CPA + 10% CB	18,73	4,97	2,8	60,68	2,82	2,83	0,71	0,34	0,04

D'après le Tableau III.7 avec une lecture comparative on peut conclure que :

La substitution de 10% de COP, COV ou CB à 90% de CPA entraîne des modifications mineures de la composition en oxydes des ciments anhydres. Les changements les plus notables concernent les teneurs en SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, qui sont légèrement inférieures dans les mélanges avec des cendres. Les teneurs en CaO, MgO, SO<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O et Cl- restent relativement proches de celles du CPA dans les mélanges.

#### **III.2.2.1.1. Classification des Mélanges Cimentaires selon leur Degré de Réactivité :**

La classification des mélanges cimentaires selon leur degré de réactivité se base sur le calcul du rapport CaO/SiO<sub>2</sub>. Un rapport élevé indique généralement une plus grande réactivité du ciment.

**Tableau III.8** : Classification selon le degré de réactivité

Echantillons	CaO /SiO <sub>2</sub>	Observation	Classification
CPA	3.02	Réactivité Moyenne	Pouzzolanique
COP	101.03	Haute Réactivité	Hydraulique
COV	102.03	Haute Réactivité	Hydraulique
CB	2.81	Réactivité Moyenne	Pouzzolanique
90% CPA + 10% COP	3.3	Réactivité Moyenne	Pouzzolanique
90% CPA + 10% COV	3.47	Réactivité Moyenne	Pouzzolanique
90% CPA + 10% CB	3.24	Réactivité Moyenne	Pouzzolanique

D'après le Tableau III.8 les cendres COP et COV, lorsqu'ils sont utilisés à 10%, augmentent légèrement la réactivité du ciment par rapport à CPA pur, tandis que CB à 10% a un effet moins prononcé. Cependant, Les très hauts rapports CaO/SiO<sub>2</sub> de COP et COV purs indiquent leur potentiel élevé de réactivité lorsqu'ils sont utilisés en grandes quantités.

La classification du CB selon le degré de réactivité est entre 2 et 4 donc il est de nature pouzzolanique, mais pour être utilisé comme, constituant secondaire actif, dans l'industrie du ciment, il doit répondre à certains critères chimiques et physiques. Ainsi aux exigences imposées selon la norme Américaine STM-C-618 (2018) [34], qui sont on générale les trois conditions suivantes :

- 1) La somme totale des trois oxydes (%SiO<sub>2</sub>) + (% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + (% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) supérieure à 70%,
- 2) Le taux de dioxyde de soufre inférieur à 4%,
- 3) La perte au feu inférieur 10%.

Si les trois conditions citées précédemment sont vérifiées, le matériau sera déclaré « pouzzolanique actif ».

En conséquence :

1/ (% SiO<sub>2</sub>) + (% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) + (% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 64.30 + 20.80 + 6.60 = 12.04 % < 70% (**Condition non vérifié**).

2/ (% SO<sub>3</sub>) = 0.6 < 4%

3/ P.A.F : Selon les mélanges jusqu'au 10% de substitution qui attient plus de 7% (voir paragraphe ci-dessous), à 100% le PAF sera supérieur à 10%. (**Condition non vérifié**)

On peut conclure que CB est beaucoup plus un matériaux hydraulique qu'un matériau pouzzolanique.

### **III.2.2.2. Perte au feu (PAF) :**

Les mesures expérimentales de perte au feu des ciments élaborés sont regroupées dans le Tableau III.9.

**Tableau III.9 : Perte au feu des ciments élaborés**

Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
PAF (%)	2.84	3.10	2.99	3.48	3.49
Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
PAF (%)	2.84	3.43	3.15	3.34	3.83
Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
PAF (%)	2.84	4.11	5.26	6.33	7.29

La tendance Générale réplique que la PAF augmente avec l'augmentation du pourcentage de la cendre pour tous les types des cendres testés (COP, COV, CB). Alors que les augmentations marquées pour COP et COV sont modérées, avec une PAF maximale d'environ 3.49% pour COP et 3.83% pour COV à 10% de substitution. Tandis que CB montre une augmentation beaucoup plus importante de la PAF, atteignant jusqu'à 7.29% à 10% de substitution. Cela implique que COP et COV ont des augmentations modérées de la PAF suggèrent des effets modestes sur les propriétés volatiles du ciment, pouvant nécessiter des ajustements mineurs dans le processus de fabrication ou l'usage du ciment. Mais pour CB les augmentations très importantes de la PAF indiquent que CB introduit une quantité significative de matières volatiles, ce qui pourrait nécessiter des ajustements majeurs dans la formulation du ciment pour compenser les effets sur la prise et la durabilité.

Ces résultats soulignent l'importance de contrôler les pourcentages des cendres dans les formulations de ciment pour équilibrer les propriétés mécaniques et la durabilité tout en minimisant les impacts négatifs des matières volatiles.

### **III.2.2.3. Indices d'hydraulicité :**

L'indice d'hydraulicité, ou indice de Vicat, est défini comme le rapport de la fraction acide à la fraction basique du ciment. Le calcul des différents modules hydrauliques est regroupé dans le Tableau III.10.

$$I = \frac{\text{fraction acide}}{\text{fraction basique}} = \frac{\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{CaO} - \text{MgO}} \quad (11)$$

**Tableau III.10 : Indice d'hydraulicité des ciments élaborés**

Echantillons	CPA	90% CPA + 10% COP	90% CPA + 10% COV	90% CPA + 10% CB
I	0.264	0.236	0.221	0.238

Pour classer les ciments selon leur résistance chimique, on doit calculer les valeurs de l'indice d'hydraulicité. Ainsi on distingue [34] :

- Les ciments basiques (ce sont généralement les ciments portland), pour lesquels  $I \leq 0.5$ .
- Les ciments neutres (riches en laitier) pour lesquels  $I > 0.5$ .
- Les ciments acides pour lesquels  $I = 1$ .

Selon la classification mentionnée précédemment, on peut conclure que jusqu'à 10% de substitution tous les ciments préparés peuvent être classés comme des ciments basiques ( $I \leq 0.5$ ).

### **III.3. Caractérisation des nouveaux mortiers :**

#### **III.3.1. À l'état frais :**

##### **III.3.1.1. Masse volumique apparente :**

La mesure de la masse volumique apparente des mortiers normalisés à l'état frais a été effectuée conformément à la norme NF EN 1015-6 [32]. Les résultats obtenus sont regroupés dans le Tableau III.11.

**Tableau III.11 : Masse volumique apparente des mortiers normalisés à l'état frais**

Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	3.549	3.450	3.470	3.441	3.441
Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	3.549	3.524	3.484	3.397	3.433
Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	3.549	3.343	3.301	3.252	3.216

D'après le Tableau III.11 on constate que les cendres COP, COV et CB entraîne une diminution de la masse volumique apparente des mortiers normalisés à l'état frais par rapport au ciment Portland ordinaire (CPA). Une réduction modérée causée par COP, qui se stabilise à des pourcentages plus élevés. Et de même une réduction progressive causée par COV avec un léger regain à 10%. Alors que le CB cause la réduction la plus prononcée et continue, suggérant une augmentation significative de la porosité. Ces constatations impliquent que pour :

- COP et COV : Les réductions de densité apparente peuvent indiquer une légère augmentation de la porosité, ce qui peut affecter la résistance mécanique et la durabilité, mais de manière moins prononcée que CB.
- CB : La diminution substantielle de la densité apparente suggère une porosité accrue, ce qui peut avoir des effets négatifs plus significatifs sur la résistance mécanique et la durabilité des mortiers.

##### **III.3.1.2. L'étalement :**

L'essai d'étalement a été effectué conformément à la norme EN 1015-3 [33]. Cet essai vise à évaluer la maniabilité des mortiers normalisés préparés avec les nouveaux ciments. Les mesures de cet essai sont consignées dans le Tableau III.12.

**Tableau III.12 :** Etalement des mortiers normalisés de ciments élaborés

Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
D <sub>1</sub> (cm)	18.00	19.60	19.20	18.90	17.70
D <sub>2</sub> (cm)	18.00	19.60	19.20	18.80	17.70
$F = \frac{D_1 + D_2}{2}$ (cm)	18.00	19.60	19.20	18.85	17.70
Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
D <sub>1</sub> (cm)	18.00	19.80	19.10	18.20	18.40
D <sub>2</sub> (cm)	18.00	19.80	19.00	18.00	18.40
$F = \frac{D_1 + D_2}{2}$ (cm)	18.00	19.80	19.05	18.10	18.40
Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
D <sub>1</sub> (cm)	18.00	20.00	19.10	17.90	17.10
D <sub>2</sub> (cm)	18.00	19.00	19.60	18.20	17.20
$F = \frac{D_1 + D_2}{2}$ (cm)	18.00	19.50	19.35	18.05	17.15

D'après le Tableau III.12, les cendres COP, COV et CB tend à augmenter la fluidité des mortiers à faibles pourcentages (2.5%), mais des pourcentages plus élevés montrent des réductions dans certains cas. Les cendres COP et CB présentent une augmentation initiale de la fluidité avec un pic à 2.5%, suivie d'une réduction progressive. À 10%, la fluidité est inférieure à CPA. La Meilleure performance globale en termes de fluidité est marquée pour COV, avec une augmentation initiale et une fluidité supérieure à CPA même à 10%. Cela implique que les formulations avec des pourcentages élevés de COP et CB peuvent entraîner une réduction de la maniabilité, ce qui pourrait nécessiter des ajustements dans le processus de mélange ou l'ajout d'adjuvants pour améliorer la consistance. Alors que COV maintient une bonne maniabilité même à des pourcentages plus élevés, suggérant une meilleure performance en termes de fluidité.

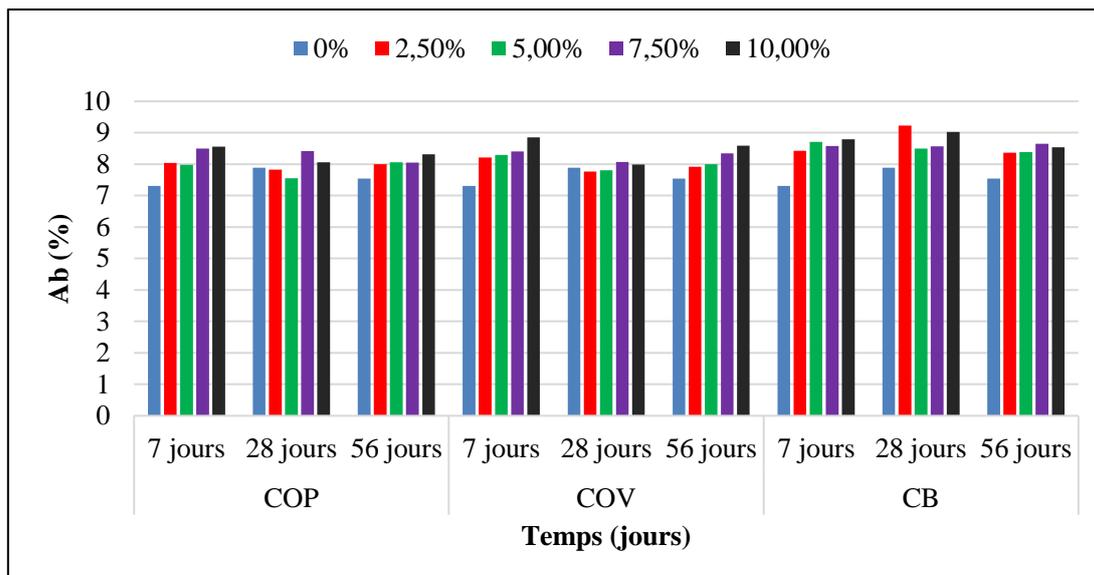
Conformément à la norme NF EN 1015-3 [33], tous mortiers les préparés sont des mortiers plastiques avec une consistance comprise entre 140 et 200 mm.

