

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

Thème :

**Étude mécanique et thermique du plâtre de
construction substitué partiellement par la cendre
de biomasse de bois**

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil
« Option Structures »

Préparé par :

- ZERRAG Belkacem
- KEBBI Ouardia Lydia

Encadré par : Pr. CHELOUAH Nasser

Année Universitaire : 2022 - 2023

Remerciement

Au terme de ce travail je tiens à remercier Dieu le tout puissant qui m'a

Donné la force d'atteindre mes objectifs.

C'est avec joie que j'exprime ma profonde gratitude et mes profonds respects aux personnes qui ont participé à la réalisation de ce projet

Je remercie sincèrement ceux qui ont, de près ou de loin contribué à la réalisation de ce mémoire, fruit de mon premier pas dans l'univers de la recherche.

Ces remerciements vont tout particulièrement à :

Mon l'encadreur « professeur CHELOUAH NASSER »

et les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Ma famille et mes frères

**Je remercie également tous mes collègues de
L'université et toute ma promotion.**

ZERRAG Belkacem



Dédicace

Je dédie ce mémoire spécialement à mes chers parents

à ma sœur et à mes frères

Qui m'ont toujours encouragé et motivé dans mes études.

**Ce mémoire représente donc l'aboutissement de soutien
et des encouragements qui m'ont été prodigués tout au long de mon cursus
universitaire.**

**Je dédie également ce travail à tous mes enseignants du département de
génie civil et à mes amis**

Zerrag Belkacem



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma mère qui m'autant encouragé durant ces années d'étude

A mon père celui qui a fait de moi une femme

Mon marie chéri

A mon fils mon petit bonhomme Rayan

A toute ma famille et proches

KEBBJ Ouardia Lydia



Résumé

On constate un intérêt croissant pour le plâtre comme éco-matériau de construction pour son caractère local et la faible consommation d'énergie qui caractérise son cycle de vie global. Ce travail évalue l'effet de la récupération de deux cendres de biomasse de bois (CA, CB), issues du chauffage domestique sur les propriétés mécaniques et thermiques des mélanges de plâtre (PCA, PCB). Ces éprouvettes ont été obtenues en substitution partielle d'un plâtre fin, dans des proportions variables (0, 5, 10, 15 et 20% en poids). Les éprouvettes fabriquées ont été exposées à l'air libre et conservées au laboratoire à une température de 20 ± 2 °C et une humidité relative de 65%, puis mises dans l'étuve à partir du 7^{ème} et 28^{ème} jour jusqu' à l'obtention de masses constantes. Le niveau de résistance mécanique diminue avec la teneur en cendres de bois et augmente avec le temps de durcissement. Le PCB présente les meilleurs niveaux de résistance à la flexion et à la compression causés par la formation de nouveaux hydrates, mais le PCA présente une bonne isolation thermique. L'étude expérimentale menée a mis en évidence les bénéfices de la forte teneur en périclase (MgO) sur les l'isolation thermique. Par contre cette en MgO influe négativement sur la résistance mécanique.

Mots clés : biomasse, la cendre de bois, plâtre, résistance mécanique, isolation thermique

Abstract

There is a growing interest in plaster as an eco-building material due to its local character and the low energy consumption that characterizes its overall life cycle. This work assesses the effect of the recovery of two biomass ash (CA, CB), from domestic wood heating on the mechanical and thermal properties of plaster mixtures (PCA, PCB). These specimens were obtained in partial substitution of fine plaster in varying proportions (0, 5, 10, 15 and 20% by weight). The test pieces manufactured were exposed to the open air and kept in the laboratory at a temperature of 20 ± 2 C and a relative humidity of 65%, then put in the oven from the 7th and 28th days until constant masses were obtained. The level of mechanical strength decreases with wood ash content and increases with curing time. PCB has the best levels of flexion and compression resistance caused by the formation of new hydrates, but PCB has good thermal insulation. The experimental study demonstrated the benefits of high periclase content (MgO) on mechanical properties and thermal insulation.

ملخص:

هناك اهتمام متزايد بالجص كمواد بناء بيئي بسبب طابعه المحلي وانخفاض استهلاك الطاقة الذي يميز دورة حياته الإجمالية. وقيّم هذا العمل تأثير استعادة رمادين من رماد الكتلة الحيوية (CA, CB) من تسخين الخشب المنزلي على الخصائص الميكانيكية والحرارية لخلائط الجص (PCA, PCB). تم الحصول على هذه العينات في استبدال جزئي للجص الناعم بنسب متفاوتة (0 و 5 و 10 و 15 و 20% من الوزن). تم تعريض قطع الاختبار المصنعة للهواء الطلق وتم الاحتفاظ بها في المختبر عند درجة حرارة 20 ± 2 درجة مئوية ورطوبة نسبية من 65%، ثم تم وضعها في الفرن من اليومين السابع والثامن والعشرين حتى يتم الحصول على كتل ثابتة. ينخفض مستوى القوة الميكانيكية مع محتوى الرماد الخشبي ويزداد مع وقت العلاج. يحتوي ثنائي الفينيل متعدد الكلور على أفضل مستويات مقاومة الشني والضغط الناتجة عن تكوين هيدرات جديدة، لكن ثنائي الفينيل متعدد الكلور يتمتع بعزل حراري جيد. أظهرت الدراسة التجريبية فوائد محتوى البريكلاز العالي (MgO) على والعزل الحراري، من ناحية أخرى، يؤثر MgO هذا سلبًا على المقاومة الميكانيكية.

SOMMAIRE

Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Abstract	IV
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations	VI
INTRODUCTION GÉNÉRAL	1
CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉS SUR LE PLÂTRE ET LES CENDRES DE BIOMASSE	3
I.1. Le plâtre	3
Introduction	3
I.1.1. Histoire du plâtre	3
I.1.2. Définition de plâtre :	5
I.1.3. Matière première du plâtre	5
I.1.4. Fabrication du plâtre	8
I.1.5. Les différents types de plâtres	10
I.1.6. Propriétés physique du plâtre	10
I.1.6.1. Prise du plâtre	10
I.1.6.1.1. Les modificateurs de prise : accélérateurs et retardateurs de prise	11
I.1.6.2. Microstructure du plâtre	12
I.1.7. Mise en œuvre du plâtre	12
I.1.7.1. La pâte pure du plâtre	12
I.1.7.2. Le mortier du plâtre	12
I.1.8. Propriétés mécaniques du plâtre	12
I.1.9. L'utilisation du plâtre	13
1.10. Fabrication du plâtre	14
1.10.1. Extraction du gypse	14
1.10.2. Concassage	15
1.10.3. La cuisson	16
1.10.4. Le broyage	18
I.2. Les cendres de biomasse	19

I.2.1. Définition de la biomasse	19
I.2.2. Histoire de la biomasse	19
I.2.3. Les différentes biomasses	20
I.2.3.1. Les biocarburants	20
I.2.3.2. La combustion de bois et de déchets.	20
I.2.4. Domaine d'application :	21
I.2.5. Caractéristiques des cendres	23
I. 2.5.1. Facteurs influençant la qualité des cendres de biomasse	23
I.2.5.2. Caractéristiques générales des cendres	23
CHAPITRE II: CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX, MATÉRIELS UTILISÉS ET ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	25
Introduction	25
II.1. Matériaux utilisés	25
II.1.1. Le plâtre	25
II.1.1.1. Analyse minéralogiques par diffraction aux rayons X	25
II.1.1.2. L'analyse chimique	26
II.1.1.3. Les propriétés physiques	26
II.1.2. Les cendres de biomasse	27
II.1.2.1. L'analyse chimique	27
II.1.2.2. Les propriétés physiques	28
II.1.2.3. Masse volumique apparente	28
II.1.2.3. Propriétés chimique	29
II.1.3. Le plastifiant	29
II.1.3. 1.Mode d'emploi	29
II.1.3. 2.Caractéristiques du plastifiant	30
II.2. Les essais expérimentaux	30
II.2.1. La maniabilité	31
II.2.2. Hydratation et début de prise	32
II.2.3. Masse volumique apparente	32
II.2.4. Résistance mécanique	32
II.2.5. Conductivité thermique	33
CHAPITRE III: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS	34
III.1. Consistance	35
III.2. Le début de prise	39

III.3. Masse volumique apparente	40
III.4. Résistance à la compression	41
III.5. Résistance à la flexion	44
III.6. Conductivité thermique	46
CONCLUSION GÉNÉRALE	48
BIBLIOGRAPHIE	49

Liste des figures

Figure I. 1. Rose de sable	6
Figure I. 2. Le gypse albâtre	6
Figure I. 3. Le sélénite	6
Figure I. 4. Photos prises au MEB des deux formes de semihydrate.	9
Figure I. 5. L'extraction du gypse en souterrain	14
Figure I. 6. Extraction de gypse à ciel ouvert	15
Figure I. 7. Concasseur et la ligne de production de Gypse & du plâtre	16
Figure I. 8. Four de cuisson du gypse	17
Figure I. 9. Cycle de vie de la biomasse.	21
Figure II. 1 . Analyse minéralogique par DRX du plâtre	26
Figure II. 2. Analyse granulométrique au laser des deux cendres CA et CB	28
Figure II. 3. Analyse minéralogique par DRX des deux cendres CA et CB	29
Figure II. 4. Moule en forme de cône en caoutchouc de 40 mm de hauteur et 75 mm de diamètre intérieur et la table d'étalement	31
Figure II. 5. Presse hydraulique Control de type PILOT PRO modèle 65-L27P12	33
Figure II. 6. Le CT-mètre	33
Figure III. 1. Consistance des liants de plâtre en fonction de la teneur des cendres CA et CB	35
Figure III. 2. Diamètres de l'étalement des différents liants de plâtre	36-37-38
Figure III. 3. « temps-couteau » par la méthode de couteau	39
Figure III. 4. Temps de début de prise en fonction des teneurs en cendre CA et CB	40
Figure III. 5. Masse volumique sèche en fonction de la teneur en cendre	41
Figure III. 6. Résistance à la compression des PCA et PCB à 7 jours en fonction de la teneur en cendre CA et CB	42
Figure III. 7. Résistance à la compression des PCA à 7 et 28 jours en fonction de la teneur en cendre CA	43
Figure III. 8. Résistance à la compression des PCB à 7 et 28 jours en fonction de la teneur en cendre CB	43
Figure III. 9. Résistance à la flexion des PCA-7J et PCB-7J	44
Figure III. 10. Résistance à la flexion des PCA-7J et PCA-28J	45
Figure III. 11. Résistance à la flexion des PCB-7J et PCB-28J	45
Figure III. 12. Résistance à la flexion des PCB-28J et PCA-28J	46
Figure III. 13. La conductivité thermique des PCA et PCB à 7 jours en fonction de la teneur en cendre CA et CB	47

Liste des tableaux

Tableau I.1. Exemple de composition de plâtre destiné à la réalisation d'enduits	9
Tableau II.1. Analyse chimique du plâtre	26
Tableau II.2. Le refus au tamis de 200 μm , 800 μm et la masse volumique apparente du plâtre	26
Tableau II.3. Analyse chimique des deux cendres CA et CB en pourcentage	27
Tableau II.4. Masse volumique apparente des cendres CA et CB	28
Tableau II.5. Caractéristiques du plastifiant	30
Tableau II.6. Dosage en plastifiant pour les liants	31

Liste des abréviations

E/P : eau / plâtre

PCA : liant plâtre et cendre A

PCB : liant plâtre et cendre B

α , β : L'hémi-hydrate

ETM : éléments traces métalliques

DRX : diffraction aux rayons X

CA : Cendre A

CB : Cendre B

λ : Coefficient de conductivité thermique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Connu depuis l'Antiquité, le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction. Le plâtre est un matériau de grande disponibilité et très connu pour ses qualités : il est favorable à la protection de l'environnement, assez malléable, de faible densité, aux propriétés fonctionnelles remarquables (coupe-feu, isolant thermique, régulateur de l'hygrométrie des enceintes), décoratif, ... Ce qui justifie l'intérêt accordé à ce matériau pour les constructions. Sa grande fragilité préoccupante, la forte demande en ressources naturelles et l'augmentation de l'activité industrielle sont à l'origine des travaux de recherches dans le monde entier en vue de son renforcement. Pour améliorer les performances du plâtre certains chercheurs se sont penchés vers l'incorporation des déchets agricoles issus du recyclage. Le recyclage des déchets est actuellement un domaine de recherche important et innovant. L'utilisation de déchets recyclés pour améliorer les performances du plâtre pourrait être une solution à ces problèmes [1].

Le recyclage des déchets en tant que matériau de construction durable apparaît non seulement comme une solution viable aux problèmes de pollution, mais également comme une option économique dans la conception de bâtiments écologiques. Les cendres de biomasse font référence aux résidus minéraux issus de la combustion de matériaux organiques tels que les résidus de bois, les déchets de papier, les coques de noix de coco et autres déchets agricoles. Ces cendres sont riches en nutriments tels que le potassium, le phosphore et le calcium, ce qui les rend précieuses pour une utilisation dans l'agriculture. En outre, les cendres de biomasse peuvent également être utilisées comme matière première pour la production de ciments, de matériaux de construction et d'autres produits industriels. En raison de leur potentiel économique et écologique, les cendres de biomasse ont attiré l'attention des chercheurs et des industriels ces dernières années, ce qui a conduit à des recherches approfondies sur leur utilisation et leur valorisation [1].

Ainsi donc, ce projet de fin d'étude vise à analyser les mélanges de plâtre avec l'incorporation des cendres de biomasse pour aller vers un secteur du bâtiment plus durable. Deux types différents de cendre de biomasse de bois vont substituer une partie du plâtre pour évaluer ses propriétés mécaniques, physiques et sa conductivité thermique.

Le manuscrit s'articule autour de trois chapitres : Le premier chapitre se subdivise en deux parties, la première concerne des généralités sur le plâtre et la deuxième partie s'intéresse aux cendres de biomasse. Le deuxième chapitre décrit le protocole de travail ainsi que les différentes méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation des matériaux. Le dernier et troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus et à leurs interprétations. Le manuscrit est clôturé par une conclusion générale.

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

I.1. Le plâtre

Introduction

Le plâtre est un des plus anciens matériaux de construction fabriqués par l'homme. La faible température nécessaire à la production de poudre de plâtre et l'abondance du gypse naturel dans la nature expliquent cette ancienneté d'utilisation.

S'il est encore employé sous sa forme traditionnelle de poudre gâchée avec de l'eau pour réaliser des enduits, c'est sous la forme d'éléments préfabriqués en usine (carreaux, dalles, plaques) que son utilisation se développe aujourd'hui pour répondre aux besoins de la construction. C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieure, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et sonore. La conductivité thermique d'un enduit de plâtre est de l'ordre de $0,26 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ contre 1,15 pour un enduit de ciment [1]. Le plâtre présente aussi une résistance au feu très performante. À l'époque de Louis XIV, le plâtre est imposé comme revêtement intérieur et extérieur pour limiter les risques de propagation d'incendies catastrophiques, comme celui de Londres en 1666 [1].

Ces propriétés s'expliquent par la très grande porosité du matériau (l'air est un excellent isolant) et par présence d'eau de structure (environ 20 %). Le plâtre dégage de l'eau en présence de chaleur, stabilisant ainsi la température murale à des valeurs inférieures à 200 °C. Une couche de plâtre de 1 m² de surface et de 10 mm d'épaisseur représente une réserve d'eau de 1,4 litre, qui va se dégager et limiter la progression de feu, sans aucun dégagement de gaz toxique ou de fumées [1].

