



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 de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structures

Thème

**Effet de l'incorporation des déchets de mousse de
polyuréthane dans le plâtre**

Réaliser par :

*BOUKECHA Mouna
ISSAD Radea*

Promoteur :

Mme MEZIANI. M

Devant le jury :

*A. LAICHAOUI
A. OURABAH*

PROMOTION : JUIN 2024

REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord Dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la volonté pour mener à bien ce travail.

*Nous exprimons nos vifs remerciements, notre profonde gratitude et notre reconnaissance à notre encadrante **Mme MEZIANI Meriem**, pour sa précieuse contribution tout au long de notre mémoire. Ses conseils éclairés, son expérience et son dévouement ont grandement enrichi notre expérience de recherche et ont joué un rôle essentiel dans notre réussite.*

Nos remerciements vont également au technicien de laboratoire pédagogique du département de Génie Civil pour son aide et ses précieux conseils.

Nous adressons également notre gratitude à tous nos enseignants durant nos cursus universitaires pour leurs disponibilités et leurs précieux conseils.

Nos tendresses les plus profondes à nos très chères familles pour leurs soutiens tout au long de cette étude.

Enfin à tous ceux qui nous ont soutenus durant ce travail directement et indirectement, par leur amitié et leur sympathie.

Dédicace

Merci DIEU le tout miséricordieux, ton amour et tes grâces à mon égard m'ont donné la persévérance et le courage pour accomplir ce travail.

*Je dédie ce mémoire à mes parents spécialement
Sans eux jen'aurai certainement pas fait cela.*

A mes précieuses sœurs : Nadjet, Meriem, Zina

A mes deux très chers frères : Sid Ali, Riad

*A mes très chers cousins : Lotfi, Merouane,
Ghani,*

*A mes chers(e) amis(e) : Naima, Wissam, Lynda,
Manissa, Amira, Loucif*

MOUNA

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A Mes très chers Parents,

*Pour l'amour qu'ils m'ont toujours donné, leurs
encouragements et toute l'aide qu'ils m'ont apportée durant
mes études.*

*Puisse Dieu leur accorder santé, bonheur, prospérité et
longue vie afin que je puisse un jour combler de joie leur
vieux jours*

A Mes frères,

SAMIR et YOUNES et Yallas

A Mes chères Sœur et leurs maris

*Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout
au long de mes études.*

A Mon Neveu et Ma Nièce

Daniel & Miral

RADEA

Résumé

Les chercheurs en Génie civil ont conforté un défi de reformer les déchets industriels en matériaux de construction, dans le but de remplacer progressivement les matériaux classiques par de nouveaux matériaux élargissant, ainsi considérablement la capacité de répondre aux nouvelles exigences des consommateurs et de limiter les risques menaçant l'environnement. Pour ces raisons, on a essayé de valoriser les déchets polymères plus précisément la masse de polyuréthane comme remplaçant partiel au plâtre pour la formulation des plâtres pris (pâte de plâtre durcie).

Dans cette recherche, nous avons entrepris une étude approfondie de l'effet de l'incorporation de la mousse polyuréthane dans le plâtre, à des teneurs allant jusqu'à 90%, dans l'objectif principal était d'évaluer les changements des propriétés physiques et mécaniques. Pour ce faire, nous avons mené une série d'expériences rigoureuses, incluant des tests de résistance mécanique, des mesures des grandeurs physiques à savoir : la densité, la porosité, l'absorption d'eau, la capacité de rétention d'eau et des analyses thermique et hygrométrique.

Les résultats ont révélé une diminution significative de la densité apparente et de la conductivité thermique accompagnée d'une augmentation significative de la capacité de rétention d'eau avec l'augmentation de la proportion de mousse polyuréthane dans les mélanges, tout en maintenant une résistance mécanique adéquate pour certaines applications spécifiques.

Abstract:

Civil engineers have been faced with the challenge of reforming industrial waste into building materials, with the aim of gradually replacing traditional materials with new ones that considerably expand the capacity to meet new consumer demands and limit the risks threatening the environment.

For these reasons, we have tried to valorize polyurethane foam waste as a partial replacement for plaster in the formulation of plaster paste.