### **III.3.2. À l'état durci :**

#### **III.3.2.1. Caractérisation physique :**

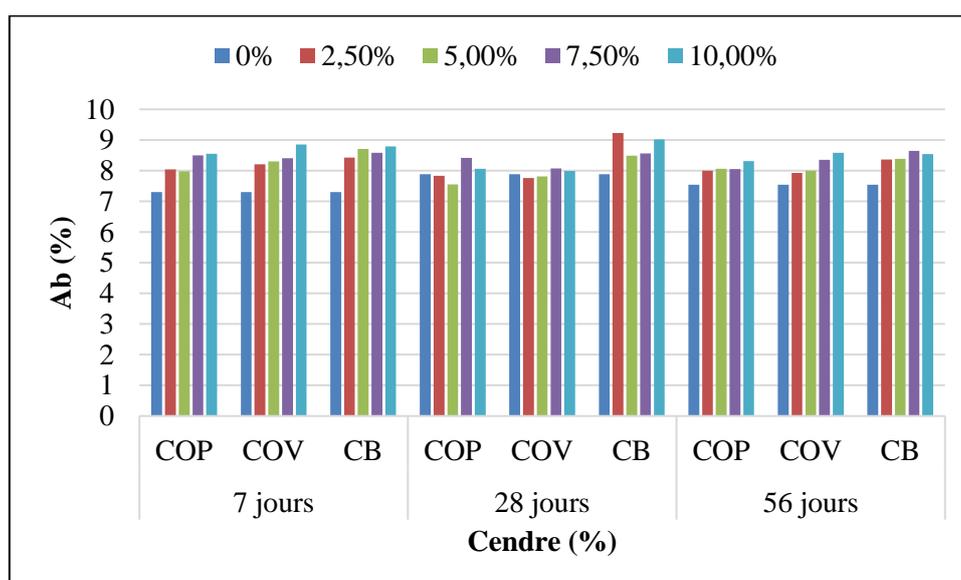
##### **III.3.2.1.1. Absorption par immersion totale :**

L'absorption d'eau par immersion totale d'un mortier est évaluée conformément à la norme NBN B 15.215 (2018) [31]. Après avoir été conservées dans l'eau pendant 07, 28 et 56 jours, les éprouvettes sont retirées de l'eau. Elles sont ensuite séchées jusqu'à ce qu'elles atteignent une masse constante, puis immergées dans l'eau pendant 48 heures. Les détails de l'effet du déchet et de l'évolution dans le temps sont illustrés respectivement dans les Figures III.3 et III.4.



**Figure III.3 :** Influence du type et du pourcentage de la cendre sur l'absorption par immersion totale des mortiers

D'après la Figure III.3 (voir Tableau 1 Annexe 2), l'absorption par immersion totale des mortiers étudiés augmente généralement avec le temps pour tous les cendres (COP, COV, CB). L'augmentation de la concentration des cendres (de 2.50% à 10.00%) tend à augmenter l'absorption, bien que les différences soient plus prononcées dans certains cas (particulièrement pour le CB). On particulier COP montre une augmentation continue de l'absorption avec l'augmentation de la concentration, particulièrement notable à 56 jours. Alors que COV présente des augmentations plus modérées de l'absorption avec la concentration, avec moins de différences marquées entre les concentrations. Tandis que CB montre une tendance claire d'augmentation de l'absorption avec l'augmentation de la concentration, les différences étant les plus notables parmi les trois cendres, surtout à 56 jours.



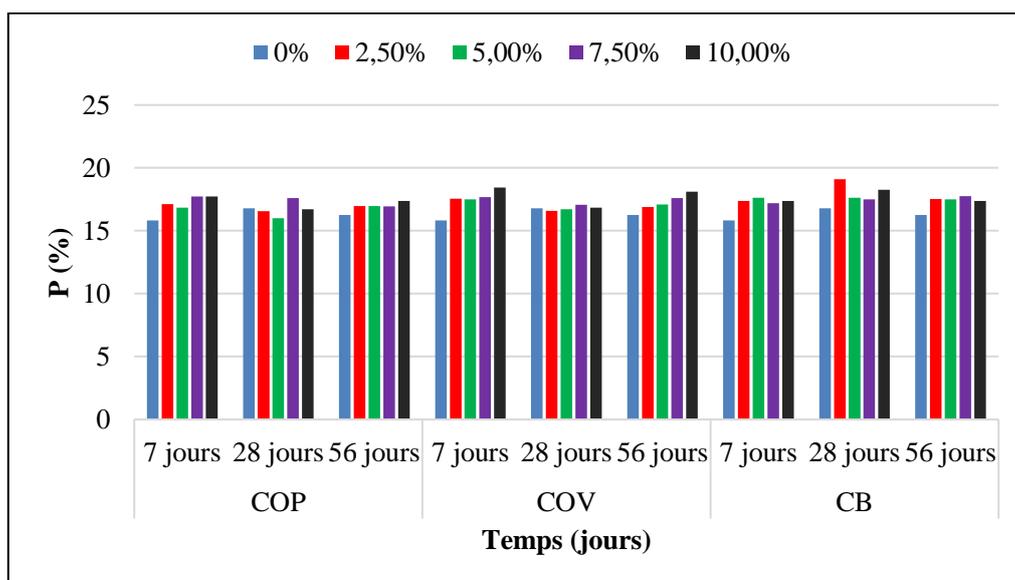
**Figure III.4 :** Evolution de l'absorption par immersion totale des mortiers en fonction du temps

D'après la Figure III.4 (voir Tableau 1 Annexe 2), les mortiers contenant des COP ont une absorption d'eau généralement plus faible que les mortiers de référence, indiquant que les cendres de poulet ont une capacité similaire à filler les pores du ciment et à réduire la porosité du mortier. Alors que les mortiers contenant des COV présentent une absorption d'eau légèrement plus faible que les mortiers de référence surtout à l'âge de 28 jours, mais l'effet est moins marqué que pour COP. Cela suggère que les cendres de vache ont une capacité de remplissage des pores moins importante que ce dernier. Tandis que l'effet des CB sur l'absorption d'eau est variable selon les résultats, avec une convergence à celles des COV à l'âge de 56 jours à des teneurs élevées (7.5% et 10%).

### III.3.2.1.2. Porosité accessible à l'eau :

La mesure de la porosité accessible à l'eau a été effectuée en utilisant la méthode des pesées hydrostatiques conformément à la Norme NF EN18-459 (2010) [30].

Les résultats de l'essai de mesure de la porosité accessible à l'eau des mortiers normalisés contenant différents pourcentages de cendres tels que des os de poulet, des os de vache et du bois sont représentés en premier temps dans la Figure III.5 pour l'effet du déchet, et en deuxième temps dans la Figure III.6 pour l'évolution en fonction du temps.

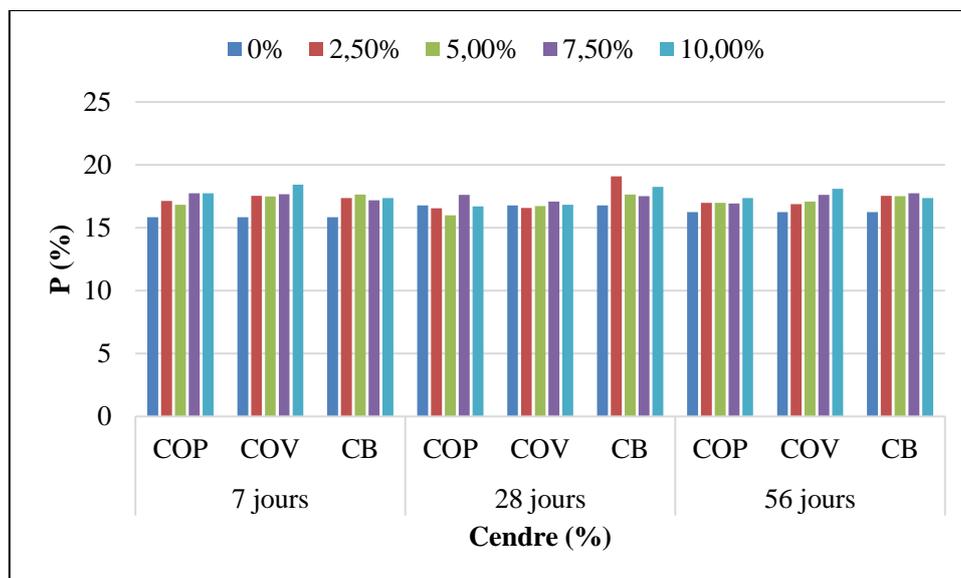


**Figure III.5 :** Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la porosité accessible à l'eau des mortiers

D'après la Figure III.5 (voir Tableau 2 Annexe 2), tous les types de mortiers présentent une diminution de la porosité accessible à l'eau au cours du temps jusqu'à l'âge de 28 jours puis une légère augmentation au cours des 56 jours. Cela est dû au phénomène d'hydratation du ciment, qui entraîne la formation de produits d'hydratation qui remplissent les pores du mortier.

En comparant les trois types de cendres, on peut observer que la porosité accessible à l'eau de la cendre CB est la plus élevée à tous les moments d'analyse, suivie de la cendre COV et enfin de la cendre COP. Cette différence de comportement peut être attribuée à des variations dans

la composition et la microstructure des cendres, influençant leur aptitude à développer une porosité accessible à l'eau.



**Figure III.6 :** Evolution de la porosité accessible à l'eau des mortiers en fonction du temps

D'après la Figure III.6 (voir Tableau 2 Annexe 2), la porosité accessible à l'eau des mortiers avec COP montre une augmentation générale avec des pourcentages de cendres plus élevés, bien que quelques fluctuations mineures soient observées. Alors que ceux avec COV présentent une augmentation plus constante de la porosité avec une teneur en cendres plus élevée, particulièrement visible sur des temps de durcissement plus longs. Tandis que ceux avec CB présentent le plus de variabilité, avec des augmentations significatives à certains moments (par exemple, 2,5 % à 28 jours) mais moins de cohérence dans l'ensemble. CB présente des motifs irréguliers, indiquant que son impact sur la porosité pourrait être plus complexe et potentiellement influencé par d'autres facteurs.

### III.3.2.1.3. Masse volumique humide et sèche :

Les résultats des masses humides et sèches ainsi que l'effet du déchet et leurs évolutions en fonction du temps sont représentés respectivement dans les Figures III.7, III.8 pour MVH, et les Figures III.9, III.10 pour MVS.

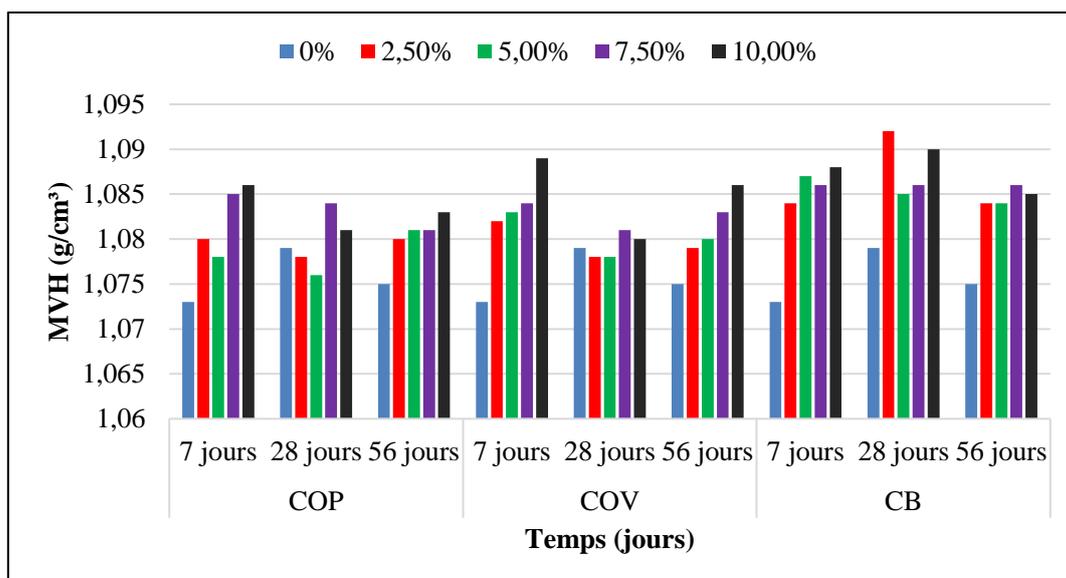


Figure III.7 : Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la MVH des mortiers

D'après la Figure III.7 (voir Tableau 3 Annexe 2), l'augmentation est plus visible à 7 jours, avec moins de variation à 28 et 56 jours. Les mortiers avec COV et CB ont tendance à montrer des augmentations de MVH plus élevées que les mortiers avec COP, particulièrement visibles à 7 jours et 28 jours. Les mortiers avec CB présente plus de fluctuations à 28 jours, ce qui indique qu'il pourrait être plus sensible aux changements de teneur en cendres au cours de cette période. À mesure que le temps de durcissement passe de 7 jours à 56 jours, les valeurs de MVH ont tendance à se stabiliser. Cela suggère que l'impact de la teneur en cendres sur la propriété mesurée devient plus cohérent au fil du temps.