I.1.1. Histoire du plâtre

La légende veut qu'un jeune berger, gardant son troupeau voulut se réchauffer auprès du feu. Il ramassa du bois et des pierres (gypse) et les dressa autour de son âtre. À la chaleur de la flamme, les pierres du foyer se transformèrent en une poudre blanche. La pluie survint et la poudre se transforma à son tour en une pâte. Puis lorsque le soleil reparut, la pâte séchât, et à la grande surprise du jeune plâtre, la pâte devint aussi dure que la pierre initiale. Le gypse avait livré son secret : le plâtre était né.

Le plâtre est considéré comme l'un des plus anciens matériaux de construction avec la chaux et la terre cuite. Connu depuis fort longtemps que son obtention exige une certaine transformation ; en effet, il s'obtient facilement en chauffant à une température qui n'est pas très élevée, puis en réduisant en poudre, le gypse (ou la pierre à plâtre) qui est un minérale relativement répandu dans la nature.

Chapitre I : Généralités sur le plâtre et les cendres de biomasse

En Egypte, il est bien connu que la grande pyramide, élevée par Chéops, roi d'Egypte vers 2800 an avant notre ère, porte l'un des plus anciens témoignages de l'emploi du plâtre en construction;

L'homme se servait du plâtre pour assembler les pierres des édifices et pour réaliser des enduits.

En Afrique et plus précisément en Algérie, c'est avec un plâtre très résistant que les berbères ont construit les barrages et les canaux grâce auxquels ils assurent depuis des siècles l'irrigation des palmeraies du Mزاب, comme c'est au plâtre qu'ils assemblent les blocs de terre damée avec lesquels il montent leurs habitations.

En France, Paris devient la ville du plâtre grâce à ses gisements souterrains et à l'Edit de Louis XIV de 1667 obligeant le plâtrage des maisons en intérieur comme en façade pour éviter à Paris le sort funeste de Londres lors du grand incendie de 1666.

Lavoisier, dès 1768 présente la première étude scientifique des phénomènes qui sont à la base de la préparation du plâtre. Puis au siècle suivant, les travaux de plusieurs auteurs et particulièrement ceux de Vant'Hoff et surtout de Le Chatelier permettent d'aborder une explication scientifique de la déshydratation du gypse.

Cependant dans le domaine de la fabrication et des moyens qu'elle utilise, c'est le 20^{ème} siècle qui, à la faveur de l'évolution industrielle, a apporté les transformations les plus profondes, celles qui ont conduit aux équipements actuels. Bien entendu, parallèlement, les applications et les techniques d'utilisation du plâtre ont évolué à un rythme analogue.

En Algérie la production de plâtre remonte à l'antiquité, et a été fortement développée pendant la période coloniale française pour répondre aux besoins de construction. À cette époque, les principales sources de gypse étaient situées dans la région de Mascara, dans l'ouest du pays. Plusieurs usines de production de plâtre ont été construites dans cette région pour traiter le gypse extrait des carrières locales.

Aujourd'hui et d'après des études géologiques, l'Algérie dispose d'abondantes ressources en gypse naturel dont la teneur dépasse les 75% requis pour la construction, le sud du pays notamment en possède d'importants gisements. D'autre part, le plâtre vue sa bonne propriété d'isolation thermique, peut être considéré comme un matériau très adéquat à la construction dans ces régions chaudes du pays qui présentent une faible hygrométrie de l'air, une

pluviométrie courte et irrégulière. Il est donc plus qu'intéressant d'envisager l'introduction du plâtre et mortier de plâtre comme substitue au béton abusivement utilisé au sud [2].

I.1.2. Définition de plâtre :

Le plâtre est un matériau couramment utilisé dans la construction pour les revêtements muraux, la production de panneaux préfabriqués, et l'exécution de plaques pour faux plafond. C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique, acoustique et sa très grande résistance au feu (incombustible, mauvais conducteur de chaleur, ne libère aucun produit toxique en cas d'incendie) [3].

I.1.3. Matière première du plâtre

La matière première désigne le matériau d'origine naturelle qui est l'objet d'une transformation artisanale ou industrielle. En effet le plâtre est obtenu à partir du gypse. Il en existe deux types : le gypse naturel et le gypse de synthèse.

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

De la famille des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau, il se trouve dans la nature en quantité importante et se présente sous forme de deux structures :

- un hydraté de sulfate de calcium de formule chimique ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), c'est le gypse,
- un anhydre de formule CaSO_4 qui est l'anhydrite.

Le gypse se forme à partir de l'évaporation d'eau de mer, de l'eau douce ou de sources thermales, et est souvent associé à des dépôts de sel. Le gypse est largement utilisé dans l'industrie de la construction pour la fabrication de plâtre, de ciment et de produits de gypse moulé tels que des panneaux de plafond et de cloison sèche. Il est également utilisé dans l'agriculture pour amender les sols alcalins et dans l'industrie alimentaire pour la production d'autres produits alimentaires.

À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuilletée dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium. Les principales variétés que l'on rencontre dans la nature sont :

- Sous forme macro-cristallisée : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse lenticulaire, la rose des sables (figure I.1).
- Sous forme micro-cristallisée : l'albâtre, le gypse fibreux, le gypse albâtre (figure I.2), le gypse éolien, ou bien de sélénite (figure I.3).



Figure I. 1. Rose de sable



Figure I. 2. Le gypse albâtre



Figure I. 3. Le sélénite

Chapitre I : Généralités sur le plâtre et les cendres de biomasse

Le gypse exploité dans l'industrie plâtrière est une roche micro-cristallisée à grains généralement fins (gypse saccharoïde). Il est rarement pur et se trouve mélangé à des impuretés en nombre et proportion variables d'une carrière à l'autre : argile, silice, dolomie, anhydrite, etc.

La pierre est généralement extraite de mines ou de carrières souterraines puis cuite, cassée, broyée et ensuite moulue pour donner la poudre blanche, que l'on appelle, plâtre. Ce sont des gisements de gypse qui sont le plus souvent exploités.

Les gisements de gypse sont nombreux dans le monde, particulièrement en France, aux Etats-Unis et en Algérie, mais absents des régions volcaniques comme le Japon.

Les ressources en gypse dans le monde ont été évaluées à plus de 2,6 milliards de tonnes [4], ce qui a permis d'assurer une production continue de plâtre pour la construction et d'autres industries.

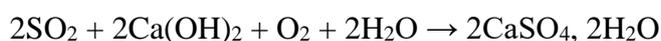
Le gypse de synthèse (Les gypses sous-produits de traitements chimiques)

La fabrication de divers produits industriels, tels que les engrais, donne comme sous-produit du gypse. Ce gypse qui concentre toutes les impuretés du produit de base, pose des problèmes de stockage et d'écologie. Dans certains pays dépourvus de gypse naturel, tels que le Japon et la Belgique, l'utilisation de ce type de gypse comme matière première, après purification, a été réalisée avec succès et reste la seule source de gypse. Parmi ces gypses de synthèse, on peut citer :

Dans la production de l'acide phosphorique H_3PO_4 (Engrais). Le déchet de l'industrie chimique contenant du sulfate de calcium (le phosphogypse). L'industrie des engrais phosphatés produit du gypse (1,7 t/t de phosphate) lors de la fabrication de l'acide phosphorique à partir de phosphate naturel.



Le désulfogypse : pour des raisons écologiques, la désulfuration des gaz de combustion de charbon et de fuel est de plus en plus rendue obligatoire dans la plupart des pays qui utilisent des centrales thermiques pour la production électrique. La technique la plus répandue, consiste à faire absorber le dioxyde de soufre présent dans les gaz de combustion, par une suspension aqueuse d'hydroxyde de calcium, d'après la réaction :



D'autres industries produisent également du gypse, notamment pour la fabrication de l'acide borique (borogypse), de l'acide citrique (citrogypse) et du dioxyde de titane (titanogypse).

I.1.4. Fabrication du plâtre

Quelle que soit l'origine du gypse, synthétique ou naturelle, une déshydratation partielle est nécessaire pour obtenir l'hémihydrate de formule chimique $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ et nommé aussi calcium sulfate semi hydraté qui est une poudre blanche connue sous le nom commercial de plâtre. Cette déshydratation se fait sous chauffage à une température entre 150 et 170 °C, selon la réaction chimique suivante :



Un chauffage à des températures plus élevées (au-delà de 300°C) donne de l'anhydrite (CaSO_4) complètement déshydraté :



Deux types de procédés sont généralement utilisés pour la fabrication de la poudre blanche de plâtre (hémihydrate):

Le procédé par voie sèche qui est le plus couramment utilisé dans la construction. Il est réalisé à la pression atmosphérique.

Il donne, vers 150-170°C de l'hémihydrate β , et vers 400-600°C, de l'anhydrite (CaSO_4).

Le procédé par voie humide qui quant à lui se déroule sous pression de vapeur saturante de l'eau, dans des autoclaves, sous 2 à 7 bars. Il donne de l'hémihydrate α utilisé pour les plâtres spéciaux et pour les moulages dentaires.

Du point de vue structurelle, l'hémihydrate α est bien cristallisé et demande peu d'eau pour le gâchage (rapport massique eau sur plâtre (E/P) \approx 0,3), tandis que l'hémihydrate β présente une structure très poreuse avec un gâchage adéquat qui ne peut être réalisé qu'à des rapport E/P > 0,6. Ainsi ces deux hémihydrates de structure différentes donnent des plâtres pris avec des microstructures complètement différentes :

Plus dense pour l'hémihydrate α et plus poreuse pour l'hémihydrate β .

Le plâtre obtenu à partir de l'hémihydrate α a ainsi une résistance mécanique nettement supérieure à celui obtenu à partir de l'hémihydrate β . Aussi les coûts de production sont beaucoup plus importants pour la fabrication de l'hémihydrate α [5].

Chapitre I : Généralités sur le plâtre et les cendres de biomasse

Le plâtre utilisé en construction est principalement constitué d'hémihydrate β ($\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$), de 60 à 80 % et d'anhydrite (CaSO_4).

Il est obtenu par le procédé par voie sèche. Les propriétés du plâtre (donc ses utilisations) dépendent, en grande partie, de sa composition en hémihydrate et en anhydrite. L'anhydrite est un régulateur de prise ; plus le % d'anhydrite est élevé et plus le temps de durcissement est lent.

Tableau I.1. Exemple de composition de plâtre destiné à la réalisation d'enduits [6] :

$\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$ (plâtre)	CaSO_4 (anhydrite)	CaCO_3 (calcaire)	MgCO_3 (dolomite)	Argile et silice
72 %	18 %	7 %	1 %	2%

Le plâtre utilisé pour élaborer des produits préfabriqués (carreaux, plaques...) est généralement composé de hémihydrate β pur (100%).

Les phases semihydratées α et β

Le semihydrate α se présente sous forme de cristaux bien formés. Si le chauffage a lieu à l'air sec sans eau, on parle dans ce cas de préparation par voie sèche, on obtient la forme β du semihydrate. Le départ d'eau du gypse est violent et le semihydrate β cristallise mal.

La Figure I.4. Permet de comparer les deux formes de semihydrate ainsi obtenues

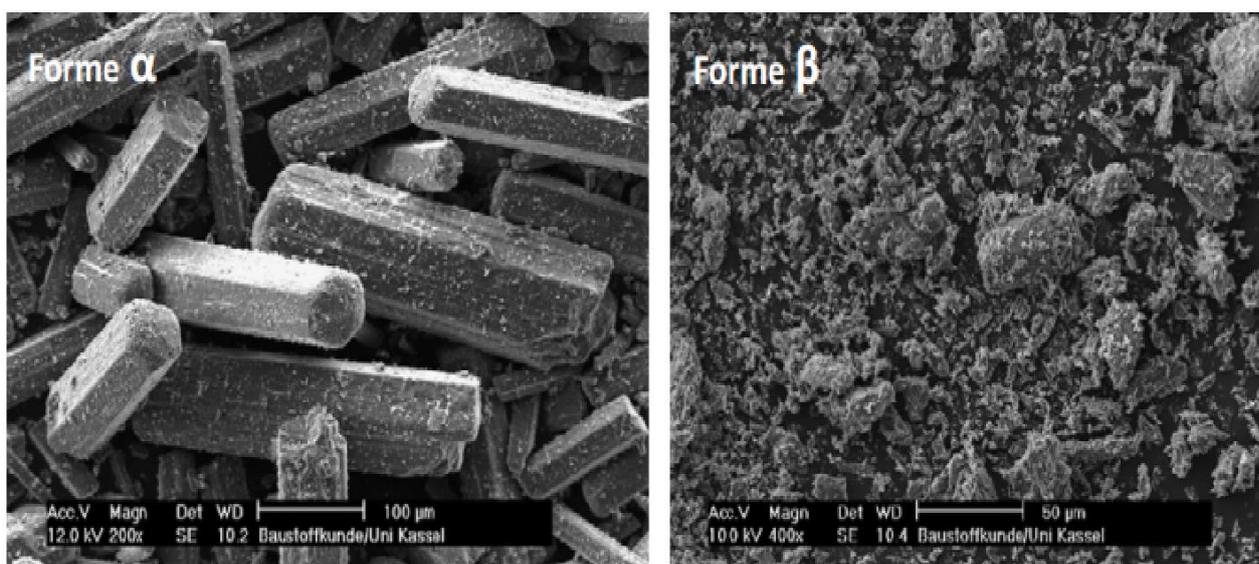


Figure I. 4. Photos prises au MEB des deux formes de semihydrate [6].

I.1.5. Les différents types de plâtres

Les principaux types de plâtres commercialisés ainsi que leurs utilisations les plus courantes bien que non exhaustives sont en fonction des différentes variétés suivantes.

➤ Plâtre gros

Le refus au tamis de 800 μm varie entre 5 et 20%,

Eau de gâchage : 75 à 100%

Temps de prise : 8 à 25 minutes,

Consommation : 8 kg/m^2

➤ Plâtre Fin :

Le refus au tamis de 800 μm < 1%, et le refus à 200 μm = 25%,

Eau de gâchage : 40 à 100%

Temps de prise : 30 à 60 minutes,

Consommation : 8 à 12 kg/m^2

I.1.6. Propriétés physique du plâtre

I.1.6.1. Prise du plâtre

Lors du gâchage du plâtre, on peut observer une dissolution de la poudre dans l'eau obtenant un liquide blanc homogène renvoyant une quantité d'eau à la surface pleine de bulles d'air; par la suite, ce mélange commence à durcir et un dégagement de chaleur s'enclenche c'est le début de prise (début de cristallisation). Après un bout de temps, le mélange achève son durcissement : c'est la fin de la prise. Une fois séché, il devient solide mais fragile.

La prise du plâtre est basée sur la théorie de la dissolution-cristallisation décrite par Le Chatelier [7]. Cette théorie fut formulée en 1887 par Le Chatelier, comme suit :

La réaction d'hydratation du plâtre se déroule en deux étapes.

La réaction : $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (solide) + $3/2\text{H}_2\text{O}$ (aqueux) \rightarrow $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (solide) se décomposerait en deux mécanismes réactionnels successifs, qui deviennent très rapidement simultanés :

- 1^{ère} étape :

la dissolution : $\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O} (\text{solide}) \rightarrow \text{Ca}^{2+} (\text{aqueux}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{aqueux}) + 1/2\text{H}_2\text{O} (\text{aqueux})$

- La 2^{ème} étape :

la cristallisation : $\text{Ca}^{2+} (\text{aqueux}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{aqueux}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{aqueux}) \rightarrow \text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O} (\text{solide})$

C'est une réaction chimique de très courte durée en comparaison avec celles des matériaux cimentaires. En une trentaine de minutes, près de 95% de l'hémihydrate s'est déjà transformé en dihydrate (gypse) nommé aussi calcium sulfate dihydraté et la réaction chimique touche à sa fin. C'est la phase de durcissement.