In this research, we undertook an in-depth study of the effect of incorporating polyurethane foam into plaster with mixtures of up to 90% foam, with the main aim of assessing changes in physical and mechanical properties. To this end, we conducted a series of rigorous experiments, including mechanical strength tests, measurements of physical properties such as density, porosity, water uptake (absorption), water retention capacity, and thermal and hygrometric analyses.

The results revealed a significant decrease in bulk density and thermal conductivity, accompanied by a significant increase in water retention capacity as the proportion of polyurethane foam in the mixture increased, while maintaining adequate mechanical strength for some specific applications.

Table de matières

Introduction générale.....	1
1 Chapitre I.....	3
1.1 Introduction :	4
1.2 Généralités sur le plâtre :	4
1.2.1 Définition :	4
1.2.2 Fabrication :.....	4
1.2.2.1 Extraction de gypse (matière première) :.....	4
1.2.2.2 Le concassage :	5
1.2.2.3 La cuisson :	5
1.2.2.4 Le broyage :	6
1.2.2.5 Conditionnements et logistique :	6
1.2.3 Historique :	7
1.2.4 Evaluation de l'utilisation de plâtre :	8
1.2.4.1 En cimenterie :	8
1.2.4.2 En industries chimiques	9
1.2.4.3 En agriculture et engrais	9
1.2.4.4 En industries alimentaires	10
1.2.4.5 En construction et urbanisme	10
1.2.4.6 En Construction :	10
1.2.4.7 En urbanisme :	11
1.2.4.8 Autres utilisations :	11
1.2.5 Fabrication de plâtre pris :.....	12
1.2.6 Microstructure du plâtre pris :.....	13
1.2.7 Comportement de plâtre :.....	13
1.2.7.1 Comportement mécanique du plâtre sec :	13
1.2.7.2 Comportement mécanique du plâtre en présence d'eau :	14
1.2.7.3 Comportement physique :	14
1.2.7.4 Comportement hygrométrique :.....	15
1.2.7.5 Comportement thermique au feu :	16
1.3 Généralités sur les déchets :.....	16
1.3.1 Définition d'un déchet selon la norme algérienne :	16
1.3.2 Classification :.....	17
1.3.2.1 Les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux :.....	17

Table de matières

1.3.2.2	Les déchets ménagers et assimilés (déchet non dangereux) :.....	17
1.3.2.3	Les déchets inertes :.....	18
1.3.3	Gestion :	19
1.3.4	Recyclage :	20
1.3.5	Réutilisation :	20
1.4	Principales sources de production des déchets du secteur de la construction :	21
1.5	Valorisation et recyclage des déchets dans les matériaux de construction :	21
1.5.1	Les plastiques :	22
1.5.1.1	La mousse polyuréthane :	22
1.5.1.2	Méthodes de recyclages de la mousse polyuréthane :.....	23
1.5.1.3	Application dans les matériaux de construction :	24
1.6	Conclusion :.....	24
2	Chapitre II.....	26
2.1	INTRODUCTION :.....	27
2.2	Caractérisation des matériaux :.....	27
2.2.1	Le plâtre :	27
2.2.1.1	Masse volumique apparente et absolue :	28
2.2.1.2	Masse volumique apparente :.....	29
2.2.1.3	Masse volumique absolue : (NFP 18-558).....	30
2.2.1.4	Distribution granulométrique :.....	31
2.2.1.5	Surface spécifique (surface Blaine)	33
2.2.2	La mousse polyuréthane :.....	35
2.2.2.1	La masse volumique apparente :.....	36
2.2.2.2	Capacité d'absorption d'eau (eau de gâchage) :	36
2.2.3	Diffraction des rayons X (DRX) :.....	37
2.2.4	Infrarouge :.....	39
2.3	Fabrication et conservation des pâtes de plâtre :	41
2.3.1	Essai Etalement :	45
2.3.2	Essai de prise :.....	45
2.4	Caractérisation des pâtes à l'état durci	47
2.4.1	Porosité, densité apparente et absorption d'eau	47
2.4.2	Coefficient d'absorption d'eau par capillarité :.....	48
2.4.3	Rétention d'eau :	49
2.4.4	Module de Young :.....	49
2.4.5	Résistance mécanique en flexion :	50