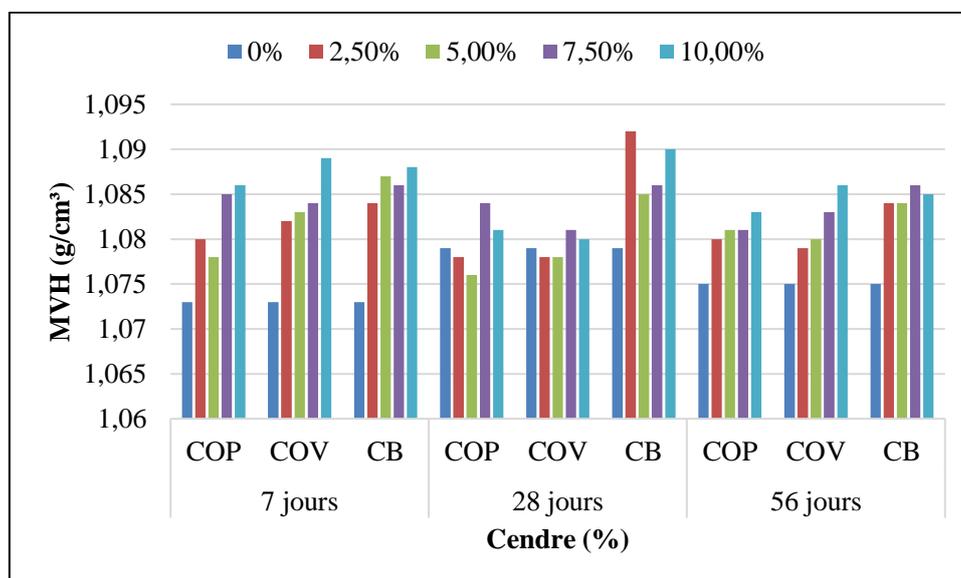
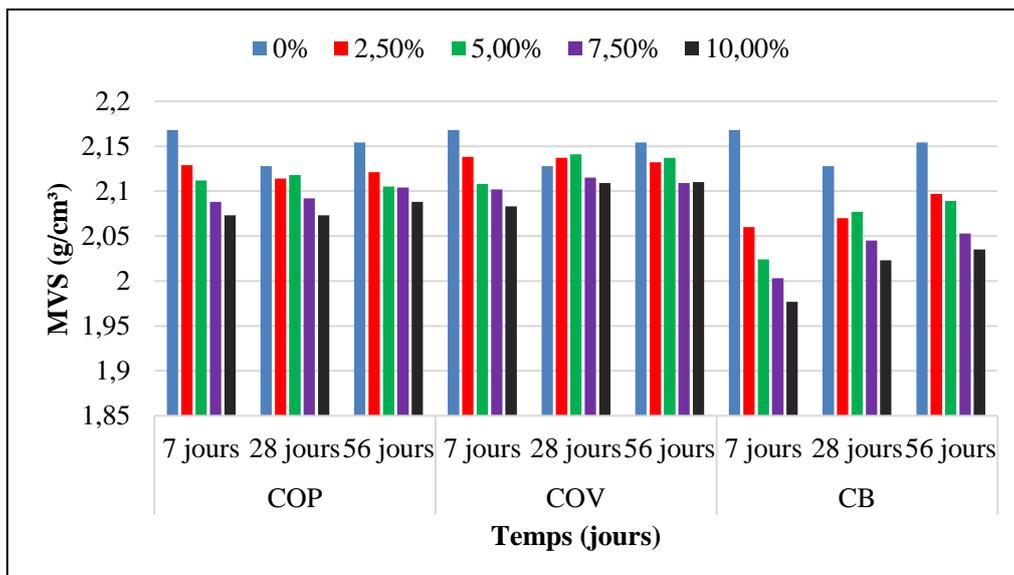


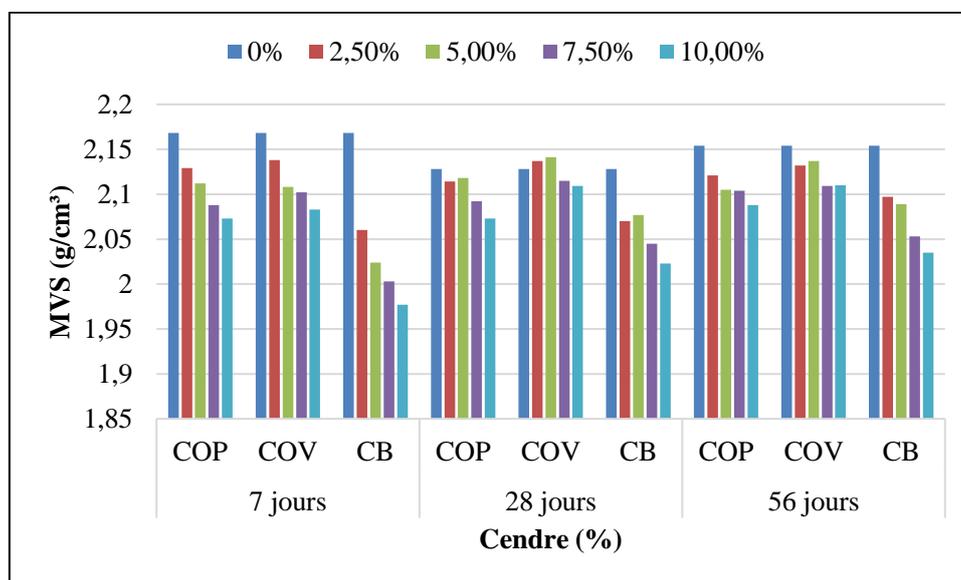
Figure III.8 : Evolution de la masse volumique humide des mortiers en fonction du temps

D'après la Figure III.8 (voir Tableau 3 Annexe 2), pour tous les types de mortiers avec les (COP, COV et CB), il existe une tendance générale à l'augmentation des valeurs de MVH avec les pourcentages de teneur en cendres plus élevés cela confirme les résultats de l'absorption ci-dessus.



**Figure III.9 :** Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la MVS des mortiers

D'après la Figure III.9 (voir Tableau 4 Annexe 2), Pour tous les types des mortiers avec (COP, COV et CB), il existe une nette tendance à la diminution de la densité sèche avec l'augmentation des pourcentages de teneur en cendres. La diminution est plus prononcée pour le CB, indiquant que le CB a un effet plus fort sur la réduction de la densité sèche du mortier. Cela est due à sa masse volumique absolue qui est très léger (voir ci-dessus). Le COP et le COV affichent des tendances décroissantes similaires, mais le COV maintient généralement des densités légèrement plus élevées à des pourcentages intermédiaires.



**Figure III.10 :** Evolution de la masse volumique sèche des mortiers en fonction du temps

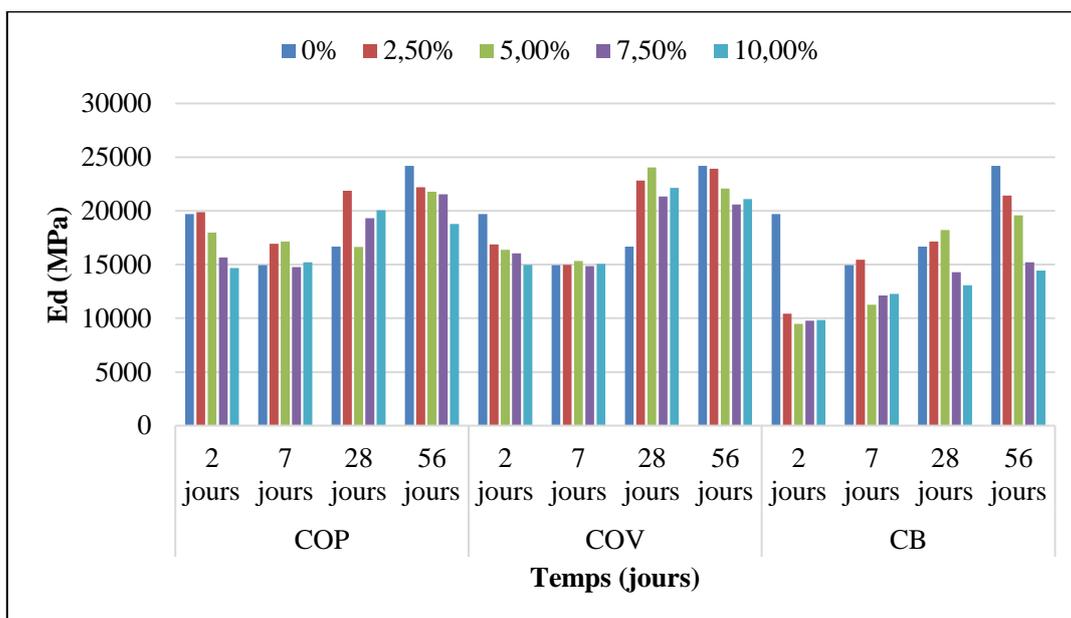
D'après la Figure III.10 (voir Tableau 4 Annexe 2), les tendances observées à 7 jours se poursuivent généralement à 28 et 56 jours, tous les types des mortiers présentant une diminution de la densité sèche avec une augmentation de la teneur en cendres. L'ampleur de la baisse tend à se stabiliser dans le temps, particulièrement visible pour les mortiers avec CB.

Ces derniers présentent systématiquement la réduction la plus significative de la densité sèche sur tous les temps de durcissement.

### III.3.2.2. Caractérisation mécanique :

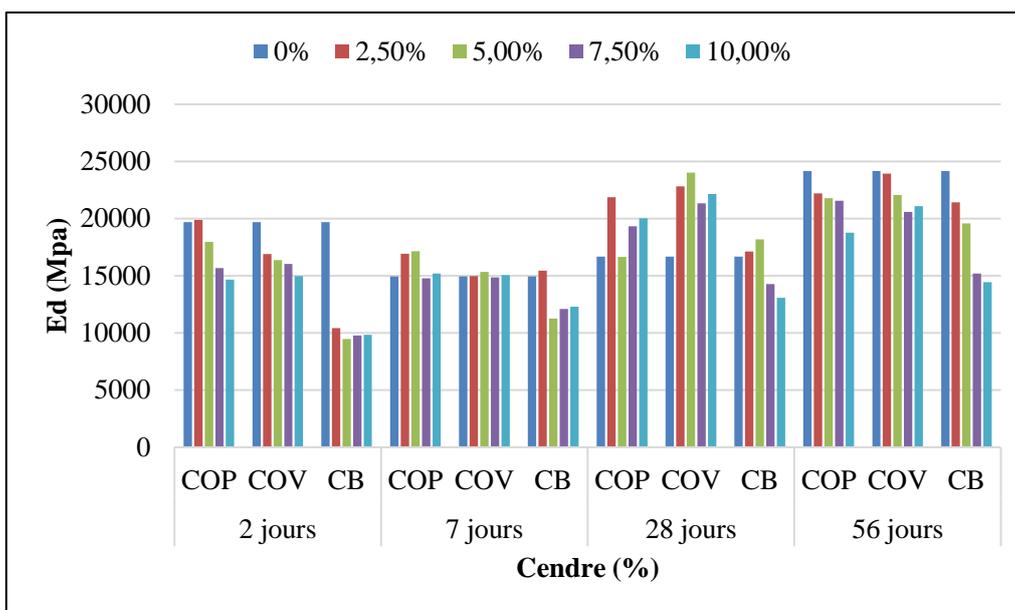
#### III.3.2.2.1. Module d'élasticité dynamique :

Les résultats de calcul du module d'élasticité dynamique à partir de l'essai de mesure du temps de propagation des ondes soniques à travers des mortiers normalisés contenant différents pourcentages de cendres tels que des os de poulet, des os de vache et du bois sont représentés en premier temps dans la Figure III.11 pour l'effet du déchet, et en deuxième temps dans la Figure III.12 pour l'évolution en fonction du temps.