La durée de la prise dépend de la nature du plâtre, de la température ambiante, de la quantité d'eau de gâchage, des adjuvants, etc.

I.1.6.1.1. Les modificateurs de prise : accélérateurs et retardateurs de prise

L'hydratation du plâtre passe par la mise en solution de semihydrate suivie d'une cristallisation du dihydrate en solution sursaturée. La cinétique de ce processus peut être modifiée, par l'addition dans l'eau de gâchage ou dans le plâtre, de composés minéraux ou organiques qui agissent sur la solubilité des phases anhydres ou sur leur vitesse de dissolution. Industriellement, les retardateurs et accélérateurs sont utilisés pour contrôler les temps de prise.

Les retardateurs peuvent former un complexe avec le semihydrate, ralentissant ainsi sa dissolution, et se déposent sur les sites de croissance des cristaux.

Les retardateurs de prise les plus utilisés dans l'industrie plâtrière sont les acides carboxyliques type acide citrique ou acide malique. L'acide citrique est connu pour son pouvoir retardateur, que l'on attribue à deux phénomènes : le dépôt de citrate de calcium à la surface des grains de semihydrate, gênant la germination hétérogène, et l'adsorption sélective d'un complexe sur les cristaux de gypse en train de croître. Aussi, d'autres paramètres tels que le taux de gâchage ou la granulométrie influent sur la durée d'hydratation. La matrice à base de plâtre hydraté (gypse) du composite à mettre au point doit principalement jouer un rôle de barrière thermique à chaud. Intéressons-nous au comportement au feu d'une matrice gypse.

I.1.6.2. Microstructure du plâtre

Le plâtre durci ou pris se présente sous la forme d'un solide poreux à texture ordonnée. C'est un matériau d'une grande porosité, constitué d'un assemblage de cristaux de gypse.

La microstructure du plâtre est très dépendante des conditions de cristallisation (sursaturation, PH, température, présence d'additifs, etc.), mais aussi de la granulométrie de l'hémihydrate initial [5].

Isolation thermique et régulation hygrothermique

Du fait de sa faible conductivité thermique λ , le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres minéraux pour améliorer l'isolation thermique. Un enduit plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de brique forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique. La conductivité thermique dépend fortement de la porosité formée.

I.1.7. Mise en œuvre du plâtre

Le plâtre peut être utilisé dans la construction sous forme de pâte pure ou en mortier.

I.1.7.1. La pâte pure du plâtre

Contrairement au ciment, la pâte de plâtre pure est obtenue par saupoudrage de la poudre de plâtre dans l'eau jusqu'à saturation de celle-ci. Le taux de gâchage à saturation est rapport du poids de l'eau utilisé pour la mise en œuvre du plâtre sur le poids de celui-ci et est déterminé selon la norme NF B12-401[9].

I.1.7.2. Le mortier du plâtre

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé plâtre, de sable et d'eau. Le sable siliceux est préféré au sable de carrière. Les fines contenues dans le sable siliceux sont moindres par rapport au sable de calcaire. Les fines ont un pouvoir absorbant d'eau important en raison de leurs surfaces spécifiques élevées.

I.1.8. Propriétés mécaniques du plâtre

La quantité d'eau de gâchage (le rapport Eau/Plâtre) influe directement sur les propriétés des produits résultants.

Le rapport E/P élevé provoque une porosité élevée par conséquent un matériau moins dense d'où une chute de résistance mécanique car il y a moins d'engrènement et de liaison entre les

cristaux. Par contre lorsque l'excès d'eau présent dans la masse durcie a été séché à l'air ou par étuvage, la résistance mécanique à sec peut être deux fois supérieure à celle à l'état humide. Le séchage a pour effet d'éliminer l'excès d'eau entre les cristaux. L'excès d'eau réduit la cohésion entre les cristaux eux-mêmes. 40% de la résistance est due aux forces de cohésion entre les cristaux en plus de la résistance qui peut être attribuée à l'imbrication des cristaux lors de la croissance [1].

I.1.9. L'utilisation du plâtre

Le plâtre est un matériau de construction largement utilisé dans divers domaines d'application en raison de ses propriétés telles que la résistance, la dureté, la malléabilité, la facilité de mise en œuvre et la capacité à résister au feu.

- Le plâtre est employé dans la réalisation des cloisons de distribution ou de séparation entre les logements, comme plafonds ou doublage des murs, il participe à l'amortissement des bruits d'impact et aériens.
- Le plâtre est très utilisé dans la décoration intérieure grâce à sa capacité de se mouler sur toutes les formes et à se prêter à tout type de finition.
- Il laisse passer la vapeur d'eau, régule le degré d'hygrométrie dans le cas de fortes fluctuations :
- Il absorbe l'humidité de l'air quand il fait chaud et la restitue quand il fait froid.
- Associé à des isolants (polystyrène expansé, laine minérale, film chauffant en plafond), il participe au confort thermique des enceintes.
- Dans la sécurité des personnes, le semihydrate est classé A1 par décision de la Commission Européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits à aucune contribution à l'incendie [10].

Voici quelques-uns des domaines d'application les plus courants du plâtre :

- **Construction et architecture :** Le plâtre est utilisé pour la construction de murs, de plafonds et d'autres éléments architecturaux tels que les moulures et les ornements. Il peut également être utilisé pour la finition intérieure et extérieure des bâtiments.
- **Médecine :** Le plâtre est utilisé pour la fabrication de plâtres orthopédiques qui sont utilisés pour immobiliser les os fracturés et les articulations blessées pendant la guérison.

- **Art et sculpture** : Le plâtre est utilisé pour la création de sculptures et d'autres formes d'art. Il est également utilisé pour la réalisation de moulages pour la reproduction de sculptures et d'autres objets d'art.
- **Cinéma et théâtre** : Le plâtre est utilisé pour la fabrication de décors et de costumes pour les productions cinématographiques et théâtrales.
- **Industrie alimentaire** : Le plâtre est utilisé pour la fabrication de moules pour la production de chocolats et de bonbons.
- **Industrie céramique** : Le plâtre est utilisé pour la fabrication de moules pour la production de céramiques.
- **Ingénierie et construction navale** : Le plâtre est utilisé pour la fabrication de modèles et de moules pour la construction de navires et de bateaux.

En somme, le plâtre est un matériau polyvalent et adaptable qui trouve sa place dans différents domaines d'application, allant de la construction à l'art en passant par la médecine, la céramique et l'industrie alimentaire.

1.10. Fabrication du plâtre

La fabrication du plâtre comprend plusieurs étapes clés, dont voici les principales :

1.10.1. Extraction du gypse

Le gypse est le matériau de base du plâtre, et il est généralement extrait de carrières à ciel ouvert ou de mines souterraines.



Figure I. 5. L'extraction du gypse en souterrain



Figure I. 6. Extraction de gypse à ciel ouvert

1.10.2. Concassage

Le concassage est une étape importante dans la fabrication du plâtre, car il permet de réduire la taille des morceaux de gypse extraits de la carrière ou de la mine. Cette réduction de taille est essentielle pour faciliter le transport du gypse et permettre une meilleure dissolution dans l'eau lors de la formation de la pâte de plâtre.

Le concassage est réalisé à l'aide d'un équipement spécialisé appelé concasseur. Il existe différents types de concasseurs utilisés dans l'industrie du plâtre, tels que les concasseurs à mâchoires, les concasseurs à percussion et les concasseurs à rouleaux. Le choix du type de concasseur dépend du type de gypse et de la quantité à traiter.

Une fois que le gypse est concassé, il est transporté à l'usine de fabrication de plâtre pour être transformé en poudre fine. La qualité du concassage est importante pour obtenir une poudre homogène et fine, ce qui est essentiel pour garantir une qualité de plâtre élevée [11].



Figure I. 7. Concasseur et la ligne de production de Gypse & du plâtre

Il existe plusieurs types de concasseurs sur le marché et peuvent traiter jusqu'à 1200 à 1300 t/h. Les différents types de concasseurs utilisés dans l'industrie du plâtre sont :

- Concasseurs à mâchoire

Les blocs sont écrasés entre 2 mâchoires cannelées, l'une fixe, l'autre animée d'un mouvement alternatif.

- Concasseurs à cylindre dentés

Les deux cylindres tournent en sens inverses. Leur but est de calculer les rendements.

- Concasseurs a cylindre unique et mâchoire

Le gypse est écrasé par un cylindre denté tournant devant une mâchoire fixe, bien adapté au traitement d'un matériau humide.

- Concasseur à percussion (à marteaux)

Un cylindre à marteau fixe tourne à grande vitesse et projette ainsi les blocs contre les enclumes [12].

1.10.3. La cuisson :

La cuisson est une étape clé dans la fabrication du plâtre. Elle permet de transformer le gypse en plâtre en éliminant l'eau de cristallisation et en le transformant en un matériau solide et dur.

Il existe deux types de cuisson pour produire du plâtre :

- la cuisson du gypse pour obtenir l'hémihydrate α
- la cuisson du gypse pour obtenir de l'hémihydrate β .

La cuisson du gypse pour obtenir l'hémihydrate α est plus rapide et produit un plâtre plus dur et plus résistant que la cuisson du gypse pour obtenir le l'hémihydrate β , qui nécessite un temps de cuisson plus long mais permet de produire un plâtre plus fin et plus blanc.

Le four utilisé pour la cuisson du gypse est appelé calcinateur. Le gypse est chauffé dans le calcinateur à une température précise pendant une période de temps déterminée en fonction du type de cuisson. Après la cuisson, le plâtre est refroidi et broyé en une fine poudre pour être utilisé dans diverses applications.

La qualité de la cuisson est cruciale pour obtenir un plâtre de haute qualité, car une cuisson insuffisante ou excessive peut affecter la résistance, la couleur et la texture du plâtre. Les paramètres de cuisson doivent être soigneusement contrôlés pour garantir un plâtre de haute qualité.



Figure I. 8. Four de cuisson du gypse

On procède à la cuisson suivante deux principes essentiels :

- La cuisson en voie sèche (destinée pour la fabrication de l'hémihydrate β).
- La cuisson en voie humide (destinée pour la fabrication de l'hémihydrate α).

La cuisson du gypse pour obtenir l'hémihydrate β

Après un premier broyage, la poudre fine calibrée est cuite à raison de 5 t par heure, dans des fours de type « four beau » qui opère une cuisson indirecte du gypse placé dans une virole en rotation au-dessus de brûleurs à fioul.

La cuisson du gypse pour obtenir l'hémihydrate α

On dépose les pierres de gypse, précédemment triées, dans des paniers que l'on descend ensuite dans des autoclaves (sorte de « cocotte-minute »). La cuisson s'effectue à une pression pouvant aller jusqu'à 10 bars. Les caractéristiques du plâtre ainsi obtenu permettent un gâchage avec peu d'eau (5 à 6 fois moins qu'avec du plâtre β) pour un matériau offrant alors des résistances mécaniques beaucoup plus élevées [13].

1.10.4. Le broyage

Le broyage est une étape importante dans la fabrication du plâtre car il permet de transformer le plâtre cuit en une fine poudre qui peut être utilisée dans différentes applications.

Après la cuisson, le plâtre est extrait du four et laissé refroidir pendant quelques heures. Une fois refroidi, le plâtre est transporté vers la zone de broyage où il est transformé en une fine poudre. Le broyage peut être réalisé à l'aide de différents types de broyeurs, tels que des broyeurs à boulets, des broyeurs à marteaux ou des broyeurs à cylindres.

Le broyage doit être effectué avec soin pour obtenir une poudre de plâtre de qualité optimale. Le degré de finesse de la poudre dépend du type de broyeur utilisé et du temps de broyage. Plus la poudre est fine, plus elle est facile à travailler et à mélanger avec d'autres matériaux pour obtenir une bonne adhérence et une bonne consistance.

Il est également important de contrôler la température de la poudre de plâtre pendant le broyage, car une température trop élevée peut entraîner une décomposition du plâtre, affectant ainsi sa qualité.

Après le broyage, la poudre de plâtre est stockée dans des silos jusqu'à son utilisation ultérieure dans différentes applications, telles que la fabrication de plaques de plâtre, d'enduits, de moulures, de corniches, etc.

Il est important de noter que le broyage est une étape clé dans la fabrication du plâtre, qui doit être effectuée avec soin pour garantir la qualité et la performance du produit final [14].

I.2. Les cendres de biomasse

Introduction

Globalement, l'industrie agricole produit chaque année d'énormes quantités de déchets et la valorisation n'est toujours pas facile. La production de cendres issues de la combustion des déchets de biomasse peut être continue tout au long de l'année ou interrompue au printemps et en été, mais son utilisation est limitée à des périodes spécifiques d'activité agricole [15]. Les cendres de biomasse diffèrent par leur composition chimique et morphologique, selon le type de biomasse, le sol d'implantation de la biomasse, le type et les circonstances de combustion [16]. Par conséquent, l'enjeu actuel dans le domaine des matériaux s'oriente vers la valorisation des cendres de biomasse pour assurer d'une part une amélioration du niveau mécanique, thermique et de durabilité à long terme part, une économie d'énergie. Plusieurs chercheurs ont étudié la valorisation des cendres de biomasse comme stabilisants dans les matériaux de construction, comme substituant dans la fabrication des ciments etc.

I.2.1. Définition de la biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale qui peut devenir une source d'énergie.

I.2.2. Histoire de la biomasse

La biomasse peut se vanter d'être l'une des premières formes d'énergie utilisées par l'Homme ! Ses premières utilisations remontent aux débuts de nos origines, à la Préhistoire : nos ancêtres utilisaient déjà la biomasse par le feu pour se chauffer, s'éclairer ou pour cuire leurs aliments.

Le conflit géopolitique qui s'est fait sentir dans les années 1970 a entraîné une crise du carburant. En conséquence, l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) a réduit ses exportations de pétrole. Cela a attiré l'attention des gouvernements et du monde universitaire. Beaucoup ont commencé à chercher à développer davantage de sources d'énergie renouvelables. Ce mouvement a entraîné de nombreuses améliorations de l'énergie verte dans les panneaux solaires, les centrales géothermiques, les parcs éoliens offshore et l'énergie hydroélectrique. Au cours de cette période, les scientifiques ont adopté une approche systématique de l'énergie et ont inventé le terme biomasse.

Au fil du temps, l'importance de la bioénergie est devenue liée à des problèmes tels que la pollution par les combustibles fossiles. Certaines préoccupations environnementales

croissantes marquent cette période de l'histoire de la biomasse. Les scientifiques se sont tournés vers la recherche sur le changement climatique et la réduction des combustibles fossiles.

I.2.3. Les différentes biomasses

La biomasse peut être séparée en deux catégories : traditionnelle et moderne.

La biomasse traditionnelle englobe la combustion de bois énergie, d'excréments d'animaux et de charbon de bois, tandis que la biomasse moderne concerne des procédés technologiques tels que la production de biocarburants.

I.2.3.1. Les biocarburants

Un biocarburant est produit à partir de la biomasse qui réunit un grand nombre de matières organiques. Pour créer un biocarburant, il faut transformer la matière organique et en extraire le carburant de substitution qui va permettre de produire de l'énergie.

En d'autres termes c'est le carburant liquide issu de la transformation des matières végétales produites par l'agriculture (betterave, blé, maïs, colza, tournesol, pomme de terre...). Les biocarburants sont assimilés à une source d'énergie renouvelable. Leur combustion ne produit que peu de CO₂ et de la vapeur d'eau et pas ou peu d'oxydes azotés et soufrés (NO_x, SO_x).

I.2.3.2. La combustion de bois et de déchets.

L'étape de combustion de la biomasse agricole consiste à la brûler dans une chaudière spécialisée afin de produire de la chaleur et récupérer les cendres. Les gaz de combustion sont filtrés par le biais de filtres à manche, électrostatiques ou multicyclones avant d'être rejetés dans l'atmosphère.