Table de matières

2.4.6	Résistance mécanique en compression :	51
2.4.7	Conductivité thermique	52
2.5	Conclusion :	54
3	Chapitre III.....	55
3.1	Introduction :	56
3.2	Résultats des essais physiques	56
3.2.1	Etat frais :	56
3.2.1.1	La masse volumique :	56
3.2.1.2	Etalement :	57
3.2.1.3	La prise :	58
3.2.2	Etat durci :	59
3.2.2.1	Porosité :	59
3.2.2.2	Densité apparente :	60
3.2.2.3	Absorption d'eau :	60
3.2.2.4	Coefficient d'absorption d'eau par capillarité :	61
3.2.2.5	Rétention d'eau :	62
3.2.3	Résultats des essais mécaniques.....	63
3.2.3.1	La flexion :	63
3.2.3.2	La compression :	64
3.2.3.3	La conductivité thermique :	65
3.2.4	Le module de Young	66
3.2.5	Valeur de la capacité tampon hydrique (MBV)	68
3.2.6	Infrarouge :	69
3.3	Conclusion	71
	Conclusion générale	73

Liste des figures

Figure 1-1 : Image MEB des plâtres obtenus respectivement par voie humide (α) et par voie sèche (β) [3]	6
Figure 1-2 : la procédure de fabrications de plâtre	7
Figure 1-3 : Cycle des systèmes sulfates de calcium— eau [7]	12
Figure 1-4 : : Projection de la structure du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ par WOOSTER en 1936	13
Figure 1-5 : : Types et classification des déchets (Agacem et Boudouaya, 2016) [13]	19
Figure 1-6 : Image MEB de la mousse.....	22
Figure 1-7 : formation chimique de polyuréthane.....	23
Figure 2-1 : Le plâtre utilisée	28
Figure 2-2 : Masse volumique apparente.	29
Figure 2-3 : : la masse volumique absolue (le pycnomètre)	30
Figure 2-4 : L’essai sédimentométrique.....	32
Figure 2-5 : : courbe de l’analyse sédimentométrique de plâtre	32
Figure 2-6 : Perméabilimètre de BLAINE	34
Figure 2-7 :Les broyats de déchets de mousse polyuréthane.....	35
Figure 2-8 : Echantillons de mousse polyuréthane.....	36
Figure 2-9 : appareil DRX	37
Figure 2-10 : Analyse DRX de la poudre de plâtre	38
Figure 2-11 :: Analyse DRX de la mousse polyuréthane.....	38
Figure 2-12 : Préparation de la pastille pour essai Infrarouge	39
Figure 2-13 : Analyse infrarouge de poudre de plâtre	40
Figure 2-14 : Infrarouge de la mousse polyuréthane	40
Figure 2-15 : Essai de consistance du plâtre de référence (P0)	43
Figure 2-16 :Fabrication et conservation des pâtes de plâtre avec/sans la mousse polyuréthane	44
Figure 2-17 : Essais de consistances des mélanges plâtre \neg -mousse	45
Figure 2-18 : Essai de pris.....	47
Figure 2-19 : Procédures des essais de porosité, densité et absorption d’eau	48
Figure 2-20 : Essai d’absorption d’eau par capillarité	48
Figure 2-21 : Essai ultrason.....	50
Figure 2-22 : Essai de résistance à la flexion.....	51
Figure 2-23 : Schéma mécanique de l’essai de rupture par flexion	51
Figure 2-24 : Essai de résistance à la compression	53
Figure 2-25 : Dispositif de l’essai de rupture par compression	53
Figure 2-26 : Appareil CT-mètre	53
Figure 2-27 : Essai MBV.....	54
Figure 3-1 : la masse volumique des différentes substitutions de mélange plâtre et la mousse de polyuréthane.	56
Figure 3-2 : l’influence de la mousse polyuréthane sur la consistance de plâtre.....	57
Figure 3-3 : Influence de la mousse polyuréthane sur la prise de plâtre.....	58
Figure 3-4 : Porosité des différentes formulations	59
Figure 3-5 : Densité apparentes des différentes mélanges	60
Figure 3-6 : Absorption d’eau des différentes formulations	61
Figure 3-7 : Coefficient d’absorption d’eau par capillarité.....	62
Figure 3-8 : Rétention d’eau	63
Figure 3-9 : Résistance à la flexion (R_f)	64
Figure 3-10 : Résistance à la compression (R_c)	65
Figure 3-11 : Résultats de la conductivité thermique.....	66