**Figure III.11 :** Influence du type et du pourcentage de la cendre sur le module d'élasticité dynamique des mortiers

D'après la Figure III.11 (voir Tableau 5 Annexe 2), les mortiers avec COP affichent la plus grande stabilité dans le temps avec des fluctuations modérées. Des pourcentages plus élevés entraînent généralement une diminution du module dynamique, sauf augmentations spécifiques à 28 jours. Pour les mortiers avec COV ils présentent une diminution plus constante du module dynamique avec l'augmentation du pourcentage de cendres, avec quelques exceptions à 28 jours et 56 jours où des pourcentages inférieurs (2,5 % et 5 %) montrent une augmentation. Mais les mortiers avec CB présentent des baisses significatives du module dynamique avec des pourcentages de cendres croissants, particulièrement visibles aux premiers stades (2 jours).



**Figure III.12 :** Evolution du module d'élasticité dynamique des mortiers en fonction du temps

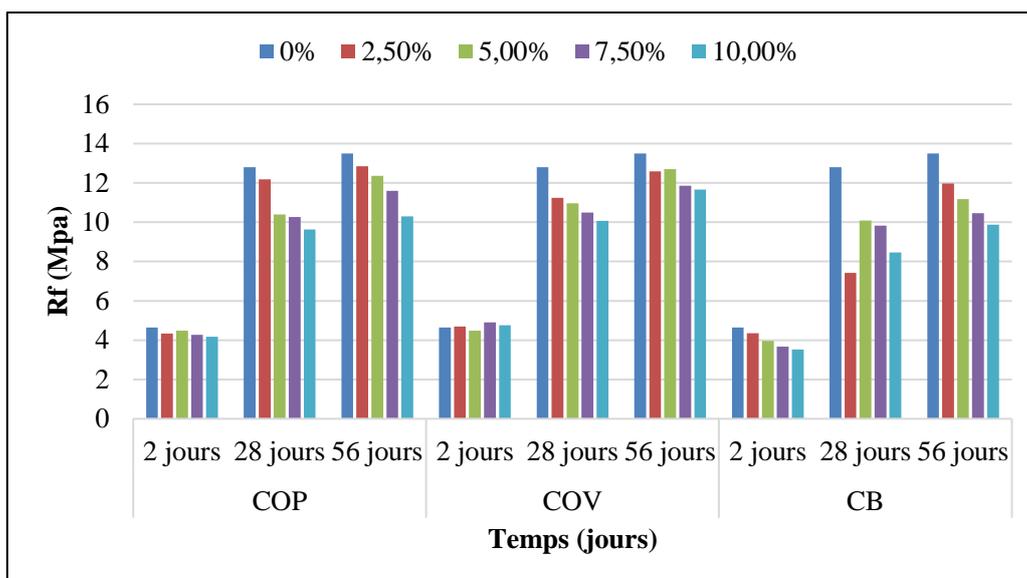
D'après la Figure III.12 (voir Tableau 5 Annexe 2), pour tous les types des mortiers avec (COP, COV et CB), il existe une tendance générale à la diminution du module d'élasticité dynamique avec des pourcentages croissants de teneur en cendres, particulièrement visible lors de temps de durcissement plus courts (2 et 7 jours). La diminution est la plus prononcée pour le CB, indiquant que le CB a un effet plus fort sur la réduction du module élastique dynamique du mortier. Les mortiers avec COP montrent des tendances plus variables, avec quelques augmentations à des pourcentages spécifiques, particulièrement visibles à 28 jours. Alors que les mortiers avec COV montrent des valeurs relativement stables avec des fluctuations mineures, indiquant un effet moins prononcé de la teneur en cendres. Tandis que les mortiers avec CB présentent systématiquement la réduction la plus significative du module d'élasticité dynamique sur tous les temps de durcissement, indiquant une forte sensibilité à la teneur en cendres.

Les tendances observées à 2 jours se poursuivent généralement à 7, 28 et 56 jours, tous les types montrant une diminution du module d'élasticité dynamique avec l'augmentation de la teneur en cendres. L'ampleur de la baisse tend à se stabiliser dans le temps, particulièrement visible en CB.

Différents types de cendres influencent différemment le module dynamique. Le COV a tendance à maintenir ou à augmenter légèrement le module à des pourcentages inférieurs (2,5 % et 5 %) au fil du temps, tandis que le CB présente des diminutions significatives.

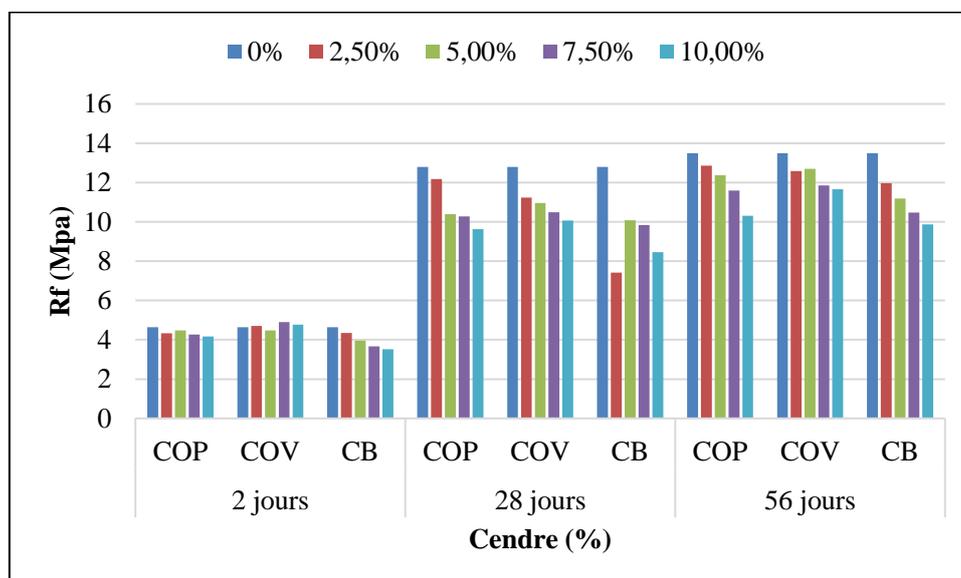
#### **III.3.2.2.2. Résistance à la flexion :**

Les résultats des essais de l'essai de la flexion ainsi que l'effet du déchet et leurs évolutions en fonction du temps sont représentés dans les Figures III.13, III.14.



**Figure III.13 :** Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la résistance à la flexion des mortiers

D'après la Figure III.13 (voir Tableau 6 Annexe 2), la résistance à la flexion des ciments avec cendres (COP, COV et CB) présente une évolution différente de celle du CPA (ciment de référence) en fonction du temps et du pourcentage de cendres. Pour la plupart des types de cendres, on observe une diminution de la résistance à la flexion avec l'augmentation du pourcentage de cendres, excepté pour le COV à 2 jours et 56 jours. La résistance à la flexion augmente généralement avec le temps pour tous les types de ciments et de pourcentages de cendres.



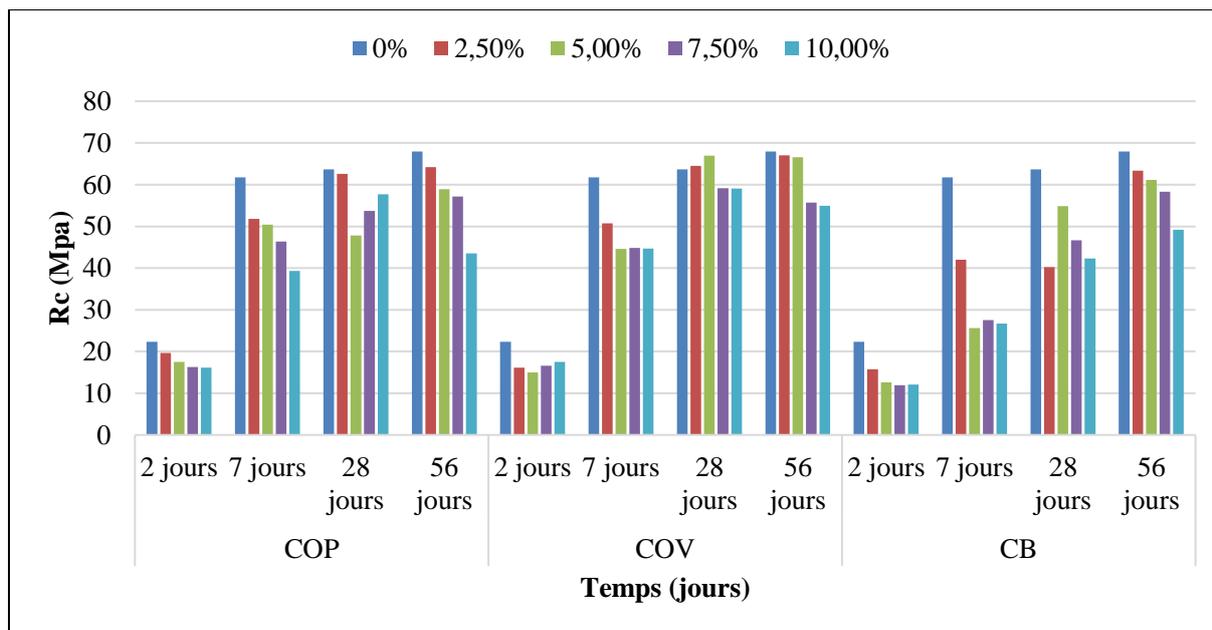
**Figure III.14 :** Evolution de la résistance de la flexion des mortiers en fonction du temps

D'après la Figure III.13 (voir Tableau 6 Annexe 2), la résistance à la flexion des mortiers avec COP est généralement inférieure à celle du mortier témoin avec CPA, surtout pour les pourcentages de cendres élevés (7,5% et 10%). Alors que les mortiers avec COV présentent

un comportement plus variable, avec une résistance à la flexion comparable au mortier témoin avec CPA à 2 jours et 56 jours pour certains pourcentages (2,5% et 10%), mais inférieure pour d'autres (5% et 7,5%). Tandis que les mortiers avec CB montrent la plus forte diminution de la résistance à la flexion avec l'augmentation du pourcentage de cendres, et sa performance reste inférieure au mortier témoin avec CPA à tous les âges et pourcentages testés.

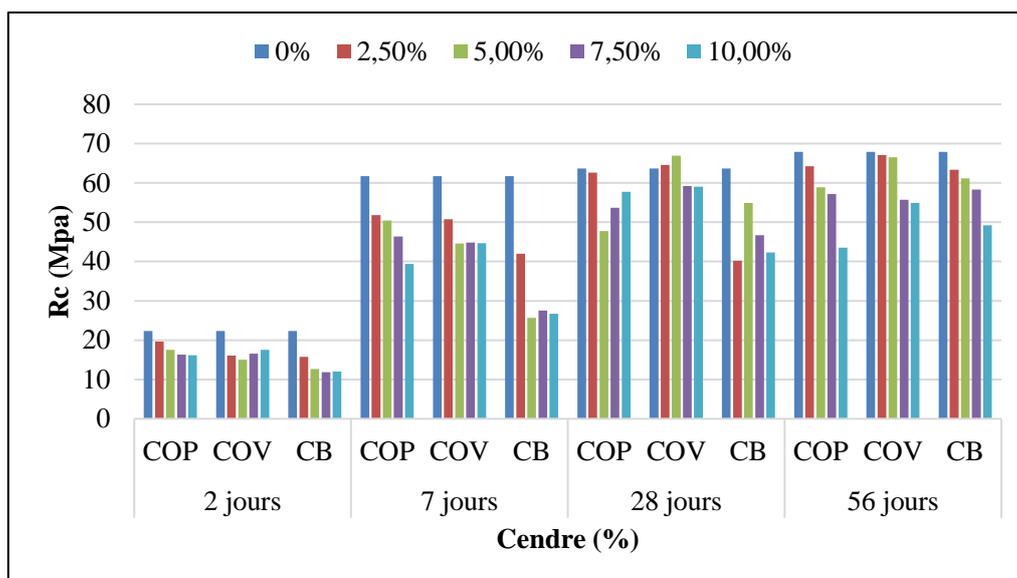
**III.3.2.2.3. Résistance à la compression :**

Les résultats des essais de l'essai de la flexion ainsi que l'effet du déchet et leurs évolutions en fonction du temps sont représentés dans les Figures III.15, III.16.



