

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira – Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire présenté en vue de l'obtention du Master en Génie Civil,
Option structure

Thème :

**Étude de l'influence des cendres de biomasse et du verre finement
broyé sur les propriétés mécaniques et l'absorption capillaire du
plâtre**

Réalisé par :

- BOUSSEMAR Billal
- ZIANI Cherifa

Encadré par : Pr. CHELOUAH Nasser

Année Universitaire : 2024 – 2025

Remerciements

Dieu merci de nous avoir dotés de courage, de patience et de volonté.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères au professeur N. CHELOUAH, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de diriger ce travail. Toujours présent à nos côtés, ses conseils précieux et son accompagnement bienveillant ont été essentiels à la réussite de ce projet.

Nous tenons également à exprimer toute notre reconnaissance aux membres du jury, pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail, ainsi que pour leurs remarques enrichissantes.

Nous remercions également M. ZOUBIRI, chef du laboratoire MDC,
Ainsi que l'ensemble des enseignants du département de Génie civil, tout particulièrement :
M. SLIMANOU, Mme MEZIANI, Mme OUARI et Mme DJERROUD pour leur soutien constant et leurs précieux conseils tout au long de notre parcours.

À toute notre promotion.

Enfin, nous exprimons notre gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide à la réalisation de ce projet.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ Mes chers parents que dieu me les gardes
- ❖ Ma grand-mère Ait khelifa wahchia
- ❖ Ma tante Nassira et Hayat
- ❖ Ma sœur Fatma Zohra et à son époux Yanis
- ❖ Mes frères : Youcef et Ismail
- ❖ Mes amis, sans exception
- ❖ Mon binôme et à toute sa famille.

BILLAL

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

- ❖ Mes chers parents que dieu me les gardes
- ❖ Mes sœurs : Nassima, Soraya, Rosa, Alia et Narimen
Ainsi qu'à leurs époux : Walid, Clark, Sofiane, Yacine et Nadir
- ❖ Ma sœur Firouse
- ❖ Mon frère Momen
- ❖ Mon neveu Ilyan Eden
- ❖ Mes nièces : Assia, Mariah, Khaoula, Dana
- ❖ Mes amies, sans exception
- ❖ Mon binôme et à toute sa famille.

CHERIFA

تلخيص

يهدف هذا العمل إلى استكشاف جدوى استخدام الزجاج المسحوق ورماد الكتلة الحيوية كمضافات معدلة للجبس المستخدم في قطاع البناء. تم اعتماد منهجية تجريبية تعتمد على تحضير خلطات جبسية تحتوي على نسب متفاوتة من الزجاج والرماد، وتحليل تأثير هذه الإضافات على الخصائص الأساسية للجبس من خلال اختبارات مخبرية معيارية. شملت التحاليل مقاومة الانضغاط، الامتصاص المائي، الكثافة، وزمن التصلب. أظهرت النتائج أن الإضافات المختارة تؤثر بشكل إيجابي على أداء الجبس، خصوصاً من حيث تحسين مقاومته وتقليل نفاذية الماء. تفتح هذه النتائج آفاقاً لتطوير مواد بناء صديقة للبيئة عبر إعادة تدوير النفايات الزجاجية والعضوية، مع إمكانية استخدامها في التطبيقات غير الإنشائية مثل الألواح الجبسية والعوازل.

Abstract

This study explores the feasibility of incorporating crushed glass and biomass ash as performance-enhancing additives in construction-grade gypsum. An experimental methodology was adopted, involving the preparation of gypsum mixtures with varying proportions of glass and ash, followed by standardized testing to evaluate key properties such as compressive strength, water absorption, density, and setting time. The results indicate that the selected additives positively influence gypsum performance, particularly by enhancing its strength and reducing water permeability. These findings highlight the potential for developing eco-friendly building materials through the recycling of glass and organic waste, especially for non-structural applications such as gypsum boards and insulation products.

Résumé

Cette étude explore la faisabilité de l'incorporation du verre infiniment broyé et de cendres de biomasse comme additifs améliorant les performances du plâtre de construction. Une méthodologie expérimentale a été adoptée, impliquant la préparation de mélanges de plâtre contenant différentes proportions de verre et de cendres, suivie d'essais standardisés pour évaluer des propriétés clés telles que la résistance à la compression, l'absorption d'eau, la densité et le temps de prise. Les résultats indiquent que les additifs sélectionnés influencent positivement les performances du plâtre, notamment en améliorant sa résistance et en réduisant sa perméabilité à l'eau. Ces résultats soulignent le potentiel de développement de matériaux de construction écologiques grâce au recyclage du verre et des déchets organiques, notamment pour des applications non structurelles telles que les plaques de plâtre et les produits isolants.

Table des matières

Remerciement	
Dédicace	
Dédicace	
Résumé	
Abstract	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	

Introduction générale

CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PLÂTRE, LES CENDRES DE BIOMASSE ET LE VERRE BROyé

I.1. Le plâtre.....	3
I.1.1. Introduction	3
I.1.2. Histoire du plâtre.....	4
I.1.3. Généralités sur le plâtre.....	5
I.1.4. Matière première du plâtre	6
I.1.5. Fabrication du plâtre	7
I.1.6. Les différents types de plâtre.....	8
I.1.7. Propriétés physiques et chimiques du plâtre.....	10
I.1.8. Microstructure du plâtre	12
I.1.9. Isolation thermique et régulation hygrothermique.....	12
I.1.10. Mise en œuvre du plâtre	13
I.1.11. Propriétés mécaniques du plâtre	13
I.1.12. Utilisation du plâtre	14
I.1.13. Fabrication du plâtre.....	15
I. 2. La cendre de biomasse	17
I.2.1. Introduction	17
I.2.2. Définition de la biomasse	18
I.2.3. Histoire de la biomasse	18
I.2.4. Les différentes biomasses.....	18
I.2.5. Domaine d'application des cendres	20
I.2.6. Caractéristiques des cendres de biomasse	21

I.2.6.1. Facteurs influençant sur la qualité des cendres de biomasse	21
I.2.6.2. Caractéristique générale des cendres :	22
I. 3. Le verre broyé.....	22
I.3.1. Définition du verre	22
I.3.2. Histoire du verre	24
I.3.3. Fabrication du verre	25
I.3.5. Domaine d'application du verre	25
I.3.6. Les caractéristiques générales du verres	26

CHAPITRE II: CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX, MATÉRIELS UTILISÉS ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

I. Introduction :	29
II.1. Matériaux et leurs caractéristiques	29
II.1.1. Le plâtre	29
II.1.2. La cendre de biomasse	31
II.1.3. Le verre broyé.....	36
II.2. Essais expérimentaux.....	39
II.2.1. Le gâchage du plâtre	40
II.2.2. Les conditions de cure.....	40
II.2.3. La consistance	41
II.2.4. Perte de masse d'eau par évaporation.....	42
II.2.5. Hydratation, Temps de début et fin de prise	42
II.2.6. Résistances mécaniques	43
II.2.7. Absorption capillaire.....	44

CHAPITRE III: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III. Introduction.....	46
III.1. Consistance	46
III.2. Début et fin de la prise :	49
III.3. Perte de masse par évaporation d'eau	51
III.4. Résistance mécanique.....	53
III.4.1. Résistance à la compression.....	53
III.4.2. Résistance à la flexion	55
III .5. Absorption capillaire	57
Conclusion générale	

Liste de figures

Chapitre I		
Figure I.1	Poudre de plâtre	05
Figure I.2	Différents types de gypse naturel	06
Figure I.3	Les différentes utilisations du plâtre	14
Figure I.4	L'extraction du gypse à ciel ouvert et souterraine	15
Figure I.5	Concassage du gypse	15
Figure I.6	Four de cuisson du gypse	16
Figure I.7	Photos prises au MEB des deux formes d'hémihydrate α et β	17
Figure I.8	Organisation locale des atomes de verre (ordre à courte distance) [34].	23
Figure I.9	Variations thermiques du volume spécifique V (l'enthalpie H) lors du passage de l'état liquide à l'état solide (vitreux ou cristallin) [34].	23
Chapitre II		
Figure II.1	Analyse minéralogique par DRX du plâtre	30
Figure II.2	Analyse minéralogique par DRX de la cendre de biomasse	32
Figure II.3	Analyse granulométrique au laser de la cendre de biomasse	34
Figure II.4	Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)	35
Figure II.5	Analyse minéralogique par DRX du verre broyé	36
Figure II.6	Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)	38
Figure II.7	Analyse granulométrique au laser du verre broyé	39
Figure II.8	Moule en forme de cône en caoutchouc de 40 mm de hauteur et 75 mm de diamètre intérieur et la table d'étalement	41
Figure II.9.1	Mesure du temps de début de prise par la méthode du couteau.	43
Figure II. 9.2	Mesure du temps de fin de prise par la méthode du pouce	43
Figure II. 10	Presse hydraulique Control de type PILOT PRO modèle 65-L27P12	44
Figure II. 11	Immersion des éprouvettes dans l'eau	45
CHAPITRE III		
Figure III. 1	Influence du pourcentage d'additions sur le diamètre d'étalement	46
Figure III. 2.1	Diamètres de l'étalement du plâtre avec E/P = 0.60 et sans additions	47
Figure III. 2.2	Diamètres de l'étalement des différents liants de plâtre	48
Figure III. 3	Impact des additions sur le temps de prise du plâtre	49
Figure III. 4	Temps de prise (début et fin) des mélanges plâtre avec additions	50
Figure III.5	Perte de masse de l'eau en fonction de la teneur des additions en pourcentage et du temps en jour	53
Figure III.6	Influence du taux d'additions sur la résistance à la compression du plâtre pris	54
Figure III.7	Influence des teneurs en additions sur la résistance à la flexion du plâtre pris	56
Figure III.8	Variation de l'absorption capillaire après 60 minutes pour les différentes teneurs en addition	57

Liste des tableaux

Tableau II.1	Analyse chimique du plâtre	30
Tableau II.2	Le refus au tamis de 200 μm , 500 μm et la masse volumique apparente du plâtre	31
Tableau II.3	La composition chimique de la cendre de biomasse	33
Tableau II.4	La composition chimique du verre broyé	37

Liste des abréviations

P : Plâtre

C : La cendre de biomasse

V : Le verre broyé

E/P : Rapport Eau / Plâtre

DRX : Diffraction aux rayons X

λ : Coefficient de conductivité thermique

α, β : L'hémihydrate de sulfate de calcium

$^{\circ}\text{C}$: Degré Celsius

MEB : Microscopie électronique à balayage

Min : Minute (s)

MPa : Méga pascal

EN : Norme Européenne

NF : Norme française

AC : Absorption d'eau par capillarité

(%) : Pourcentage

(μm) : Micromètre

M : Masse

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Connu depuis l'Antiquité, le plâtre fait partie des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. Traditionnellement utilisé sous forme de poudre mélangée à de l'eau pour la réalisation d'enduits, il est aujourd'hui majoritairement employé sous forme d'éléments préfabriqués (carreaux, dalles, plaques), répondant ainsi aux exigences modernes du secteur du bâtiment.

Ce matériau se distingue par sa disponibilité et par ses nombreuses qualités : respectueux de l'environnement, malléable, léger, coupe-feu, isolant thermique, régulateur d'humidité et esthétiquement apprécié. Ces caractéristiques expliquent l'intérêt toujours croissant qu'il suscite dans le domaine de la construction.

Cependant, sa grande fragilité, sa sensibilité à l'eau, la pression croissante sur les ressources naturelles et l'essor de l'activité industrielle soulèvent des préoccupations. Ces défis ont conduit à des travaux de recherche à l'échelle mondiale visant à renforcer ses propriétés. Parmi les solutions explorées, l'incorporation de déchets agricoles ou industriels issus du recyclage se révèle prometteuse.

Ce projet de fin d'études s'inscrit dans cette dynamique de valorisation de déchets tels que les cendres de biomasse et le verre broyé, respectivement issus de l'agriculture et de l'industrie, pour la formulation de matériaux de construction innovants à base de plâtre. Cette démarche s'inscrit dans une optique de développement durable, alliant performance technique et réduction de l'impact environnemental.

Le verre broyé, dérivé du recyclage des déchets verriers, présente des caractéristiques physiques et chimiques intéressantes, notamment sa granulométrie fine et sa richesse en silice amorphe, qui peuvent influencer positivement la microstructure du plâtre. De même, la cendre de biomasse, résidu de la combustion de matières organiques, est une ressource disponible en grande quantité et peu exploitée dans le domaine des matériaux de construction. Sa teneur en composés réactifs — en l'occurrence la chaux vive (CaO), la magnésie (MgO) et l'oxyde de potassium (K_2O) — pourrait probablement influencer sur les propriétés mécaniques et la prise du plâtre et modifier le comportement rhéologique et l'absorption capillaire du plâtre.

Introduction générale

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'impact de l'incorporation de verre broyé et de cendre de biomasse sur les propriétés physiques et mécaniques du plâtre de construction. L'étude vise notamment à évaluer dans quelle mesure ces ajouts influencent les propriétés à l'état frais, telles que le temps de prise et la consistance, ainsi que les propriétés à l'état durci, comme la résistance mécanique, l'évaporation de l'eau et l'absorption capillaire.

Pour répondre à ces enjeux et atteindre les objectifs fixés, ce travail de recherche s'articule autour de trois chapitres principaux, suivant une démarche méthodologique progressive et cohérente. Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les matériaux utilisés, notamment le plâtre, le verre broyé et la cendre de biomasse. Le deuxième chapitre présente la caractérisation des matériaux utilisés en adoptant des protocoles expérimentaux ainsi que les différents essais réalisés. Enfin, le troisième chapitre expose les résultats obtenus, suivis de leur analyse et interprétation. Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise l'ensemble des résultats obtenus et propose des recommandations pratiques pour l'utilisation des cendres de bois et le verre broyé comme ajout dans la production du plâtre.

Chapitre I :

Généralités sur le plâtre, les cendres de biomasse et le verre broyé

I.1.Le plâtre**I.1.1. Introduction**

Le plâtre compte parmi les matériaux de construction les plus anciens connus de l'humanité. Utilisé depuis l'Antiquité, il accompagne les civilisations humaines depuis des millénaires dans des usages aussi variés qu'architecturaux et artistiques. Les Égyptiens, les Grecs et les Romains, entre autres, l'ont largement exploité pour bâtir, décorer et sculpter.

Aujourd'hui encore, le plâtre conserve une place essentielle dans le secteur du bâtiment. Il est appliqué directement sur les surfaces sous forme d'enduit ou de cloison, ou utilisé sous forme d'éléments préfabriqués comme les carreaux et les plaques.

Son champ d'utilisation dépasse largement le cadre de la construction. On le retrouve dans le scellement, la réalisation de chapes, ainsi que dans la fabrication de moules destinés à l'industrie et à l'artisanat. Le domaine médical en fait également un large usage, notamment pour créer des moulages servant à immobiliser les fractures ou à consolider des bandages [1].

Le plâtre est particulièrement bien adapté à un usage en intérieur, notamment en raison de ses qualités d'isolation thermique et acoustique, mais aussi de sa bonne résistance au feu. Sa conductivité thermique, estimée à environ $0,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ pour un enduit, est nettement inférieure à celle du ciment (1,15) et très largement inférieure à celle de l'acier (50), ce qui en fait un excellent isolant [2].

Le plâtre se distingue par sa grande porosité, ce qui lui confère d'excellentes propriétés isolantes. Il contient environ 20 % d'eau, qui s'évapore sous l'effet de la chaleur, maintenant ainsi la température en dessous de 20 °C. Une couche de 10 mm d'épaisseur appliquée sur 1 m² peut libérer jusqu'à 1,4 litre d'eau, ce qui limite efficacement la propagation du feu. De plus, le plâtre ne dégage ni fumée ni gaz toxique en cas d'incendie [1].

Ce matériau est obtenu par cuisson du gypse, suivie d'un broyage. Ce procédé lui apporte plusieurs qualités : une grande facilité de mise en œuvre, un temps de prise rapide, ainsi que d'excellentes capacités d'isolation. Sur le plan environnemental, le plâtre présente également des atouts non négligeables : il est recyclable, sa production nécessite peu d'énergie, et il contribue à améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

I.1.2. Histoire du plâtre

L'usage du plâtre remonte à bien plus loin que la célèbre légende du berger de Montmartre, qui aurait découvert ce matériau après qu'une pluie providentielle ait frappé des pierres de gypse calcinées dans son foyer. Si cette histoire relève davantage du folklore, elle illustre néanmoins la facilité avec laquelle on peut obtenir du plâtre, grâce à sa faible température de cuisson. En réalité, les premières civilisations du Moyen-Orient utilisaient déjà ce matériau plusieurs millénaires avant notre ère. Elles employaient des moellons de gypse liés avec du plâtre pour construire les premières villes [3].

Le plâtre est utilisé depuis l'époque néolithique, soit aux alentours de 9000 avant J.-C. L'une des plus anciennes traces de son emploi a été retrouvée sur le site de Çatal Höyük, en Anatolie, où des enduits de plâtre recouvrent les murs de certaines habitations, datant de 7000 avant J.-C.

Les civilisations mésopotamiennes telles que les Sumériens et les Assyriens, mais surtout les Égyptiens, ont largement exploité le plâtre. Ces derniers s'en servaient notamment pour la réalisation de masques funéraires, dont le plus ancien exemple connu est celui du roi Téty, datant de 2400 avant J.-C. et découvert à Saqqarah. L'historien romain Pline rapporte que Lysistratè de Sicyone, frère du célèbre sculpteur Lysippe, aurait été le premier à réaliser un moulage en plâtre sur un modèle vivant, afin d'en tirer une reproduction en cire.

La tradition des masques funéraires moulés perdure durant les époques hellénistique et romaine, mais c'est toujours en Égypte que la production de plâtre fut la plus florissante. On y fabriquait notamment des reliefs, des médaillons, des attaches d'anses, des pieds de vase ou encore des plats décoratifs.

En Algérie, la technique du plâtre s'est également implantée très tôt, notamment grâce à la présence abondante de gisements de gypse dans plusieurs régions, comme les Hauts Plateaux, le nord de l'Algérie ou encore certaines zones sahariennes. Le plâtre a longtemps été utilisé aussi bien comme liant pour les enduits que comme matériau de construction, dans la continuité des traditions architecturales méditerranéennes et nord-africaines. Dans les constructions traditionnelles, on retrouve l'emploi du plâtre dans les murs, les plafonds, les décors sculptés ou peints, notamment dans les maisons citadines et les édifices religieux. Cette utilisation s'inscrit dans une logique d'adaptation aux matériaux locaux et aux conditions climatiques.

Dès l'époque mérovingienne, au VII^e siècle, on retrouve des sarcophages moulés en plâtre, parfois ornés de décorations. Le moulage permettait alors une production en série à moindre coût. Ces types de sépultures disparurent toutefois vers le milieu du VIII^e siècle.

Il faut attendre la Renaissance pour que le plâtre soit à nouveau mis à l'honneur, notamment grâce au sculpteur florentin Andrea del Verrocchio. Il relança l'usage du moulage en plâtre pour créer des statues, destinées à enrichir les collections royales et princières. Dans le même temps, les masques moulés redevinrent populaires.

Mais c'est véritablement au XIX^e siècle que le plâtre connut son âge d'or. Cette période vit l'essor des musées de moulages, abondamment détaillés dans le premier tome du dossier [4].

I.1.3. Généralités sur le plâtre

Le plâtre est un matériau de construction principalement utilisé pour les enduits. Toutefois, son usage s'est largement diversifié ces dernières années, en grande partie grâce à la simplicité de sa préparation. De nombreuses variantes, telles que les plaques et autres formes de plâtres prêts à l'emploi, ont été développées pour en faciliter encore davantage la mise en œuvre.

Le plâtre permet d'obtenir une surface lisse, qui peut être laissée brute ou recouverte de peinture. Sa légèreté et sa malléabilité comptent parmi ses atouts majeurs, ce qui en fait un matériau très apprécié dans le domaine de la construction et de la rénovation [5].