Liste des figures

Figure 3-12 : Vitesses d'ondes sonique longitudinale (V_l) et transversale (V_t)	67
Figure 3-13 : Module de Young longitudinal et transversal	68
Figure 3-14 : Capacité tampon hydrique des différents mélanges.....	68
Figure 3-15 : Classification des valeurs MBV selon le Nordtest Project [Rode et al., 2005]	69
Figure 3-16 : Analyse infrarouge de pâte de plâtre	69
Figure 3-17 : Analyse infrarouge des mélanges plâtre et mousse polyuréthane (P30, P50, P60 et P70)	70

Liste des tableaux

Tableau 2-1 :: Composition chimique de plâtre	39
Tableau 2-2 : Masse volumique apparente.	41
Tableau 2-3 : Masse volumique absolue.....	42
Tableau 2-4 : Temps d'écoulement de l'air	46
Tableau 2-5 : Masse volumique de la mousse polyuréthane	47
Tableau 2-6 : rapport volumique entre la poudre de plâtre et les broyats de déchets de mousse polyuréthane	53
Tableau 2-7 : Diamètre moyen de la galette d'étalement de la pâte de plâtre de référence	55

Notation et symbole

Notation et symbole :

Symbole	Désignation	Unités
ρ_a	Masse volumique apparente	Kg/m^3
ρ_s	Masse volumique absolue	Kg/m^3
P/E	Le rapport de plâtre / eau	/
R_f	Resistance a la flexion	MPa
Rc	Resistance a la compression	MPa
λ	Conductivité thermique	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$
ϕ	Diamètre	mm
W	Absorption d'eau	%
S	Surface spécifique (surface Blaine)	g/cm^2
MBV	Moisture Buffer Value	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{RH})$
C	Capillarité	$\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})$
DRX	Diffraction de Rayon X	θ
IFR	Infrarouge	cm^{-1}

Introduction générale

Les récents développements menés dans le domaine des matériaux de construction, concernant notamment les matériaux composites incorporant des déchets dans leurs composition et visant à déterminer la comptabilité de ces déchets avec la matrice dans laquelle ils sont intégrés, ont un objectif commun d'obtenir de nouveau produit répondant à la demande de l'industrie de la construction.

Sous la dénomination de déchet cohabitent aujourd'hui à la fois un déchet dit ultime, destiné à sortir définitivement du circuit par l'élimination, et un déchet valorisable, doté d'une valeur marchande et destiné à être réintroduit dans le circuit économique.

Les déchets à base de plastique constituent une alternative intéressante qui peut augmenter la performance des mortiers. Effectivement, il est toujours possible de trouver ces déchets dans notre pays, en particulier dans le nord algérien. Et leurs utilisations représentent une solution efficace pour l'industrie en termes technologique, économique et environnemental.

L'incorporation de la mousse polyuréthane dans le plâtre peut offrir des avantages synergiques, mais peut également présenter des défis, notamment en ce qui concerne la réaction chimique entre eux et leur impact sur les propriétés finales du produit.

L'objectif de cette étude est l'analyse en profondeur de l'effet d'incorporation de la mousse polyuréthane dans le plâtre, en examinant comment cela affecte la résistance mécanique et les caractéristiques physiques, thermique et hygrométrique.

Le premier chapitre de ce mémoire a été consacré à une recherche bibliographique sélective comprenant un aperçu sur le plâtre ; ses origines, ses différents types de fabrication et l'historique de son emploi dans le monde. Nous avons enchaîné par la suite à définir les déchets plastiques ; leurs taux de production et leur recyclage, leurs composition chimique et l'utilisation de la mousse de polyuréthane.

Le deuxième chapitre a été dédié à une étude expérimentale approfondie, mettant en œuvre des tests de laboratoire pour évaluer les propriétés mécanique et physique du plâtre enrichi de mousse polyuréthane. Nous chercherons à comprendre comment cette combinaison modifie la résistance, la flexibilité, et d'autres caractéristiques essentielles du matériau.

Le troisième et dernier chapitre présente une analyse des résultats obtenus accompagnés des interprétations appropriées à chaque essai mettant en évidence les implications pratiques de cette recherche dans divers domaines d'application tels que la construction, art et artisanat, ingénierie et prototypage, restauration.

Nous terminerons ce modeste projet par une conclusion générale.