**Figure III.15 :** Influence du type et du pourcentage de la cendre sur la résistance à la compression des mortiers

D'après la Figure III.15 (voir Tableau 7 Annexe 2), les mortiers avec COP montrent une sensibilité significative à la cendre, avec une résistance à la compression optimale généralement observée à des pourcentages inférieurs (2,5 % ou 5 %). Alors que pour les mortiers avec COV et CB présentent une tendance générale à l'augmentation de la résistance à la compression avec des pourcentages des cendres plus élevés, avec quelques variations et pics à des pourcentages spécifiques.



**Figure III.16 :** Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du temps

D’après la Figure III.16 (voir Tableau 7 Annexe 2), les mortiers avec COP affichent généralement une résistance à la compression maximale d’environ 5 % de substitution après 2 et 7 jours. Toutefois, le pic passe à 2,50 % pour des périodes de durcissement plus longues (28 et 56 jours). Alors que pour les mortiers avec COV ils Démonstrent une augmentation constante de la résistance à la compression avec un pourcentage des cendres croissant, montrant en particulier la résistance la plus élevée à 10 % après des périodes de durcissement plus longues. Tandis que pour les mortiers avec CB la résistance à la compression la plus élevée est généralement observée à 2,50 % des cendres, particulièrement visible après 28 et 56 jours de durcissement.

### III.3.2.3. Durabilité :

#### III.3.2.3.1. Durabilité à l’acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> :

Afin d’évaluer la durabilité des ciments élaborés et de refléter l’impact de l’environnement de stockage sur les échantillons préparés, nous avons immergés des échantillons de mortier normalisés dans une solution d’acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) à 5% de concentration pendant une durée de 60 jours, avec un cycle de 15 jours. À la fin de cette période, les échantillons ont été pesés. Les données recueillies ont été consignées dans le Tableau III.13.

**Tableau III.13 :** Perte de masse des mortiers soumises à l’acide sulfurique

Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
Perte de masse (g)	- 81.00	- 63.40	- 85.35	- 87.85	- 91.75
Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
Perte de masse (g)	- 81.00	- 80.10	- 80.70	- 80.43	- 79.05
Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
Perte de masse (g)	- 81.00	- 91.45	- 78.15	- 96.53	- 91.05



**Figure III.17 : Dégradation des différents mortiers élaborés**

D'après le tableau III.13 et la Figure III.17 tous les mortiers, avec ou sans cendres, présentent une perte de masse après 60 jours de leur exposition à l'acide sulfurique. La perte de masse la plus faible est observée pour les mortiers avec COV 2,5%, 5% et 7,5%, suivis des mortiers avec COP 2,5% et CB 2,5%. Les mortiers avec COV semblent avoir une meilleure résistance à l'acide sulfurique que les mortiers avec COP, à l'exception du cas de COP 2,5%. Les mortiers avec CB présentent une performance comparable aux mortiers avec COP, voire légèrement inférieure pour les pourcentages de substitution élevés (7,5% et 10%).

### **III.4. Elaboration d'un ciment optimal :**

L'élaboration des trois ciments optimaux était le résultat d'une optimisation par la méthode des plans d'expériences avec surface de réponse. La confection de 09 éprouvettes de dimension (4x4x16) cm<sup>3</sup>, ainsi que leur conservation et les essais de leur caractérisation mécanique (résistance à la compression, module d'élasticité dynamique et résistance à la flexion), étaient les mêmes présentés dans le chapitre II.

#### **III.4.1. Modèle utilisé :**

Le modèle utilisé pour lier les facteurs d'entrée (pourcentage du CPA, de COP, de COV, de CB et l'âge) et les réponses de sortie ( $R_c$ ,  $E_d$  et  $R_f$ ) est le modèle quadratique. L'analyse de l'ANOVA de ce modèle, la statistique d'ajustement et les équations du modèle a donné les résultats regroupés dans les Tableaux III.14, III.15 et III.16 respectivement :

**Tableau III.14 :** Analyse de l'ANOVA du modèle

Reponse	Source	Somme des carrés	df	Carré moyen	F-Valeur	p-Valeur	Observation
<b>R<sub>c</sub></b>	Modèle	15935.63	11	1448.69	56.22	< 0.0001	Significatif
<b>E<sub>d</sub></b>	Modèle	5.314E+08	11	4.831E+07	11.88	< 0.0001	Significatif
<b>R<sub>f</sub></b>	Modèle	429.14	11	39.01	75.32	< 0.0001	Significatif

D'après le Tableau III.14 les F-valeur du modèle choisi pour les trois réponses implique que tous les modèles sont significatifs. Il n'y a que 0,01 % de chance qu'une F-valeur aussi élevée se produise en raison du bruit.

**Tableau III.15 :** Statistiques d'ajustement des réponses

Réponse	R <sub>c</sub>	E <sub>d</sub>	R <sub>f</sub>
<b>R<sup>2</sup></b>	0.9582	0.8287	0.9684
<b>R<sup>2</sup> ajusté</b>	0.9411	0.7589	0.9556
<b>R<sup>2</sup> prédit</b>	0.9182	0.6525	0.9484
<b>Précision adéquate</b>	22.2009	13.1337	25.3275

D'après le Tableau III.15 tous les R<sup>2</sup> prédit des réponses sont en accord raisonnable avec le R<sup>2</sup> ajusté correspondants ; c'est-à-dire que la différence est inférieure à 0,2. En plus tous les déterminants R<sup>2</sup> sont proches de 1, qui implique la bonne liaison entre les variables d'entrée et les réponses de sortie. La Précision adéquate qui mesure le rapport signal sur bruit, ce rapport doit être supérieur à 4 pour être souhaitable. Tous les ratios indiquent un signal adéquat. Ces modèles peuvent être utilisés pour naviguer dans l'espace de conception.

Les équations du modèle quadratique obtenues des trois réponses étudiées sont comme suite :

(12) : Celle de la résistance à la compression.

(13) : Celle du module d'élasticité dynamique.

(14) : Celle de la résistance à la flexion.

Ces trois équations sont regroupées dans le tableau III.16 ci-dessous.

**Tableau III.16 :** Les équations du modèle quadratique

$R_c = 63.70 + (6.60 * C) + (3.38 * COP) + (7.51 * COV) + (20.34 * Age) - (1.70 * C * COP) + (0.4843 * C * COV) - (3.34 * C * CB) + (3.25 * C * Ages) - (2.51 * COP * Ages) - (0.4783 * COV * Ages) - (18.37 * (Ages)^2)$	(12)
---	------

$E_d = 26426.74 + (5373.52 * C) + (4762.72 * COP) + (5730.44 * COV) + (2248.27 * Ages) + (542.08 * C * COP) + (822.86 * C * COV) - (1623.41 * C * CB) + (8.32 * C * Ages) - (720.14 * COP * Ages) - (325.90 * COV * Ages) - (1519.46 * (Ages)^2)$	(13)
$R_f = 12.16 + (1.37 * C) + (1.19 * COP) + (1.30 * COV) + (3.97 * Ages) + (0.2335 * C * COP) - (0.0767 * C * COV) - (0.7155 * C * CB) + (0.6433 * C * Ages) + (0.0940 * COP * Ages) + (0.1612 * COV * Ages) - (2.39 * (Ages)^2)$	(14)

### III.4.2. Validation du modèle :

La validation des modèles dans notre travail à consister surtout à une ciblassions des facteurs d'entrée et avoir des solutions qui correspondes à chaque ciblassions, ces derniers sont regroupés dans le Tableau III.17 et leurs solutions dans le Tableau III.18.

**Tableau III.17 : Ciblassions des mélanges de validation**

Mélange	Facteur/réponse	But	Limite inférieure	Limite supérieure
<b>MPVB1</b>	C	Minimiser	90	100
	COP	Ciblé à = 5	0	10
	COV	Ciblé à = 2,5	0	10
	CB	Ciblé à = 2,5	0	10
	Ages	Ciblé à = 15	2	56
	R <sub>c</sub>	Dans l'intervalle	11.887	73.065
	E <sub>d</sub>	Dans l'intervalle	9464.79	24171.4
	R <sub>f</sub>	Dans l'intervalle	3.52	13.502
<b>MPVB2</b>	C	Minimiser	90	100
	COP	Ciblé à = 2.5	0	10
	COV	Ciblé à = 5	0	10
	CB	Ciblé à = 2.5	0	10
	Ages	Ciblé à = 15	2	56
	R <sub>c</sub>	Dans l'intervalle	11.887	73.065
	E <sub>d</sub>	Dans l'intervalle	9464.79	24171.4
	R <sub>f</sub>	Dans l'intervalle	3.52	13.502
<b>MPVB3</b>	C	Minimiser	90	100
	COP	Ciblé à = 2.5	0	10
	COV	Ciblé à = 2.5	0	10
	CB	Ciblé à = 5	0	10
	Ages	Ciblé à = 15	2	56
	R <sub>c</sub>	Dans l'intervalle	11.887	73.065
	E <sub>d</sub>	Dans l'intervalle	9464.79	24171.4
	R <sub>f</sub>	Dans l'intervalle	3.52	13.502

**Tableau III.18 :** Résultats des premières solutions sélectionnées des mélanges de validation

Mélange	C (%)	COP (%)	COV (%)	CB (%)	Agés (jours)	R <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>d</sub> (MPa)	R <sub>f</sub> (MPa)	Désirabilité
MPVB1	90	5	2.5	2.5	15	38.010	16134.231	7.419	1.000
MPVB2	90	2.5	5	2.5	15	38.448	16374.574	7.607	1.000
MPVB3	90	2.5	2.5	5	15	36.482	14648.058	7.320	1.000

#### III.4.2.1. Résultats expérimentaux de validation du modèle :

Les résultats expérimentaux de validation du modèle des trois mélanges élaborés sont regroupés dans le Tableau III.19.

**Tableau III.19 :** Résultats expérimentaux des mélanges de validation

Mélange	C (%)	COP (%)	COV (%)	CB (%)	Agés (jours)	R <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>d</sub> (MPa)	R <sub>f</sub> (MPa)
MPVB1	90	5	2.5	2.5	15	43.6	15819.065	8.89
MPVB2	90	2.5	5	2.5	15	43	16469.819	9.05
MPVB3	90	2.5	2.5	5	15	38.433	13594.643	8.123

En comparant les résultats des deux tableaux III.18 et III.19 on constate clairement que les réponses expérimentales des modèles sont supérieures aux solutions sélectionnées à désirabilité égale à 1, cela implique la validation du modèle choisis.

#### III.5. Conclusion :

L'étude de caractérisation des différents ciments élaborés avec les trois cendres choisies nous a permis de connaître l'efficacité de l'utilisation des cendres comme substitution du ciment. Cela est en comparaison entre les résultats pour chaque cendre. Où on a conclu que les cendres d'os de vache sont les meilleures, suivi des cendres d'os de poulet puis ceux du bois. Les deux meilleurs mélanges optimaux sont ceux soit à maximum de cendre de vache (2.5% COP, 5% COV et 2.5% CB), soit à maximum de cendre de poulet (2.5% COV, 5% COP et 2.5% CB).

# CONCLUSION GÉNÉRALE

## Conclusion générale et perspectives

Cette étude met en lumière une tentative de recherche expérimentale visant à fabriquer un nouveau matériau de construction dont la principale source est les déchets ménagers et assimilés. Afin d'avancer vers cet objectif, il a fallu choisir un ou deux types de ces derniers. Deux types de déchets ménagers ont été choisis (os de poulet et de vache) et un autre type assimilé (déchets de bois), et tous les trois ont été utilisés à l'état carbonisé en fonction des modalités d'élimination au niveau des décharges publiques.