Quant aux résidus de combustion, les cendres, elles se déposent sur des grilles fixes ou mobiles dans la chaudière et vont être acheminées et récupérées dans un conteneur pour être utilisées dans un domaine précis.

On peut avoir accès à des sources de la biomasse pour la transformation en énergie de celles-ci à partir des matières et des résidus agricoles, des eaux usées, des déchets urbains solides, des restes animaux, des résidus industriels, ainsi que des produits et des résidus forestiers.

Ces vastes sources de biomasse renouvelables et les moyens de les utiliser pour produire de l'énergie et des matériaux propres destinés à la construction.

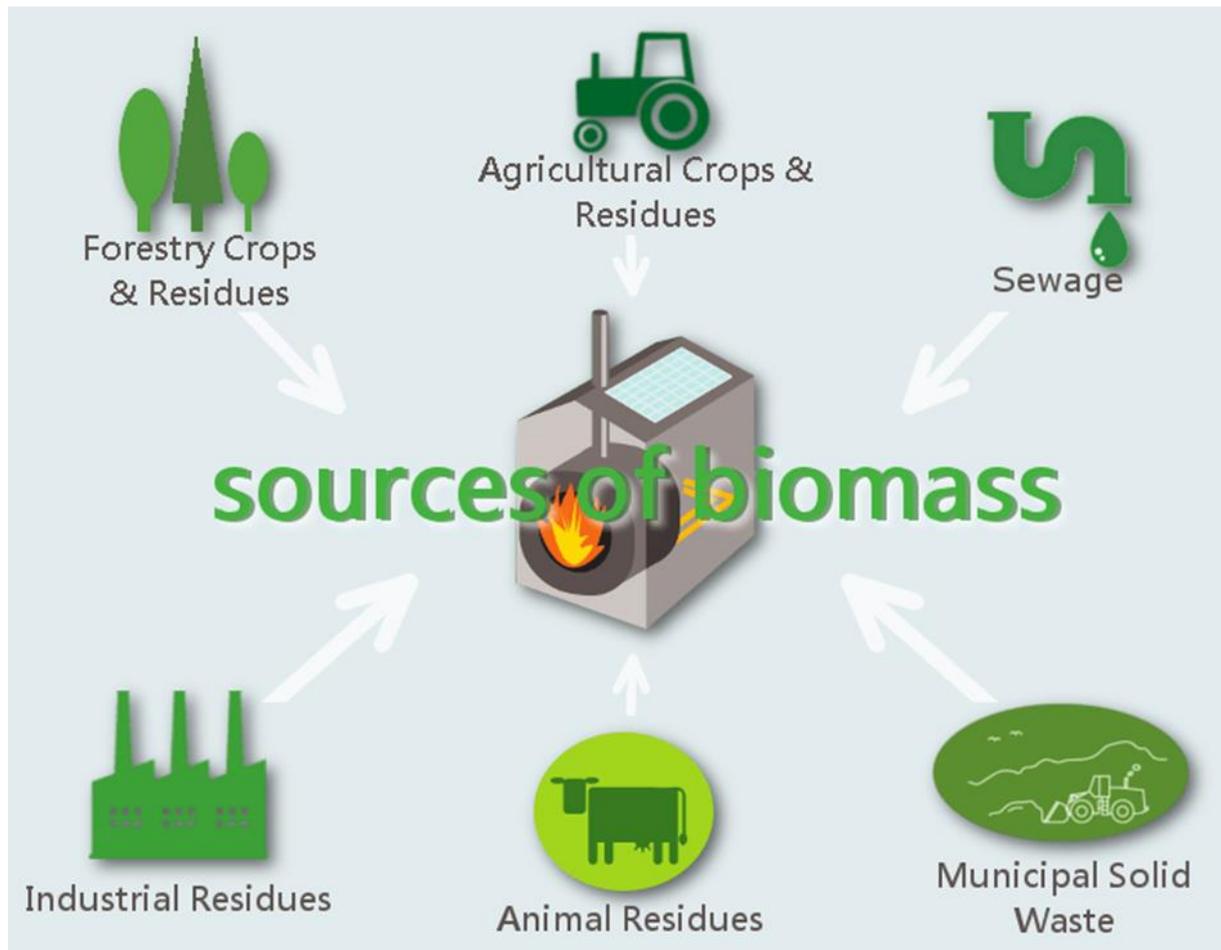


Figure I. 9. Cycle de vie de la biomasse

I.2.4. Domaine d'application :

Les cendres de biomasse ont divers domaines d'application en raison de leur composition minérale et de leurs propriétés physiques. En voici quelques exemples :

- **Agriculture**

Les cendres de biomasse peuvent être utilisées comme engrais pour les sols, car elles contiennent des éléments nutritifs tels que le calcium, le potassium, le phosphore et le magnésium. L'application des cendres de biomasse sur les sols peut améliorer leur fertilité et leur productivité.

- **Gestion des déchets**

Les cendres de biomasse peuvent être utilisées pour la gestion des déchets, en particulier pour les déchets organiques tels que les boues de station d'épuration, les déchets de cuisine et les

résidus agricoles. En ajoutant des cendres de biomasse à ces déchets, on peut réduire leur volume et leur poids, ainsi que leur potentiel de pollution.

▪ **Production d'énergie**

Les cendres de biomasse sont un sous-produit de la production d'énergie à partir de biomasse. La combustion de biomasse, tels que les résidus de bois, génère de l'énergie thermique et électrique, ainsi que des cendres de biomasse. Ces cendres peuvent être utilisées comme matière première dans la production d'autres matériaux de construction.

▪ **Production de matériaux de construction**

Les cendres de biomasse peuvent être utilisées comme additifs dans la production de matériaux de construction tels que le ciment, le béton et le plâtre. En ajoutant des cendres de biomasse à ces matériaux, on peut améliorer leur résistance, leur durabilité et leur capacité d'isolation thermique.

Dès lors, l'enjeu actuel dans le domaine des matériaux s'oriente vers la valorisation des cendres de biomasse pour assurer d'une part une amélioration du niveau mécanique, de la durabilité thermique et de la durée de vie et d'autre part, une économie d'énergie.

Plusieurs chercheurs ont étudié la valorisation des cendres de biomasse comme stabilisants dans les matériaux de construction ; Les mâchefers de biomasse, les cendres volantes de charbon et les mâchefers de bois ont été étudiés dans des briques compressées de différentes teneurs en remplacement partiel par du Geosilex, un sous-produit industriel utilisé juste comme source de chaux, les résultats obtenus indiquent une amélioration de la résistance à la compression [17–18]. Les mâchefers de biomasse et la cendre d'épi de maïs ont été établis comme substitut du ciment Portland dans les briques, cette récupération augmente la résistance du niveau du matériau [19,20]. Ainsi, l'élaboration de briques avec des cendres volantes déposées à la chaux a amélioré leur niveau de résistance mécanique [21,22]. Une autre source utilisée pour la stabilisation chimique du sol damé est que les résidus de carbure de calcium ajoutés au cendres volantes génèrent une amélioration adéquate de la résistance à la compression des briques [23]. L'activation alcaline a également été utilisée pour la stabilité des sols, c'est-à-dire des blocs de terre comprimée stabilisés avec un liant produit à partir de cendres volantes [24, 25–26].

I.2.5. Caractéristiques des cendres de biomasse

I. 2.5.1. Facteurs influençant la qualité des cendres de biomasse

Les cendres sont issues de la combustion de biomasse végétale (paille, bois...), de biomasse animale (carcasses), de déjections (fientes) et boues d'épuration, et de déchets (bois en fin de vie, liqueurs noires, déchets plastiques). Ainsi, le facteur principal influençant la qualité des cendres est le type de biomasse dont elles sont issues. Toutefois, on dénombre de nombreux facteurs qui influent sur la qualité des cendres :

- Le type d'intrants ou de mélange d'intrants (pour le bois : essence, part d'écorce, le type de biomasse, de déchets...)
- Le type de conditionnement appliqué à ces intrants : broyage, criblage, déferraillage, ajout d'adjuvants dans le cas des biomasses agricoles (CaO pour limiter la production de mâchefers, carbonate de soude pour éviter la production d'acide chlorhydrique ou d'acide sulfurique...).
- Le type de traitement thermique (combustion, pyrolyse...)
- Le type d'équipement de combustion : lit fluidisé, four à grille...
- La taille de l'installation, la température de combustion
- Le mode de traitement des fumées : cyclone, électro-filtre...
- Les modalités de récupération des cendres : mélange ou non des cendres sous foyer et cendres cycloniques ou multicyclonique/cendres humides/sèches
- La conduite de l'installation
- Les techniques de post-traitement (mélanges, broyage, extraction chimique...)

I.2.5.2. Caractéristiques générales 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.

Cendres sous foyer La teneur en cendres (matières minérales non volatilisées lors de la combustion ainsi que des imbrulés organiques) varie entre 0,5 à 15 % de la matière brute. Les agros combustibles ou les écorces présentent une teneur élevée en cendres, contrairement à

Chapitre I : Généralités sur le plâtre et les cendres de biomasse

des plaquettes forestières calibrées. Globalement, les cendres de biomasse sont principalement composées de chaux (10 à 30 %) et de silice (5 à 60 %). De manière indicative, on peut donner des caractéristiques communes à toutes les cendres de bois. Elles ont un pH toujours nettement basique (autour de 12) et ont une valeur neutralisante d'environ 50 %, c'est-à-dire qu'une tonne de cendre à la même pouvoir neutralisant qu'une tonne de carbonates chaux (CaCO_3) ou 500 kg de Chaux (CaO) et contiennent des éléments fertilisants, nécessaires aux cultures.

Les cendres contiennent également des éléments traces métalliques (ETM) ou "métaux lourds" potentiellement polluants : arsenic, bore, cadmium, cuivre, chrome, argent, molybdène, mercure, nickel, et zinc ; certains devant être considérés comme des oligo-éléments d'intérêt tels que le bore, le cuivre, le zinc : Ces ETM sont présents à l'état naturel dans la biomasse des végétaux. La combustion de la biomasse tend à concentrer certains ETM dans les cendres.

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

Introduction

Ce chapitre présente les matériaux et leurs caractéristiques, le matériel utilisé ainsi que la description des essais expérimentaux réalisés.

II.1. Matériaux utilisés

Pour mener à bien la campagne expérimentale de ce projet de fin d'étude, les matières premières suivantes ont été utilisées dans la préparation des mélanges : plâtre, eau du robinet, plastifiant et deux cendres de biomasse issues du chauffage domestique nommées A et B (CA) et (CB), respectivement.

II.1.1. Le plâtre

Le plâtre utilisé est un plâtre de type hemihydrate β , provenant de l'usine de la région de Bouira. C'est un matériau couramment utilisé dans la construction pour les revêtements muraux, la production de panneaux préfabriqués et l'exécution de plaques pour faux plafonds. C'est une poudre blanche obtenue à partir de la cuisson du gypse naturel, suivie de broyage. Le plâtre Mélangé avec de l'eau, on parle de gâchage, on obtient un liquide blanc qu'on appelle une solution aqueuse qui, au bout de quelques minutes devient pâteux puis, durcit qu'on appelle aussi plâtre pris. Ce processus s'effectue selon le principe de Le Chatelier décrit au chapitre I.

II.1.1.1. Analyse minéralogiques par diffraction aux rayons X

Le matériel utilisé est un diffractomètre aux rayons X (DRX), D 5000 de SIEMENS. Le diagramme obtenu pour le plâtre utilisé est donné sur la Figure II.1 et semble principalement composé de hemihydrate β ($\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$) et contient aussi quelques cristaux de gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) résiduels suite à une mauvaise cuisson après extraction en carrière. Le plâtre utilisé présente aussi quelques impuretés de type carbonate de calcium (CaCO_3) issues probablement des matières organiques calcinées. La présence d'anhydrite est très faible.

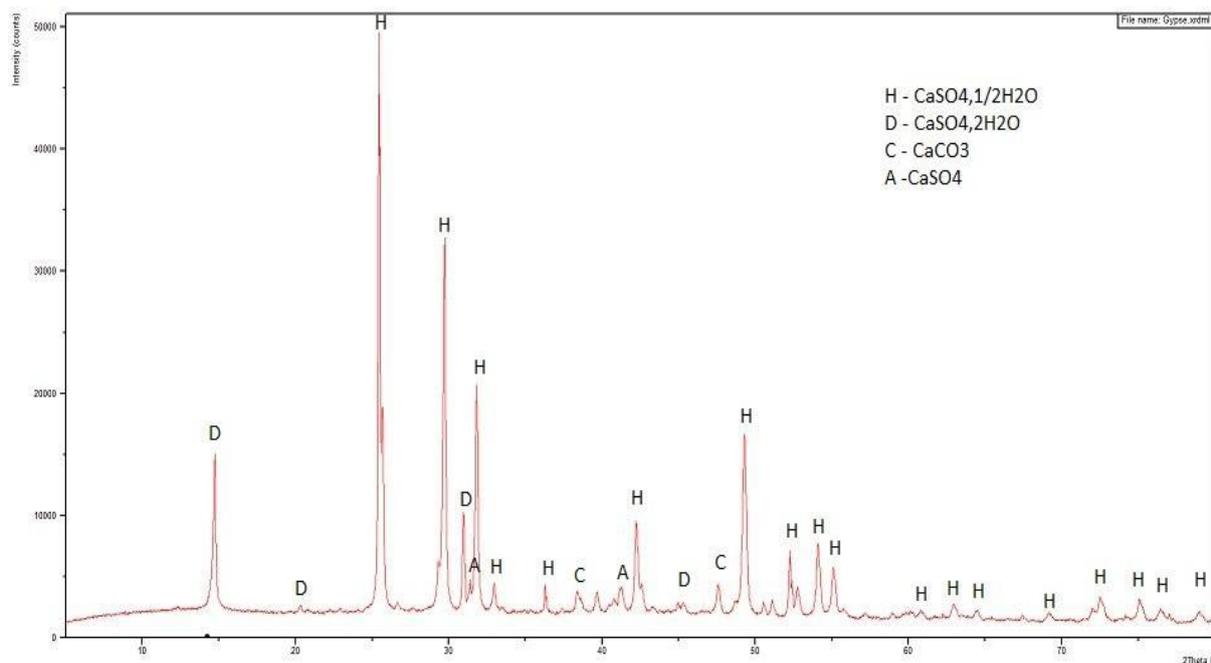


Figure II. 1. Analyse minéralogique par DRX du plâtre

II.1.1.2. L'analyse chimique

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. L'analyse chimique du plâtre utilisé est résumée dans le Tableau II.1.

Tableau II.1. Analyse chimique du plâtre

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	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 SO₂, ce qui confirme que le plâtre utilisé est composé essentiellement de sulfate de calcium. La valeur de la perte au feu est lié à la présence de CaCO₃.

II.1.1.3. Les propriétés physiques

Ces propriétés sont présentées dans le Tableau II.2

Tableau II.2. Le refus au tamis de 200 µm, 800 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 800 μm et 200 μm , respectivement peut nous renseigner sur la grosseur des grains du plâtre utilisé. Le refus au tamis de 200 μm est de l'ordre de 25 % ce qui implique que le plâtre utilisé est un plâtre fin.

II.1.2. Les cendres de biomasse

Les deux types de cendres de biomasse nommées CA et CB, ont été collectées lors du chauffage au bois domestique et le bois a été récupéré lors de l'élagage des arbres. Les deux types de cendres ont été utilisés sans aucun prétraitement. Elles ont été ramassées, tamisées à 63 micromètre et étuvé à 40°C pendant 24 heures et laisser refroidir avant chaque mélange préparé.