1 Chapitre I

Recherche bibliographique

1.1 Introduction :

Les applications du plâtre dans le domaine de la construction est très ancienne. Il est prouvé que le plâtre était déjà utilisé comme matière première dans la fabrication d'enduits en l'an 7000 avant [1]. Ce chapitre nous fait recherche générale sur notre étude.

Dans la première partie il est nécessaire de faire le point sur différentes connaissances tel que la définition générale et les étapes de fabrication de plâtre, les différents domaines d'utilisations notamment la construction et ces caractéristiques de construction.

Dans la deuxième partie vise à contribuer au développement durable des déchets et leurs classifications selon les normes algériennes et le rôle de la valorisation des déchets dans le domaine de la construction, on s'intéresse sur le recyclage des plastiques et le polyuréthane.

1.2 Généralités sur le plâtre :

1.2.1 Définition :

Le gypse constitue la matière première du plâtre. Le di-hydrate de sulfate de calcium (gypse) déshydraté par une cuisson au four, se transforme en plâtre ou héli-hydrate de sulfate de calcium. La structure et les caractéristiques physiques de l'héli-hydrate obtenu (α ou β) vont dépendre des conditions de cuisson à savoir la température, la pression, l'environnement etc.... [2].

1.2.2 Fabrication :

La fabrication de plâtre passe par plusieurs étapes depuis l'extraction du gypse jusqu' à l'obtention du plâtre prêt à l'emploi. Voici un aperçu du processus de fabrication du plâtre :

1.2.2.1 Extraction de gypse (matière première) :

La pierre de plâtre se trouve dans la nature sous deux formes :

- Une forme cristalline : le gypse ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau très abondante ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$; 79 % $CaSO_4$ et 21% H_2O)
- Une forme anhydre, anhydrite ou sulfate de calcium ($CaSO_4$; d=2 ,90), plus rare associé au sel gemme ou à la marne.

Sous sa forme cristalline, le gypse est constitué de feuillets facilement clivables en lamelles souples et flexibles ou d'agrégats cohérents avec une structure fibreuse. Les cristaux sont souvent gros, généralement aplatis ou prismatiques et allongés parallèlement.

1.2.2.2 Le concassage :

Le concassage est le procédé de réduire la taille du gypse issu de la carrière en produits plus fins. Après broyage, il ne reste généralement aucun bloc de plus de 100 mm de diamètre.

Ce gypse peut donc être transporté, par exemple, sur un tapis et envoyé en usine pour un traitement ultérieur.

1.2.2.3 La cuisson :

Selon les conditions de pression et de vapeur d'eau imposées, on distingue deux principes de cuisson :

- La cuisson par voie sèche (la plus utilisée, car moins coûteuse), est réalisée à la pression atmosphérique ou sous une faible pression partielle de vapeur d'eau. Vers des températures de 140 à 170 °C, l'eau du gypse s'élimine à l'état de vapeur sèche et donne un solide microporeux constitué d'un assemblage de microcristaux, (figure I.1), c'est l'hemi hydrate β , il nécessite un taux de gâchage $e/p < 0,6$. Il s'agit du composé principal de plâtres courants utilisés en tant que matériau de construction. Par chauffage vers 400 à 600 °C on obtient de l'anhydrite II, (CaSO_4).
- La cuisson par voie humide qui s'effectue sous pression saturante de vapeur d'eau dans des autoclaves sous 2 à 7 bars pendant quelques heures. Le produit obtenu est l'hemi hydrate α , il nécessite un taux de gâchage faible $e/p = 0,4$ et donne des plâtres dits "durs" ayant de très bonnes résistances mécaniques. Les plâtres courants qui se présentent sous forme d'une poudre blanche sont constitués soit :
 - d'hemi hydrate β ($\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$) qui est le principal constituant des plâtres ; la formule correspondant à 93,79% de sulfate de calcium CaSO_4 et 6,21% d'eau de cristallisation.
 - D'un mélange d'hemi hydrate β avec de l'anhydrite II (CaSO_4) dans la proportion d'environ 2/3 d'hemi hydrate et 1/3 d'anhydrite II, il est à noter que plus la proportion d'anhydrite II est importante plus le durcissement est étalé dans le temps.
 - D'hemi hydrate α , compact, cristallin, faiblement soluble dans l'eau [3].