Une caractérisation était inévitable : une caractérisation physique et chimique des trois cendres des déchets sélectionnés et des ciments élaborés avec différentes proportions de remplacement par les cendres, en plus d'une caractérisation des mortiers normalisés produits dans ses états frais et durci (caractérisation physique et mécanique). En plus pour gagner du temps afin de produire du ciment contenant les trois cendres de déchets utiliser, la méthode des plans d'expériences et à l'aide d'un logiciel était utilisée, tout en vérifiant expérimentalement la validité du modèle choisi. D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure :

- Les différences de masse volumique apparente reflètent les variations dans la porosité, la taille des particules et la structure interne des matériaux.
- Le CPA est plus dense et moins poreux, le COP et le COV ont des particules individuelles denses mais une structure globale poreuse et le CB est moins dense et le plus poreux.
- Le CPA et le CB ont des distributions granulométriques distinctes, tandis que le COP et le COV ont des distributions granulométriques comparables.
- L'effet des cendres sur la surface spécifique de Blaine varie non seulement avec le type de cendre mais aussi avec leur concentration.
- Les cendres COV ont un effet moins important sur la consistance que les cendres COP ou CB, en particulier pour les faibles pourcentages.
- Le COV est le plus efficace pour accélérer le processus de prise des ciments, tandis que CB ralentit significativement ce processus. Les effets du COP sont plus variables, avec des tendances à la fois d'accélération et de ralentissement selon le pourcentage utilisé.
- Les trois types de cendres ont des compositions chimiques distinctes. La substitution du CPA par 10% de l'une d'entre elles modifie sa composition chimique, la rapprochant de celle du CPA d'origine.
- La PAF augmente avec l'augmentation du pourcentage de la cendre pour tous les types des cendres testés.
- Chaque cendre influence différemment la densité apparente et, par conséquent, les propriétés finales des mortiers. Une attention particulière doit être portée lors de l'utilisation de CB, en raison de son impact plus important sur la porosité.

- Chaque cendre influence différemment la maniabilité des mortiers, et des ajustements peuvent être nécessaires pour optimiser les propriétés de travail et la performance finale du matériau.
- Les mortiers avec les cendres COP, COV et CB montrent une absorption par immersion totale qui tend à augmenter avec la concentration et le temps. L'effet est plus prononcé avec les cendres COP et CB, où l'absorption augmente de manière significative à des concentrations plus élevées, particulièrement après 56 jours. La cendre COV présente une augmentation plus modérée de l'absorption avec des différences moins marquées entre les concentrations.
- Le type et le pourcentage de cendres utilisées comme substitution dans les mortiers influencent de manière significative la porosité accessible à l'eau. Des pourcentages plus élevés de cendres ont tendance à augmenter la porosité, ce qui pourrait avoir un impact sur la durabilité et la résistance du matériau. Chaque type de cendre présente des comportements différents, ce qui indique que le choix du matériau et sa proportion doivent être soigneusement étudiés dans la formulation du mortier.
- Le type et le pourcentage de cendres utilisées dans les mélanges de mortier affectent la MVH, des teneurs en cendres plus élevées entraînant généralement une augmentation des valeurs. Cet effet a tendance à se stabiliser sur des périodes de durcissement plus longues.
- La substitution du ciment par de cendres réduit la densité sèche des mortiers, l'effet étant plus prononcé lorsque les pourcentages de cendres sont plus élevés. Cette tendance est constante quel que soit le temps de durcissement, ce qui suggère que la réduction de la densité sèche due à la teneur en cendres est un effet stable et durable.
- Les pourcentages de cendres plus élevés (7,5 % et 10 %) entraînent généralement une réduction du module dynamique pour tous les types de cendres, à quelques exceptions près en fonction de la période de temps.
- Le module dynamique a tendance à changer de manière plus significative dans les premiers jours (2 jours), avec une plus grande stabilité observée sur des périodes plus longues (56 jours) pour certains types de cendres.
- La résistance à la flexion des ciments avec cendres est généralement inférieure à celle du CPA, surtout pour les pourcentages de cendres élevés et pour le CB. Le COP et le COV présentent des comportements plus variables, avec des performances parfois comparables au CPA pour certains pourcentages.
- L'efficacité des cendres varie en fonction du matériau et de la période de durcissement, ce qui suggère qu'une sélection minutieuse du pourcentage des cendres est cruciale pour optimiser la résistance à la compression. : Le pourcentage optimal de la COP est d'environ 2,50% à 5%, selon la période de durcissement. Jusqu'à 10 % pour COV en particulier pour des périodes de durcissement plus longues. A un pourcentage de CB de 2,50%, surtout après 28 et 56 jours.
- Les cendres COV, notamment aux pourcentages de 2,5%, 5% et 7,5%, semblent offrir un certain avantage en termes de durabilité des mortiers à l'acide sulfurique par rapport au CPA et CB.
- Tous les mortiers, avec ou sans cendres, montrent une perte de masse inégal après 60 jours d'exposition à l'acide sulfurique.

- La validité du modèle choisi prouve l'efficacité de la méthode des surfaces de réponse pour réduire le nombre de tests et améliorer les résultats expérimentaux

### **PERSPECTIVES :**

- ❖ Etude de la microstructure surtout les échantillons aux résultats critique (maximum ou minimum).
- ❖ Etude de la possibilité de l'utilisation des cendres des décharges publiques.

**RÉFÉRENCE**

**BIBLIOGRAPHIQUE**

## Références bibliographiques

- [1] Joseph ABDO. (09 Juillet 2020). Ciments, Consulté le 22 Mars 2024, sur techniques ingénieur, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/les-materiaux-de-construction-42224210/ciments-c920/differents-types-de-ciment-c920niv10004.html>
- [2] BENCHEIKH A. Contribution à la caractérisation d'un ciment à base du laitier, Mémoire de Master. Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [3] Djebbari O. Influence des Eléments Mineurs et Majeurs sur la Réactivité du Clinker, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 28 Septembre 2020.
- [4] AZZOUZ W, & REZIG M. Valorisation des poussières de farine crue issues de l'industrie ciment dans le traitement des eaux urbaines, Mémoire de Licence, Université MOULAY TAHAR, Algérie, 2014.
- [5] DAHRI L. Analyse expérimentale d'un béton avec ajout de déchet de verre coloré et non coloré (étude comparative), Mémoire de Master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, Algérie, 2019.
- [6] GUENDOOUZ A. & BELGHITI A. Préparation théorique du cru et clinker à ciment par le logiciel de gestion de la qualité, Application à la Cimenterie de Sidi Moussa – ADRAR, Mémoire de Master, Université ABDERRAHMAN MIRA, Algérie, 2018.
- [7] ZOUAI K. Etude du mode de fabrication du ciment et effet des matières premières- Impact de l'utilisation du ciment sur l'environnement, Mémoire de Magister, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Algérie, 2011.
- [8] YAHIA M. Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment, Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [9] MADOUY Y. Recyclage d'un déchet industriel (poussière de By-pass), Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2019.
- [10] DJEKRI D. & BENCHIKH A. ETUDE DE COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DU MORTIER ET BETON A BASE DES CIMENTS TERNAIRES, Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir Elibrahimi – Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2013.
- [11] SAILAA R. L'influence de la chaux libre du clinker sur les Propriétés physico-chimiques et mécaniques du ciment portland. Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF, Algérie, 2016.
- [12] MEBARKI H. Etude comparative des clinkers de l'ouest Algérien : Analyse Physico-chimique et Applications. Mémoire de Master, Université TLEMCEN, Algérie, 2013.
- [13] <https://www.ecolex.org/fr/details/legislation/loi-n-01-19-relative-a-la-gestion-au-controle-et-a-lelimination-des-dechets-lex-faoc043228/>
- [14] <https://www.aps.dz/societe/118150-la-quantite-des-dechets-menagers-en-algerie-depassera-20-millions-de-tonnes-en-2035>

- [15] Shumet Getahun<sup>1</sup> and Bahiru Bewket “ A Study on Effect of Partial Replacement of Cement by Cattle Bone Ash in Concrete Property” Journal of Civil & Environmental Engineering, Volume 11:2, 2021, DOI: 10.37421/jcce.2020.10.354
- [16] Dagnaw S and Mohammed T A 2020 Study on Partial Replacement of Cement with Animal Bone Ash in Concrete at Elevated Temperatures, in: International Conference on Advances of Science and Technology, Springer p 3-16
- [17] Akinyemi B A and Dai C 2020 Development of banana fibre and wood bottom ash modified cement mortars Construction and building materials 241 p 11804
- [18] Raza M S, et al. 2020 Experimental study of physical, fresh-state and strength parameters of concrete incorporating wood waste ash as a cementitious material Journal of Materials and Engineering Structures 7 p 267-276
- [19] M. Kotb, M. Assas & H. Abd-Elrahman “Effect of grounded bone powder addition on the mechanical properties of cement mortar” Design and Nature V 201
- [20] Quadri, A. I. and Ogunsola, O. N. “Influence of cow bone powder on cement partially substitutes in sandcrete blocks”, Proceedings of the 2021 Annual Conference of the School of Engineering & Engineering Technology, FUTA, 6th– 8th October, 2021.
- [21] John K. Makunza “investigation on fired animal bones as aggregate replacement in concrete”, RILEM International workshop on performance-based specification and control of concrete durability 11-13 June 2014, Zagreb, Croatia.
- [22] Biomasse - Définition. (04 Septembre 2022). Consulté le 22 Mars 2024, sur [https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition/biomasse.php4](https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/biomasse.php4)
- [23] <https://standard-sand.com/sables-cen-en-196-1/>
- [24] Norme Algérienne pour les Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle du filler, adopter le 26/11/2005.
- [25] Norme française de la méthode d'essais des ciments - Détermination de la finesse, <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1966/methodes-dessais-des-ciments-determination-de-la-finesse/fa035378/10567>
- [26] Norme Algérienne pour le ciment - Détermination de la consistance normale de la pâte de ciment <https://fr.scribd.com/document/654444023/NA-229>
- [27] Norme Algérienne pour le ciment - Détermination de la perte au feu <https://www.calameo.com/read/001496329d98cc5ccf4b0>
- [28] Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1961/methodes-dessais-des-ciments-partie-1-determination-des-resistances/fa184622/57803>
- [29] Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses) <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10153/methodes-dessai-des-mortiers-pour-maconnerie-partie-3-determination-de-la-c/fa037043/10531>
- [30] Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p18459/beton-essai-pour-beton-durci-essai-de-porosite-et-de-masse-volumique/fa160729/34961>

- [31] Essais sur béton durci - Absorption d'eau par immersion  
[https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40\\_id=350206&p40\\_language\\_code=fr&p40\\_detail\\_id=113243](https://app.nbn.be/data/r/platform/frontend/detail?p40_id=350206&p40_language_code=fr&p40_detail_id=113243)
- [32] NF EN 1015-6 octobre 1999 Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 6 : Détermination de la masse volumique apparente du mortier frais.  
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10156/methodes-dessai-des-mortiers-pour-maconnerie-partie-6-determination-de-la-m/fa037045/10524>
- [33] NF EN 1015-3 octobre 1999 Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 3 : détermination de la consistance du mortier frais (avec une table à secousses)  
<https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10153/methodes-dessai-des-mortiers-pour-maconnerie-partie-3-determination-de-la-c/fa037043/10531>
- [34] SELLAOUI C. Etude comparative des propriétés rhéologiques des pâtes de ciments, Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 de Guelma, Algérie, 2023.
- [35] Norme EN 196-6 SSB : Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse, Décembre 2018.

# ANNEXES

# ANNEXE 1

## FICHE TECHNIQUE DES MATERIAUX



### SPA BISKRIA CIMENT



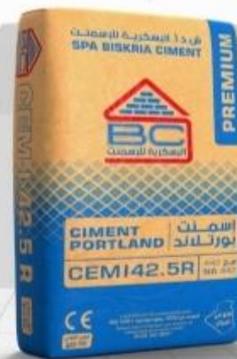
#### FICHE TECHNIQUE

#### CEM I 42.5R CIMENT PORTLAND

Ciment portland, pour les bétons hautes performances et a une résistance rapide à court terme, destiné aux domaines où les délais de décoffrage sont courts, il est recommandé particulièrement pour le bétonnage par temps froid.