Figure I.1. Poudre de plâtre

I.1.4. Matière première du plâtre

La matière première désigne un matériau d'origine naturelle qui subit une transformation, que celle-ci soit artisanale ou industrielle. Dans le cas du plâtre, il provient essentiellement du gypse, un minéral qui se présente sous deux formes principales : le gypse naturel et le gypse de synthèse.

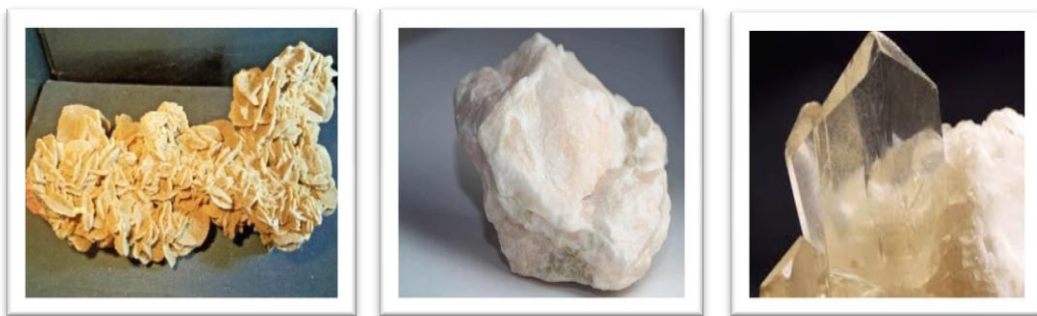
- **Le gypse naturel ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)**

Le gypse est un minéral appartenant à la famille des évaporites, des roches sédimentaires particulièrement solubles dans l'eau. Il se forme généralement par évaporation de l'eau dans des lagunes marines sursaturées, ce qui favorise la précipitation du sulfate de calcium hydraté.

Sur le plan moléculaire, le gypse se cristallise selon un système monoclinique. Sa structure est feuilletée, alternant une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium.

Dans la nature, on rencontre plusieurs variétés de gypse, classées selon leur forme cristalline :

- **Formes macro-cristallisées** : gypse lamellaire, fer de lance, gypse lenticulaire, rose des sables.
- **Formes micro-cristallisées** : albâtre, gypse éolien, ou sélénite [6].



1. Rose des sables

2. Albâtre

3. Gypse variété sélénite

Figure I.2. Différents types de gypse naturel

- **Le gypse de synthèse**

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Il provient principalement de plusieurs sources liées à des procédés chimiques spécifiques, parmi lesquelles :

- **Fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse)** : Le gypse est produit par l'attaque sulfurique du phosphate naturel dans l'industrie des engrais phosphatés.

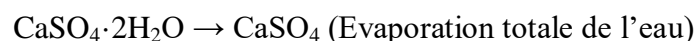
- **Fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2)** : Ce procédé conduit également à la production de gypse, appelé titanogypse.
- **Désulfuration des gaz et fumées** : Cette méthode vise à éliminer le soufre des gaz de combustion des centrales thermiques. Le gypse ainsi produit est appelé désulfogypse. La technique la plus courante consiste à absorber le dioxyde de soufre, ainsi que les oxydes d'azote, présents dans les gaz de combustion, par une suspension aqueuse d'hydroxyde de calcium (lait de chaux) [6].

I.1.5. Fabrication du plâtre

Quel que soit l'origine du gypse, qu'il soit naturel ou issu de procédés industriels, il doit subir une déshydratation partielle pour être transformé en sulfate de calcium semi-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), plus communément appelé plâtre. Cette transformation s'effectue par chauffage du gypse à une température comprise entre 150 et 170 °C, provoquant ainsi l'évaporation d'une partie de l'eau cristalline. La réaction chimique correspondante est la suivante :



Si la température dépasse 300 °C, la déshydratation devient complète et l'on obtient de l'anhydrite (CaSO_4), comme le montre la réaction suivante :



Il existe deux procédés principaux permettant de produire la poudre blanche de plâtre.

- **Procédé par voie sèche**
 1. Ce procédé est principalement utilisé dans le domaine du bâtiment et se déroule à pression atmosphérique. Il permet d'obtenir deux types de produits, en fonction de la température :
 - **Hémihydrate β** : obtenu à une température de 150 à 170 °C.
 - **Anhydrite** : produit à des températures comprises entre 400 et 600 °C.

- **Procédé par voie humide**

Ce procédé se réalise en autoclave, sous pression de vapeur saturante, généralement entre 2 et 7 bars. Il permet de produire sulfate de potassium hémihydrate α , un plâtre caractérisé par une structure cristalline régulière. Ce type de plâtre est destiné à des applications spécialisées, telles que les plâtres à prise rapide, ainsi que dans les domaines médical et dentaire.

Les deux formes d'hémihydrate se distinguent par leur structure et leur comportement lors du gâchage :

L'hémihydrate α , bien cristallisé, nécessite un faible rapport eau/plâtre ($E/P \approx 0,3$) et donne un matériau dense et résistant.

L'hémihydrate β , plus poreux et mal cristallisé en raison d'une déshydratation plus brutale à l'air sec, demande un rapport E/P supérieur à 0,6 pour un bon mélange, et conduit à une microstructure plus ouverte et moins résistante.

Le choix entre les deux formes influe donc directement sur les propriétés mécaniques du plâtre. La forme α donne lieu à un matériau plus compact et plus solide, tandis que la forme β génère un plâtre plus poreux et moins performant sur le plan mécanique. Cependant, la production de l'hémihydrate α reste plus coûteuse.

Dans le secteur de la construction, le plâtre est principalement composé d'hémihydrate β (entre 60 et 80 %) et d'anhydrite (CaSO_4). Cette dernière agit comme un régulateur de prise : plus sa proportion est élevée, plus le durcissement est lent. Pour les produits préfabriqués comme les carreaux ou les plaques, un plâtre constitué à 100 % d'hémihydrate β est généralement utilisé [7].

I.1.6. Les différents types de plâtre

Dans le domaine du bâtiment et des travaux décoratifs, les plâtres peuvent être classés selon leur finesse (granulométrie), leur temps de prise, ainsi que leurs usages spécifiques. Bien que cette classification ne soit pas exhaustive, elle permet d'identifier les principales catégories utilisées couramment :

- **Plâtre gros**

Ce type de plâtre est principalement destiné aux travaux de scellement, de rebouchage, ou encore à la réalisation des premières couches d'enduit.

- **Granulométrie (refus au tamis de 800 μm)** : entre 5 % et 20 %
- **Proportion d'eau de gâchage** : 75 à 100 %
- **Temps de prise** : de 8 à 25 minutes
- **Consommation moyenne** : environ 8 kg/m²

- **Plâtre fin**

Le plâtre fin est utilisé pour les finitions, les enduits lisses, ou les travaux nécessitant une surface régulière et esthétique.

- **Granulométrie (refus au tamis de 800 μm)** : inférieur à 1 %
- **Refus au tamis de 200 μm** : environ 25 %
- **Proportion d'eau de gâchage** : 40 à 100 %
- **Temps de prise** : de 30 à 60 minutes
- **Consommation** : entre 8 et 12 kg/m², selon le type de support utilisé [8].

- **Plâtre à mouler**

Réservé aux applications artistiques ou décoratives, comme les moulures, corniches et éléments ornementaux.

Refus au tamis de 800 μm : généralement inférieur à 1 %

Eau de gâchage : 65 à 85 %

Temps de prise : 10 à 20 minutes

Consommation : environ 9 kg/m²

- **Plâtre de modelage (ou plâtre de Paris)**

Employé pour les travaux manuels, les maquettes, ou la réalisation d'empreintes précises.

Granulométrie très fine, quasiment sans refus

Eau de gâchage : 60 à 80 %

Temps de prise : 5 à 15 minutes

Consommation : entre 7 et 10 kg/m²

- **Plâtre réfractaire**

Conçu pour résister à de fortes températures, souvent utilisé dans les domaines de la fonderie ou de la fabrication de moules thermiques.

Composé de charges spécifiques comme la silice ou l'alumine

Eau de gâchage : 45 à 60 %

Temps de prise : variable selon formulation

Consommation : dépend des conditions d'utilisation et des formes à réaliser [9].

I.1.7. Propriétés physiques et chimiques du plâtre

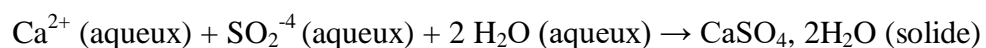
- **Prise du plâtre**

Lors du mélange du plâtre en poudre avec de l'eau, la poudre se dissout partiellement, créant une suspension homogène et blanche. Rapidement, une fine couche d'eau peut remonter à la surface, souvent accompagnée de petites bulles d'air. Peu après, le mélange commence à durcir, phénomène qui s'accompagne d'un léger dégagement de chaleur, signalant le début de la prise, autrement dit le début de la cristallisation.

Après un certain temps, le durcissement s'achève, marquant ainsi la fin de la prise. Une fois complètement sec, le plâtre devient solide, mais conserve une certaine fragilité.

Le mécanisme de prise du plâtre repose sur la théorie de la dissolution-cristallisation, formulée par Le Chatelier en 1887 [10]. Selon cette théorie, la réaction d'hydratation du plâtre se déroule en deux étapes successives, qui deviennent rapidement simultanées.

1. **Dissolution** : le sulfate de calcium hémihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) se dissout dans l'eau, libérant des ions calcium (Ca^{2+}) et sulfate (SO_4^{2-}) ainsi que de l'eau :
$$\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} (\text{solide}) \longrightarrow \text{Ca}^{2+} (\text{aqueux}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{aqueux}) + \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} (\text{aqueux})$$
2. **Cristallisation** : les ions en solutions réagissent avec l'eau pour former du sulfate de calcium dihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) également connu sous le nom de gypse, qui précipite sous forme solide :



Ce processus chimique est relativement rapide comparé à d'autres matériaux cimentaires. Environ 95 % de sulfate de calcium hémihydrate se transforme en sulfate de calcium dihydrate en une trentaine de minutes, signalant la fin de la réaction chimique et la phase de durcissement.

La durée de la prise du plâtre dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La nature spécifique du plâtre utilisé
- La température ambiante

- La quantité d'eau de gâchage
- La présence éventuelle d'adjuvant

Ces éléments peuvent accélérer ou ralentir le processus de prise, influençant ainsi les propriétés finales du matériau.

- **Les modificateurs de prise :**

Ce sont des composés, d'origine minérale ou organique, incorporés soit dans l'eau de gâchage, soit directement dans le plâtre, dans le but de contrôler la cinétique de sa prise. Cette dernière repose sur une réaction d'hydratation en deux temps : la dissolution du sulfate de calcium hémihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$), suivi de la précipitation du sulfate de calcium dihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) à partir d'une solution sursaturée. C'est la cristallisation progressive du dihydrate qui est responsable du durcissement du plâtre.

- **Les retardateurs de prise**

Ils ralentissent la vitesse de dissolution de semihydrate en gênant la croissance des cristaux de dihydrate. Ils agissent souvent en formant un complexe avec le semihydrate, limitant ainsi sa mise en solution, ou en se déposant sur les sites de nucléation et de croissance cristalline, freinant la formation du réseau solide.

- **Les accélérateurs de prise**

À l'inverse, les accélérateurs favorisent une hydratation plus rapide du plâtre. Ils augmentent la solubilité de semihydrate ou favorisent la nucléation des cristaux de dihydrate. Cela permet d'obtenir un durcissement plus rapide, utile dans certaines applications industrielles où un gain de temps est recherché.

- Facteurs supplémentaires influençant la prise :

Outre les additifs, d'autres paramètres comme le taux de gâchage (rapport eau/ plâtre) ou la granulométrie (taille des particules de plâtre) influencent fortement la cinétique d'hydratation. Une granulométrie fine et un faible taux de gâchage tendent à accélérer la prise.

Enfin dans les formulations de composites à base de plâtre, la matrice de gypse formée joue un rôle crucial en tant que barrière thermique. Son comportement au feu dépend notamment de la vitesse d'hydratation et de la structure cristalline formée, ce qui souligne l'importance d'un bon contrôle des modificateurs de prise.

I.1.8. Microstructure du plâtre

Le plâtre durcit ou pris se présente sous la forme d'un solide poreux à texture désordonnée. Il est constitué d'un assemblage de cristaux de gypse qui forment un réseau complexe, conférant au matériau sa porosité et ses propriétés mécaniques [7].

La microstructure du plâtre est fortement influencée par plusieurs conditions de cristallisation :

- **Le taux de sursaturation** : c'est le rapport entre la concentration d'ions en solution et leur solubilité. Un fort taux de sursaturation entraîne une cristallisation rapide, produisant des cristaux plus petits et une microstructure plus fine, donc une porosité plus élevée.
- **Le PH du milieu** : le pH influence la morphologie des cristaux. Selon qu'il est acide ou basique, il peut favoriser la formation de cristaux allongé ou lamellaires, ce qui modifie la texture globale du plâtre.
- **La température** : une température élevée accélère la cinétique de réaction et favorise une cristallisation rapide. Cela peut entraîner la formation de cristaux plus petits ou moins bien formés, modifiant la structure poreuse du plâtre.
- **La présence d'additifs** : les accélérateurs (comme le chlorure de calcium) ou les retardateurs (comme les phosphates ou l'acide citrique) influencent la vitesse de prise et la croissance cristalline, impactant directement la densité et la distribution des pores.
- **La granulométrie de l'hémihydrate** : Des particules plus fines réagissent plus rapidement, ce qui favorise une prise homogène et une structure plus dense. À l'inverse des grains grossiers peuvent donner un réseau cristallin plus irrégulier.

I.1.9. Isolation thermique et régulation hygrothermique

Le plâtre possède une faible conductivité thermique (λ) ce qui en fait un bon isolant. Il peut être utilisé seul ou en combinaison avec d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois. Cette propriété dépend fortement de sa porosité, formée lors de la cristallisation. De plus, le plâtre régule l'humidité ambiante en absorbant et en restituant la vapeur d'eau, contribuant ainsi au confort intérieur [11].

I.1.10. Mise en œuvre du plâtre

Le plâtre est un matériau couramment utilisé en génie civil, apprécié pour sa maniabilité et sa rapidité de prise. Il se présente sous forme de poudre à mélanger avec de l'eau afin d'obtenir une pâte malléable. Selon les besoins du chantier, il peut être utilisé pur ou intégré dans un mortier. Sa polyvalence en fait un choix fréquent pour les travaux de finition, de scellement ou de réparation.

- **Le plâtre pur**

Contrairement au ciment, la pâte de plâtre pure s'obtient par saupoudrage de la poudre de plâtre dans l'eau jusqu'à saturation de cette dernière. Le taux de gâchage à saturation correspond au rapport entre le poids de l'eau utilisée pour la mise en œuvre et le poids du plâtre. Ce taux est déterminé conformément à la norme NF B12-401 [12].

- **Le mortier de plâtre**

Le mortier de plâtre est un mélange homogène composé de plâtre, de sable et d'eau. Le sable siliceux est généralement préféré au sable calcaire, car il contient moins de fines. Ces particules fines, en raison de leur grande surface spécifique, possèdent un fort pouvoir absorbant. Une moindre teneur en fines permet une meilleure maîtrise de la quantité d'eau utilisée, ce qui améliore la durabilité du mortier, bien que cela puisse parfois entraîner une résistance mécanique légèrement inférieure.

I.1.11. Propriétés mécaniques du plâtre

Les propriétés mécaniques du plâtre dépendent fortement du rapport eau/plâtre (E/P), qui influence sa microstructure. Un rapport E/P élevé augmente la porosité, diminue la densité et réduit la résistance mécanique du matériau. À l'état humide, l'excès d'eau affaiblit la cohésion cristalline. En revanche, après séchage (à l'air ou par étuvage), la résistance s'améliore nettement, pouvant doubler par rapport à l'état humide. La résistance du plâtre repose principalement sur l'imbrication des cristaux formés et sur la cohésion entre eux, cette dernière représentant environ 40 % de la résistance totale. Le contrôle du rapport E/P et du séchage est donc essentiel pour optimiser les performances mécaniques du plâtre [2].

1.1.12. Utilisation du plâtre

Le plâtre est un matériau traditionnel polyvalent, utilisé dans divers secteurs : construction (enduits, mortiers), industrie (plaques, carreaux), santé et confort. Dans le domaine de la construction moderne, ses applications incluent les cloisons sèches, plafonds suspendus et éléments préfabriqués. Les plaques de plâtre répondent à des besoins spécifiques [13] :

- **Humidité** : plaques hydrofuges.
- **Incendie** : plaques coupe-feu.
- **Chocs** : plaques haute dureté.
- **Acoustique** : plaques renforcées pour l'absorption et plaques épaisses pour l'isolation.



Figure I.3. Les différentes utilisations du plâtre

I.1.13. Fabrication du plâtre

La fabrication du plâtre suit un processus industriel structuré, composé de plusieurs étapes clés. Chaque phase est cruciale pour garantir la qualité du produit final. De l'extraction du gypse à la cuisson, puis au broyage et au conditionnement, chaque opération contribue à transformer la matière première en un plâtre aux propriétés adaptées aux différents usages.

- **Extraction du gypse**

L'extraction du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) se fait à l'aide d'explosifs, aussi bien en carrières à ciel ouvert qu'en mines souterraines, selon la géométrie et la profondeur du gisement.



Figure I.4. L'extraction du gypse à ciel ouvert et souterraine

- **Concassage**

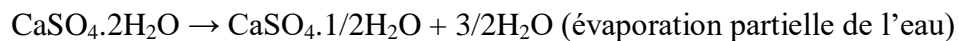
Le concassage vise à réduire la taille du gypse extrait pour obtenir des fragments inférieurs à 100 mm, facilitant ainsi leur transport, notamment par bandes, vers l'usine pour les étapes de Traitements suivants.



Figure I.5. Concassage du gypse

- **La cuisson**

Le gypse est cuit à une température comprise entre 150 et 170 °C. Ce procédé permet de séparer les impuretés, plus lourdes, qui restent au fond du four, tandis que le gypse cuit est récupéré en surface. La cuisson déclenche la réaction chimique de déshydratation du gypse selon la réaction chimique ci-dessous, essentielle à la formation du plâtre [14].



Un chauffage au-delà de 300 °C entraîne la déshydratation complète du gypse, aboutissant à la formation de l'anhydrite (CaSO_4), une forme du plâtre sans eau.

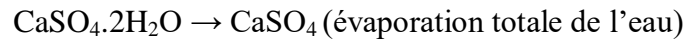


Figure I.6. Four de cuisson du gypse

Deux méthodes principales sont utilisées pour produire l'hémihydrate de plâtre :

- **Procédé par voie humide** : Réalisé dans des autoclaves sous pression saturante de vapeur d'eau (2 à 7 bars), ce procédé permet la formation de l'hémihydrate α . Il conduit à un plâtre très cristallisé, non poreux, avec d'excellentes résistances mécaniques (jusqu'à 35 MPa). Il est principalement utilisé pour des applications spéciales, comme les moulages dentaires et la céramique. Ce plâtre nécessite un faible taux de gâchage (~0.4).

- **Procédé par voie sèche** : Réalisé à pression atmosphérique, il donne de l'hémihydrate β , un solide microporeux à faible résistance mécanique. Ce type de plâtre est couramment utilisé dans le secteur de la construction et nécessite un taux de gâchage plus élevé (≥ 0.6) [7].