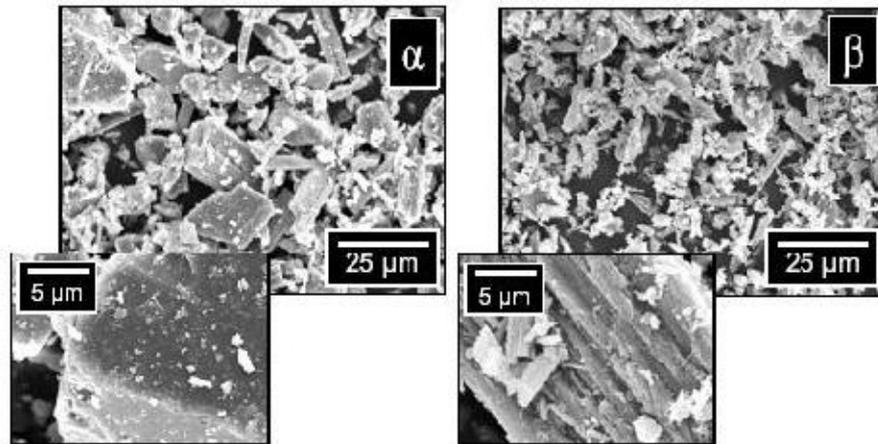


Figure 1-1 : Image MEB des plâtres obtenus respectivement par voie humide (α) et par voie sèche (β) [3]

1.2.2.4 Le broyage :

Le plâtre est réduit en particules de 200 μm grâce à un système de marteaux en rotation à l'intérieur d'un tamis (garantie d'une granulométrie maximale).

1.2.2.5 Conditionnements et logistique :

Le conditionnement et la logistique de plâtre impliquent plusieurs étapes cruciales pour garantir que le produit arrive en bon état chez le consommateur final. Voici une vue d'ensemble des processus typiques :

- Conditionnement de plâtre :
 - Production et traitement (extraction, broyage, cuisson)
 - Emballage
 - Etiquetage
- Logistique de plâtre
 - Stockage
 - Transport
 - Gestion de la chaîne d'approvisionnement
 - Livraison [3]