II.1.2.1. L'analyse chimique

Les résultats de l'analyse chimique par spectrométrie de fluorescence X résumés dans le Tableau II.3, indiquent que les deux cendres CA et CB présentent une forte teneur en CaO, de l'ordre de 38,58 % et 40,74 % en poids, respectivement. Elles ont une légère teneur en SiO₂ et en K₂O. La CA contient une forte concentration d'oxyde de magnésium (MgO) (15,13 % en poids), contrairement au CB qui contient une teneur plus faible de 1,58 % en poids. De faibles niveaux de Al₂O₃, Fe₂O₃ et Na₂O peuvent également être observés dans les deux cendres. En raison de la carbonatation de CA et CB, qui sont principalement composés de CaO, on obtient des pertes au feu élevées, de l'ordre de 34,55 % et 22,00 % en poids, respectivement. Ces pertes au feu sont liées à la présence de la calcite (CaCO₃) dans les deux cendres CA et CB. La cendre CB présente plus de CaCO₃ par rapport à la cendre CA.

Tableau II.3. Analyse chimique des deux cendres CA et CB en pourcentage

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Perte au feu
CA	12,67	0,20	0,02	38,58	15,13	0,91	0,46	8,36	22,00
CB	12,73	0,40	0,02	40,74	1,58	0,82	0,01	8,94	34,55

II.1.2.2. Les propriétés physiques

L'analyse granulométrique au laser de la cendre de biomasse a révélé l'existence d'une forte teneur en fines inférieures à 2 μm , 85,62 % dans les CB et 60,52 % dans les CA (Figure II.2.).

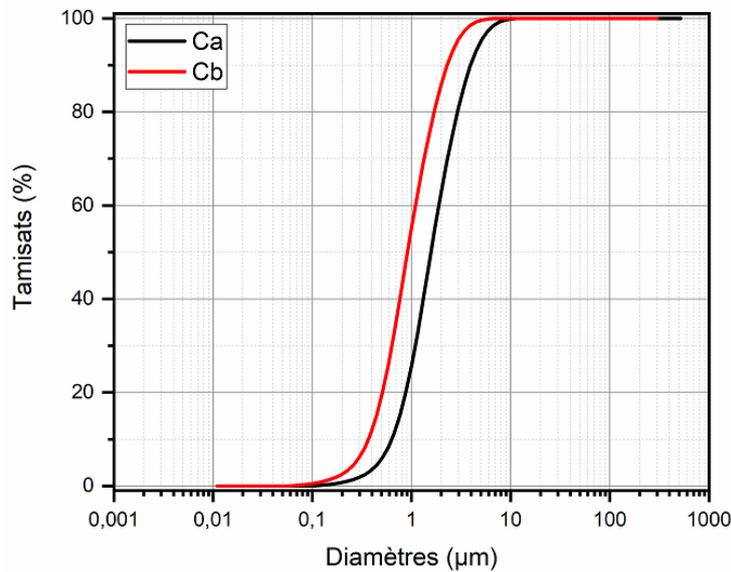


Figure II.2. Analyse granulométrique au laser des deux cendres CA et CB

Les fines particules des deux cendres peuvent s'insérer entre les cristaux du mélange de plâtre assurant une bonne densification améliorant ainsi les performances mécaniques.

II.1.2.3. Masse volumique apparente

Les résultats suivants des masses volumiques apparentes des deux cendres CA et CB sont récapitulés dans le Tableau II.4. Elles sont presque égales.

Tableau II.4. Masse volumique apparente des cendres CA et CB

	Masse volumique Apparente (g/cm^3)
CA	0,883
CB	0,878

II.1.3. 2.Caractéristiques du plastifiant

Dans le Tableau II.5 sont présentées les caractéristiques du plastifiant utilisé.

Tableau II.5. Caractéristiques du plastifiant

Aspect	liquide
Couleur	marron
pH	4,7 ± 1
Densité	1,04 ± 0,015
Dosage usuel	0,3% à 1 %

II.2. Les essais expérimentaux

Dans cette étude des pourcentages en plâtre ont été substitués par deux cendres CA et CB, respectivement. Huit liants "plâtre-Cendre" différents avec 5%, 10%, 15% et 20% en poids de Cendres CA et CB ont été utilisés et nommés respectivement PCAX% et PCBX% pour fabriquer des liants plâtre-cendre-eau. Un échantillon de plâtre de référence avec 0% de cendre a été aussi réalisé et nommé PC0%.

Le gâchage du plâtre est l'opération qui consiste à mettre la poudre au contact de l'eau. Contrairement au gâchage du ciment, afin d'éviter la formation de « grumeaux », il faut verser la poudre dans l'eau, progressivement en saupoudrant la surface.

La procédure pour mélanger le plâtre, la cendre et l'eau et éventuellement le plastifiant a été développée en suivant les indications de la norme européenne EN 13279-2:2014 [46]. Tout d'abord, des poudres de plâtre et de cendres ont été mélangées ensemble, puis saupoudrée dans l'eau et mélangées soigneusement et rapidement pendant 30s. La solution aqueuse du mélange "Plâtre + Cendre + eau" obtenue est laissée reposer pendant 60 s pour évacuer l'air emprisonné dans la solution. La solution aqueuse est ensuite mélangée à l'aide d'une spatule métallique et versée dans les moules. La durée de cette opération ne doit pas dépasser 60s.

Les échantillons ont été retirés des moules après un jour. Ensuite, ils ont été stockés dans une pièce ventilée à 23 °C ± 2 C et 60 % ± 5 % HR pendant 7 jours et 28 jours respectivement. Avant de commencer les mesures thermiques et mécaniques, les échantillons ont été conditionnés dans une étuve réglée à 40 °C jusqu'à ce qu'ils aient un poids constant

II.2.1. La maniabilité :

Dans la conception de l'expérience, il était prévu de maintenir un rapport Eau/liant de 0,60. Cependant, les premiers essais ont montré que les deux cendres CA et CB nécessitent un ajout d'eau plus important pour obtenir une maniabilité acceptable. Ainsi, finalement, le rapport eau/liant utilisé au cours des expériences était de 0,6 pour tous les liants de plâtre. Par contre, pour les liants PCA10%, PCB10%, PCA15%, PCB15% PCA20% et PCB20%, un dosage en plastifiant Sikaplast BV40 a été ajouté en l'incorporant totalement dans l'eau de gâchage pour maintenir la consistance exigée par les normes (Tableau II.6.).

Tableau II.6. Dosage en plastifiant pour les liants

les liants	PCA10%	PCB10%	PCA15%	PCB15%	PCA20%	PCB20%
Dosage plastifiant%	0,3	0,3	0,5	0,5	0,8	0,8

A ces taux de dosage en plastifiant, la solution aqueuse de l'hémihydrate est assez fluide, ce qui permet une meilleure mouillabilité des cendres et offre un temps de manœuvre raisonnable pendant la mise en œuvre.

La maniabilité de chaque mélange a été 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.4).



Figure II. 4. Moule en forme de cône en caoutchouc de 40 mm de hauteur et 75 mm de diamètre intérieur et la table d'étalement

Selon EN 13279-2 :2014 [33], la valeur d'écoulement du mélange doit être comprise entre 150 mm et 210 mm afin d'avoir une consistance fluide et maniable.

II.2.2. Hydratation et début de prise

L'hydratation est un processus exothermique, qui devient perceptible par l'augmentation de la température du liant de plâtre durcissant. La montée en température s'achève avec la fin des réactions de transformation (fin d'hydratation). En raison de la vitesse de prise élevée des

liants de plâtre, le contrôle du processus de prise est d'une grande importance en ce qui concerne l'ouvrabilité.

Le 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. Toute 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**.

II.2.3. Masse volumique

Après avoir mesuré chaque éprouvette avec un pied à coulisse pour obtenir le volume réel, $V(m^3)$ et l'avoir pesée à l'aide d'une balance de marque KERN 572 (précision 0,001 g), pour obtenir sa masse m (kg), la masse volumique à 7 et à 28 jours après étuvage a été calculée.

II.2.4. Résistance mécanique

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. Ces mesures ont été réalisées à l'aide d'une presse hydraulique Control de type PILOT PRO modèle 65-L27P12 (Figure II.5). 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 uni-axiale appliquée sur chaque demi-bloc jusqu'à la rupture.

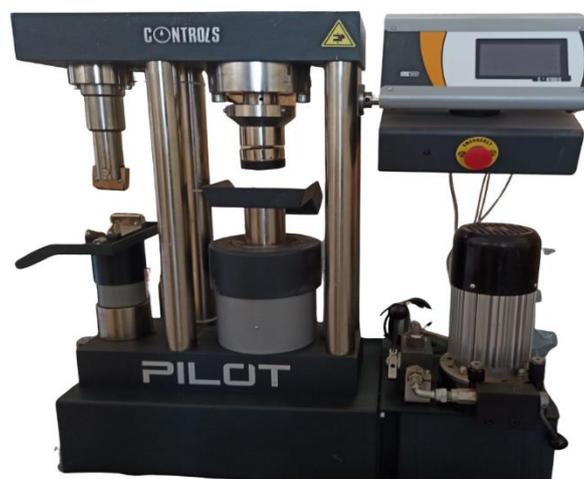


Figure II. 5. Presse hydraulique Control de type PILOT PRO modèle 65-L27P12

II.2.5. Conductivité thermique

Des prismes de 80 mm de longueur, 50 mm de largeur et 10 mm de hauteur ont été préparés, où différentes mesures ont été effectuées dans les mêmes échantillons pour les tests thermiques. Les conductivités thermiques λ des éprouvettes fabriquées ont été évaluées conformément à la norme NF EN 993-15, mesurées à l'aide d'un CT-mètre (Figure II.6), avec la méthode du fil chaud déterminée selon la norme ISO 8894-1 :1987. Un capteur a été spécifiquement sélectionné pour correspondre à la taille de l'échantillon et aux propriétés du matériau. Le capteur a été pris en sandwich entre deux échantillons.



Figure II. 6. Le CT-mètre

CHAPITRE III: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Dans ce chapitre on a enregistré tous les résultats obtenus et leurs interprétations au cours de notre travail.

III.1. Consistance

La mesure de l'ouvrabilité ou de la consistance des liants de plâtre est l'écoulement qui caractérise les propriétés du liant avant le début du temps de prise.

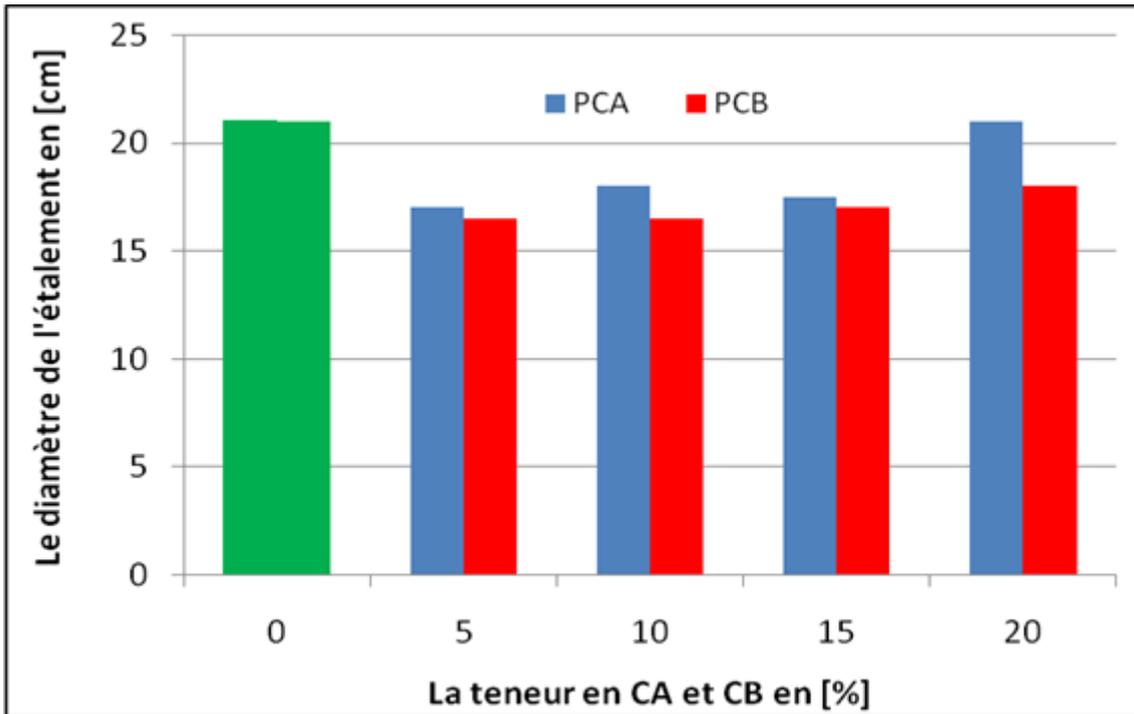
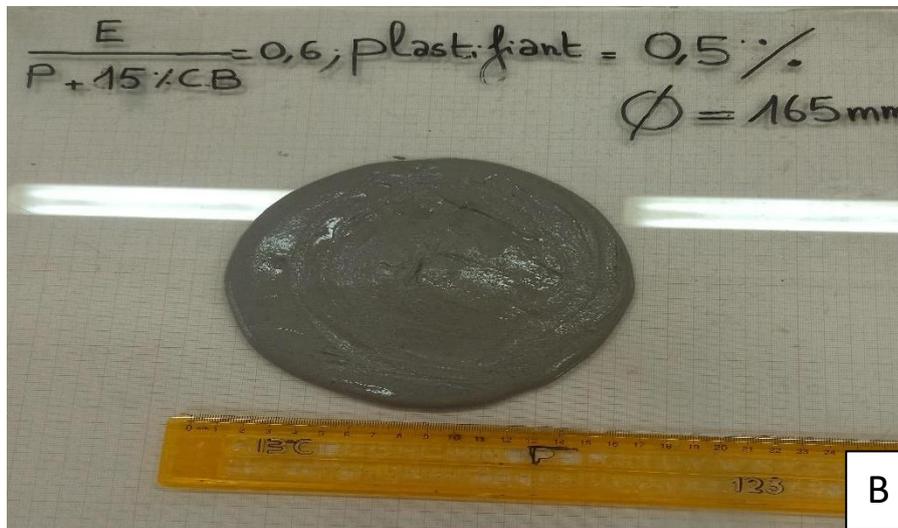
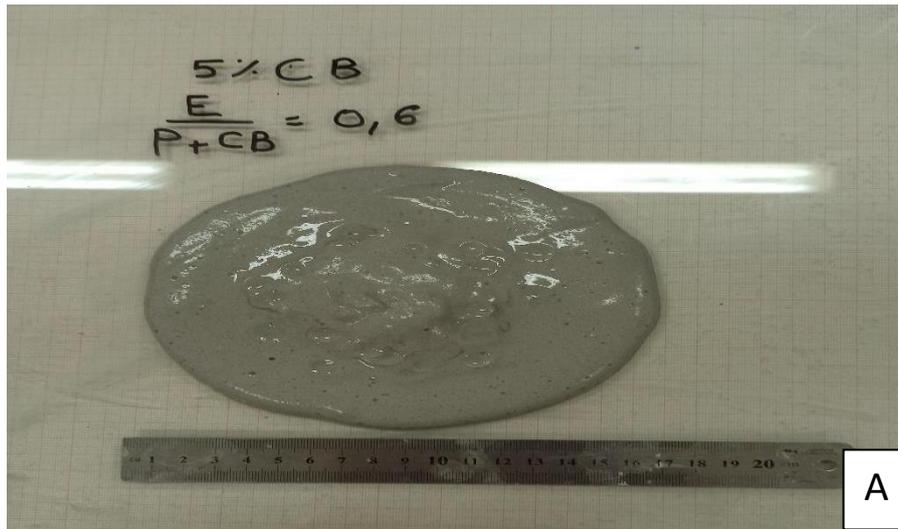