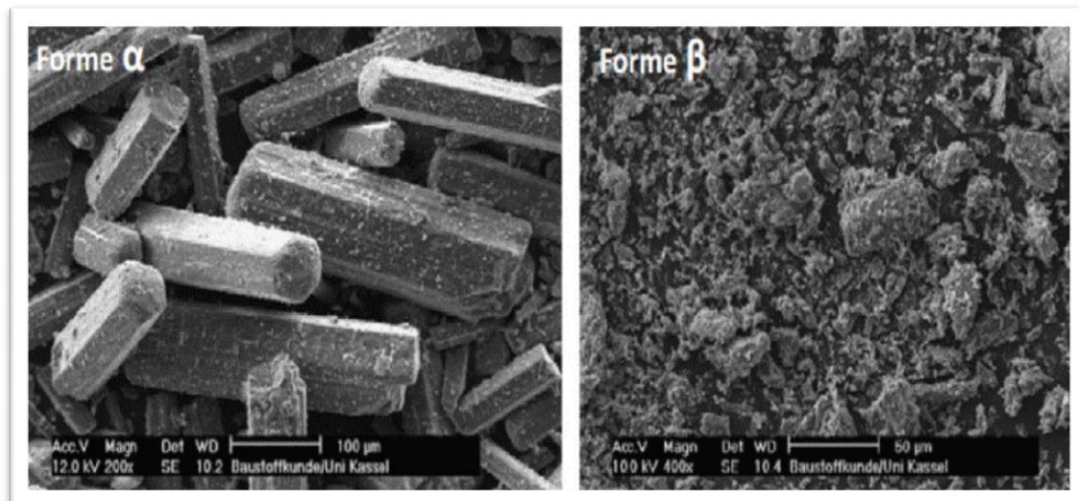


Figure I.7. Photos prises au MEB des deux formes d'hémihydrate α et β

- **Le broyage**

Après la cuisson, le plâtre est réduit en poudre par broyage, un facteur clé influençant les propriétés du produit final :

- **Broyage standard** : Le plâtre est fragmenté en particules de 200 μm à l'aide de marteaux rotatifs et d'un tamis.
- **Broyage / sélection** : Semblable au broyage standard, mais le plâtre est aspiré à travers une "cage d'écureuil" en rotation. En fonction de la taille et du poids des particules, elles sont soumises à des forces centrifuges et d'aspiration qui déterminent leur passage ou non à travers la cage [13].

I. 2. La cendre de biomasse

I.2.1. Introduction

Les cendres de biomasse, issues de la combustion de matières organiques (bois, résidus agricoles, déchets organiques), sont de plus en plus valorisées pour leurs richesses minérales (calcium, potassium, phosphore, magnésium). Autrefois perçues comme des déchets, elles trouvent aujourd'hui des applications en agriculture, dans les matériaux de construction et le

traitement des eaux. Leur composition varie selon le type de biomasse et les conditions de combustion, influençant leurs propriétés. Dans un contexte de transition énergétique et de gestion durable, leur valorisation constitue une solution à fort potentiel environnemental et économique [15].

I.2.2. Définition de la biomasse

La biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale pouvant être converties en énergie. Elle peut être utilisée directement (comme le bois énergie), par méthanisation (biogaz), par transformation chimique (biocarburants), ou encore pour le compostage. Issue des forêts et de l'agriculture, la biomasse constitue une alternative crédible aux énergies fossiles et est généralement considérée comme une source d'énergie renouvelable [16].

I.2.3. Histoire de la biomasse

L'usage de la biomasse comme source d'énergie remonte à la préhistoire, où le bois servait au chauffage, à la cuisson et à la protection. Elle est restée la principale source d'énergie jusqu'au XIX^e siècle, lorsque les énergies fossiles (charbon, puis pétrole) ont pris le relais.

Durant le Moyen Âge et jusqu'à la Révolution industrielle, le bois dominait encore les usages domestiques et artisanaux. Le déclin de la biomasse a commencé avec l'essor du charbon.

À partir des années 1970, en particulier après le choc pétrolier de 1973, l'intérêt pour la biomasse a ressurgi dans un contexte de prise de conscience environnementale et de transition énergétique. Aujourd'hui, elle représente une part significative des énergies renouvelables mondiales, utilisée sous diverses formes : bois-énergie, biogaz, biocarburants, ou déchets organiques valorisés. Son rôle continue de croître, notamment dans les contextes ruraux et industriels [17].

I.2.4. Les différentes biomasses

La biomasse se divise en deux grandes catégories :

- **Biomasse traditionnelle** : Utilisée principalement dans les pays en développement, elle inclut le bois de feu, les résidus agricoles ou le fumier séché, brûlés directement pour la cuisson ou le chauffage. Bien qu'abondante, elle présente de faibles

rendements, des émissions polluantes et des risques sanitaires liés à une combustion incomplète.

- **Biomasse moderne** : Elle repose sur des technologies avancées et moins polluantes, comme les biocarburants (éthanol, biodiesel), le biogaz, les granulés de bois, ou la valorisation industrielle des déchets organiques. Cette forme permet une meilleure efficacité énergétique, un contrôle accru des émissions et une intégration aux réseaux énergétiques.

➤ **Les biocarburants**

Les biocarburants sont des carburants de substitution issus de la biomasse (végétale, animale ou déchets), souvent mélangés aux carburants fossiles [18]. On distingue trois générations de biocarburants selon l'origine de la matière première et les procédés utilisés :

- La 1^{ère} génération, à base de produits agricoles alimentaires (maïs, colza, betterave), est déjà industrialisée.
- La 2^{ème} génération, issue de résidus non alimentaires (paille, bois, déchets), est en développement.
- Les biocarburants avancés proviennent de matières non concurrentes à l'alimentation.

L'incorporation des biocarburants conventionnels est limitée à 7 % de l'énergie dans les carburants. Ils sont considérés comme une énergie renouvelable, émettant peu de CO₂, de NO_x et de SO_x, et majoritairement de la vapeur d'eau lors de leur combustion.

➤ **La combustion de bois et des déchets**

La combustion du bois et des déchets organiques est une méthode courante de valorisation énergétique de la biomasse. Elle consiste à brûler des matières organiques solides (bois, résidus agricoles, déchets verts, etc.) pour produire de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Lors de ce processus, l'oxydation de la matière libère de l'énergie thermique. Celle-ci est ensuite convertie selon l'installation. Cette combustion génère aussi des émissions gazeuses (CO₂, H₂O, CO, NO_x, particules fines) et des cendres, constituant la fraction incombustible de la biomasse [19].

L'efficacité et l'impact environnemental de la combustion dépendent de plusieurs facteurs :

- Le type de combustible (essence de bois, humidité, granulométrie, présence d'éléments contaminés).
- La technologie de combustion utilisée (foyer à grille, chaudière à combustion étagée)

- Le contrôle des conditions de combustion (température, temps de séjour, rapport en air)
- La gestion des émissions et des résidus.

La combustion du bois est considérée comme neutre en carbone lorsqu'elle s'inscrit dans une gestion durable des forêts, car le CO₂ émis est compensé par celui absorbé lors de la croissance des arbres. En revanche, la combustion de déchets organiques ou industriels nécessite une vigilance particulière. Elle doit respecter des normes environnementales strictes afin de limiter l'émission de polluants dangereux tels que les dioxines ou les métaux lourds, qui peuvent avoir un impact négatif sur la santé humaine et l'environnement [20].

I.2.5. Domaine d'application des cendres

Les cendres provenant de la combustion de biomasse, riches en minéraux comme le calcium, le potassium, le phosphore et la silice, peuvent être valorisées dans divers secteurs. Elles sont utilisées comme amendements agricoles pour améliorer la qualité des sols, dans la fabrication de matériaux de construction (comme les ciments ou les briques), et même pour le traitement des eaux. Ces applications contribuent à une gestion durable des sous-produits tout en réduisant l'impact environnemental de la combustion [21]. Voici quelques exemples :

- **En agriculture**

Les cendres de biomasse peuvent être utilisées comme amendements minéraux ou fertilisants pour corriger l'acidité des sols et fournir des nutriments essentiels aux plantes. Toutefois, leur application doit être contrôlée afin d'éviter l'accumulation excessive de métaux lourds ou de substances indésirables, garantissant ainsi une utilisation sûre et bénéfique pour l'environnement et l'agriculture.

- **Dans la gestion des déchets**

Les cendres de biomasse peuvent être utilisées pour stabiliser les boues industrielles ou être intégrées dans des matrices de confinement, contribuant ainsi à la réduction du volume de déchets ultimes. Cette utilisation permet de valoriser les cendres tout en diminuant l'impact environnemental des déchets industriels.

- **La production d'énergie**

Bien que les cendres de biomasse ne soient pas directement combustibles, leur chaleur résiduelle peut être récupérée dans des systèmes industriels tels que les chaudières à haute performance ou les systèmes de récupération thermique. De plus, les éléments métalliques

présents dans les cendres peuvent parfois être extraits et valorisés, contribuant ainsi à une gestion plus efficace des ressources et à la réduction de l'impact environnemental.

- **La production de matériaux de construction**

Les cendres de biomasse offrent une alternative intéressante dans le secteur de la construction en tant que matière première secondaire. Riches en oxydes de silicium, de calcium et d'aluminium, elles possèdent des propriétés pouzzolaniques, similaires à celles des cendres volantes issues du charbon. Elles peuvent ainsi être utilisées comme substitut partiel du ciment dans la fabrication de béton, contribuant à la réduction de la consommation de clinker et des émissions de CO₂. De plus, les cendres de biomasse peuvent être intégrées dans la production de briques, tuiles, pavés, et autres matériaux de construction, améliorant parfois leurs propriétés mécaniques et thermiques.

La valorisation des cendres de biomasse comme stabilisants dans les matériaux de construction a été largement étudiée. Des recherches ont montré que les mâchefers de biomasse, les cendres volantes de charbon, et les mâchefers de bois peuvent être utilisés comme substituts partiels dans la fabrication de briques, améliorant ainsi la résistance à la compression [22-23]. Par exemple, l'ajout de cendres d'épi de maïs et de mâchefers de biomasse dans les briques a renforcé leur résistance [24-25], tandis que l'utilisation de cendres volantes et de chaux a également amélioré les propriétés mécaniques des briques [26-27]. En outre, des résidus de carbure de calcium ajoutés aux cendres volantes ont montré une amélioration de la résistance à la compression des briques. Enfin, l'activation alcaline avec des cendres volantes a été utilisée pour stabiliser les sols, renforçant les blocs de terre comprimée [28-29].

La valorisation des cendres de biomasse dans les matériaux de construction contribue à réduire l'empreinte écologique des constructions, tout en limitant l'enfouissement de ces cendres. Cette approche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, en réutilisant des sous-produits industriels pour améliorer la durabilité et la performance des matériaux, tout en réduisant les déchets [30-31-32].

I.2.6. Caractéristiques des cendres de biomasse

I.2.6.1. Facteurs influençant sur la qualité des cendres de biomasse

La qualité des cendres de biomasse dépend principalement du type de biomasse utilisée, mais de nombreux autres facteurs influencent également leur composition. Ces facteurs incluent le type d'intrants (bois, déchets, boues, etc.), le traitement appliqué aux intrants (broyage, criblage, ajout d'adjuvants), le type de traitement thermique (combustion, pyrolyse), et le type d'équipement de combustion utilisé. D'autres éléments tels que la température de combustion, le mode de traitement des fumées, les techniques de récupération des cendres et les post-traitements, comme le broyage ou l'extraction chimique, jouent également un rôle important dans la qualité des cendres produites [33].

I.2.6.2. Caractéristique générale des cendres

Il faut d'abord distinguer les principales sources de cendres dans une chaufferie : les cendres sous foyer sont récupérées sous la grille de combustion alors que les cendres volantes sont les résidus captés au niveau du traitement des fumées. Il est admis que les cendres volantes issues des équipements de traitement des fumées (électro filtres, filtres à manches) sont plus concentrées en métaux que les cendres sous foyer et présentent une fraction soluble plus élevée [33].

I. 3. Le verre broyé

I.3.1. Définition du verre

Le verre est un solide amorphe, c'est-à-dire qu'il ne possède pas de structure cristalline ordonnée. Tous les matériaux amorphes ne sont pas des verres, mais tous les verres sont amorphes. Le verre présente un ordre à courte distance (organisation locale des atomes) mais pas d'ordre à longue distance (Figure 1.8).

D'un point de vue thermodynamique, le verre se forme à partir d'un liquide sur fondé qui est refroidi rapidement, évitant ainsi la cristallisation (Figure 1.9).

La température de transition vitreuse (T_g) marque le passage du liquide visqueux à un solide amorphe. En dessous de T_g , le matériau ne coule plus.

Lors d'une trempe (refroidissement rapide), si on observe une propriété comme le volume spécifique (V_0) :

- V_0 diminue de façon continue avec la température.
- À la température de cristallisation (T_f), cette diminution est régulière.

- À T_g , la pente de la courbe change : la baisse devient plus lente → ce changement indique la formation du verre.

Au sens industriel, le verre est un matériau minéral solidifié sans cristallisation grâce à un refroidissement rapide.

La température de transition vitreuse (T_g) dépend de la vitesse de refroidissement du matériau. Contrairement à une transition de phase classique, T_g ne correspond pas à un point critique bien défini. Il s'agit d'une transition dynamique, liée à l'incapacité du système à se réorganiser pour atteindre une structure d'équilibre.

Ainsi, plus le refroidissement est rapide, plus cette transition se produit à une température élevée, marquant l'établissement d'un état amorphe hors d'équilibre [34].

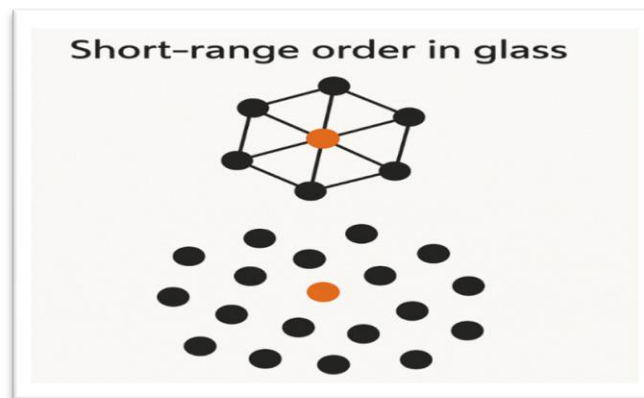


Figure I.8. Organisation locale des atomes de verre (ordre à courte distance) [34].

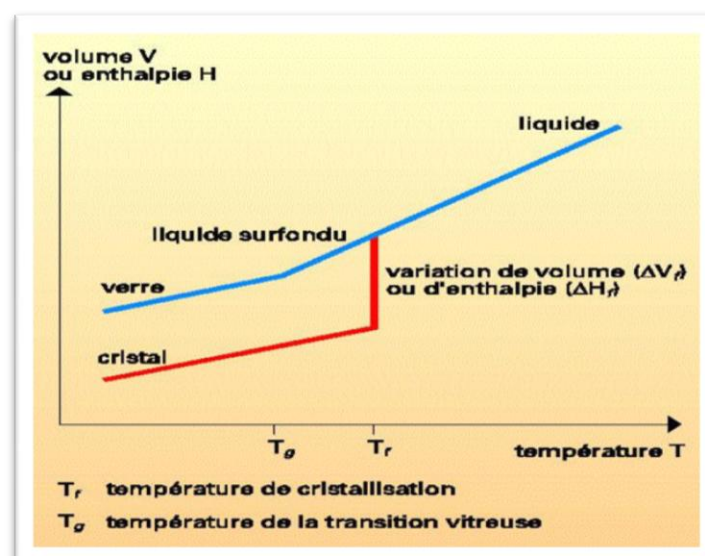


Figure I.9. Variations thermiques du volume spécifique V (l'enthalpie H) lors du passage de l'état liquide à l'état solide (vitreux ou cristallin) [34].

I.3.2. Histoire du verre

L'histoire du verre débute dès la Préhistoire.

- Vers 100 000 av. J.-C, l'humain utilise déjà l'obsidienne, un verre volcanique naturel, pour fabriquer des pointes de flèches.
- Les tectites, petites billes de verre formées lors d'impacts de météorites, sont utilisées comme bijoux.
- Les fulgurites, tubes de verre produits par la fusion du sable frappé par la foudre, sont également connues de l'Homme.

Le verre existe naturellement depuis des centaines de milliers d'années, et l'homme l'a utilisé pour la première fois il y a 100 000 ans sous forme d'obsidienne, un verre d'origine éruptive. Cette matière était taillée de manière grossière pour fabriquer des outils, des armes et parfois des bijoux. Étant donné la rareté des gisements d'obsidienne, elle était précieuse et faisait l'objet de négoce, au même titre que l'or [35].

Les premiers verres fabriqués par l'Homme proviennent de Mésopotamie, de Syrie et d'Égypte, datant du V^e millénaire avant notre ère. À cette époque, le verre existait sous forme de glaçure (un enduit vitrifiable appliqué sur la céramique), et il n'était pas encore transparent, mais opaque, généralement de couleur verte ou bleue, comme l'indiquent les colliers de perles et les baguettes de verre retrouvés. Au cours de l'époque hellénistique, sous le règne de Philippe II de Macédoine, une avancée importante eut lieu : l'ajout de dioxyde de manganèse au verre, permettant de le rendre transparent en éliminant les oxydes responsables de sa coloration. Cette évolution permit la fabrication de pièces plus grandes, comme des articles de table, et des objets décoratifs créés par le moulage du verre visqueux pour obtenir des effets de mosaïque multicolores.

L'invention de la technique de soufflage du verre est attribuée aux Phéniciens ou aux Babyloniens, grâce à l'invention de la canne à souffler. Cette innovation a permis de fabriquer des objets en verre plus facilement, plus rapidement et à moindre coût, rendant le verre plus accessible, notamment pour la fabrication de récipients. À partir du III^e siècle, le verre incolore apparaît et se répand, obtenu par l'ajout de manganèse, qui sert de purificateur pour éliminer les impuretés. Le verre naturel, quant à lui, a une teinte bleu-verdâtre en raison des oxydes métalliques présents dans le sable utilisé pour sa fabrication.

I.3.3. Fabrication du verre

La fabrication du verre, un procédé ancien et fascinant, se compose de plusieurs étapes clés.

Voici un résumé des grandes étapes de sa fabrication :

- **Les matières premières** : le verre est principalement composé de [36] :
 - Sable de silice (SiO_2) ; l'ingrédient de base.
 - Carbonate de sodium (Na_2CO_3) ; abaisse la température de fusion.
 - Calcaire (CaCO_3) ; stabilise le verre d'autres additifs peuvent être ajoutés pour donner des couleurs ou des propriétés spécifiques au verre.
 - Agents colorants ou décolorants (oxydes métalliques).
- **Mélange et fusion** : les matières premières sont pesées et mélangées, puis portées à haute température dans un four (environ 1500 °c). La fusion dure plusieurs heures pour assurer une homogénéité complète : Le verre fondu [37].
- **Affinage** : l'affinage consiste à éliminer les bulles de gaz et homogénéiser la pâte de verre fondue. On utilise parfois des agents affinant comme le sulfate de sodium.
- **Mise en forme** : le verre fondu est mis en forme selon l'usage final [38] :
 - Soufflage (bouteilles).
 - Flottage (verre plat)
 - Pressage ou moulage (verrerie décorative)
- **Le recuit** : une fois formé, le verre est refroidi lentement dans un four de recuits. Ce processus permet de réduire des tensions internes et d'éviter que le verre ne se casse.
- **Le traitement final** : selon l'usage prévu, le verre peut ensuite être :
 - Poli
 - Découpé
 - Trempé (pour le rendre plus résistant)
 - Revêtu (pour améliorer ses propriétés, comme l'isolation) [39].