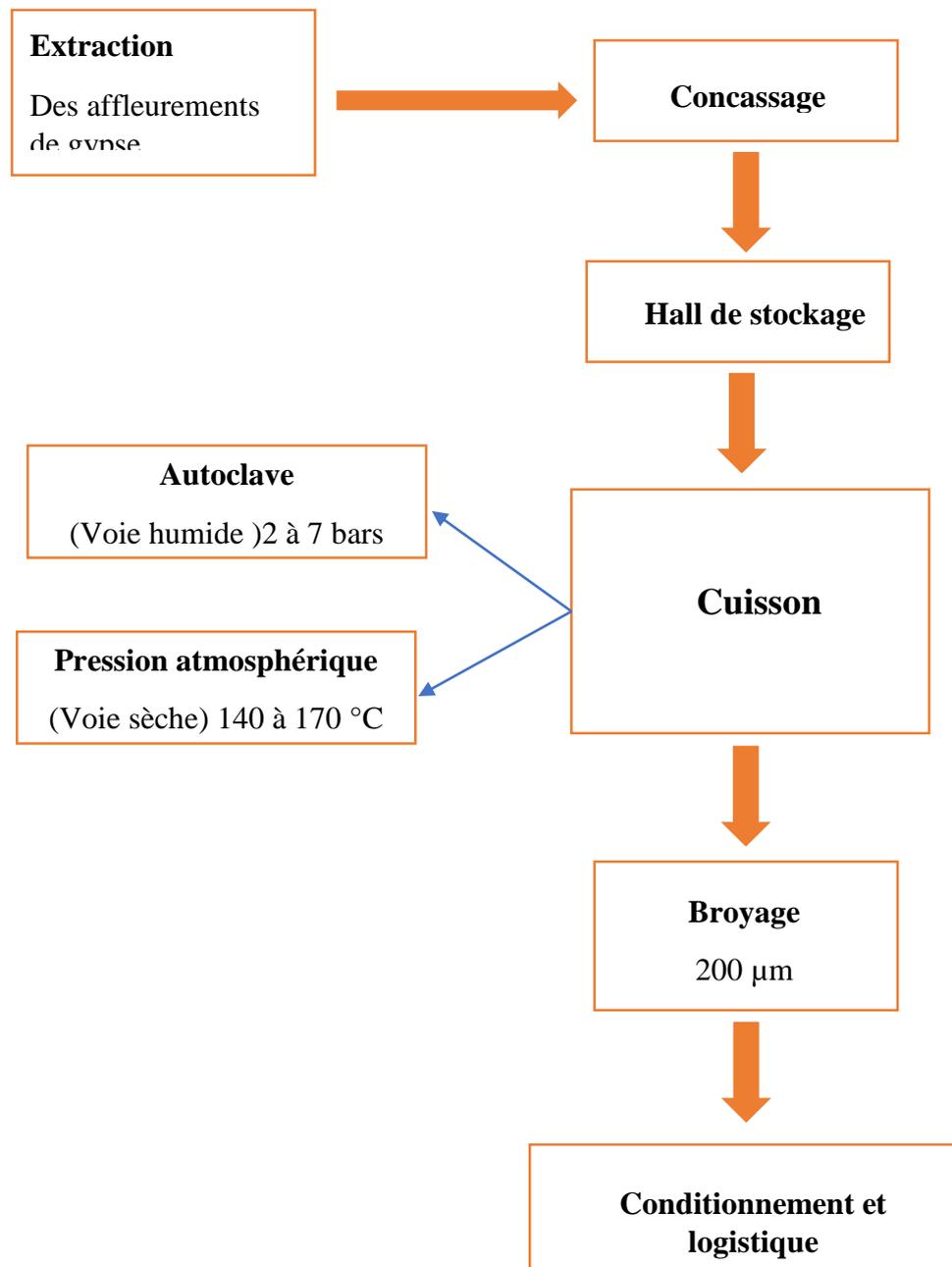


Figure 1-2 : la procédure de fabrications de plâtre

1.2.3 Historique :

Le plâtre est un des plus vieux matériaux de construction utilisé par l'Homme, avec la chaux et la terre cuite. Les premiers signes d'emploi de plâtre remontent à environ 9000 ans, sous forme de support pour fresques murales (fouilles en Anatolie). La faible température nécessaire à la production de poudre de plâtre et l'abondance de gypse naturel dans la nature expliquent cette ancienneté.

d'utilisation. L'un des premiers exemples d'utilisation du plâtre en construction est l'assemblage de blocs de pierre constituant la grande pyramide de Khéops en Egypte.

Plus récemment, la généralisation de l'emploi du plâtre est liée à un édit de Louis XIV promulgué en 1667, imposant l'utilisation d'un enduit de plâtre dans les maisons à ossature de bois. Cet édit faisait suite à l'incendie de Londres en 1666, le plâtre étant déjà connu pour sa résistance au feu.

Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduits, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons). C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation en intérieur, grâce à ses propriétés d'isolation thermique et acoustique et sa résistance au feu. La conductivité thermique d'un enduit de plâtre est de l'ordre de $0,26 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$, contre $1,15 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ pour un enduit de ciment ou $50 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$ pour de l'acier.

Ces propriétés s'expliquent par la très grande porosité du matériau (l'air est un excellent isolant) et par la 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 m^2 et de 10 mm d'épaisseur représente une réserve d'eau de 1,4 litres [4], qui vont se dégager et limiter la progression du feu, sans aucun dégagement de gaz toxiques ou de fumées. [5]

1.2.4 Evaluation de l'utilisation de plâtre :

1.2.4.1 En cimenterie :

Le plâtre ou sulfate de calcium dihydraté, ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) peut avoir plusieurs effets sur la prise et la résistance du ciment.

1.2.4.1.1 Effet sur la prise du ciment :

- **Accélération de la prise :** Le plâtre est souvent utilisé comme un régulateur de prise dans le ciment. Il contrôle le temps de prise initial en ralentissant la réaction du tricalcium aluminate (C_3A) avec l'eau. Sans l'ajout de plâtre, le (C_3A) réagirait très rapidement, ce qui entrainerait une prise très rapide du ciment.
- **Quantité de plâtre :** une quantité adéquate de plâtre permet de prolonger le temps de prise initial du ciment, permettant un temps de travail suffisant pour mélanger, le transport et le placement du béton. Toutefois, un excès de plâtre peut entrainer une prise retardée ou une prise irrégulière.