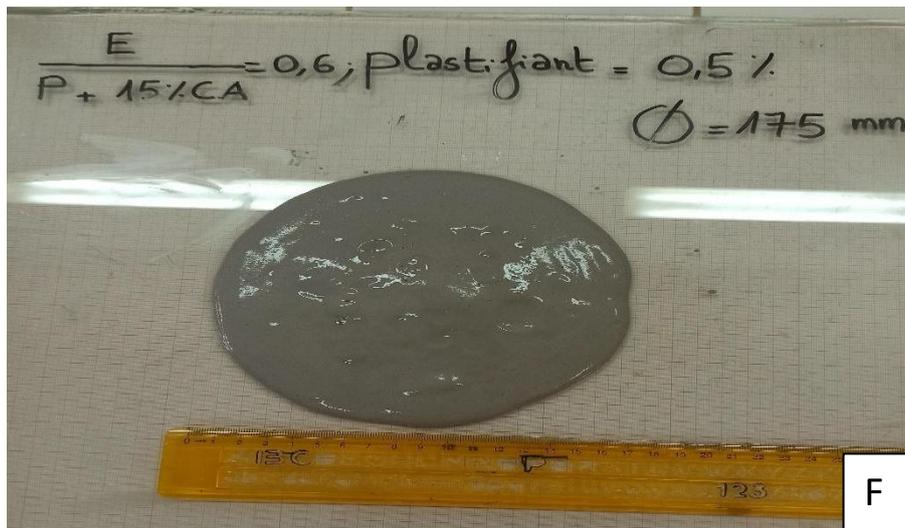
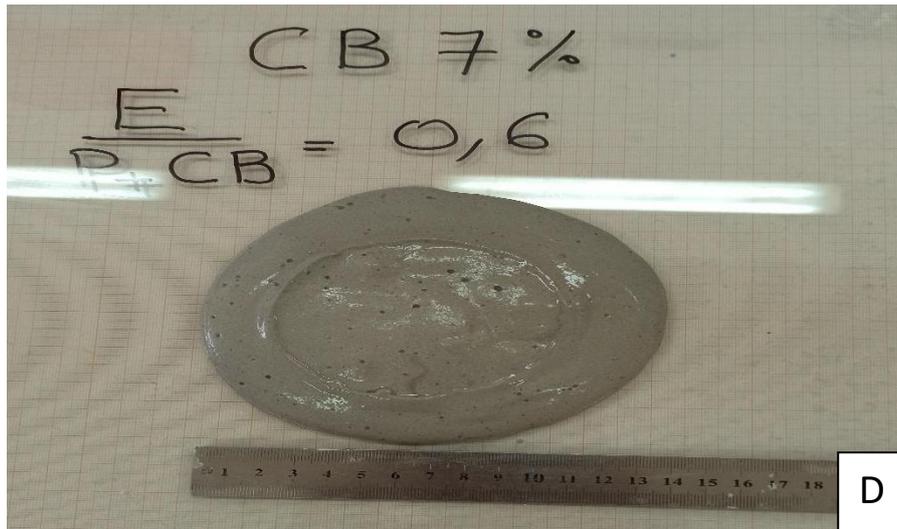
Figure III. 1. Consistance des liants de plâtre en fonction de la teneur des cendres CA et CB

La Figure III.1. regroupe l'ensemble des mesures effectuées sur le diamètre de l'étalement des mélanges de plâtre en fonction de la teneur en cendre et montre que les valeurs des diamètres se trouvent dans la plage de consistance exigé par la norme EN 13279-2:2014. La teneur en eau et le dosage en plastifiant des deux mélanges PCA et PCB sont égales et les diamètres de l'étalement des PCA et PCB sont différents. Les mélanges PCA présentent des valeurs supérieures à celle des PCB. La teneur élevée en MgO dans la cendre CA possède un caractère hydrophobe et l'eau non absorbé a contribué à un étalement supérieur dans les liants PCA.

Les « Figures III.2. A, B, C, D, E, F, G, H, I » montrent les diamètres de l'étalement des différents liants PC0%, PCA_X% et PCB_X% avec X= 5, 10, 15, et 20.

Chapitre III : Résultats et interprétation





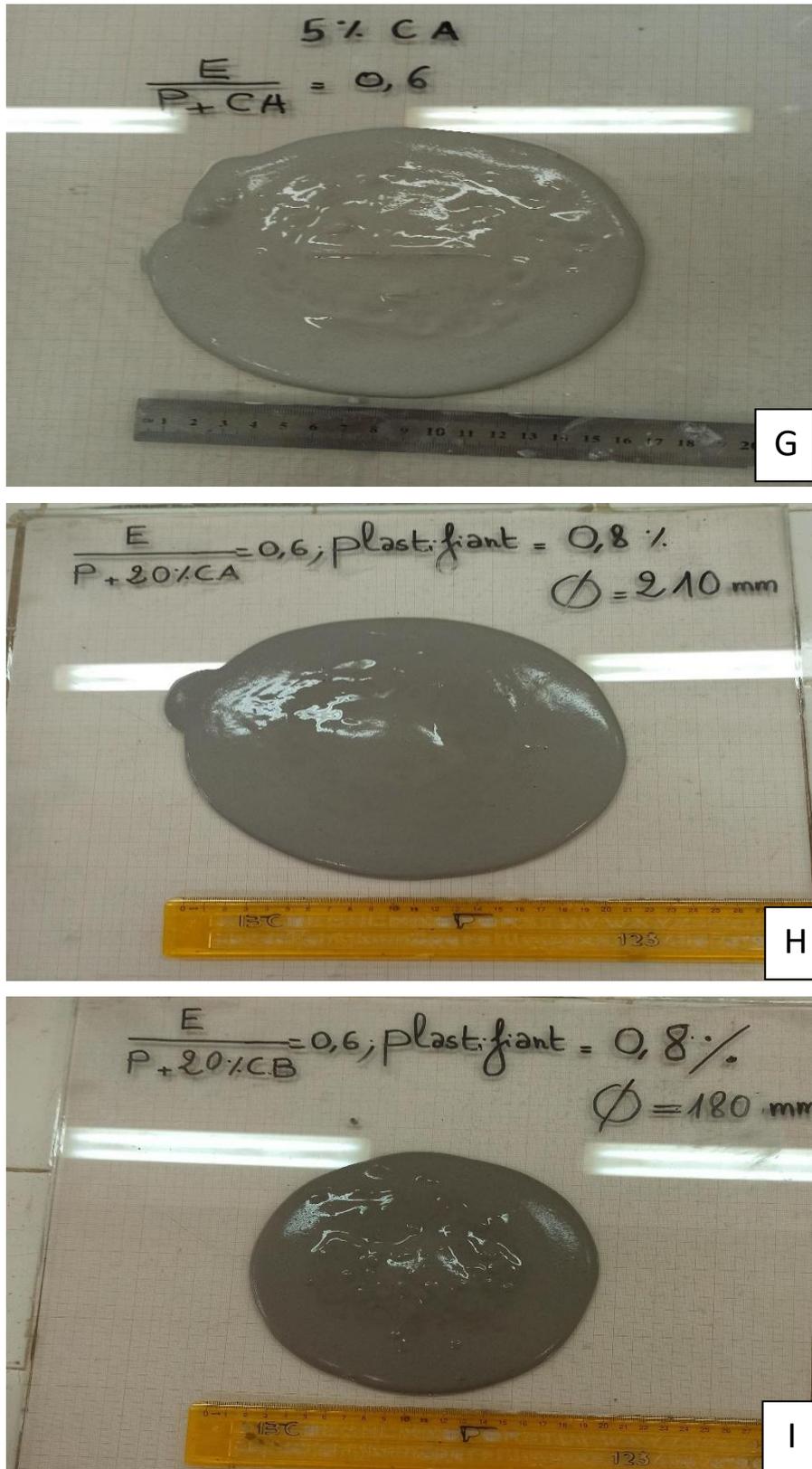


Figure III. 2. Diamètres de l'étalement des différents liants de plâtre

Conclusion

Une augmentation en eau non absorbée par les cendres CA entraîne une incidence importante sur la consistance des liants de plâtre frais. Les mélanges de plâtre frais PCA présentent des étalements plus grands que ceux du mélange de plâtre frais PCB. Ces résultats confirment la présence de l'eau en plus non absorbée dans le mélange du plâtre frais des PCA.

III.2. Le début de prise

Le 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 de **début de prise (Figure III.3.)**.



Figure III. 3. « temps-couteau » par la méthode de couteau

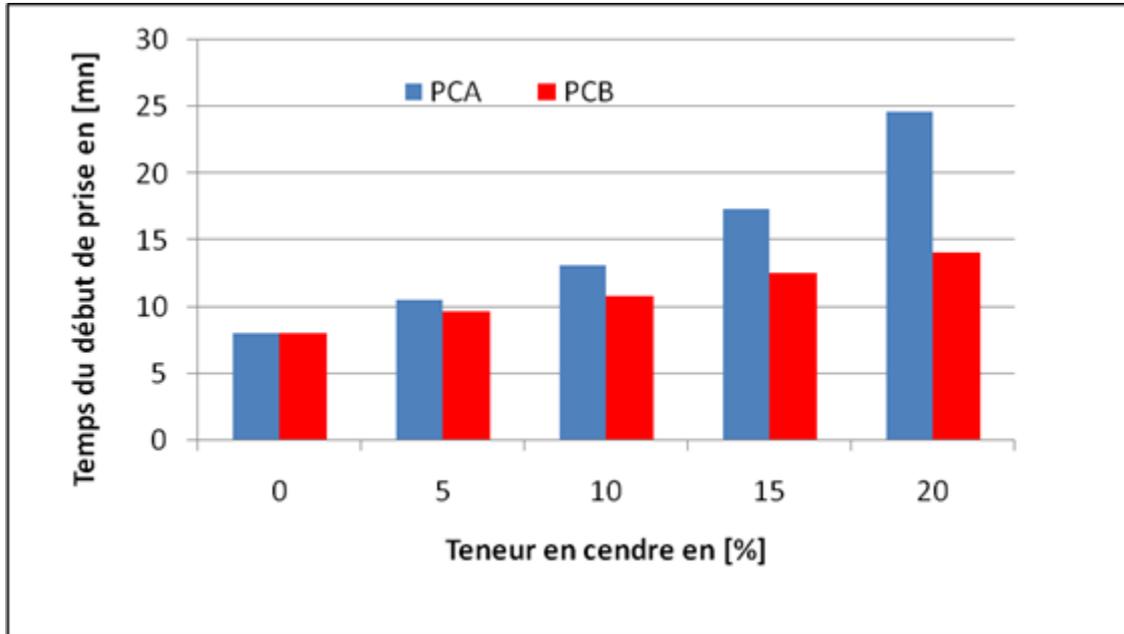


Figure III. 4. Temps de début de prise en fonction des teneurs en cendre CA et CB

Le Tableau III.1 et l'histogramme de la Figure III.4. montrent que les différents mélanges de plâtre ont présenté des délais de début de prise allant de 10 mn 30 s à 24 mn 36 s pour les PCA et de 9 mn 40 s à 14 mn 05 s pour les PCB.

Les PCA présente un retard de début prise par rapport au PCB. Le PCA présente une quantité d'eau non absorbée par les CA contenant une teneur élevée en MgO qui repousse l'eau.

L'échantillon témoin PC0% présente par contre un début de prise rapide de l'ordre de 8 minutes par rapport au PCA et au PCB en raison de la teneur élevée en hemihydrate β . Il est aussi à mentionner que le temps du début de prise des deux mélanges PCA et PCB augmentent en fonction de l'augmentation de plâtre substitué. A chaque fois que hemihydrate β diminue dans le mélange le temps du début de prise augmente. En d'autre terme, il n'y'a pas assez de cristaux formé par hemihydrate β et l'eau pour déclencher un temps de début de prise rapide.

Conclusion

Les liants de plâtre frais présentant un taux élevé d'eau engendrent des retards dans le temps des débuts de prise.

III.3. Masse volumique

La Figure III.5 montre la variation de la masse volumique sèche des PCA et PCB en fonction du taux de substitution de CA et CB, respectivement à 28 jours. Les résultats présentés dans cette figure montrent les tendances à la baisse de la masse volumique des PCA et PCA avec l'augmentation du taux de substitution partielle de CA et CB, respectivement dans le mélange. Les cendres sont plus légères et présentent des masses volumiques apparentes inférieures à celle du plâtre. Les PCA à 28 jours présentent des masses volumiques sèches inférieures à celles des PCB en raison de la présence des pores formés par l'eau en excès dans le liant du plâtre.

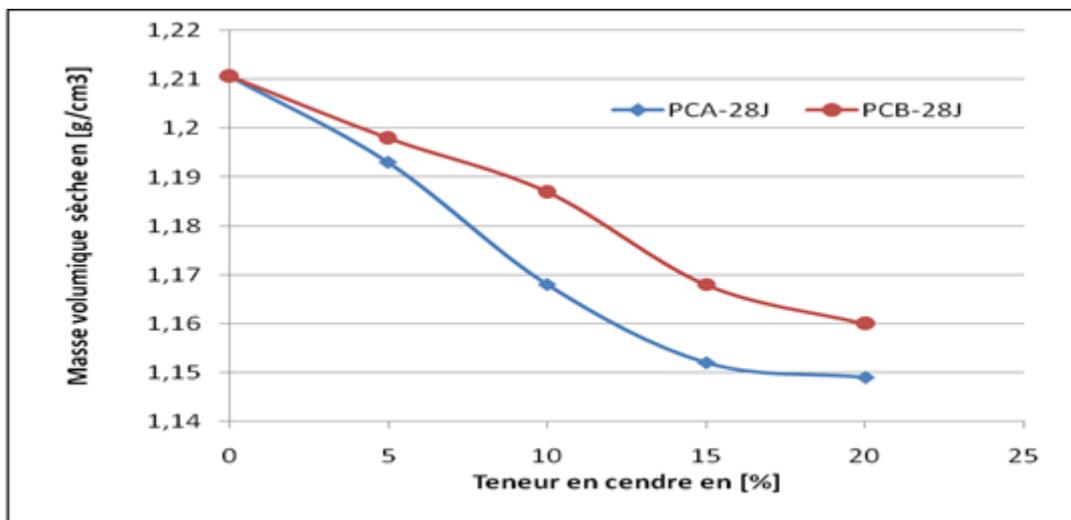


Figure III. 5. Masse volumique sèche en fonction de la teneur en cendre

III.4. Résistance à la compression

Comme pour la plupart des matériaux de construction à base de minéraux, la résistance à la compression est le critère d'application le plus important pour le plâtre. Par rapport aux produits liés au ciment, qui développent leur résistance sur une période de plusieurs semaines avec un durcissement normal, les hémihydrates à base de sulfate de calcium atteignent leur résistance maximale à l'état humide après environ une heure. Un séchage ultérieur augmente la résistance par rapport à la résistance à l'état humide.

Les Figures ci-dessous montrent l'évolution des résistances à la compression des différents liants de plâtre à 7 et à 28 jours d'exposition à l'air libre ensuite à l'étuvage.

Chapitre III : Résultats et interprétation

La diminution de la résistance à la compression en fonction de l'augmentation du taux de substitution du plâtre par les deux cendres CA et CB à 7 jours est illustré sur la Figure III.6.