I.3.5. Domaine d'application du verre

Le verre a de nombreux domaines d'application grâce à ses propriétés uniques (transparence, résistance, inertie chimique, etc.). Voici les principaux :

- **Bâtiments et construction**
 - Les fenêtres, façades, verrières, etc.
 - Le verre feuilleté et trempé pour la sécurité.
 - Le double ou triple vitrage pour l'isolation thermique et phonique [40].
- **Emballage**
 - Les bouteilles (boissons, alcools, huiles),
 - Les bocaux alimentaires, réutilisables et recyclables à 100%
 - La résistance chimique, interne, sans interaction avec les produits [41].
- **Automobile et transport**
 - Pare-brise, vitres latérales, lunettes arrière,
 - Utilisation du verre feuilleté (sécurité) et trempé (résistance)
 - Capteurs intégrés et vitrages chauffants sur les véhicules modernes [42].
- **Electronique et optique**
 - Verres spéciaux dans les écrans de téléphones, tablettes, téléviseurs (type gorilla glass),
 - Fibres optiques pour la transmission de données à haute vitesse,
 - Lentilles optiques, microscopes, appareils photo [43].
- **Art et décoration**
 - Objets en verre soufflé
 - Vitraux
 - Vaisselle, luminaires
- **Laboratoires et industrie**
 - Tubes à essai, béchers, fioles (verre borosilicaté)
 - Réacteurs chimiques
 - Composants pour l'énergie solaire.

I.3.6. Les caractéristiques générales du verre

Le verre est un matériau fascinant aux caractéristiques uniques qui le rendent indispensable dans de nombreux domaines. Voici les principales caractéristiques du verre :

- **Transparence**

Le verre est naturellement transparent à la lumière visible, ce qui en fait un matériau idéal pour les fenêtres, vitrages, lunettes et dispositifs optiques [44].

- **Dureté et fragilité**

- Le verre est dur (résistant à la rayure), mais cassant : il se brise sans déformation.
- Résistance à la compression : élevée.
- Faible résistance à la traction (ce qui le rend fragile).

- **Isolant électrique**

Le verre est un excellent isolant électrique car il ne contient pas d'électrons libres pour conduire le courant électrique. Cette propriété est cruciale pour de nombreuses applications électroniques.

- **Isolant thermique (variable)**

La conductivité thermique du verre est relativement faible, ce qui en fait un bon isolant thermique dans certaines applications (comme les doubles vitrages). Cependant, cette propriété peut varier en fonction de la composition du verre.

- **Densité**

La densité du verre varie en fonction de sa composition, mais elle se situe généralement entre 2,4 et 2,8 g/cm³. Le verre au plomb peut avoir une densité plus élevée.

- **Point de fusion et température de ramollissement**

Le verre n'a pas un point de fusion précis comme les matériaux cristallins. Au lieu de cela, il ramollit progressivement sur une plage de températures. La température de ramollissement dépend de la composition du verre.

- **Dilatation thermique**

Le verre se dilate et se contracte en fonction des changements de température. Le coefficient de dilatation thermique varie selon le type de verre. Les verres borosilicatés (comme le Pyrex) ont un faible coefficient de dilatation, ce qui les rend résistants aux chocs thermiques.

- **Résistance chimique**

Le verre est interne chimiquement, surtout vis –à vis de nombreux acides, bases et solvants. Il ne réagit pas avec les produits alimentaires ou pharmaceutiques [45].

- **Caractéristiques Chimiques**

- **Composition amorphe**

Contrairement aux solides cristallins, les atomes du verre ne sont pas disposés selon un ordre régulier et répétitif. Sa structure est désordonnée, similaire à celle d'un liquide figé. C'est ce qui lui confère sa transparence et son absence de point de fusion précis.

- **Principalement composé de silice (SiO_2)**

La plupart des verres commerciaux sont à base de silice, souvent mélangée à d'autres oxydes (comme la soude (Na_2O), la chaux (CaO), l'oxyde de bore (B_2O_3), l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3)) pour modifier ses propriétés (point de fusion, dureté, résistance chimique, etc.).

- **Inertie chimique**

Comme mentionné précédemment, le verre est généralement inerte et ne réagit pas facilement avec d'autres substances.

- **Autres caractéristiques importantes**

- **Facilité de mise en forme** : Le verre peut être facilement moulé, soufflé, étiré et façonné lorsqu'il est chauffé à sa température de ramollissement.

- **Recyclabilité** : Le verre est recyclable à 100% sans perte de qualité, ce qui en fait un matériau durable.

- **Variété de couleurs et de finitions** : En ajoutant des oxydes métalliques à sa composition, on peut obtenir du verre de différentes couleurs. Des traitements de surface peuvent également modifier son aspect (dépoli, sablé, etc.).

- **Propriétés optiques spécifiques (pour certains types de verre)** : Certains verres sont conçus pour avoir des indices de réfraction, une dispersion ou une transmission de la lumière spécifique, ce qui les rend adaptés aux applications optiques (lentilles, prismes, fibres optiques).

- **Biocompatibilité (pour certains types de verre) :** Certains verres spéciaux sont biocompatibles et peuvent être utilisés dans des applications médicales (implants, bio verres).

Chapitre II :

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX, MATÉRIELS UTILISÉS ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

I. Introduction :

Ce chapitre présente les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude : le plâtre de construction, le verre broyé et la cendre de biomasse. Afin de caractériser ces matériaux, des analyses minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX) ainsi que des analyses chimiques par fluorescence ont été réalisées. Les propriétés physiques, telles que la granulométrie (déterminée par diffraction laser) et la masse volumique apparente, ont également été examinées.

Par ailleurs, divers essais expérimentaux ont été menés pour évaluer le comportement des mélanges, notamment en ce qui concerne la consistance, la perte d'eau par évaporation, la cinétique d'hydratation, les temps de début et de fin de prise, la résistance mécanique, ainsi que l'absorption capillaire des éprouvettes.

II.1. Matériaux et leurs caractéristiques

Pour mener à bien la campagne expérimentale de ce projet de fin d'étude, les matières premières suivantes ont été utilisées pour la préparation des mélanges : du plâtre, de l'eau du robinet, une cendre de biomasse issue du chauffage domestique, et du verre finement broyé nommées (C) et (V), respectivement.

II.1.1. Le plâtre

Le plâtre utilisé est un plâtre de type sulfate calcium de hémihydrate β ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$), issu d'une usine située dans la région de Bouira. Ce matériau est couramment employé dans le domaine de la construction, notamment pour les revêtements muraux, la fabrication de panneaux préfabriqués et la réalisation de plaques destinées aux faux plafonds.

Il se présente sous forme de poudre blanche, obtenue par cuisson du gypse naturel ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), suivie d'un broyage. Lorsque le plâtre est mélangé à l'eau, un processus appelé gâchage, il forme une solution aqueuse blanche. En quelques minutes, cette solution devient pâteuse, puis durcit pour donner ce que l'on appelle le « plâtre pris » ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ce phénomène suit le principe de Le Chatelier, détaillé au chapitre I.

➤ Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X

Le matériel utilisé pour l'analyse minéralogique est un diffractomètre à rayons X (DRX), modèle D 5000 de SIEMENS.

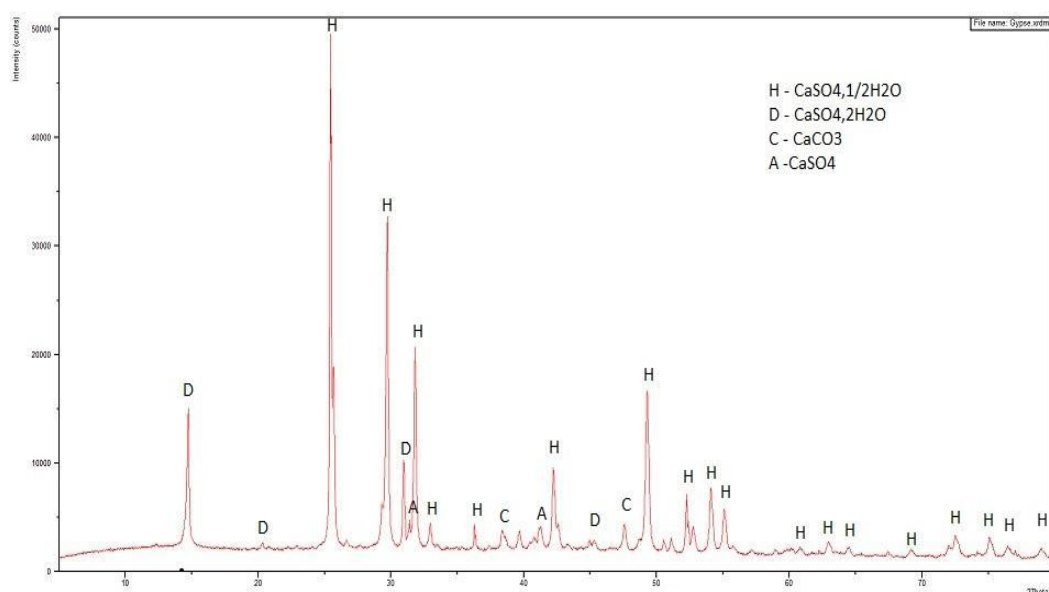


Figure II. 1. Analyse minéralogique par DRX du plâtre

Le diagramme de diffraction obtenu pour le plâtre étudié (Figure II.1) indique une composition majoritairement constituée sulfate de calcium hémihydrate β ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$). Il révèle également la présence de cristaux résiduels de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), probablement dus à une cuisson incomplète après l'extraction en carrière. De plus, des traces d'impuretés sous forme de carbonate de calcium (CaCO_3) sont détectées, vraisemblablement issues de la calcination de matières organiques. La présence d'anhydrite CaSO_4 est quant à elle très faible.

➤ L'analyse chimique

La spectrométrie de fluorescence X effectuée par le Rigaku RIX 3000 est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de quantifier la majorité des éléments chimiques présents dans un échantillon. L'analyse chimique et les principaux oxydes présents dans le plâtre utilisé sont résumés dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Analyse chimique du plâtre

Oxyde	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	Perte au feu
En %	0,70	0,10	0,08	39,15	0,53	50,95	0,09	0,03	8,35

Les constituants les plus prépondérants sont le CaO et le SO_3 , ce qui confirme que le plâtre utilisé est principalement composé de sulfate de calcium (CaSO_4). La valeur de la perte au feu est liée à l'évaporation de l'eau liée et à la présence de carbonate de calcium (CaCO_3), dont la

décomposition thermique libère du dioxyde de carbone (CO_2). Les résultats de cette analyse chimique sont en accord avec ceux obtenus par diffraction des rayons X (Figure II.1.), confirmant ainsi la présence majoritaire de sulfate de calcium (CaSO_4).

➤ Les propriétés physiques

Ces propriétés sont présentées dans le Tableau II.2

Tableau II.2. Le refus au tamis de 200 μm , 500 μm et la masse volumique apparente du plâtre.

Le refus au tamis de 200 μm (%)	Inférieur à 25 %
Le refus au tamis de 800 μm (%)	Inférieur à 1 %
La masse volumique apparente du plâtre (g/cm^3)	1,153

L'enregistrement des refus aux tamis de 800 μm et 200 μm permet d'évaluer la granulométrie du plâtre utilisé. Le refus au tamis de 200 μm étant d'environ 25 %, cela indique que le plâtre utilisé est un plâtre fin.

II.1.2. La cendre de biomasse

La cendre de biomasse, a été collectée lors du chauffage domestique au bois. Le bois utilisé provenait de l'élague des arbres. Ces cendres ont été employées sans aucun prétraitement. Après leur collecte, elles ont été tamisées à 80 μm , puis séchées à 40 °C pendant 24 heures avant d'être laissées à refroidir et puis elle est conservée dans un récipient hermétiquement fermé, afin d'éviter la carbonatation de cette cendre de biomasse, qui contient du CaO et du MgO et ce, avant chaque mélange préparé.

➤ Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X

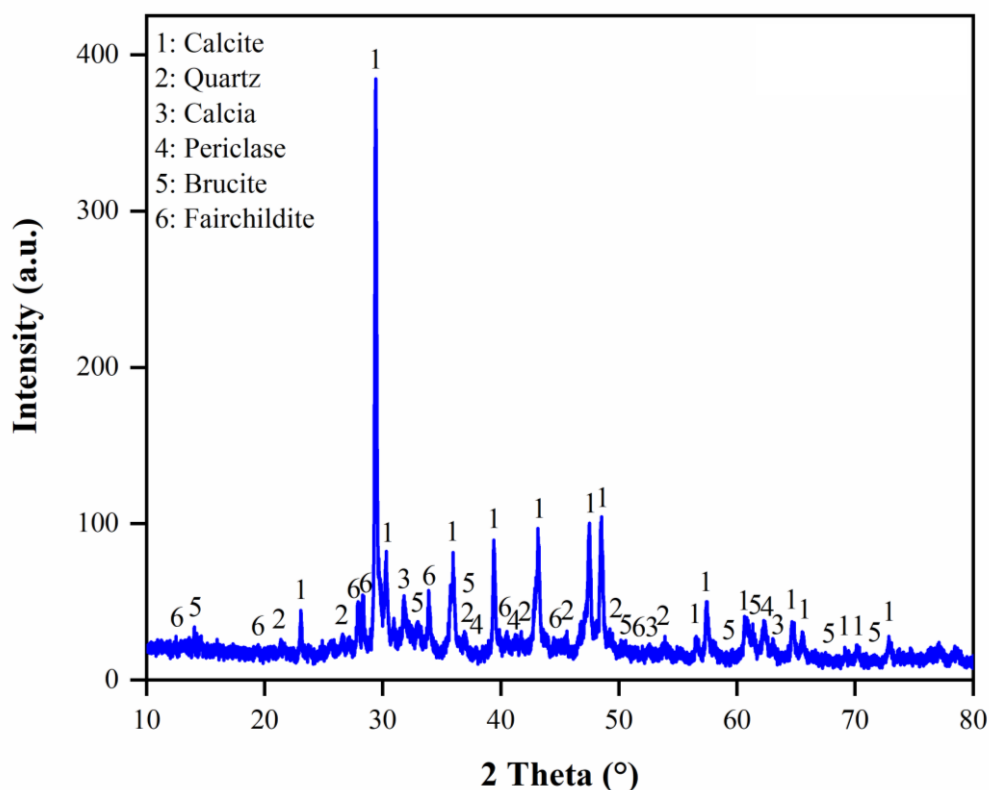


Figure II. 2. Analyse minéralogique par DRX de la cendre de biomasse

La diffraction des rayons X (DRX) de la Figure II.2 confirme les résultats de l'analyse chimique du tableau II.3 ci-dessous. La teneur en calcite (CaCO_3) est présente dans la cendre de biomasse. Le MgO (Périclase) et la Portlandite (Ca(OH)_2) issue de l'hydratation du CaO , apparaissent dans la cendre de biomasse. Le terme calcia désigne couramment l'oxyde de calcium, de formule chimique CaO , aussi appelé chaux vive dans les contextes industriels. Le quartz et le dioxyde de silicium (SiO_2) sont étroitement liés, car le quartz est une forme cristalline du SiO_2 . La brucite, un minéral composé principalement d'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2), issu de l'hydratation du MgO , ainsi que la fairchildite, un minéral plus rare de formule chimique $\text{K}_2\text{Ca(CO}_3)_2$, généralement associé aux cendres ou matériaux résiduels riches en potassium et en calcium, ont été aussi détectées.

➤ L'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique par spectrométrie de fluorescence X, résumés dans le Tableau II.3, indiquent que la cendre de biomasse utilisée présente une forte teneur en CaO, de l'ordre de 38,58 % en poids. Elle présente aussi des concentrations relativement significatives en oxyde de magnésium (MgO), en oxyde de silicium (SiO₂) et oxyde de potassium (K₂O) atteignant respectivement 15,13 %, 12,67% et 8,36% en poids.

De faibles proportions d'Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ et Na₂O sont également détectées. En raison de la carbonatation de la cendre de biomasse, qui se produit lors de la cuisson du bois et après son exposition au CO₂, une partie du CaO formée est transformée en carbonate de calcium (CaCO₃). Ce phénomène entraîne une perte au feu élevée, atteignant environ 22,00 % en poids, due également à l'élimination de l'eau, des matières grasses (les lipides) et des composés organiques (la cellulose, l'hémicellulose et la lignine).

Tableau II.3. La composition chimique de la cendre de biomasse

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu
%	12,67	0,20	0,02	38,58	15,13	0,91	0,46	8,36	22,00

➤ Les propriétés physiques

• La granulométrie au laser

La granulométrie au laser est une méthode précise et largement utilisée pour déterminer la distribution des tailles de particules fines dans différents matériaux. Elle repose sur l'utilisation d'un granulomètre tel que le Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer Partica LA-960V2 de marque HORIBA, qui utilise la diffraction de la lumière pour mesurer la taille des particules. Cet appareil est capable d'analyser des particules dans une gamme de tailles allant de 0,01 µm à 5000 µm.

D'après l'analyse granulométrique au laser, 62% des particules de la cendre de biomasse analysée ont une taille inférieure à 2 µm, ce qui indique une granulométrie très fine. Ces particules fines augmentent la surface spécifique, favorisant les réactions chimiques (activité pouzzolanique), améliorant l'homogénéité dans les mélanges et peuvent influencer la densité et la perméabilité des matériaux incorporant cette cendre de biomasse en s'insérant entre les cristaux du mélange de plâtre assurant une bonne densification améliorant ainsi les performances mécaniques.

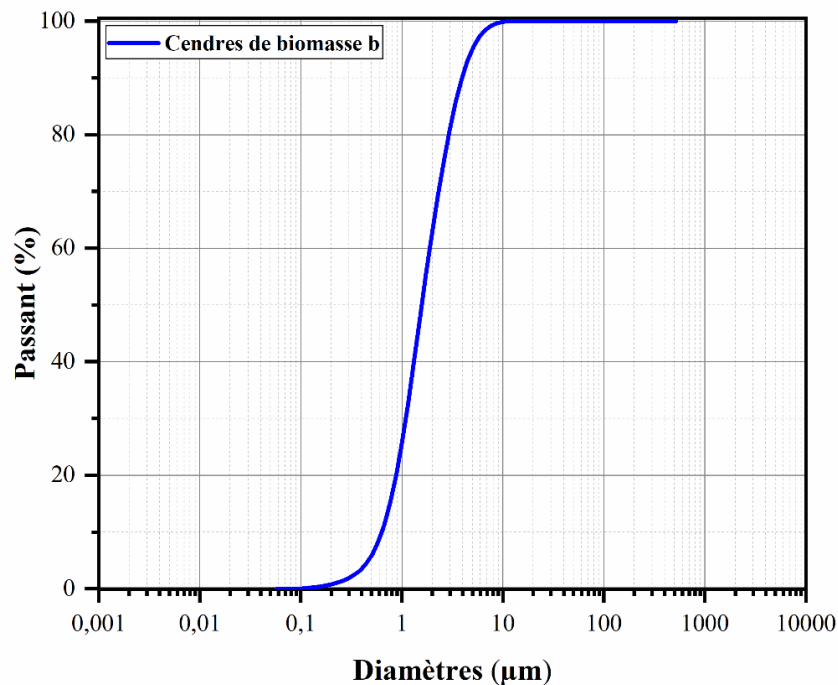


Figure II.3. Analyse granulométrique au laser de la cendre de biomasse

- **Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)**

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la morphologie d'un matériau à l'échelle nanométrique. Les microstructures des échantillons ont été examinées à l'aide de l'appareil Thermo Scientific™ Quattro ESEM haute résolution.