#### CEM I 42.5R:

Conforme à la norme Algérienne (NA442-2013).



#### DOMAINES D'APPLICATION

Un ciment pour tous vos travaux de constructions de haute résistance a jeune âge, il est aussi recommandé pour les utilisations suivantes:

- ▶ Produits en bétons qui demandent un durcissement rapide.
- ▶ Le bétonnage dans des coffrages coulissant, surtout en période hivernale.
- ▶ Béton résistant au gel en présence de sels de déverglaçage.
- ▶ Tabliers de ponts.
- ▶ Béton pompé.
- ▶ Béton projeté



#### APPLICATIONS RECOMMANDEES

- ▶ Béton armé à haute résistance.
- ▶ Béton autoplaçant.



Un produit conforme aux normes et spécifications de l'Union européenne. Le marquage CE est une exigence légale pour certains produits sur le marché de l'UE.



Produit conçu et fabriqué sous un Système de Management de la Qualité certifié ISO 9001 par AFAQ-AFNOR.



## FORMULATION CONSEILLÉE

	Ciment	Sable (sec) 0/5	Gravillons (sec) 8/15mm 15/25mm	Eau (litres)
Dosage pour béton	50k X1	X7	+ X5 + X4	+ 25 L
	Ciment	Sable Connecteur 0/1mm	Sable (sec) 0/4mm	Eau (litres)
Mortier de briquetage	50k X1	X6	+ X9	+ 35 L
Mortier de finitions	50k X1	X9	+ X6	+ 35 L

Remarque: un bidon =10 litres

## CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

Analyses chimiques (%)	Valeur	Résistance à la compression	Valeur
Perte au feu	26 – 37	2 jours (MPa)	20 – 29
Teneur en sulfates (SO3)	2.2 – 2.8	28 jours (MPa)	42.5 – 52.5
Teneur en Oxyde de Magnésium (MgO)	1.7 – 2.8		
Teneur en Chlorures (Cl-)	0.03 – 0.07		
Composition Potentielle du Clinker (Selon Bogue) (%)	Valeur		
C3S	56 – 66		
C2S	5.1 – 7.2		
Propriétés physiques	Valeur		
Consistance normale (%)	25.8 – 26.4		
Expansion à chaud (mm)	0.25 – 1.0		
Temps de prise (min)	Valeur		
Début de prise	150 – 190		
Fin de prise	220 - 250		

## CONSIGNES DE SÉCURITÉ

### PROTÉGEZ VOTRE PEAU:

Portez les équipements adaptés dans vos chantiers:



Djar Belahrache, Branis, Biskra, Algérie

Tel: (+213) 0560 753 424  
Fax: (+213) 033 62 73 92

www.biskriaciment-dz.com  
contact@biskriaciment-dz.com



f in @ Biskria Ciment

01/0003



Société Nouvelle du Littoral  
Z.A. - 11370 LEUCATE (France)  
Tél. : +33 (0) 4 68 40 14 05 - Fax : +33 (0)4 68 40 92 72  
e-mail : [contact@s-n-l.fr](mailto:contact@s-n-l.fr)  
site internet : [www.standard-sand.com](http://www.standard-sand.com)

SABLE NORMALISE CEN  
CERTIFIE CONFORME -  
EN 196.1 par l'AFNOR et conforme ISO 679

Contrôlé par le Laboratoire d'Essais des Matériaux de  
la Ville de Paris (L.E.M.V.P.)  
4 Avenue du Colonel Henri Rol-Tanguy  
75014 PARIS

Révisée le 24/06/2022  
Annule et remplace toutes les versions  
précédentes

## FICHE DE DONNEES DE SECURITE PRODUIT : SABLES NORMALISES

Selon la réglementation REACH EC N°1097/2006 et  
CLP EC N°1772/2008

### 1 - Identification de la substance/préparation et de la société/entreprise

**1.1 Nom du produit :** SABLES SILICEUX NORMALISES et SABLES SILICEUX A LA DEMANDE  
**Code fournisseur :** SABLE EN 196-1 & ISO 679 – SABLE EN 196-9 - SABLE de granulométrie selon BS 1881 part 131 - : A (1/2,5) - B (0,7/1,3) - C (0,3/0,6) - D (0,1/0,315) - E (0,05/0,25) – SABLE de granulométrie selon BS4550- SABLE de granulométrie selon ASTM C778 - SABLE NF P 98 216.1- SABLE à la demande de granulométrie spécifiée par le client.

### 1.2 Emploi de la substance/de la préparation et contre-indications

1.2-1 Emploi du produit : le sable est un sable siliceux utilisé selon le code dans le contrôle des résistances mécaniques des ciments, de la mesure de la chaleur d'hydratation des ciments et de la détermination de la macro-texture des chaussées

1-2-2 Contre-indications : Aucune

**1.3 Producteur/fournisseur :** Société Nouvelle du Littoral  
Z.A. - 11370 LEUCATE (France)  
Tél. : +33 (0) 4 68 40 14 05 - Fax : +33 (0)4 68 40 92 72  
[contact@s-n-l.fr](mailto:contact@s-n-l.fr)  
Site Internet : [www.standard-sand.com](http://www.standard-sand.com)

**1.4 Téléphone urgence :** ORFILA (INRS) +33 (0) 1 45 42 59 59  
Service disponible 24h sur 24h, 7 jours sur 7  
Langues : Français

### 2 - Identification des dangers :

#### 2.1 Classification du produit

**2.1.1 Classification selon la réglementation CLP EC N°1772/2008 :** Le sable siliceux n'est pas classé comme matière dangereuse selon la réglementation CLP EC N°1772/2008.

**2.1.3 Etiquetage de danger :** Aucun étiquetage nécessaire (voir section 2.1.1)

**2.1.3 Autres dangers :** des poussières alvéolaires peuvent être générées par les procédés de mise en œuvre utilisés par le client. Celles-ci peuvent avoir des effets sur la santé.

- **Santé :** l'inhalation prolongée ou massive de silice cristalline alvéolaire peut causer des fibroses pulmonaires, faisant généralement référence à la silicose.
- **Environnement :** néant
- **Dangers physiques et chimiques :** néant
- **Risques spécifiques :** silicose
- **Principaux symptômes :** Les principaux symptômes de la silicose sont la toux et la déficience respiratoire. L'exposition aux poussières doit être contrôlée.



S.N.L. fondée en 1910 - SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 - SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS

N° 10-171FR



### 3 – Composition/Informations sur les composants

- 3.1 **Caractérisation chimique** : Quartz - Synonyme : Silice (SiO<sub>2</sub>)  
N° C.A.S. : 14808-60-7  
N° EINECS : 238-878-4  
**Codes identification** : la silice cristalline n'est pas encore classée par la Communauté Européenne. Exemptée d'enregistrement suivant règlement REACH article 2 §7.b et annexe V.
- 3.2 **Mélange** : non applicable

### 4 – Premiers secours

#### 4.1 Mesures pouvant être appliquées en fonction des voies d'exposition :

- **Inhalation** : Faire respirer de l'air frais, consulter un médecin en cas de malaise
- **Contact avec la peau** : Laver à l'eau, consulter un médecin en cas d'irritation persistante
- **Contact avec les yeux** : Laver à l'eau, ne pas se frotter les yeux, le sable pouvant endommager la cornée.
- **Ingestion** : non toxique, consulter un médecin en cas de malaise
- **Information médicale** : aucune réaction allergique connue avec le sable siliceux.

#### 4.2 Symptômes et effets immédiats ou ultérieurs :

- Une irritation de la peau et des yeux est possible en cas de frottement

### 5- Mesures de Lutte contre l'incendie

5.1 **Moyens d'extinction** : Le sable siliceux n'est pas inflammable

5.2 **Danger émanant du produit** : aucun

5.3 **Recommandation pour les pompiers** : aucune. Le sable ne présente aucun danger de feu.

### 6 – Mesure à prendre en cas de rejet accidentel

#### 6.1 Précautions individuelles :

- Eviter la formation de poussières.
- Un appareil respiratoire adapté doit être porté en cas d'atmosphère poussiéreuse.
- Enlever et laver les vêtements poussiéreux
- **Mesures pour la protection de l'environnement** : Pas d'exigence spéciale
- **Méthode de nettoyage / récupération** : Eviter le balayage à sec et utiliser de l'eau vaporisée ou un système d'évacuation par aspiration pour éviter la formation de poussières.
- **Autres Précautions** : voir sections 8 et 13

### 7 – Manipulation et stockage

- **Précautions de manipulation** : Eviter la formation de poussières. Installer des aspirations appropriées aux points d'émission de poussières. En cas de ventilation insuffisante, porter un équipement respiratoire approprié. Se changer et laver ses vêtements poussiéreux. Se laver les mains à la fin du travail et avant de manger.
- **Stockage** : Stocker au sec à l'abri de l'humidité
- **Utilisation finale particulière** : aucune



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS

N° 00-1511FR



## 8 – Contrôle de l'exposition/protection individuelle

**8.1 Contrôle de l'exposition :** Il existe pour toutes les poussières sans effet spécifique une valeur limite réglementaire:

- o 10 mg/m<sup>3</sup> pour les poussières totales
- o 5 mg/m<sup>3</sup> pour les poussières alvéolaires (art. R232.5.5. Du Code du Travail)

En France, le décret n° 97-331 du 10 avril 1997 fixe les valeurs limites obligatoires suivante pour la silice :

- La concentration moyenne en silice cristalline libre, des poussières alvéolaires de l'atmosphère inhalée par un travailleur pendant une journée de travail de 8 h, ne doit pas dépasser 0,1 mg/m<sup>3</sup> pour le quartz.
- Lorsque l'évaluation des risques met en évidence la présence simultanée de poussières alvéolaires contenant de la silice cristalline, de la cristobalite et/ou de la tridymite et/ou d'autres poussières alvéolaires non silicogènes, la valeur limite d'exposition correspondant au mélange est fixée par :  $C_{ns} + C_{q/0,1} + C_{c/0,05} + C_{t/0,05} \leq 1$  avec Cns, Cq, Cs et Ct représentant respectivement les concentrations en poussières : non silicogènes, quartz, cristobalite et tridymite, exprimées en mg/m<sup>3</sup>. Les seuils limites à prendre en compte sont propres à chaque pays.

**8.2 Equipements de protection individuelle :**

**8.2.1 Mesures collectives de contrôle :** Mettre en place une aspiration, une ventilation et une filtration aux points d'émission de poussières :

**8.2.2 Mesures individuelles de contrôle :**

- *Protection des yeux :* Porter des lunettes de protection selon conditions du laboratoire.
- *Protection de la peau, du corps :* Porter des gants adaptés selon conditions du laboratoire.
- *Protection Inhalation :* en cas de développement de poussières, porter un masque adapté de type FFP1 ou 2
- *Mesures d'hygiène :* Ne pas secouer les vêtements de travail - Ne pas dépoussiérer à l'air comprimé. Ne pas boire ou manger dans la zone de travail. Se laver les mains avant de manger.