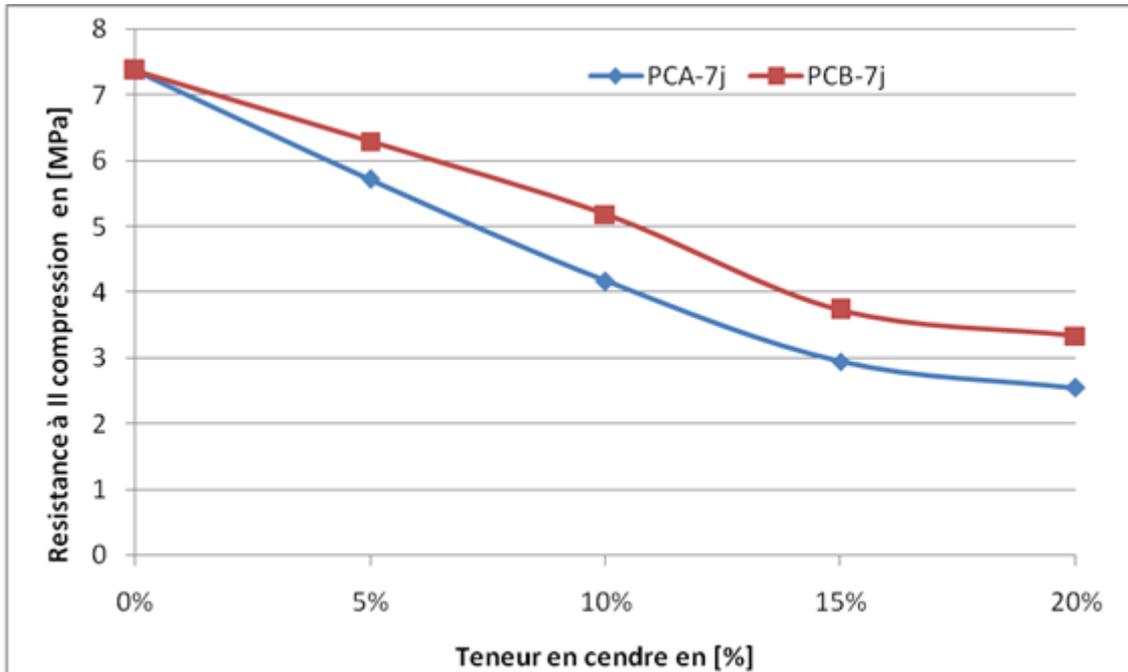


Figure III. 6. Résistance à la compression des PCA et PCB à 7 jours en fonction de la teneur en cendre CA et CB

Cette diminution est liée au manque de cristaux de plâtre pris lors de l'hydratation des mélanges. En comparaison à l'échantillon témoin PC0%, la valeur de la résistance à la compression est meilleure par rapport aux autres échantillons PCAX% et PCBX% avec X = 5, 10, 15 et 20. L'échantillon témoin PC0% présente plus de cristaux formés pendant la croissance et en conséquence plus de cohésion dans la matrice du plâtre pris.

Les valeurs des résistances à la compression des liants PCB sont meilleurs à celles de PCA à 7 jours en raison de la teneur élevée en MgO dans la cendre A. Les MgO présents dans les CA qui ont un caractère hydrophobe [27], ont contribué à l'augmentation de l'excès d'eau formant ainsi des pores capillaires dans le plâtre pris. Par contre le CaO présent dans les deux cendres CA et CB à teneur presque égales présente un caractère hydrophile.

Les Figures III.7 et III.8 montrent la comparaison des résultats de la résistance à la compression à 7 et à 28 jours des PCA et PCB.

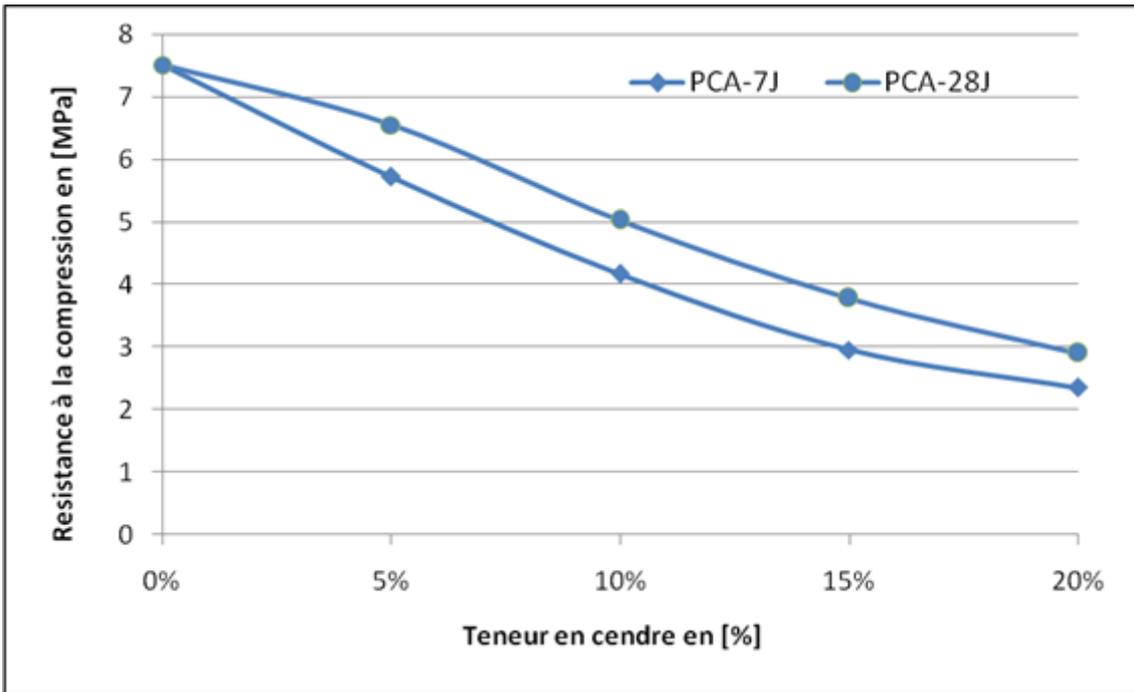


Figure III. 7. Résistance à la compression des PCA à 7 et 28 jours en fonction de la teneur en cendre CA

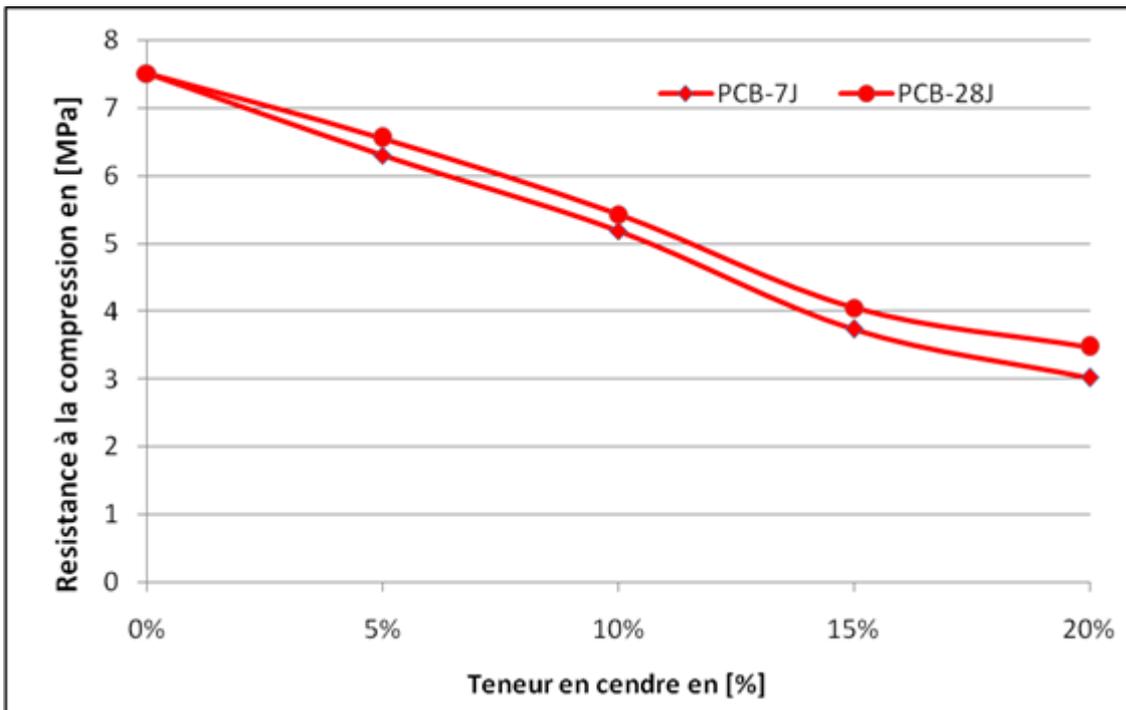


Figure III. 8. Résistance à la compression des PCB à 7 et 28 jours en fonction de la teneur en cendre CB

Les résistances à la compression des PCA et PCB à 28 jours présentent de meilleures valeurs qu'à 7 jours. Cette courte période d'exposition à l'air libre (Température 23 °C et HR 65%) n'était pas suffisante pour former d'autres hydrates. Par contre pendant les 28 jours et avant

étuvage à 40°C il y'a eu d'autres hydrates formés entre les cristaux du plâtre pris. Ces hydrates sont issus de la réaction du MgO et de CaO des cendres CA et CB avec l'eau de gâchage pour donner $Mg(OH)_2$ et $Ca(OH)_2$, respectivement. Ils ont contribué à combler les pores formés par l'excès d'eau entre les cristaux du plâtre pris.

Les résistances à la compression des PCB à 28 jours sont légèrement supérieures à celles de PCB à 7 jours (Figure III.8). La cendre CB est dépourvue de MgO et contient seulement de CaO pour former uniquement du $Ca(OH)_2$.

Conclusion

L'eau en excès non absorbé par le MgO des cendres CA dans le plâtre pris réduit la cohésion et favorise son ramollissement. Ainsi, toute quantité d'eau supplémentaire viendra augmenter cet excès qui se transformera naturellement en vide après évaporation. La formation de nouveaux hydrates dans les cristaux du plâtre pris participe à l'imbrication et l'enchevêtrement des cristaux de plâtre pris lors de l'hydratation.

III.5. Résistance à la flexion

La dépendance de la résistance à la flexion des mélanges de plâtre pris sur la teneur, le type de cendre et la durée de cure est exprimée sur les Figures III.9, III.10, III.11 et III.12.