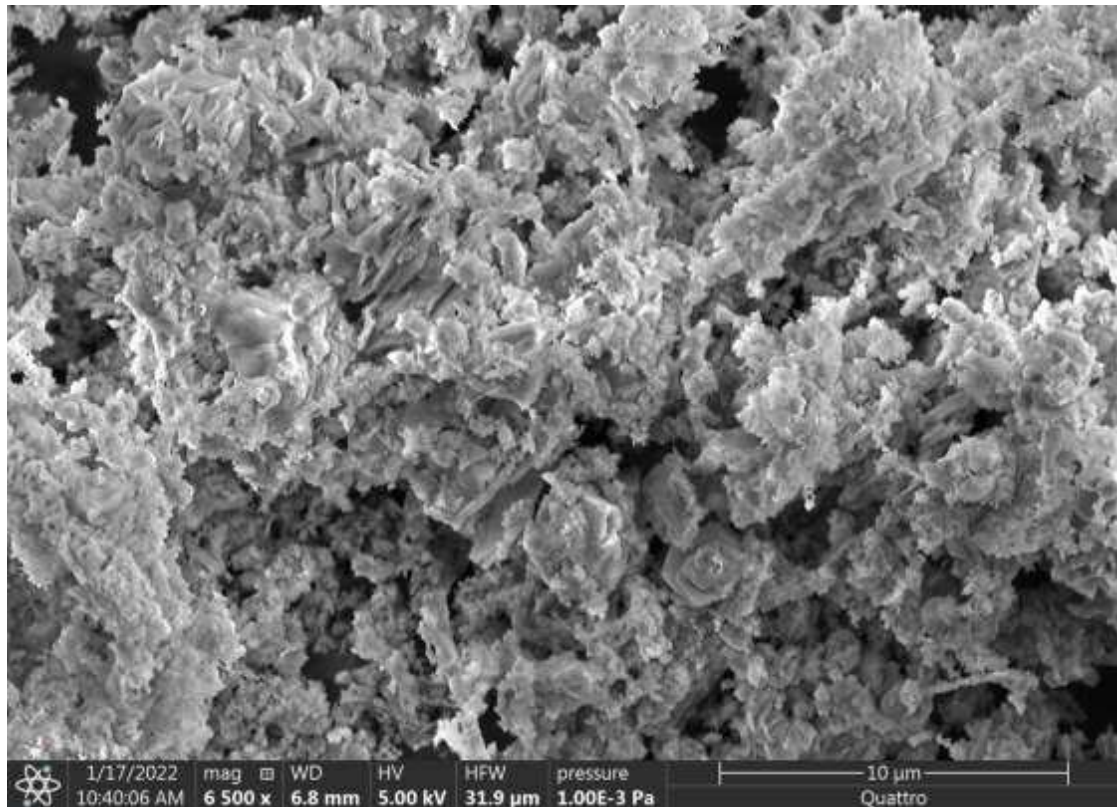


Figure. II.4. Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La cendre de biomasse utilisée présente une morphologie rugueuse et irrégulière, caractérisée par des particules aux surfaces poreuses et souvent anguleuses. Cette texture spécifique influence les interactions physiques entre les constituants du mélange, notamment en augmentant l'accrochage mécanique entre les grains et en réduisant la fluidité du système.

La quasi-totalité des particules observées présente un diamètre inférieur à 80 µm, ce qui atteste de la finesse globale du matériau analysé.

- **Masse volumique apparente**

La masse volumique apparente est utilisée pour caractériser la densité d'un matériau. La masse volumique apparente tient compte des espaces vides, des pores ou de la structure particulière du matériau dans des conditions spécifiques [9].

La masse volumique de la cendre de biomasse a été déterminée selon la norme NF P 94-053 [9]. Le résultat suivant de la masse volumique apparente de la cendre de biomasse utilisé est de l'ordre de 0,883 g/cm³

II.1.3. Le verre broyé

L'accumulation des déchets solides issus de diverses activités humaines pose un défi majeur en matière de gestion de l'espace et de l'environnement. Le recyclage et la valorisation de certains résidus industriels, comme le verre, offrent une solution efficace. Le verre collecté, finement broyé et ajouté partiellement, sans aucun prétraitement, au mélange de plâtre et de cendres de biomasse, permet de réduire l'impact écologique tout en limitant l'accumulation de ces déchets dans l'environnement. De plus, cette incorporation pourrait améliorer certaines propriétés du mélange composé de plâtre, de cendres de biomasse et de verre finement broyé.

➤ Analyse minéralogique par diffraction aux rayons X

Le spectre DRX du verre broyé se caractérise par un large halo diffus entre 15° et 30° (2θ), sans pics nets, ce qui confirme l'absence de structure cristalline. Cette structure amorphe favorise sa réactivité chimique, notamment dans les applications pouzzolaniques.

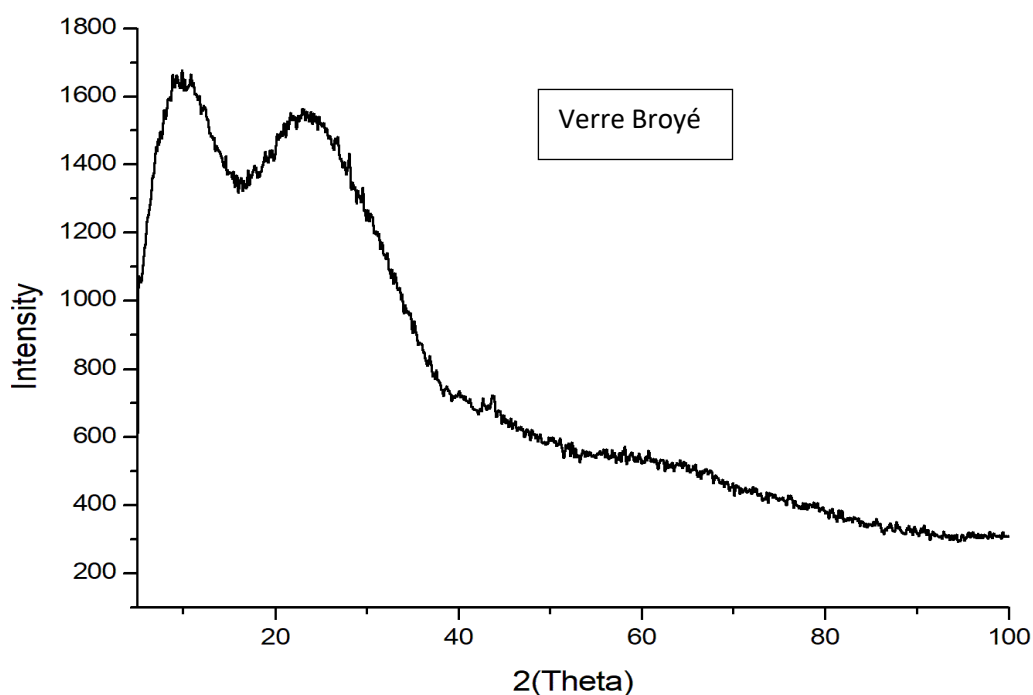


Figure II. 5. Analyse minéralogique par DRX du verre broyé

Tableau II.4 : La composition chimique du verre broyé

La composition chimique des principaux composants oxydes du verre broyé est présentée dans le tableau II.4. Ci-dessous.

Oxydes	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
%	72	13,50	11,3	2,70	2

Le verre broyé est principalement constitué de silice (SiO₂), aussi appelée vitrifiant, provenant des sables de carrières ou de rivière (quartz). L'oxyde de sodium (Na₂O), ou soude, agit comme fondant : il réduit de plusieurs centaines de degrés la température de fusion de la silice et améliore la malléabilité du verre. L'oxyde de calcium (CaO), ou chaux vive, joue le rôle de stabilisant. Issu du calcaire, il renforce la résistance chimique et mécanique du verre, empêchant son altération dans le temps. Enfin, le périclase (MgO) et l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), présents en faibles quantités, améliorent la stabilité chimique et augmentent respectivement la dureté et la résistance thermique du verre.

➤ **Les propriétés physiques**

• **L'analyse granulométrique au laser**

L'analyse granulométrique par diffraction laser des cendres de biomasse a révélé une teneur en particules fines inférieures à 80 µm d'environ 20 % (Figure II.5). Le reste des particules se situe principalement entre 80 et 350 µm, bien que le verre broyé ait été tamisé, après broyage, à l'aide d'un tamis de 80 µm. Cette observation s'explique par la morphologie allongée de certaines particules vitreuses, dont la longueur dépasse 80 µm, tandis que leur largeur reste inférieure,

Leur permettant ainsi de traverser les mailles du tamis.

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB), présentée sur la figure ci-dessous, confirme cette distribution morphologique et granulométrique.

Les particules fines de la cendre de biomasse conservent leur finesse et peuvent s'insérer entre les cristaux du mélange de plâtre, favorisant ainsi une bonne densification de la matrice, ce qui contribue à l'amélioration des performances mécaniques.

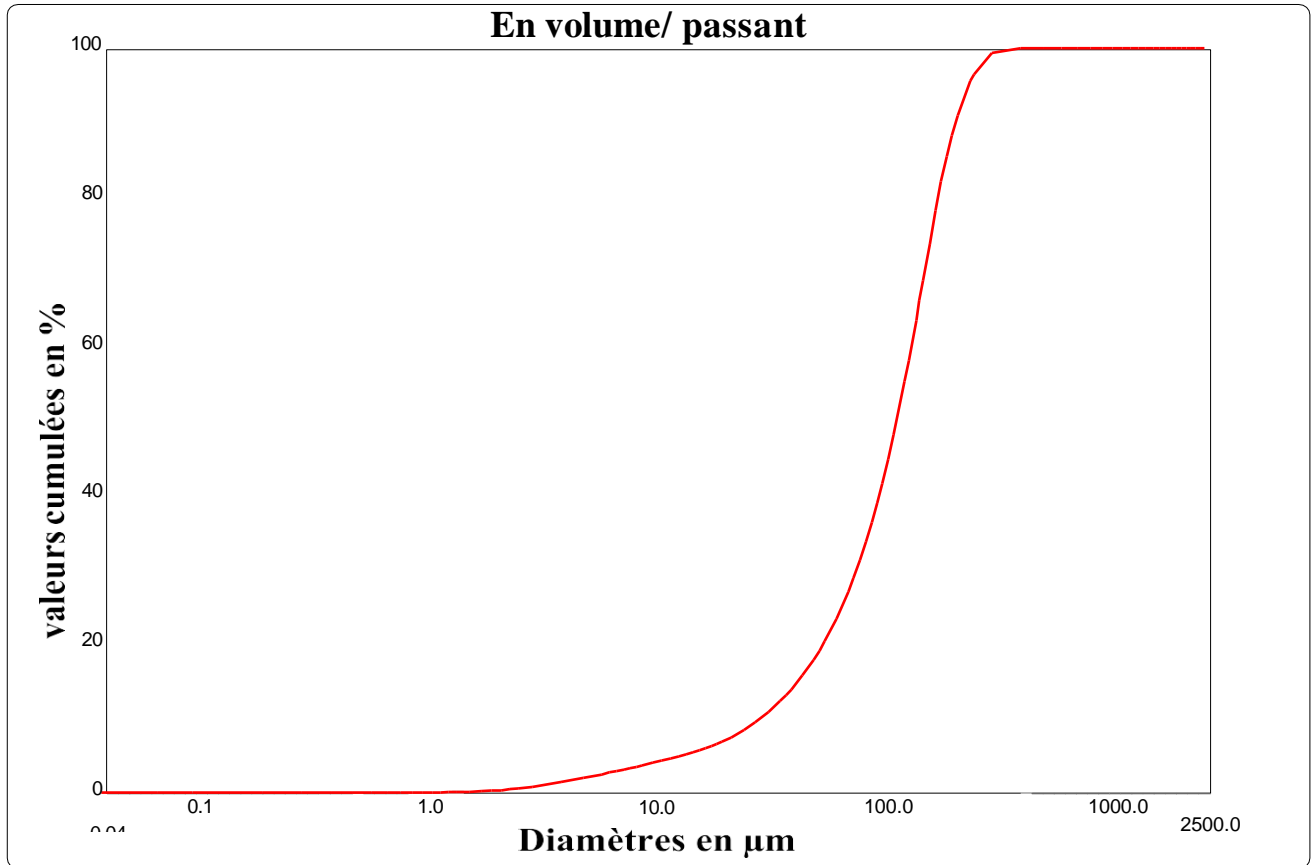


Figure II.6. Analyse granulométrique au laser du verre broyé

- **Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)**

L'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) a été réalisée afin d'observer la morphologie et la distribution des particules au sein des mélanges contenant du verre broyé.

La morphologie allongée de certaines particules de verre broyé est clairement visible, confirmant les résultats de l'analyse granulométrique, et suggérant leur passage à travers le tamis malgré leur longueur excédant 80 μm .

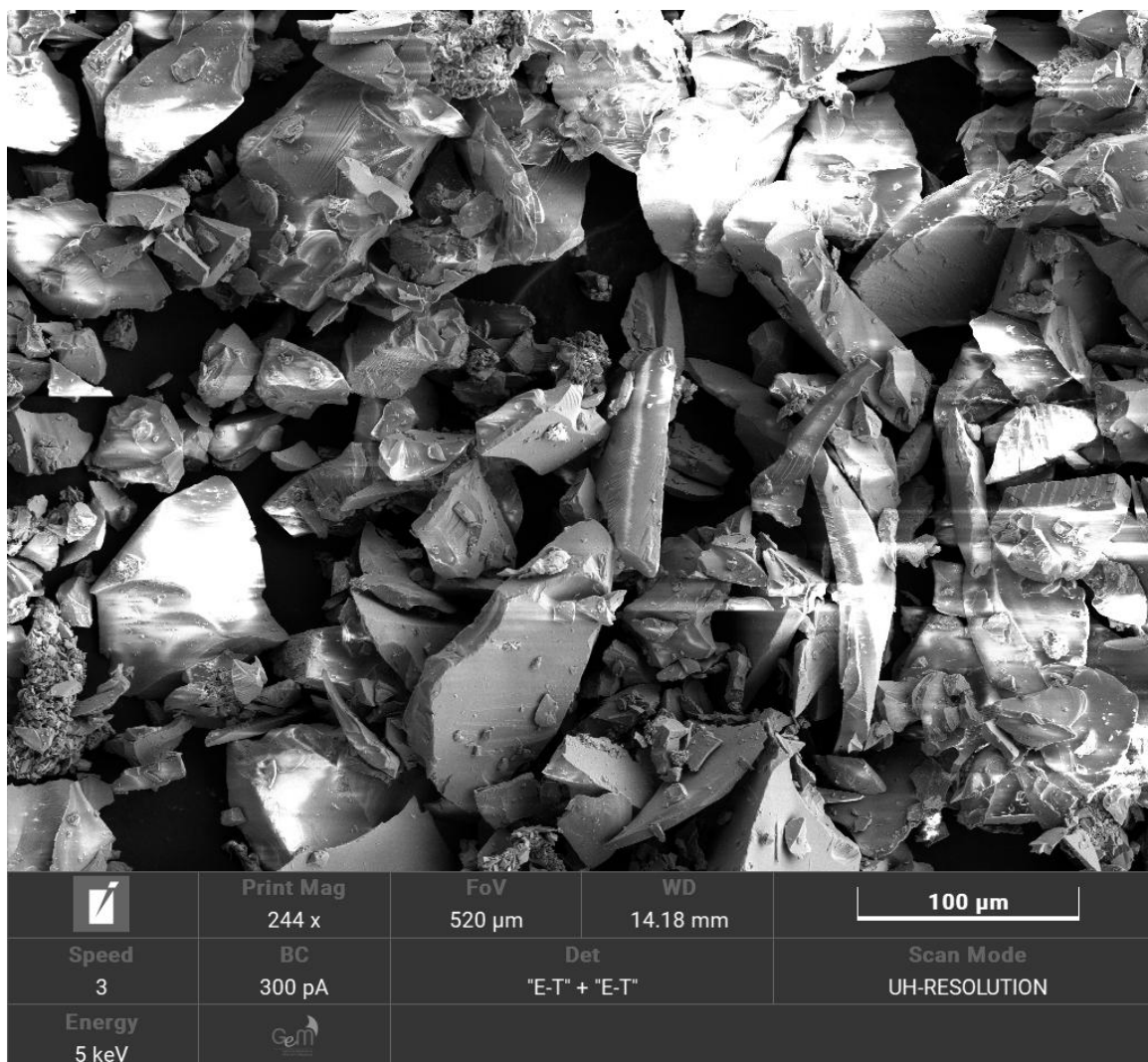


Figure. II.7. Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

Le verre broyé se présente sous forme de particules angulaires et irrégulières, ce qui augmente la force de frottement entre les grains. Cette morphologie contribue à une réduction de la fluidité du mélange composé de cendre de biomasse, de verre broyé et de plâtre, en entravant les mouvements relatifs entre particules

- **La masse volumique apparente**

La masse volumique apparente du verre broyé est de l'ordre de 1200 kg/m^3 .

II.2. Essais expérimentaux

Dans cette étude, des pourcentages de cendre de biomasse et de verre broyé ont été ajoutés au plâtre. Trois formulations distinctes, intégrant respectivement 5 %, 7,5 % et 10 % en poids de

ce mélange additif (cendre de biomasse et verre broyé), ont été préparées. Ces compositions ont été désignées sous l'appellation PCVX%.

Pour comparaison, un échantillon témoin de plâtre sans addition (0 %) a également été réalisé et nommé P0%.

Ces formulations ont ensuite été mélangées avec de l'eau afin de fabriquer des échantillons de plâtre modifié.

II.2.1. Le gâchage du plâtre

Le gâchage du plâtre est l'opération qui consiste à mélanger la poudre avec de l'eau. Contrairement au gâchage du ciment, où l'eau est généralement ajoutée à la poudre, le plâtre doit être incorporé progressivement dans l'eau. Pour éviter la formation de grumeaux, il est recommandé de saupoudrer la poudre en surface de manière homogène avant de mélanger.

La procédure de mélange du plâtre, de la cendre de biomasse, du verre broyé et de l'eau a été élaborée conformément à la norme européenne EN 13279-2 :2014 [46]

Dans un premier temps, les poudres de plâtre de cendre de biomasse et du verre broyé sont mélangées à sec, puis progressivement saupoudrées dans l'eau. Ce mélange est ensuite agité de manière homogène et rapide dans un malaxeur de laboratoire de 5 litres pendant 30 secondes.

La solution aqueuse obtenue est laissée au repos pendant 60 secondes afin de permettre l'évacuation de l'air emprisonné. Par la suite, elle est de nouveau mélangée à l'aide d'une spatule en plastique avant d'être versée dans les moules. Cette dernière étape doit être réalisée en moins de 60 secondes pour garantir des conditions optimales de prise et de durcissement.

II.2.2. Les conditions de cure

Les échantillons ont été démoulés 24 heures après leur fabrication, puis stockés dans une pièce ventilée à une température de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une humidité relative de $60\% \pm 5\%$ pendant 7 jours.

Avant d'effectuer les mesures mécaniques et absorption capillaire, les échantillons ont été conditionnés dans une étuve à $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à stabilisation de leur poids, garantissant ainsi un séchage uniforme.

II.2.3. La consistance

La consistance correspond à l'état de fluidité initiale juste après le mélange des composants ou à la viscosité du mélange. L'ajout d'eau améliore la consistance du mélange et optimise ses propriétés rhéologiques. Par ailleurs, la quantité d'eau utilisée lors du gâchage influence plusieurs paramètres clés du plâtre, notamment : Le début de prise, la fin de prise et la porosité finale. Une augmentation de la quantité d'eau entraîne une élévation de ces trois paramètres, retardant ainsi la prise et augmentant la porosité du matériau final.

Elle est généralement déterminée selon la norme NF EN 13279-2 [46] par le rapport eau/mélange et elle est testée immédiatement après le processus de mélange au moyen de moules en forme de cône en caoutchouc de 40 mm de hauteur et 75 mm de diamètre intérieur (Figure II. 8).



Figure II. 8. Moule en forme de cône en caoutchouc de 40 mm de hauteur et 75 mm de diamètre intérieur et la table d'étalement

La consistance normale est atteinte lorsque la pâte s'étale jusqu'à un diamètre compris entre 150 et 210 mm.

- Si le diamètre est inférieur à 150 mm, la pâte est trop épaisse.
- Si le diamètre est supérieur à 210 mm, la pâte est trop fluide.