**8.3 Mesures de contrôle environnemental :** non nécessaire

## 9 – Propriétés physiques et chimiques

### 9.1 Indications sur les propriétés physiques et chimiques

Forme :	sable siliceux à grain arrondi
Couleur :	gris à ocre
Teneur en silice :	> 98%
Odeur :	néant
Changement d'état	Point de fusion : 1610 °C Point d'ébullition : 2230 °C
Point d'inflammation :	néant
Température d'inflammation :	néant
Danger d'explosion :	non
Limites d'explosion :	Inférieure : néant Supérieure : néant
Pression de vapeur à 20° :	néant
Densité à 20° C :	2600 kg/m <sup>3</sup> à 2650 kg/m <sup>3</sup>
Solubilité dans/miscibilité avec	l'eau à 20°C : insoluble
Viscosité :	Dynamique à 20° C solide

9.2 Autres indications : non applicable, matériau solide



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANIKUES DES CEMENTS

N° 10-1V1FR



**10 – Stabilité et réactivité :**

**10.1 Réactivité :** non réactif dans les conditions normales

**10.2 Stabilité Chimique :** chimiquement stable

**10.3 Réaction dangereuse :** aucune

**10.4 Conditions à éviter :** aucune

**10.5 Incompatibilité :** pas d'incompatibilité particulière

**10.6 Produits de décomposition dangereux :** Pas de produit de décomposition dangereux connu.

**11 – Informations toxicologiques :**

**11.1 Information sur les effets toxicologiques :**

**Non toxique**

**Effet primaire d'irritation :**

- de la peau : Irrite la peau et les muqueuses en cas de frottement
- des yeux : Irrite les yeux en cas de frottement

**Sensibilisation :** Aucun effet de sensibilisation connu

**Mutagène :** non

**Effets CMR (cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction)**

*Toxicité chronique :* Silicose (tableau 25 des maladies professionnelles)

Une exposition prolongée et/ou massive à des poussières alvéolaires, contenant du quartz, peut provoquer la silicose, qui est une fibrose pulmonaire provoquée par le dépôt, dans les poumons, de particules de silices cristallines de taille alvéolaire.

**11.2 Information sur autres dangers :** non applicable

**12. – Informations écologiques**

**12.1 Toxicité :** pas d'écotoxicité relevée à l'égard de la silice, substance naturelle abondamment répandue.

**12.2 Persistance et Dégradabilité :** non applicable

**12.3 Potentiel de Bioaccumulation :** non applicable

**12.4 Mobilité dans le sol :** non applicable

**12.5 Résultats des évaluations PBT et vPvB :** non applicable

**12.6 Propriété perturbant le système endocrinien :** non applicable

**12.7 Autres effets :** non applicable



S.A.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour le PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS

N° 10.1V1FR



### 13. – Considération relative à l'élimination

#### 13.1 Produit et emballage

13.1.1 emballage : élimination des emballages (plastiques et cartons ) selon la réglementation en vigueur

13.1.2 Produit : *Déchets provenant des résidus Produits non utilisés* peuvent être mis en décharge en accord avec la réglementation locale. Le produit devra être recouvert le cas échéant pour éviter les émissions de poussières respirables. Chaque fois que ce sera possible, le recyclage devra être préféré à la mise en décharge sans pour autant être réutilisé dans son application première normative.

13.2 Autre information : aucune

### 14. – Informations relatives au transport

14.1. Numéro ONU ou numéro d'identification : non applicable

14.2. Désignation officielle de transport de l'ONU : non applicable

14.3. Classe(s) de danger pour le transport : non applicable

14.4. Groupe d'emballage : non applicable

14.5. Dangers pour l'environnement : non applicable

14.6. Précautions particulières à prendre par l'utilisateur : le sable normalisé doit être transporté et stocké au sec. Les camions réfrigérés sont prohibés pour ne pas humidifier le sable.

14.7. Transport maritime en vrac conformément aux instruments de l'OMI : non applicable

### 15. – Informations réglementaires

#### 15.1 Santé-Sécurité et environnement

##### Information réglementaire Européenne

1-Réglementation Reach CE N° 1097/2006

2-Réglementation CLP CE N° 1272/2008

##### Réglementation locale

Se référer aux limites d'exposition réglementaires en vigueur dans chaque pays.

Pour la France :

- Article R232.5.5. Du Code du Travail pour les poussières alvéolaires
- Décret n° 97-331 du 10 avril 1997 pour les valeurs limites obligatoires pour la silice
- Pas de toxicité pour les milieux aquatiques

15.2 Évaluation de la sécurité chimique: Aucune évaluation de la sécurité chimique n'a été réalisée pour les sables siliceux



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANIKQUES DES CIMENTS



N° 10-111FR

## 16. – Autres information

16-1 Indication de changement : non applicable

16.2 Classification et procédure utilisées pour établir la classification des mélanges conformément au règlement (CE) n° 1272/2008 [CLP]: non applicable

16.3 Informations Complémentaires :

Ces indications sont fondées sur l'état actuel de nos connaissances, mais ne constituent pas une garantie quant aux propriétés du produit et ne donnent pas lieu à un rapport juridique contractuel.

*Sablage* : selon différentes réglementations nationales, le sable contenant plus de 5 % de silice libre ne peut être utilisé pour le sablage à sec. Les producteurs européens considèrent cela comme une recommandation supplémentaire (cf décret n°69558 du 6/06/69 et Arrêté du 14/01/87)

*Mélange avec des produits tiers* : dans la mesure où des produits non fabriqués ou non fournis par notre Société sont mis en oeuvre en association avec/ou à la place de ceux-ci, il est de la responsabilité du client lui-même d'obtenir du fabricant ou du fournisseur toutes les données techniques et autres propriétés relatives à ces autres produits et d'obtenir toutes les informations nécessaires s'y rapportant.

*Responsabilité* : ces informations sont l'état de nos connaissances et nous les considérons comme précises et fiables à la date de mise à jour de cette fiche. Toutefois, on ne prétend pas ici exprimer un point de vue, une caution ou une garantie quelconque quant à leur degré d'actualisation, leur fiabilité ou leur exhaustivité.

Il est de la responsabilité de l'utilisateur de s'assurer lui-même que ces informations sont adaptées et complètes eu égard à l'utilisation particulière qu'il fait de nos produits.

Un guide de bonnes pratiques sur la « Protection de la santé des travailleurs qui manipulent de la silice cristalline » est disponible sur <http://www.nepsi.eu>.



S.N.L. fondée en 1910 – SAS capital 250 000 € - NIF FR 93 976 750 257 – SIRET 976 750 257 00025 APE 0812Z  
Certifiée pour la PREPARATION DU SABLE NORMALISE CEN POUR LA DETERMINATION DES RESISTANCES MECANQUES DES CIMENTS

N° 10-111FR



# ANNEXE 2

## TABLEAUX DES RESULTATS

**Tableau 1 : Résultats d'absorption d'eau par immersion totale**

<b>Abs (%)</b>	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
	À 07 jours	7.305	8.045	7.976	8.494	8.555
	À 28 jours	7.885	7.831	7.556	8.419	8.062
	À 56 jours	7.544	8.003	8.064	8.051	8.316
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
	À 07 jours	7.305	8.211	8.299	8.410	8.854
	À 28 jours	7.885	7.764	7.809	8.072	7.988
	À 56 jours	7.544	7.923	7.998	8.350	8.585
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
	À 07 jours	7.305	8.429	8.712	8.579	8.788
	À 28 jours	7.885	9.225	8.493	8.564	9.024
	À 56 jours	7.544	8.362	8.382	8.647	8.540

**Tableau 2 : Résultats de porosité accessible à l'eau**

<b>Porosité (%)</b>	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
	À 07 jours	15.834	17.126	16.843	17.732	17.738
	À 28 jours	16.782	16.557	15.997	17.613	16.715
	À 56 jours	16.250	16.977	16.975	16.938	17.363
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
	À 07 jours	15.834	17.551	17.492	17.676	18.438
	À 28 jours	16.782	16.588	16.720	17.073	16.842
	À 56 jours	16.250	16.890	17.090	17.608	18.111
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
	À 07 jours	15.834	17.365	17.634	17.185	17.370
	À 28 jours	16.782	19.094	17.638	17.511	18.258
	À 56 jours	16.250	17.537	17.509	17.750	17.375

**Tableau 3 : Résultats de masse volumique humide**

<b>MVH (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
	À 07 jours	1.073	1.080	1.078	1.085	1.086
	À 28 jours	1.079	1.078	1.076	1.084	1.081
	À 56 jours	1.075	1.080	1.081	1.081	1.083
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
	À 07 jours	1.073	1.082	1.083	1.084	1.089
	À 28 jours	1.079	1.078	1.078	1.081	1.080
	À 56 jours	1.075	1.079	1.080	1.083	1.086
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
	À 07 jours	1.073	1.084	1.087	1.086	1.088
	À 28 jours	1.079	1.092	1.085	1.086	1.090
	À 56 jours	1.075	1.084	1.084	1.086	1.085

**Tableau 4 : Résultats de masse volumique sèche**

<b>MVS (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
	À 07 jours	2.168	2.129	2.112	2.088	2.073
	À 28 jours	2.128	2.114	2.118	2.092	2.073
	À 56 jours	2.154	2.121	2.105	2.104	2.088
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
	À 07 jours	2.168	2.138	2.108	2.102	2.083
	À 28 jours	2.128	2.137	2.141	2.115	2.109
	À 56 jours	2.154	2.132	2.137	2.109	2.110
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
	À 07 jours	2.168	2.060	2.024	2.003	1.977
	À 28 jours	2.128	2.070	2.077	2.045	2.023
	À 56 jours	2.154	2.097	2.089	2.053	2.035

**Tableau 5 : Module d'élasticité dynamique**

Module d' élasticité dynamique $E_d$ (MPa)	Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
	À 02 jours	19702.263	19885.267	17965.776	15666.802	14668.192
	À 07 jours	14955.092	16938.009	17143.233	14775.801	15204.857
	À 28 jours	16675.764	21859.475	16650.140	19324.116	20040.336
	À 56 jours	24171.416	22202.366	21786.673	21553.871	18784.528
	Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
	À 02 jours	19702.263	16887.528	16366.477	16035.637	14967.924
	À 07 jours	14955.092	14965.877	15341.817	14864.442	15049.18
	À 28 jours	16675.764	22820.440	24036.301	21330.314	22144.418
	À 56 jours	24171.416	23931.386	22074.053	20595.016	21084.707
	Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
	À 02 jours	19702.263	10430.842	9464.792	9786.215	9824.574
	À 07 jours	14955.092	15451.891	11258.626	12109.458	12278.837
	À 28 jours	16675.764	17130.658	18198.936	14276.562	13078.141
	À 56 jours	24171.416	21413.359	19573.321	15207.117	14432.912

**Tableau 6 : Résistance mécanique à la flexion des ciments**

Résistance à la flexion (MPa)	Echantillons	CPA	COP 2.5%	COP 5%	COP 7.5%	COP 10%
	À 02 jours	4.64	4.33	4.48	4.27	4.17
	À 28 jours	12.80	12.19	10.40	10.27	9.63
	À 56 jours	13.50	12.85	12.37	11.59	10.30
	Echantillons	CPA	COV 2.5%	COV 5%	COV 7.5%	COV 10%
	À 02 jours	4.64	4.70	4.48	4.91	4.77
	À 28 jours	12.80	11.24	10.96	10.49	10.06
	À 56 jours	13.50	12.59	12.70	11.85	11.66
	Echantillons	CPA	CB 2.5%	CB 5%	CB 7.5%	CB 10%
	À 02 jours	4.64	4.35	3.96	3.66	3.52
	À 28 jours	12.80	7.42	10.08	9.84	8.46
	À 56 jours	13.50	11.97	11.18	10.47	9.87

**Tableau 7 : Résistance mécanique à la compression des ciments**

<b>Résistance à la compression (MPa)</b>	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COP 2.5%</b>	<b>COP 5%</b>	<b>COP 7.5%</b>	<b>COP 10%</b>
	À 02 jours	22.350	19.693	17.550	16.313	16.127
	À 07 jours	61.723	51.803	50.417	46.400	39.363
	À 28 jours	63.697	62.620	47.793	53.710	57.707
	À 56 jours	67.923	64.233	58.907	62,185	43.513
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>COV 2.5%</b>	<b>COV 5%</b>	<b>COV 7.5%</b>	<b>COV 10%</b>
	À 02 jours	22.350	16.110	15.010	16.567	17.513
	À 07 jours	61.723	50.743	44.617	44.867	44.647
	À 28 jours	63.697	64.527	66.957	63,785	59.057
	À 56 jours	67.923	67.063	66.540	55.713	59.375
	<b>Echantillons</b>	<b>CPA</b>	<b>CB 2.5%</b>	<b>CB 5%</b>	<b>CB 7.5%</b>	<b>CB 10%</b>
	À 02 jours	22.350	15.720	12.633	11.887	12.057
	À 07 jours	61.723	42.000	21.865	27.513	12.710
	À 28 jours	63.697	40.217	54.887	46.707	42.313
	À 56 jours	67.923	63.327	61.160	58.320	49.220