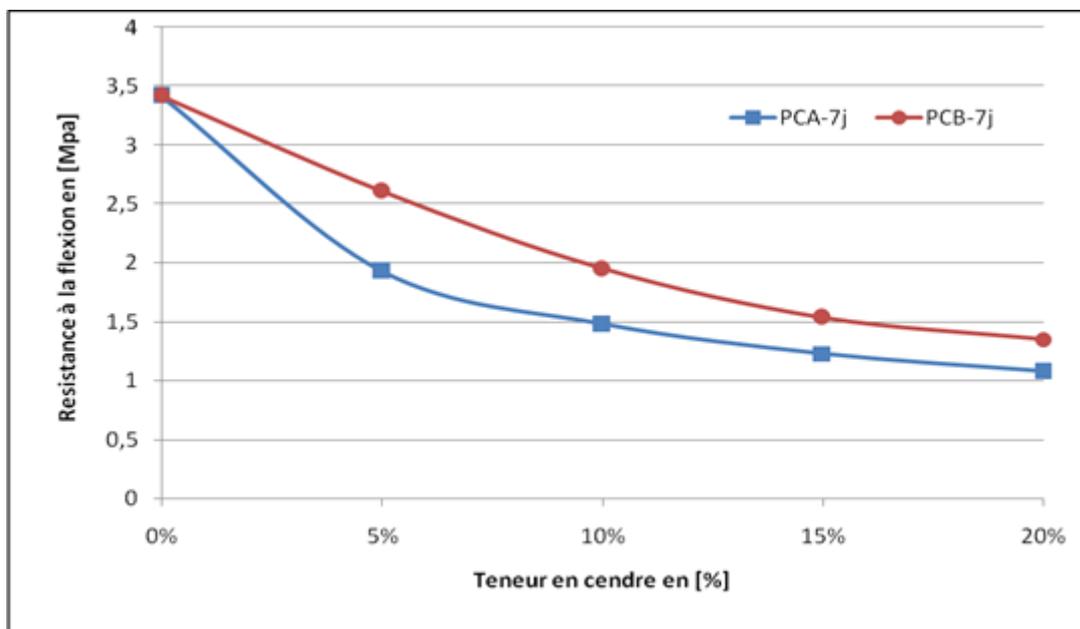


Figure III. 9. Résistance à la flexion des PCA-7J et PCB-7J

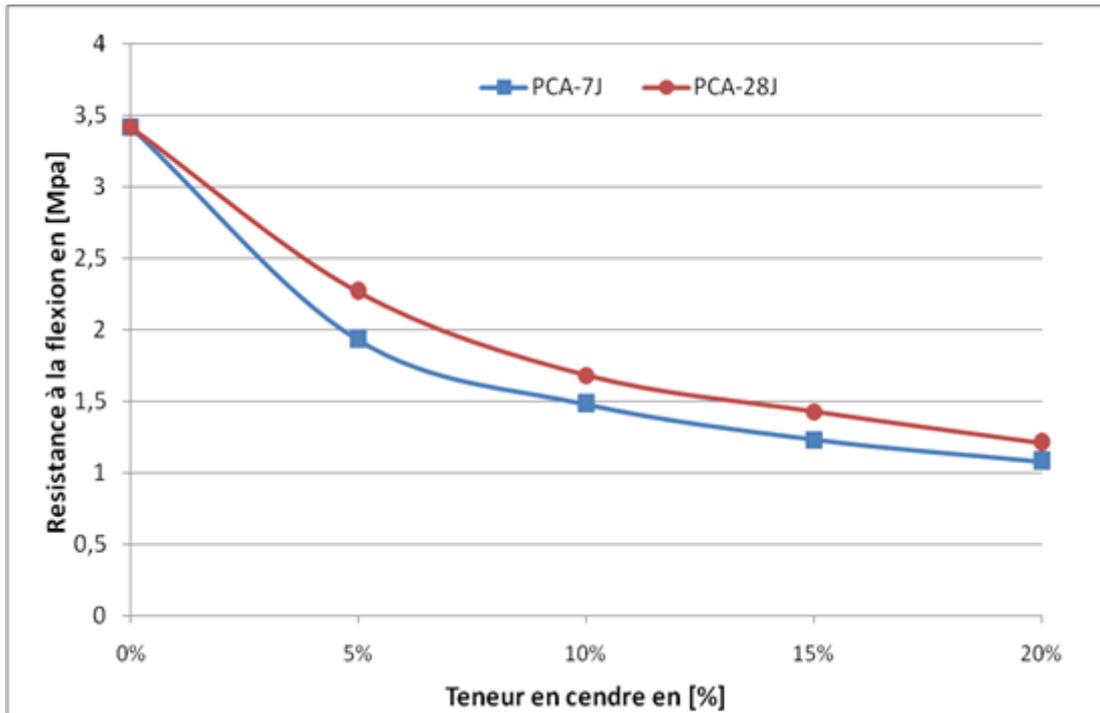


Figure III. 10. Résistance à la flexion des PCA-7J et PCA-28J

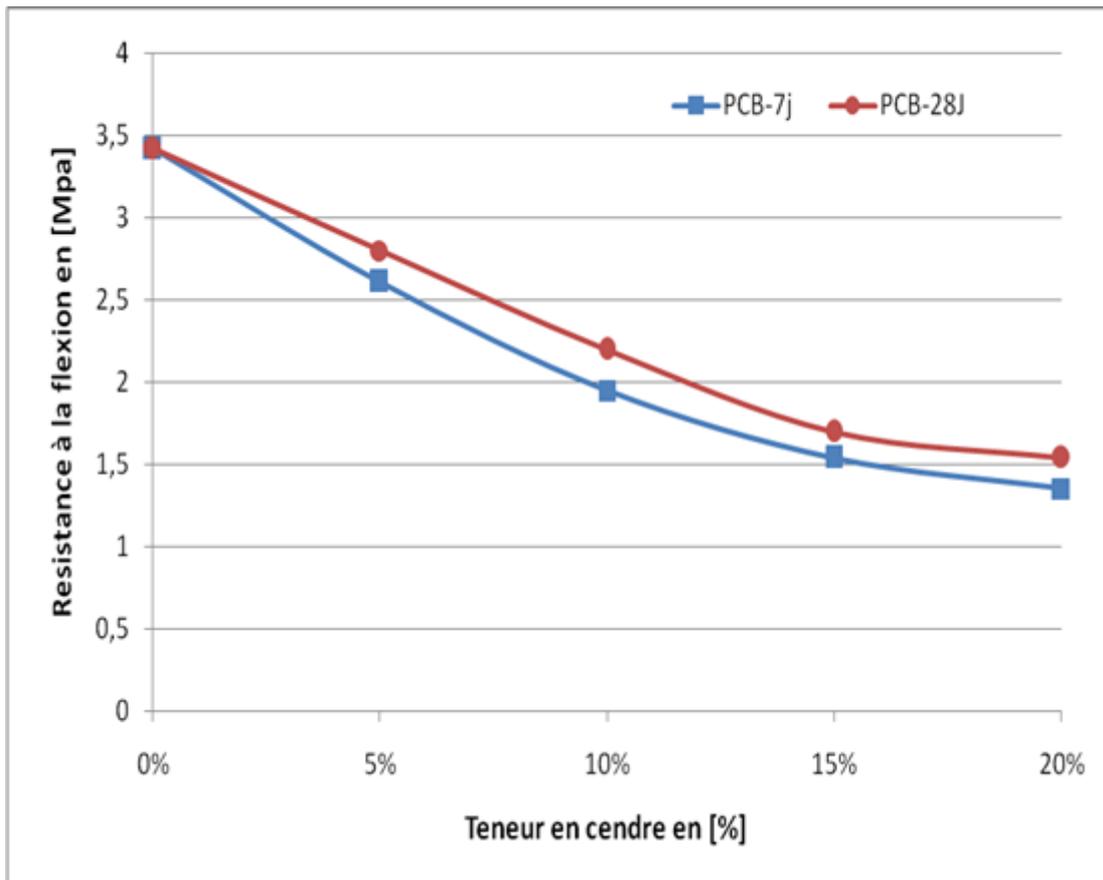


Figure III. 11. Résistance à la flexion des PCB-7J et PCB-28J

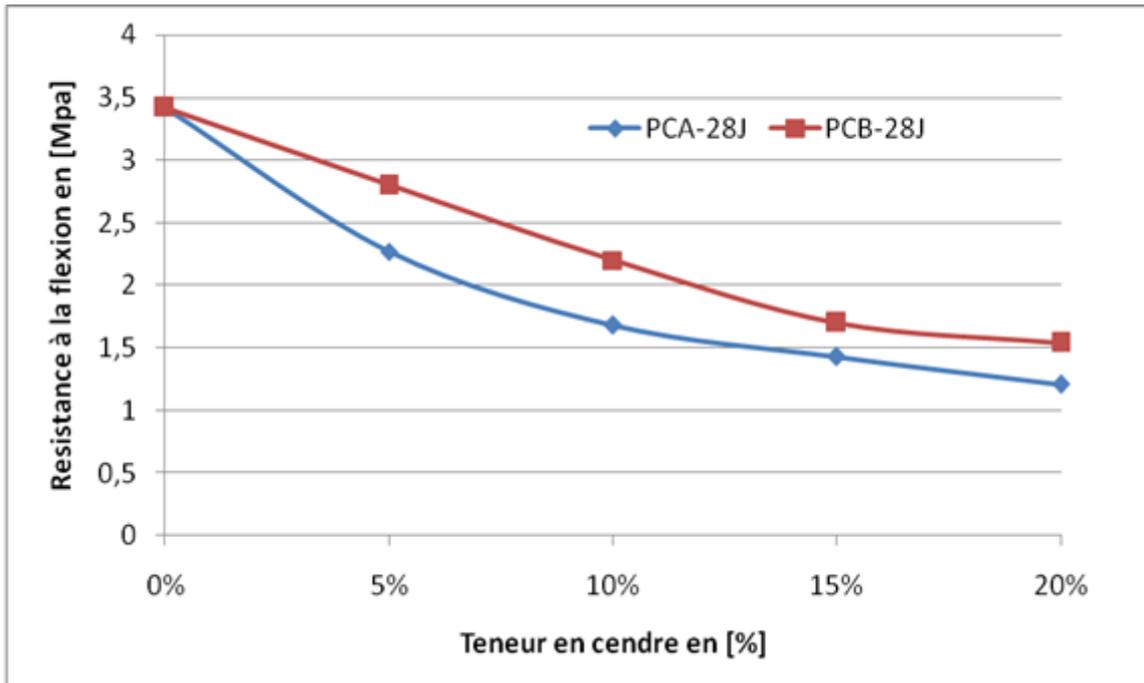


Figure III. 12. Résistance à la flexion des PCB-28J et PCA-28J

La résistance à la flexion diminue en augmentant la teneur en cendre CA et CB en raison du manque de cristaux dans le plâtre pris. La résistance à la flexion des mélanges de plâtre avec la cendre CB est supérieure à celle des mélanges avec les cendres CA en raison de l'excès d'eau présent dans le plâtre pris qui ont engendré des pores. La résistance à la flexion à 28 jours de cure sont supérieures à celle à 7 jours. La formation d'autres hydrates issus du MgO et de CaO pendant le processus d'hydratation à 28 jours à contribué à ce gain.

Conclusion

Cette tendance à la baisse de la résistance à la flexion en fonction de la teneur en cendre, l'infériorité de la résistance à la flexion des PCA par rapport aux PCB et la durée de cure peuvent être interpréter de la même manière que la résistance à la compression sauf que la résistance à la flexion de tous les mélanges de plâtre pris reste nettement inférieure à la résistance à la compression.

III.6. Conductivité thermique

La conductivité thermique des matériaux de construction est importante pour les économies d'énergie. La Figure III.13. montre les résultats de l'évolution de la conductivité thermique par son coefficient de conductivité thermique λ de PCA et PCB à différents temps de cure et en fonction du taux de substitution partielle de CA et CB, respectivement.

Conclusion

L'utilisation de la cendre à différentes teneurs a entraîné une amélioration de l'isolation thermique par rapport à l'échantillon témoin.

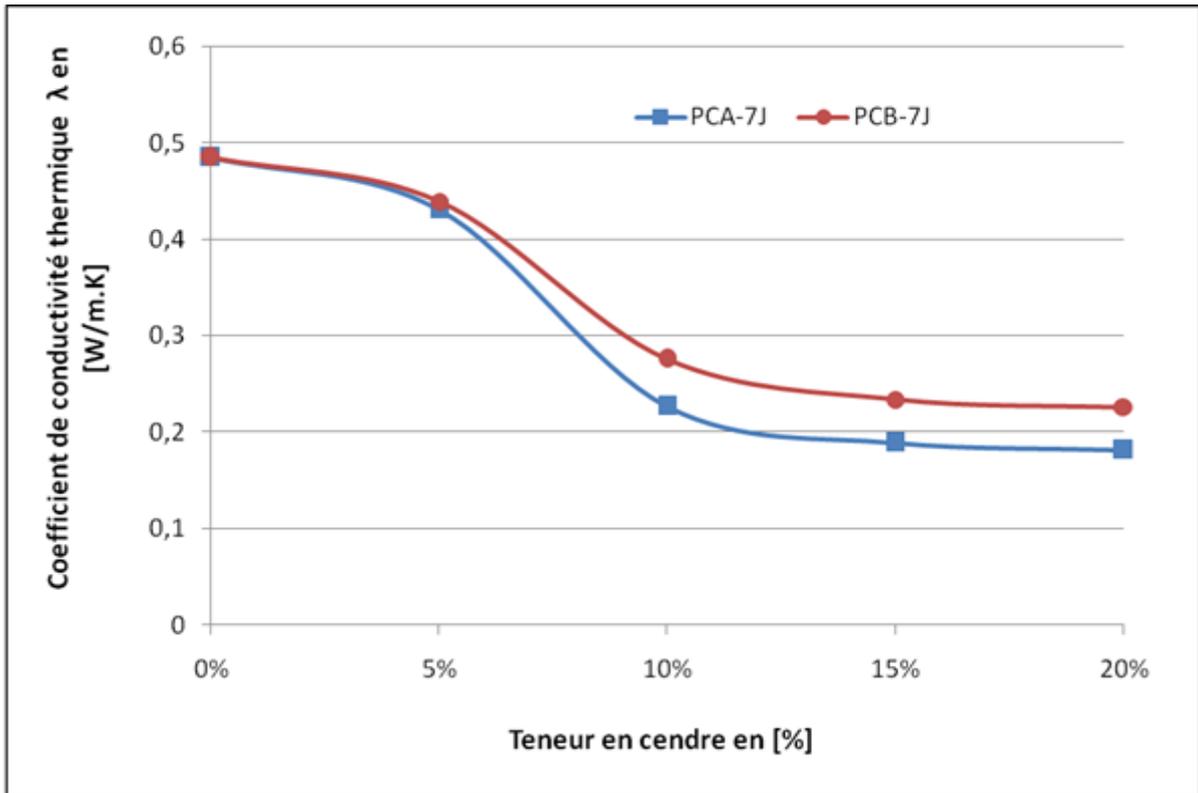


Figure III. 13. La conductivité thermique des PCA et PCB à 7 jours en fonction de la teneur en cendre CA et CB

La conductivité thermique des deux liants de plâtre pris PCA et PCB à différents taux de substitution partielle de cendre CA et CB respectivement, a diminué lorsque la teneur en cendre augmente. Cette diminution de conductivité thermique a été attribuée à la porosité élevée existante dans les cendres CA et CB [27].

Les valeurs de conductivité thermique PCA sont significativement inférieures à PCB. Cette différence est liée à l'excès d'eau repoussé par le MgO et qui a provoqué une porosité dans le plâtre pris lors de son évaporation. L'évaporation de l'eau a augmenté le nombre de pores sans humidité dans le PCA par rapport au PCB.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion

Les travaux expérimentaux présentés dans ce PFE ont révélé que les cendres de biomasse issues du chauffage domestique ne doit pas être considérée comme le facteur décisif affectant les propriétés mécaniques du plâtre pris. L'utilisation de cette cendre a permis d'améliorer la conductivité thermique.

La composition chimique de la cendre s'est avéré un facteur très important. L'utilisation de la cendre de biomasse à différentes teneurs a entraîné des diminutions dans les résistances à la compression et à la flexion dans les mélanges des plâtres pris. Par contre leurs présences et grâce à leurs caractères hydrophobe et hydrophile, à leurs porosités et leurs faibles masses volumiques apparente vis-à-vis de l'hémihydrate β , ont permis de diminuer leurs masses volumiques sèches et par conséquence augmenter leurs isolations thermiques.

Les oxydes présents dans les cendres en l'occurrence le MgO et le CaO ont permis seulement de donner une différence dans les résistances mécaniques. Les liants de plâtre pris avec les cendres riches en MgO ont montré des résistances mécaniques faibles par rapport aux liants de plâtre dépourvu de MgO.

BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographiques

- [1] Meille, S. Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure ; thèse de doctorat de l'INSA, Lyon. (2001).
- [2] Hamida Mohamed Lamine : Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction. Magistère en physique 2010. Université Mentouri de Constantine.
- [3] J. L. Vignes, H. Essadam, and D. Daligand. Une vie de plâtre. Bulletin de l'union des physiciens, pages 145-164, jan 1997.
- [4] Les Industries du plâtre (2019). La plaque de plâtre au cœur de la construction durable. [www.les industries du plâtre.org](http://www.lesindustriesduplatre.org).
- [5] JAFFEL, H. Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution cas du plâtre ; thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, France (2006).
- [6] Cour MDC 1 de Prof. Chelouah. Université Abderahmane Mira Bejaia
- [7] 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.
- [8] H. Le Chatelier. Recherches expérimentales sur la constitution des mortiers hydrauliques. Comptes rendus académie des sciences de Paris, page 715, jan 1883.
- [9] NF B12-401: Normes Françaises: Gypse et plâtre - Plâtres - Technique des essais. Decembre 1987.
- [10] Daniel DALIGANG. Plâtre. Techniques de l'Ingénieur, 'Traité Construction'(C910):24 p., jan 2002.
- [11] Papworth, F. (2011). Gypsum: properties, production and applications. Nova Science Publishers.
- [12] MFE : Fabrication du plâtre alpha a haute résistance a partir du gypse de Ghardaïa. juillet 1991.
- [13] Fuda, J. (2006). The plaster formulary. Chemical publishing company.
- [14] SANAHUJA Julien, DORMIEUX Luc, CHANVILLARD Gilles, and MEILLE Sylvain. Modélisation micromécanique des matériaux poreux (pâte de ciment, plâtre),
- [15] Agence de l'Environnement de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). December 2005. Management and recovery of ashes from wood boilers 'Storage and Spreading.
- [16] V. Gupta, D.K. Pathak, S. Siddique, R. Kumar, S. Chaudhary, Study on the mineral phase characteristics of various Indian biomass and coal fly ash for its use in masonry construction products, Constr. Build. Mater. 235 (2020) 117413.
- [17] D. Eliche-Quesada, M.A. Felipe-Sesé, M.J. Fuentes-Sanchez, ' Biomass bottom ash waste and by-products of the acetylene industry as raw materials for unfired bricks, J. Build. Eng. 38 (2021) 102191.

Références Bibliographiques

- [18] M.A. Felipe-Sesé, L. Pérez-Villarejo, E. Castro, D. Eliche-Quesada, Wood bottomash and Geosilex: a by-product of the acetylene industry as alternative raw materials in calcium silicate units, *Materials*. 13 (2020) 489.
- [19] B. Carrasco, N. Cruz, J. Terrados, F.A. Corpas, L. Pérez, An evaluation of bottomash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks, *Fuel* 118 (2014) 272–280.
- [20] B. Rajwade, N. Netam, Investigation of effects of corncob ash in flyash bricks, *Mater. Today: Proc.* 28 (2020) 2431–2434.
- [21] 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.
- [22] T. Çiçek, Y. Çinçin, Use of flyash in production of light-weight building bricks, *Constr. Build. Mater.* 94 (2015) 521–527.
- [23] S. Siddiqua, P.N.M. Barreto, Chemical stabilization of rammed earth using calcium carbide residue and flyash, *Constr. Build. Mater.* 169 (2018) 364–371.
- [24] R.A. Silva, E. Soares, D.V. Oliveira, T. Miranda, N.M. Cristelo, D. Leitao, Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation, *Constr. Build. Mater.* 75 (2015) 349–358.
- [25] J. Rivera, J. Coelho, R. Silva, T. Miranda, F. Castro, N. Cristelo, Compressed earth blocks stabilised with glass waste and flyash activated with a recycled alkaline cleaning solution, *J. Clean. Prod.* 284 (2021) 124783.
- [26] D. Leitao, J. Barbosa, E. Soares, T. Miranda, N. Cristelo, A. Braga-Sa, Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated flyash, *Energ. Buildings* 139 (2017) 44–52.
- [27] Boussaa Nadia, Kheloui Fatma, Chelouah Nasser: Mechanical, thermal and durability investigation of compressed earth bricks stabilised with wood biomass ash. *Construction and Building Materials* 364 (2023) 129874.