II.2.4. Perte de masse d'eau par évaporation

La perte en eau des échantillons, exprimée en pourcentage, a été mesurée quotidiennement pendant leur stockage en pièce ventilée ainsi que lors de leur conditionnement en étuve à 40°C jusqu'à ce que la masse des échantillons soit constante, cela indique que les échantillons ont séché presque complètement, et donc que la réaction de durcissement est terminée ou proche de l'être.

- Perte d'eau progressive :

- Au fur et à mesure que les échantillons sèchent, ils perdent de l'eau par évaporation. Pendant le séchage à température ambiante, cette perte en eau est plus lente et se produit principalement par l'évaporation de l'eau libre.

- Sécheresse complète :

- Lorsqu'ils sont placés dans une étuve à 40 °C, la perte en eau s'accélère. Après un certain temps, une fois que la masse devient constante, cela indique que l'échantillon a atteint son état de séchage complet. Autrement dit, toute l'eau libre a été éliminée.

Quand l'échantillon a perdu la majeure partie de son eau et que la masse reste constante, cela signifie que la réaction chimique est quasiment terminée et que le matériau a atteint une stabilité maximale. À ce stade, le matériau est prêt à être utilisé dans son application finale, car il a durci et il n'y a plus de risque significatif de changement dans ses propriétés physiques ou mécaniques.

II.2.5. Hydratation, Temps de début et fin de prise

L'hydratation du plâtre est un processus chimique fondamental qui permet au plâtre nommé aussi hémihydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) de devenir un matériau durci et résistant nommé dihydrate de sulfate de calcium ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Ce processus, bien que relativement rapide, est influencé par des facteurs comme la température, la quantité d'eau ajoutée, les adjuvants et les additions.

Temps de début de prise le plus courant est appelé « temps-couteau ». Le test consiste à verser sur une plaque de verre un mélange d'eau et de plâtre correspondant au taux de gâchage. Toutes les 10s, on tranche la galette avec la lame d'un couteau. Le moment où le sillon ainsi réalisé ne referme plus est appelé temps du début de prise. (Figure II. 9.1)

Temps de fin de prise, également appelé prise "au pouce", correspond au moment où le matériau a suffisamment durci pour résister à une pression exercée avec le pouce sans laisser d'empreinte notable. Il marque la transition entre l'état plastique et l'état rigide du mélange, et constitue une étape clé dans le processus de durcissement. (Figure II. 9.2)



Figure II. 9.1. Mesure du temps de début de prise par la méthode du couteau.

Figure II. 9.2. Mesure du temps de fin de prise par la méthode du pouce.

II.2.6. Résistances mécaniques

La caractérisation mécanique des échantillons a été réalisée au moyen d'essais de flexion et de compression. Dans ce but des éprouvettes prismatiques de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ ont été utilisées. Trois échantillons ont été produits pour chaque mélange. Les éprouvettes ont d'abord été brisées dans leur partie centrale lors de l'essai de flexion, puis chacune des deux moitiés a été utilisée pour mesurer la résistance à la compression des éprouvettes.



Figure II. 10. Presse hydraulique Control de type PILOT PRO modèle 65-L27P12

Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'une presse hydraulique Control de type PILOT PRO modèle 65-L27P12 (Figure II.9). La résistance à la flexion à trois points a été définie conformément à la norme NF EN 196-1, sous une charge concentrée maintenue jusqu'à la rupture. La résistance à la compression a été évaluée selon XP P 13-901 sous une charge uniaxiale appliquée sur chaque demi-bloc jusqu'à la rupture.

II.2.7. Absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément à la norme EN 1015-18 (2003) [47], afin d'évaluer la capacité des matériaux à absorber l'eau par capillarité. Pour cela, des éprouvettes prismatiques de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ ont été utilisées.

Avant l'essai, les éprouvettes ont subi un séchage préalable à une température de $40 \pm 2 \text{ °C}$ jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Après séchage, elles ont été refroidies à température ambiante, puis pesées pour déterminer leur masse sèche initiale (M_0).

L'immersion a ensuite été effectuée de manière partielle : les éprouvettes ont été placées verticalement, avec leur base immergée dans l'eau sur une hauteur de 5 mm (Figure II.10).

Chapitre II : Caractérisation des matériaux, matériels utilisés et essais expérimentaux

L'absorption capillaire a été mesurée à des intervalles de temps précis : une pesée a été réalisée après 1 heure d'immersion (masse M_1). À chaque intervalle, les éprouvettes ont été rapidement retirées de l'eau, la base essuyée avec soin pour éliminer l'excès d'eau, puis immédiatement pesées.

Cet essai permet de quantifier la vitesse et la quantité d'eau absorbée par capillarité dans le matériau étudié.

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité « C » est ensuite calculé en utilisant l'équation (1) suivante :

$$AC = \frac{Mh - Ms}{S \cdot \sqrt{t}} \text{ en } [g / (cm^2 \cdot \min^{0.5})] \dots \dots \dots (1)$$

Avec :

Mh : Masse humide en g.

Ms : Masse sèche en g.

S : Surface de la section de l'éprouvette émergée dans l'eau en cm^2 .

t : Temps d'immersion de l'éprouvette dans l'eau en minute.



Figure II. 11. Immersion des éprouvettes dans l'eau.

Chapitre III :

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

III. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus tout au long de notre étude. Après avoir exposé la méthodologie expérimentale dans le chapitre précédent, nous mettons en avant ici les principales observations et mesures effectuées. Ces résultats seront examinés à la lumière des objectifs fixés et des hypothèses formulées, afin d'évaluer l'influence des cendres de biomasse (C) et du verre finement broyé (V) sur la consistance, les propriétés mécaniques et l'absorption capillaire du plâtre. L'interprétation des données nous permettra ainsi de tirer des conclusions pertinentes sur l'impact de ces additions sur le comportement du plâtre.

III.1.Consistance

La mesure de la consistance du plâtre consiste à observer ou à quantifier son écoulement (sa fluidité) avant le début de la prise, afin de s'assurer que la consistance se situe dans les marges exigées par les normes — à savoir un diamètre d'étalement compris entre 150 et 210 mm — et qu'il peut être correctement travaillé lors de son application.

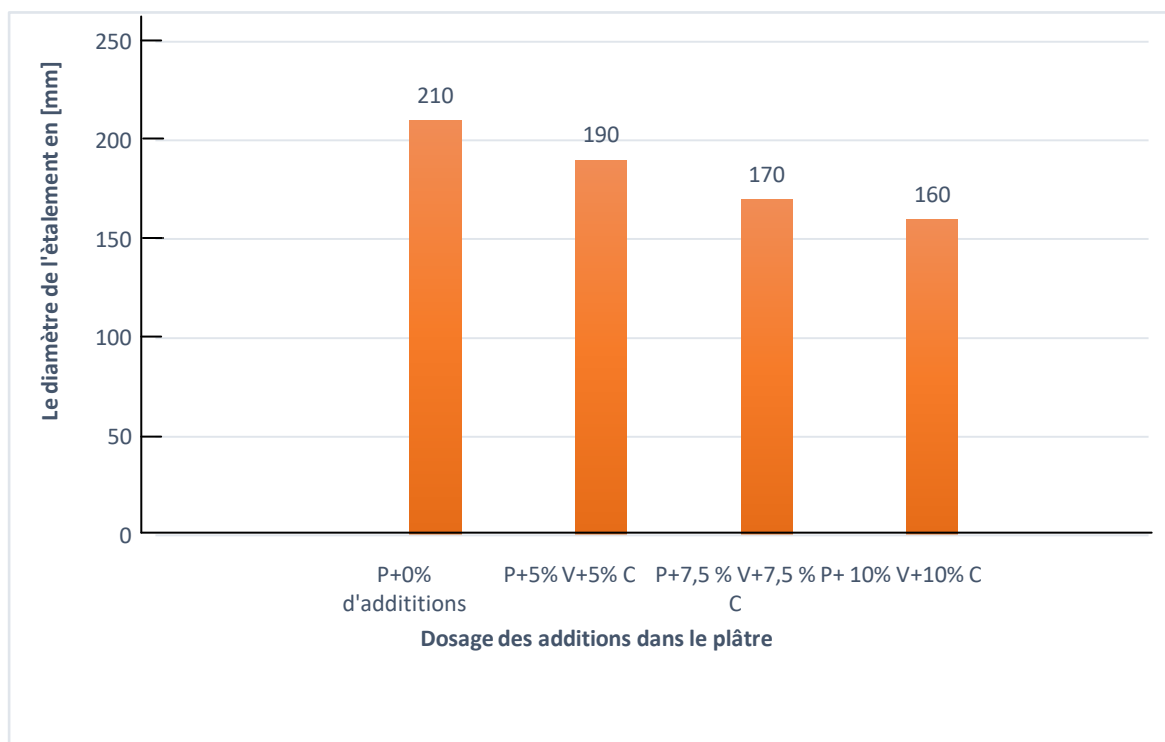


Figure III. 1. Influence du pourcentage d'additions sur le diamètre d'étalement

La figure III.1 illustre l'évolution de la fluidité des mélanges de plâtre en fonction du taux d'additions. Les résultats indiquent que l'ensemble des diamètres d'étalement mesurés se situe dans la plage de consistance définie par la norme EN 13279-2:2014 [46]. On observe une diminution progressive du diamètre d'étalement avec l'augmentation du taux d'additions, traduisant une baisse de la fluidité. Le plâtre témoin présente un diamètre d'étalement de 210 mm, contre 190 mm, 170 mm et 160 mm respectivement pour les mélanges contenant 5 %, 7,5 % et 10 % d'additions. Cette réduction est principalement attribuée à la chaux vive (CaO) l'oxyde de potassium (K_2O) contenues dans la cendre de biomasse qui réagissent violemment au contact de l'eau, en dégageant une quantité importante de chaleur (réaction exothermique). Ce phénomène favorise la formation de grumeaux et compromet l'homogénéité du mélange. De plus, l'adsorption de l'eau par les particules poreuses de la cendre de biomasse accentue cette réaction en réduisant la quantité d'eau disponible pour l'hydratation globale du système. Par ailleurs, l'effet de friction mécanique induit par les particules de verre broyé présentes dans les additions contribue également à freiner l'écoulement. En revanche, le périclase (MgO), présent dans la cendre de biomasse, réagit beaucoup plus lentement avec l'eau et n'a pas d'effet significatif sur la consistance initiale du mélange.

Les « Figures III. 2(A', A, B, C, D) montrent les diamètres de l'étalement des différents liants, avec : $X = (0\%, 5\%, 7.5\%, \text{ et } 10\%)$



A'

Figure III. 2.1. Diamètres de l'étalement du plâtre avec $E/P = 0.60$ et sans additions

Dans la figure III.2 A', la valeur du diamètre d'étalement a dépassé 210 mm avec un rapport $E/P = 0,60$. Il avait donc été prévu de maintenir un rapport eau/plâtre de 0,55 pour tous les mélanges de plâtre.

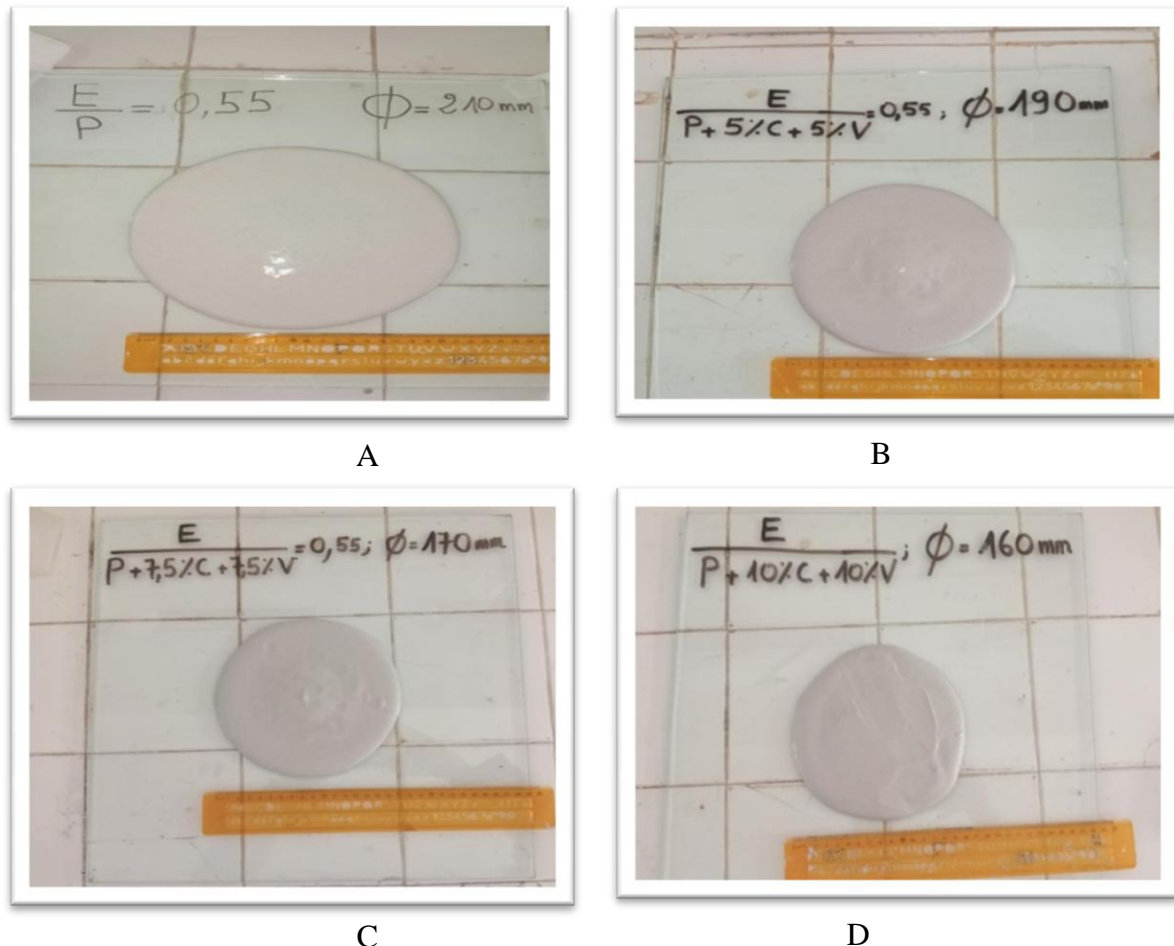


Figure III. 2.2. Diamètres de l'étalement des différents liants de plâtre

Conclusion

Une augmentation de l'addition de verre broyé (V) et de cendres de biomasse (C) entraîne une réduction notable de la fluidité des liants de plâtre frais. Le mélange de plâtre sans addition (échantillon témoin A) présente un étalement plus important (210 mm) comparé aux mélanges contenant des additions (échantillons B, C et D) dont les diamètres diminuent respectivement à 190 mm, 170 mm et 160 mm. Cette diminution confirme que l'incorporation des cendres de biomasse (C) réduit la quantité d'eau libre disponible dans le mélange, ce qui entraîne une baisse de la consistance et de la maniabilité du plâtre à l'état frais.

Cette diminution peut être attribuée à l'adsorption d'une partie de l'eau de gâchage par les additions, en particulier par les cendres riches en CaO et en K_2O , qui captent l'eau et réduisent

ainsi la quantité d'eau libre disponible pour l'étalement du mélange. En conséquence, les mélanges contenant en taux plus élevé d'additions présentent un diamètre d'étalement plus faible, traduisant une perte de fluidité par rapport au plâtre sans addition. Par ailleurs, la nature physique des ajouts, notamment leur morphologie anguleuse et leur rugosité superficielle, contribue à augmenter les frottements inter particulaires. Cette augmentation des interactions mécaniques internes s'oppose au mouvement libre des particules lors de l'étalement, aggravant ainsi la perte de maniabilité du mélange.

III.2. Début et fin de la prise :

Le début de prise correspond au moment où le plâtre commence à perdre sa fluidité. Il est influencé par la composition du mélange et le pourcentage d'addition utilisé. La fin de la prise, quant à elle, correspond au moment où le plâtre a complètement durci et ne peut plus être mis en forme.

Les résultats obtenus sont présentés dans l'histogramme de la figure (III. 3) et les figures suivantes :

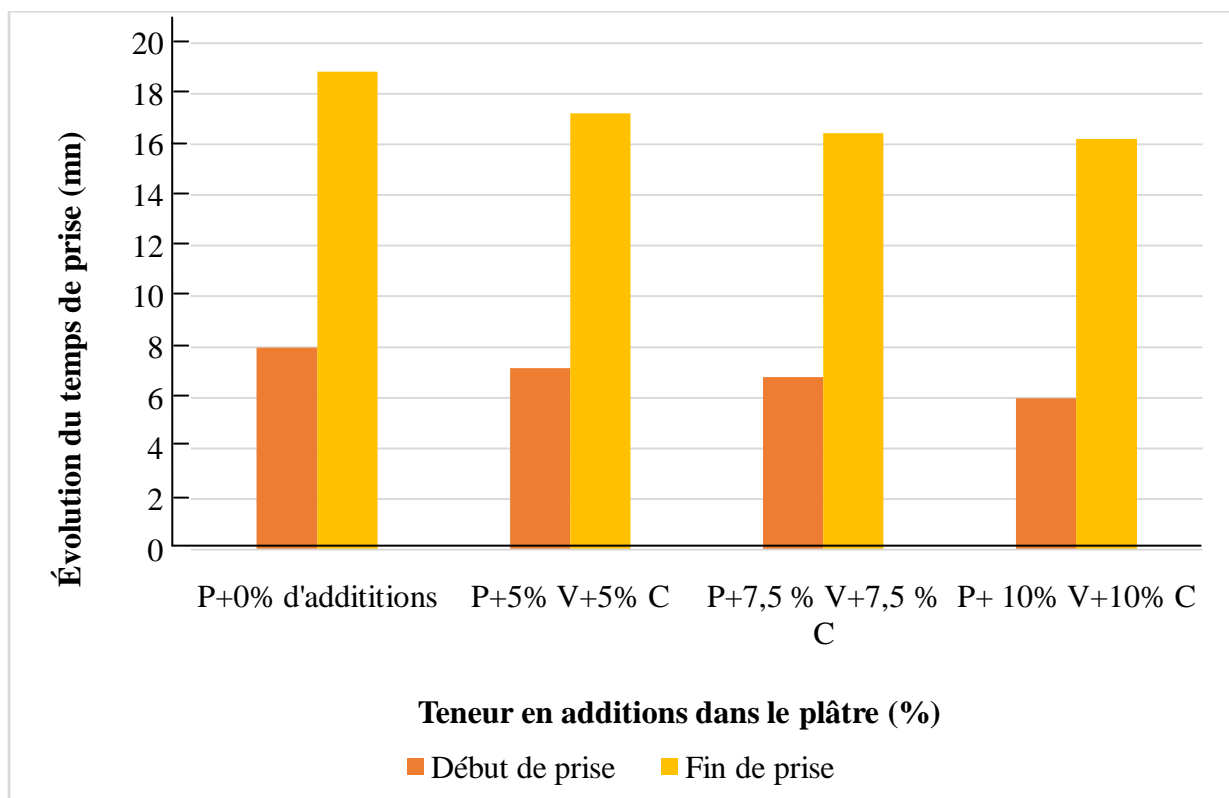


Figure III. 3. Impact des additions sur le temps de prise du plâtre

Figure III.3 montre l'influence de la teneur en additions sur le temps de début et de fin de prise du plâtre. L'augmentation du pourcentage d'additions entraîne une diminution notable des temps de prise, traduisant un effet accélérateur sur la cinétique d'hydratation.

Les figures III.4 (A, B, C, D) illustrent les temps de prise du plâtre en fonction de différents pourcentages d'ajout 5 %, 7,5 % et 10 %.

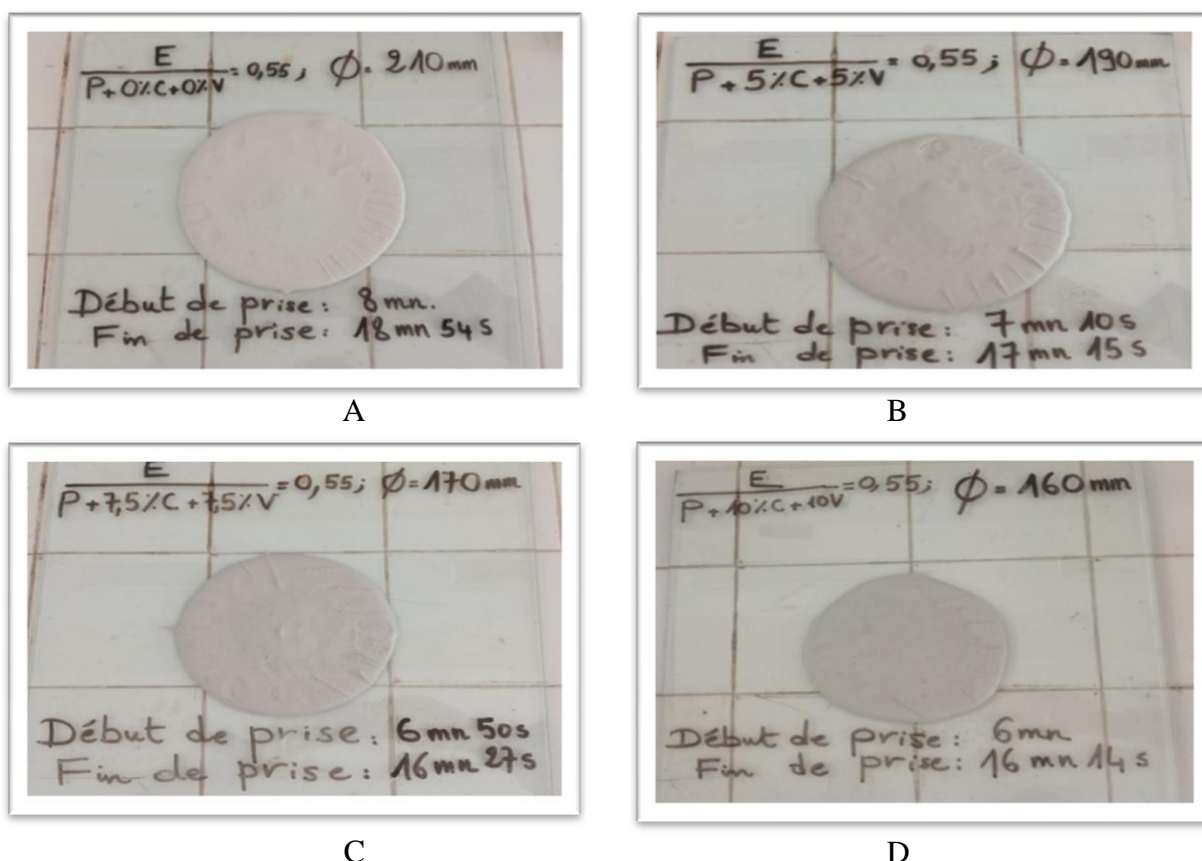


Figure III. 4. Temps de prise (début et fin) des mélanges plâtre avec additions

L'histogramme présenté dans la figure III.3, ainsi que les figures III.4 (A, B, C, D), illustrent l'évolution du temps de prise du plâtre en fonction de la teneur en additions. Il ressort clairement que l'incorporation d'additions influence significativement la cinétique de prise du plâtre. En effet, plus la teneur en additions augmente, plus le temps de prise diminue.

Sans addition (formulation témoin : P + 0 %), le début de prise est observé à 8 minutes, et la fin de prise à 18 minutes et 54 secondes. En revanche, l'ajout de 10 % de verre finement broyé et de cendres de biomasse réduit respectivement ces valeurs à 6 minutes pour le début de prise et 16 minutes et 14 secondes pour la fin.

L'effet combiné des deux types d'additions est également notable. L'incorporation simultanée de 5 % de verre et de 5 % de cendres de biomasse entraîne une réduction plus marquée du

temps de prise par rapport au plâtre sans additions. Cette tendance se poursuit avec l'augmentation progressive des proportions. La formulation contenant 7,5 % de chaque addition continue à réduire les temps de prise, tandis que la combinaison de 10 % de verre et 10 % de cendres induit la diminution la plus significative, traduisant une accélération notable des réactions de prise.

Cette accélération peut être expliquée en partie par les réactions exothermiques de la chaux vive (CaO) et de l'oxyde de potassium (K_2O), présents dans les cendres de biomasse. En présence d'eau, la chaux vive forme de l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), tandis que l'oxyde de potassium génère de la potasse caustique (KOH). Ces réactions dégagent une quantité importante de chaleur, ce qui élève la température du mélange et accélère ainsi le processus de prise du plâtre. Ces réactions dégagent une chaleur importante au contact de l'eau, ce qui élève la température du mélange et active plus rapidement les mécanismes de prise du plâtre. En revanche, le verre finement broyé n'a que peu, voire aucune influence sur le temps de prise. Cela s'explique par sa structure vitreuse, chimiquement inerte à court terme, qui ne participe pas aux réactions pouzzolaniques au début du processus — ces dernières étant très lentes. Ainsi, c'est principalement la présence des cendres de biomasse, riches en composés réactifs tels que la chaux vive et l'oxyde de potassium, qui est responsable de l'accélération observée du temps de prise.

Conclusion

La diminution progressive du temps de prise du plâtre en présence de cendre de biomasse et contenant de la chaux vive et de l'oxyde de potassium confirme leur rôle d'accélérateurs des réactions d'hydratation. Ce phénomène peut être mis à profit pour ajuster les propriétés du plâtre en fonction des exigences d'utilisation, notamment dans les applications nécessitant un temps de prise plus court. Toutefois, une attention particulière doit être portée à l'équilibre global de la formulation, afin de ne pas compromettre la maniabilité du mélange ni les performances mécaniques finales du matériau.

III.3. Perte de masse d'eau par évaporation

La figure (III.5) illustre l'évolution de la perte de masse des éprouvettes due à l'évaporation de l'eau en fonction du temps et de la teneur des additions en pourcentage. Après la prise du sulfate de calcium hémihydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) en sulfate de calcium dihydraté

($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), le plâtre durci conserve une quantité importante d'eau libre (physiquement liée). Durant la phase de séchage qui suit, cette eau libre s'évapore progressivement, entraînant une perte de masse mesurable. L'ampleur de cette perte d'eau dépend des conditions ambiantes telles que la température, l'humidité et la circulation de l'air, ainsi que de l'épaisseur et de la porosité de la couche de plâtre. Cette perte par évaporation n'inclut pas l'eau chimiquement liée, qui reste intégrée à la structure cristalline sauf en cas de températures élevées.

Durant les sept premiers jours, les éprouvettes ont été soumises à des pesées quotidiennes exposées à l'air libre. On observe une diminution progressive de la masse, correspondant à l'évaporation de l'eau libre présente dans les pores les plus larges, formés lors de l'hydratation du plâtre. Pendant le premier jour de l'étuvage à 40 °C, la perte d'eau des échantillons s'est accentuée de manière significative. Cette diminution de l'humidité s'explique par l'élévation de la température, qui favorise l'évaporation de l'eau libre contenue dans les échantillons. Le plâtre pris (P + 0 % d'addition) présente une perte de masse plus rapide et plus importante, de l'ordre de 29.40%, comparativement aux mélanges contenant des additions de 5 %, 7,5 % et 10 %, dont les pertes de masse sont respectivement de 27,84 %, 27,13 % et 25,90 %. Cette différence s'explique par l'adsorption d'une partie de l'eau de gâchage par les cendres de biomasse, riches en CaO qui a un caractère hydrophile [49]. Cette eau ne peut pas s'évaporer aux températures ambiantes ni même à 40 °C dans une étuve, car elle reste piégée dans les particules de CaO. En revanche, dans l'échantillon témoin (sans ajouts), seule l'eau physique (libre) contenue dans les pores les plus larges s'est évaporée, ce qui explique la perte de masse la plus marquée.

Conclusion

Cette différence de perte de masse d'eau s'explique par la présence de CaO dans les cendres, qui adsorbe une partie de l'eau de gâchage : cette eau, liée chimiquement, ne peut pas s'évaporer même à 40 °C. Ainsi, seule l'eau physique libre s'est évaporée dans l'échantillon témoin, d'où une perte de masse plus marquée.

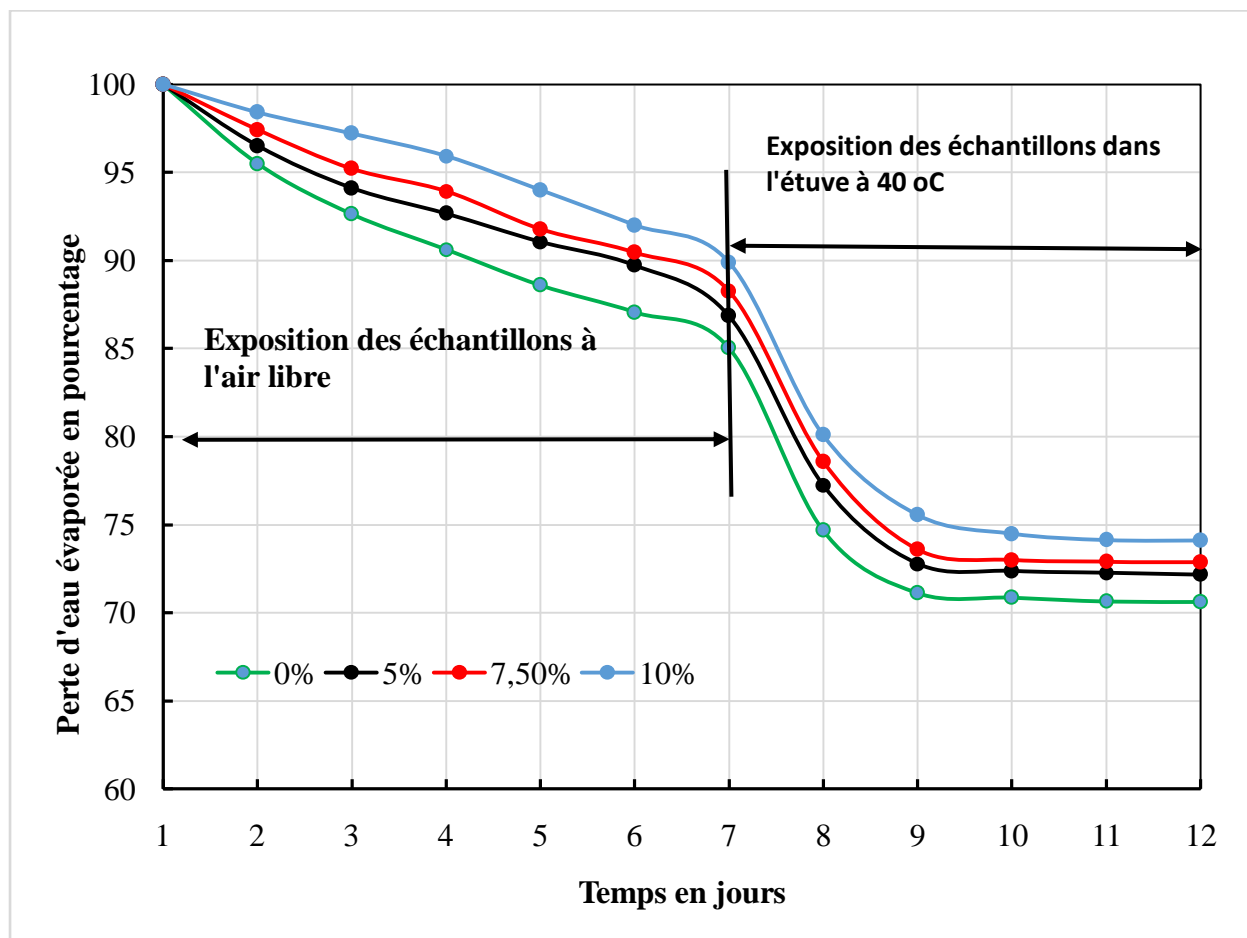


Figure III.5. Perte de masse de l'eau en fonction de la teneur des additions en pourcentage et du temps en jour

III.4. Résistance mécanique

III.4.1. Résistance à la compression

Comme pour la plupart des matériaux de construction à base minérale, la résistance à la compression constitue le principal critère d'évaluation du plâtre. Contrairement aux matériaux à base de ciment, dont la résistance se développe progressivement sur plusieurs années en conditions de durcissement normal, les hémihydrates à base de sulfate de calcium atteignent leur résistance maximale à l'état humide environs d'une heure. Un séchage ultérieur permet ensuite d'accroître cette résistance, dépassant celle mesurée à l'état humide.

La Figure(III.6) ci-dessous montre l'évolution des résistances à la compression des différents liants de plâtre exposés à l'air libre ensuite à l'étuvage à 40 °C.

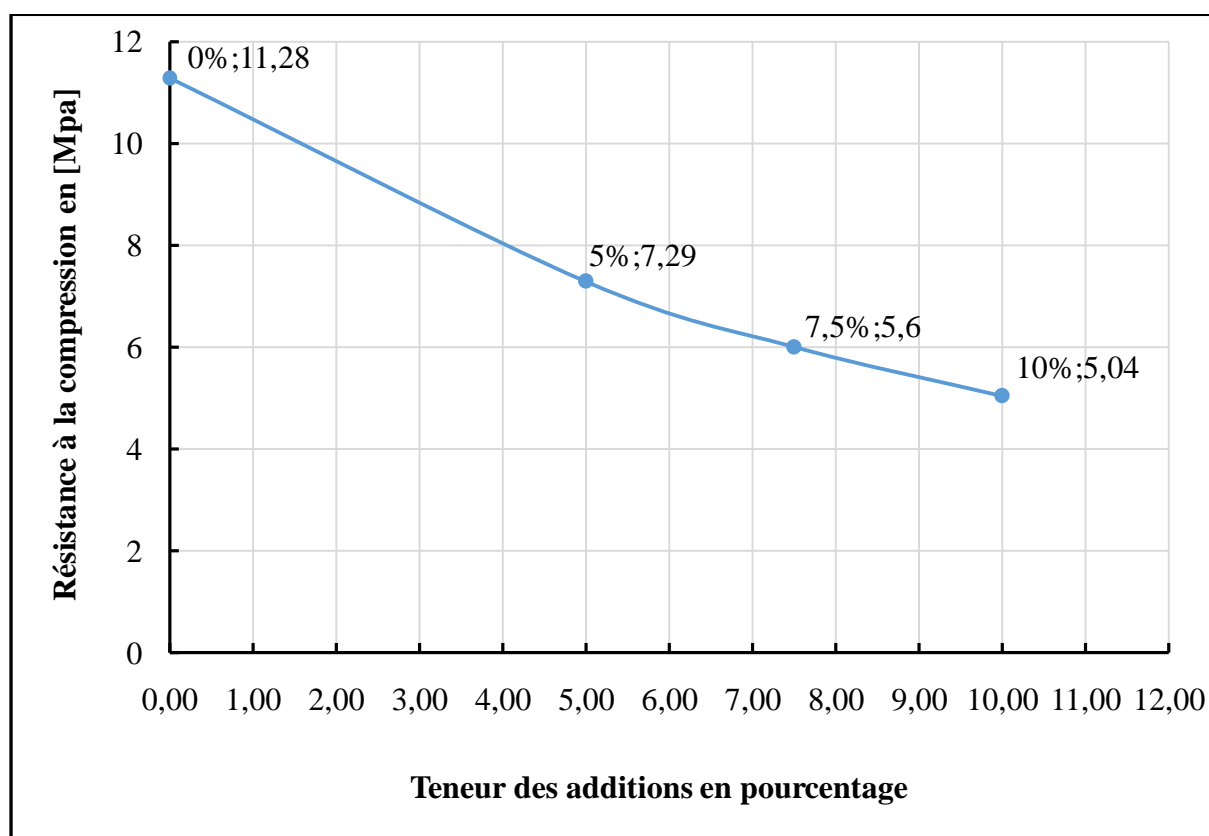


Figure III.6. Influence du taux d'additions sur la résistance à la compression du plâtre pris

Le plâtre de référence sans additions (P+0 %) présente la résistance maximale, atteignant 11,28 MPa. L'incorporation de 5 % de (V) et 5 % de (C) entraîne une diminution marquée de la résistance, qui chute à environ 7,29 MPa. Cette baisse se poursuit avec l'augmentation du taux d'additions (7,5 % et 10 %), bien que de manière légèrement atténuée. La valeur de la résistance à la compression à 10 % d'addition est de l'ordre de 5,04 MPa, ce qui est légèrement supérieur à la limite exigée par la norme EN 13279-2 :2014 [46], fixée à 4,5 MPa pour un plâtre dont les refus au tamis de 200 μm et de 800 μm sont respectivement inférieurs à 25 % et 1 %.

Cette perte de performance mécanique peut s'expliquer par une formation insuffisante de cristaux de plâtre pris ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) lors de l'hydratation. En effet, les cendres de biomasse, riches en chaux vive (CaO), adsorbent une partie de l'eau nécessaire à cette réaction, limitant ainsi la cristallisation du plâtre de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). De plus, l'hydratation du CaO et de l'oxyde de potassium (K_2O) présents dans les cendres entraîne la formation de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et de KOH , accompagnée d'un dégagement important de chaleur. Cette réaction favorise la formation de grumeaux et de pores, perturbant la croissance cristalline et compromettant la

structure dense du réseau. Le réseau cristallin devient ainsi plus discontinu et poreux, ce qui affaiblit la cohésion et la résistance mécanique du matériau. Cette chaleur exothermique importante ralentit la dissolution des ions sulfate de calcium, ce qui limite la précipitation du plâtre pris ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et entrave la formation de son réseau cristallin.

Par ailleurs, la teneur en oxyde de magnésium (MgO), légèrement abondante dans la cendre de biomasse, contribue également à la diminution de la résistance mécanique. En effet, l'hydratation lente du périclase (MgO) entraîne la formation de vides internes, ce qui perturbe la cristallisation normale du plâtre pris et compromet la compacité du réseau cristallin, affectant ainsi négativement les propriétés mécaniques finales du matériau.

En outre, bien que le verre broyé riche en SiO_2 amorphe puisse avoir un effet pouzzolanique potentiel et que la cendre de biomasse contienne des composés réactifs tels que la chaux vive, leurs réactions lentes ne semblent pas suffisantes ici pour renforcer le matériau.

Ainsi, il est clairement établi que l'accroissement du taux d'additions a un impact négatif sur les propriétés mécaniques du plâtre pris. Ce constat impose une optimisation rigoureuse des dosages pour garantir un compromis acceptable entre performances mécaniques et éventuels bénéfices environnementaux ou économiques apportés par l'incorporation de ces matériaux alternatifs.

Conclusion :

L'ajout de verre broyé et de cendre de biomasse dans le plâtre entraîne une diminution notable de la résistance à la compression, principalement en raison de l'augmentation de la porosité et de la perturbation du réseau cristallin. Ce constat souligne l'importance d'optimiser les proportions et les caractéristiques de ces ajouts afin de concilier les exigences de performance mécanique avec les objectifs de valorisation des matériaux secondaires.

III.4.2. Résistance à la flexion

La Figure III.7 présente l'évolution de la résistance à la flexion de différentes formulations de plâtre en fonction du pourcentage d'additions de verre broyé (V) et de cendre de biomasse (C).

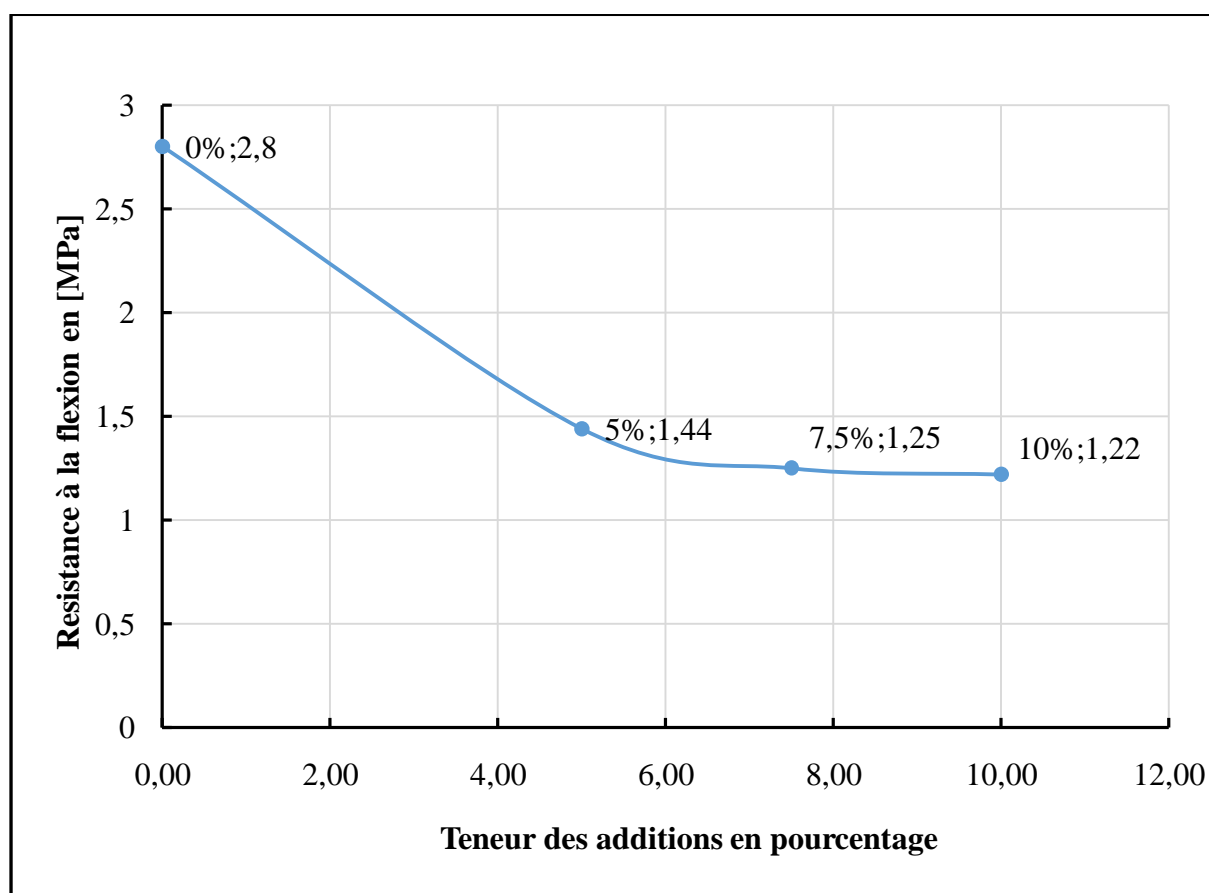


Figure III.7. Influence des teneurs en additions sur la résistance à la flexion du plâtre pris

Le plâtre de référence sans additions (P+0 %) affiche la résistance maximale à la flexion, d'environ 2,7 MPa. Dès l'ajout de 5 % de (V) et 5 % de (C), la résistance chute de manière importante, atteignant environ 1,5 MPa. Cette tendance de diminution se poursuit avec les augmentations de dosage (7,5 % puis 10 %), bien que l'ampleur du déclin soit plus modérée. La résistance à la flexion à 10 % d'addition est de 1,22 MPa, nettement inférieure à la limite de 2,2 MPa exigée par la norme EN 13279-2 :2014 [46] pour un plâtre conforme aux critères granulométriques.

La diminution de la résistance à la flexion peut être expliquée aussi par une modification de la cohésion interne de la matrice du plâtre pris. L'introduction des additions perturbe la formation d'un réseau cristallin dense et continu, ce qui fragilise le matériau face aux efforts de flexion.

Conclusion

L'ajout progressif de verre broyé et de cendre de biomasse dans le plâtre entraîne une diminution notable de la résistance à la flexion. Cette observation souligne l'importance de maîtriser le taux et la nature des additions afin de préserver les propriétés mécaniques du matériau, notamment dans des applications soumises à des efforts de flexion.

III .5. Absorption capillaire

L'essai d'absorption capillaire a été réalisé conformément à la norme EN 1015-18 (2003) [47], afin d'évaluer la capacité des matériaux à absorber l'eau par capillarité.

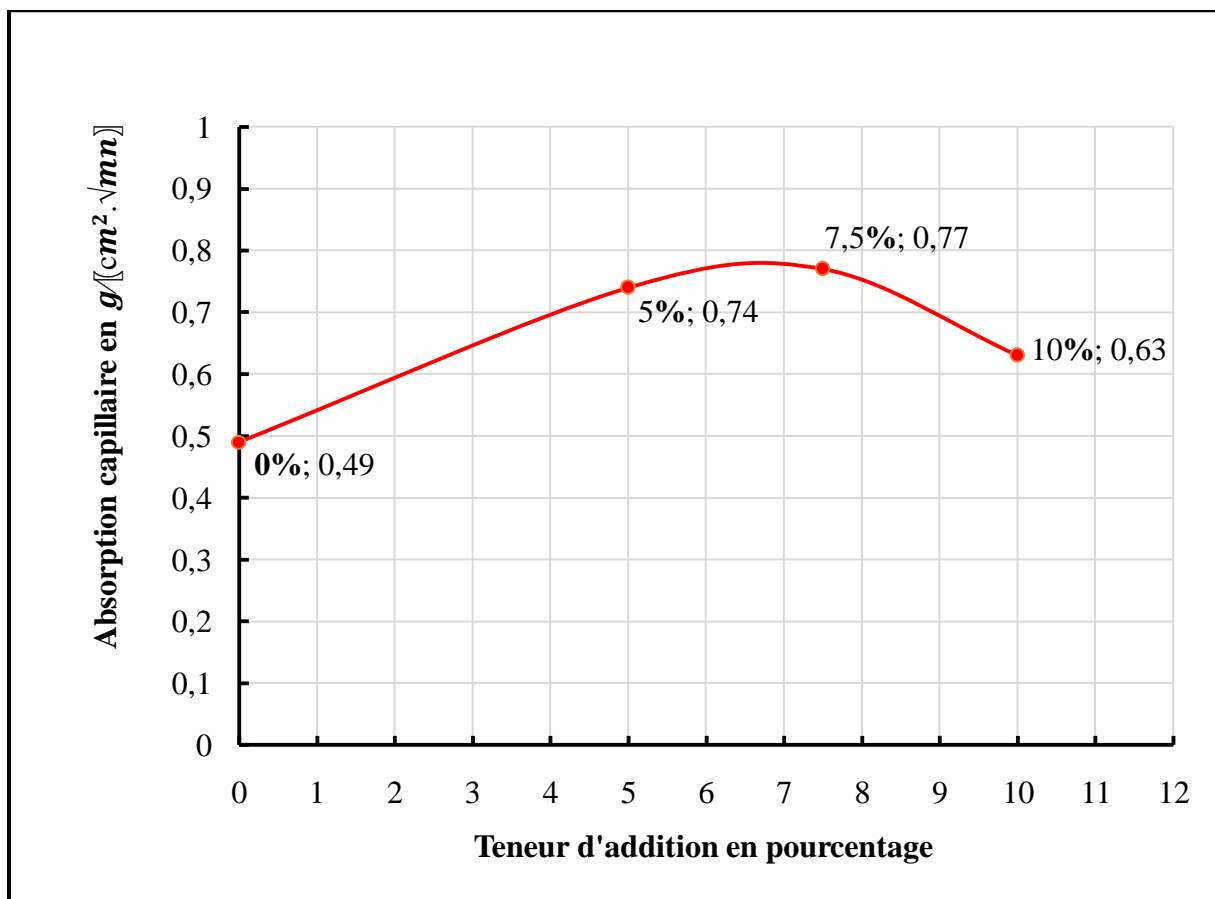


Figure III.8. Variation de l'absorption capillaire après 60 minutes pour les différentes teneurs en addition

La figure III.8 illustre l'évolution de l'absorption capillaire mesurée après 60 minutes d'immersion des éprouvettes dans l'eau, en fonction des différentes teneurs en ajouts. On observe une augmentation de l'absorption capillaire jusqu'à un taux d'addition de 7,5 %. Cette hausse résulte de la formation accrue de vides lors de l'hydratation du plâtre pris et la

formation de grumeaux, favorisée par l'introduction modérée d'additifs. En revanche, au-delà de 7,5 %, notamment à 10 % d'addition, une diminution significative l'absorption capillaire est constatée. Cette valeur se situe légèrement au-delà de la limite supérieure fixée par la norme EN 1015-18 (2003) [47], qui est comprise entre 0,1 et 0,6 g/cm²·min^{0.5} pour un plâtre conforme aux critères granulométriques. Cette baisse est attribuée à la teneur en périclase (MgO) contenue dans la cendre de biomasse, dont le caractère hydrophobe limite l'absorption capillaire de l'eau [48]. En effet, selon Kitamura et al. (1995) [49] et Dünzen (2017) [50], le processus d'hydratation du MgO dans une atmosphère saturée en vapeur d'eau est particulièrement lent, en raison de la formation d'une fine couche de brucite (Mg(OH)₂) polycristalline à la surface des grains. Cette couche agit comme une barrière, freinant la diffusion de l'eau vers le cœur des particules de MgO et ralentissant ainsi l'hydratation et l'absorption globale.

Conclusion

L'évolution l'absorption capillaire en fonction du taux d'additions met en évidence un comportement non linéaire : une augmentation initiale liée à l'augmentation de la porosité capillaire, suivie d'une baisse marquée au-delà de 7,5 %, principalement due aux propriétés hydrophobes du MgO et à sa cinétique d'hydratation lente. Cela souligne la nécessité d'un dosage optimal des ajouts pour préserver les performances capillaires du matériau.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce projet de fin d'étude était d'explorer la valorisation de la cendre de biomasse et du verre finement broyé comme additions dans le plâtre, afin de concevoir un matériau innovant, performant et respectueux de l'environnement. L'étude a porté une attention particulière à l'influence de ces ajouts sur les propriétés rhéologiques, mécaniques et capillaires d'un plâtre à base d'hémihydrate β ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$).

L'analyse révèle que l'incorporation de ces matériaux influence plusieurs caractéristiques du plâtre.

L'hémihydrate β utilisé présente une forte hydrophilie, facilitant le gâchage mais le rendant sensible à l'humidité ambiante, ce qui peut nuire à sa stabilité à long terme. L'introduction de verre finement broyé, matériau essentiellement inerte mais à surface anguleuse, influence significativement la texture et la compacité de la pâte. Sa finesse permet un meilleur enrobage dans la matrice, mais sa faible réactivité chimique et sa géométrie irrégulière contribuent à perturber la croissance cristalline et à générer des points de discontinuité, ce qui se traduit par une fragilité accrue du matériau après durcissement.

Concernant la consistance, l'ajout de cendres de biomasse, contenant de la chaux vive (CaO) et de la potasse caustique (KOH), réduit la fluidité du mélange. Ces composés hydrophiles réagissent avec l'eau, diminuant la quantité d'eau libre disponible. Le verre broyé contribue également à cette réduction de fluidité.

De plus, l'introduction de cendres de biomasse accélère la prise du plâtre. La chaux vive (CaO) et l'oxyde de potassium (K_2O) présents dans les cendres réagissent avec l'eau, dégageant de la chaleur et accélérant les réactions d'hydratation.

En termes de résistance mécanique, l'ajout de verre broyé et de cendre de biomasse entraîne une diminution de la résistance à la compression et à la flexion.

Conclusion générale

L'absorption capillaire est également affectée. Initialement, elle augmente avec l'ajout de ces matériaux, mais au-delà de 7,5% d'addition, elle diminue. Cette diminution est attribuée au périclase (MgO) présent dans la cendre de biomasse, dont le caractère hydrophobe limite l'absorption d'eau.

En définitive, bien que ces ajouts permettent une réduction de l'empreinte environnementale et une valorisation de déchets, ils entraînent aussi une diminution des résistances mécaniques due à l'augmentation de la porosité et à la perturbation de la croissance cristalline du gypse.

Ces résultats soulignent l'importance d'une optimisation des formulations, en tenant compte du caractère hydrophile ou hydrophobe des composants, pour garantir un équilibre entre durabilité, maniabilité et performances mécaniques.

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] molon.fr.(s.d).le moulage en plâtre-technique et histoire. Consulté le 11 mars 2025 sur <https://www.molon.fr/13-lha/rendu/cr-moulages2-1.pdf>
- [2] meille, s. étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure, thèse de doctorat, insa lyon, 2001.
- [3] plâtre.com. présentation générale du plâtre. [en ligne].consulté le 15 mars 2025.disponible sur : <https://www.plâtre.com>
- [4] musée des moulages de lyon. catalogue des techniques de moulage utilisées. lyon, musée des moulages, p.6, 2022
- [5] oust france bricoleur .le plâtre : définition, utilisation, avantages et inconvénient. [en ligne]. consulté le 17 mars 2025.
- [6]memoire de master thème caracterisation physico-mecanique et thermique d'un composite en platre a base des dechets des bouteilles en plastique recycle.
- [7] jaffel, h. caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution cas du plâtre ; thèse de doctorat, ecole polytechnique, france (2006).
- [8] rachedi, mokhtar. contribution à l'étude de la durabilité de mortier de plâtre à base de sable de dunes renforcé par des fibres de palmier de dattier .mémoire de magister, université kasdi merbah ouargla
- [9] "types de plâtre et leurs usages." knauf, france, <https://www.knauf.fr>.consulté le 06 avril 2025
- [10] n.b. singh and b. middendorf, "calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization," progress in crystal growth and characterization of materials, vol. 53, 2007
- [11] techniques de l'ingénieur, « plâtre- propriétés »,c910,2005.
- [12] djoudi amina., “caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcements par les fibres végétales du palmier dattier“, thèse de magister, universite de laghouat, 2001

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13] akaf,h.& chaouche, m.w. (2023). contribution à l'étude des matériaux composites biosourcés à base de plâtre. mémoire de master, université abou bakr belkaïd, tlemcen, faculté de technologie, département de génie civil.
- [14] techno-sciences.net. le plâtre : propriétés et utilisations.[en ligne].consulté le 17 mars 2025.disponible sur : www.techno-sience.net
- [15] ademe (agence de la transition écologique –france) valorisation des cendres de biomasse – état des lieux et perspectives (rapports techniques disponible sur le site l'ademe)
- [16]vassilev,s,v, baxter , d , andersen , l,k and vassileva , c.g (2013) .an overview of the composition and application of biomass ash . part 1 – phase – mineral and chemical composition and classification .fuel 105 , 40-76.
- [17]international energy agency (iae) . (2020) .technology roadmap: bioenergy for heat and power.
- [18][les biocarburants](http://les.biocarburants) sur biocarburant.com (consulté le 10 avril 2025)
- [19]obernberger , i ;and thek, g (2010) . the pellet handbook : the production and thermal utilization of biomass pellets
- [20]izquierdo,m , and querol , x (2020) leaching behavior of elements from biomass combustion fly ashes . fuel , 94, 140-152.
- [21]d. leitaó, j. barbosa, e. soares, t. miranda, n. cristelo, a. briga-sa, ´ thermal performance assessment of masonry made of iceb'sstabilisedwith alkali-activatedflyash, energ. buildings 139 (2017)44–52.
- [22]safi , b , saidi,m ans aboutaleb , d (2016) ; use of biomass ach in sustainable construction materials : a review . renewable and sustainable energy reviews , 60
- [23]d. eliche-quesada, m.a. felipe-ses´e, m.j. fuentes-sanchez, ´ biomassbottomashwaste and by - products of the acetyleneindustry as rawmaterials for unfired bricks, j. build. eng. 38 (2021)102191.
- [24]m.a. felipe-ses´e, l. p´erez-villarejo, e. castro, d. eliche-quesada, wood bottomash and geosilex: a by - product of the acetyleneindustry as alternative rawmaterials in calcium silicate units, materials. 13 (2020)489.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[25]b. carrasco, n. cruz, j. terrados, f.a. corpas, l. p´erez, an evaluation of bottomash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks, *fuel* 118 (2014) 272–280.

[26]b. rajwade, n. netam, investigation of effects of corn cob ash in flyash bricks, *mater. today: proc.* 28 (2020) 2431–2434.

[27]s.h. masuka, w. gwenzi, t. rukuni, development, engineering properties and potential applications of unfired earth bricks reinforced by coal flyash, lime and wood aggregates, *j. build. eng.* 18 (2018) 312–320.

[28]t. ¸i¸ek, y. ¸in¸in, use of flyash in production of light-weight building bricks, *constr. build. mater.* 94 (2015) 521–527.

[29]s. siddiqua, p.n.m. barreto, chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and flyash, *constr. build. mater.* 169 (2018) 364–371.

[30]r.a. silva, e. soares, d.v. oliveira, t. miranda, n.m. cristelo, d. leita, ~ mechanical characterisation of dry-stack masonry made of cebs stabilised with alkaline activation, *constr. build. mater.* 75 (2015) 349–358.

[31]j. rivera, j. coelho, r. silva, t. miranda, f. castro, n. cristelo, compressed earth blocks stabilized with glass waste and flyash activated with a recycled alkaline cleaning solution, *j. clean. prod.* 284 (2021) 124783.

[32]d. leita, j. barbosa, e. soares, t. miranda, n. cristelo, a. brigas, ´ thermal performance assessment of masonry made of iceb’s stabilised with alkali-activated flyash, *energ. buildings* 139 (2017) 44–52.

[33]valorisation des cendres issues de la combustion de biomasse revue des gisements et des procedes associes, d ;boulday – f. ,février 2016

[34]rené vacher laboratoire des verres, u.m.r. cnrs 5587 université de montpellier 2,

[35] site internet [.https://www.patrimoinecognac87.ovh](https://www.patrimoinecognac87.ovh) (consulté le 12 /04 /2025)

[36]callister , w.d. and rethwisch , d ;g (2018) .materials science and engineering :an introduction .wiley.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [37]verrierie techniques –procédés industriels, techniques de l'ingénieur (fiches p2 560).
- [38]durand , g .(2001) . le verre : structure et propriétés . masson .
- [39]encyclopedia universalis , article « verre (industrie) »
- [40]site internet de wikipédia.
- [41]pilkington group limited “ glass in building “ <https://www.pilkington.com> (consulté le 13/04/2025)
- [42]feve- fédération européenne du verre d'emballage , <https://feve.org> (consulté le 13 /04/2025)
- [43]saint –gobain sekurit –automotive glass <https://www.saint-gobain-sekurit.com> (consulté le 13/04 /2025)
- [44]corning incorporated – speciality glass and optics <https://www.corning.com>
- [45]callister,w ; d; and rethwish ,d.g. (2018). materials science ans engineering : an introduction .wiley.
- [46]liants à base de plâtre – partie2 : méthodes d'essai. association française de normalisation en 13279-2 :2014
- [47]méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie- partie 18 : détermination de la capacité d'absorption d'eau par succion (essai à la pipette).association française de normalisation en 1015-18 :2003
- [48]boussaa nadia, kheloui fatma, chelouah nasser : mechanical, thermal and durability investigation of compressed earth bricks stabilized with wood biomass ash. construction and building materials 364 (2023) 129874.
- [49]a. kitamura, k. onizuka, k. tanaka. hydration characteristics of magnesia taikabutsu overseas 16 (1995), no. 3, 3-11.
- [50]c. dünzen. (2017). die hydratation von magnesiumoxid - α -aluminiumoxid -mischungen und deren verwendung als hydraulisches bindemittel. thèse de doctorat. université de technologie clausthal, allemagne.