1.2.4.1.2 Effet sur la résistance du ciment :

- **Résistance initiale** : l'ajout de plâtre peut influencer la résistance initiale du ciment. En régulant la prise, il permet un développement uniforme de la structure cristalline du ciment, ce qui peut améliorer la résistance initiale.
- **Résistance à long terme** : si la quantité de plâtre est très élevée, il peut y avoir une formation excessive de produits d'hydratation qui peuvent mener à une résistance inférieure à long terme.

1.2.4.2 En industries chimiques

Les sulfates de calcium naturels ou artificiels sont utilisés comme matière première pour la fabrication de nombreux produits chimiques d'application industriels

Voici quelques-unes des principales utilisations :

- Production de sulfure d'hydrogène (H_2S)
- Agent de charge et additif
- Traitement des eaux
- Agent de contrôle du P^H
- Fabrication de ciment
- Fabrication de produit chimique (le chlorure de calcium ($CaCl_2$) le nitrate de calcium [$Ca(NO_3)_2$]).

1.2.4.3 En agriculture et engrais

Les épandages de gypse broyé sur terrains agricoles peuvent présenter plusieurs avantages sur le plan agronomique. En effet, le gypse apporte une correction des sols salins ou alcalins qui se trouvent en région arides ou semi arides et en bordure de mer. Le chlorure de sodium ($NaCl$) possède une action inhibitrice ou asphyxiante sur la croissance des plants et créant des sols dur et grossiers par défloculation des argiles ; le gypse en solution permet un remplacement des cations Na^+ par Ca^{2+} , ce qui fait flocculer les argiles et rend le sol plus aéré et léger, par ailleurs l'alcalinité est réduite et la teneur en calcium assimilable augmente.

1.2.4.4 En industries alimentaires

Le gypse est utilisé pour la purification des eaux de brasserie grâce à son pouvoir flocculant. Il peut également être employé pour réduire la teneur en tartre et contrôler la clarté des vins.

Dans l'alimentation animale, le gypse broyé sert dans la préparation de nourritures pour bétail, il pallie le manque de soufre et évite l'utilisation de matières azotées pour améliorer les fourrages de qualité médiocre.

1.2.4.5 En construction et urbanisme

Actuellement, le plâtre a des utilisations assez diversifiées, soit en construction ou bien en urbanisme.

1.2.4.6 En Construction :

Le plâtre est un matériau de construction très polyvalent utilisé depuis des millénaires. Voici quelque unes de ses principales utilisations en construction :

- Revêtement des murs et plafonds ;
- Plaques de plâtre ;
- Moulures et éléments décoratifs ;
- Construction préfabriquée ;
- Isolation thermique et phonique ;
- Réparations et rénovations.

✚ Avantage du plâtre :

- Finition lisse
- Résistance au feu
- Régulation de l'humidité

✚ Inconvénients du plâtre :

- Fragilité
- Sensibilité à l'eau

1.2.4.7 En urbanisme :

L'utilisation du plâtre en urbanisme a plusieurs applications, reflétant ses propriétés uniques et ses avantages distincts. Voici un aperçu des principaux usages et bénéfices du plâtre dans le contexte urbain

- Construction et rénovation des bâtiments ;
- Restaurations architecturales ;
- Décoration et design intérieure ;
- Urbanisme paysager.

1.2.4.8 Autres utilisations :

Le caractère neutre et inerte de gypse, sa faible abrasivité à être finement broyé, ainsi que sa blancheur qui peut être élevée, en font un bon produit de charge dans les secteurs industriels suivants :

- Peintures et colles, pâtes à moduler.
- Papiers, tissus.
- Verrerie.
- Insecticides en poudre.
- Pharmacie, Prothèse dentaire, chirurgie.

L'anhydrite broyée peut également s'employer en charge, dans les peintures et papiers, les cartons bitumés et les bitumes pour revêtements routiers. [6]

1.2.5 Fabrication de plâtre pris :

Le plâtre pris est obtenu en hydratant la poudre de semi-hydrate ou hémihydrate (souvent appelée poudre de plâtre), elle-même produite à partir de gypse extrait en carrière ou d'origine artificielle. Par exemple, les centrales thermiques sont une source importante de désulfo-gypse, obtenu à partir de l'épuration de gaz sulfurés. Le phospho-gypse, issu de l'industrie des phosphates, est également

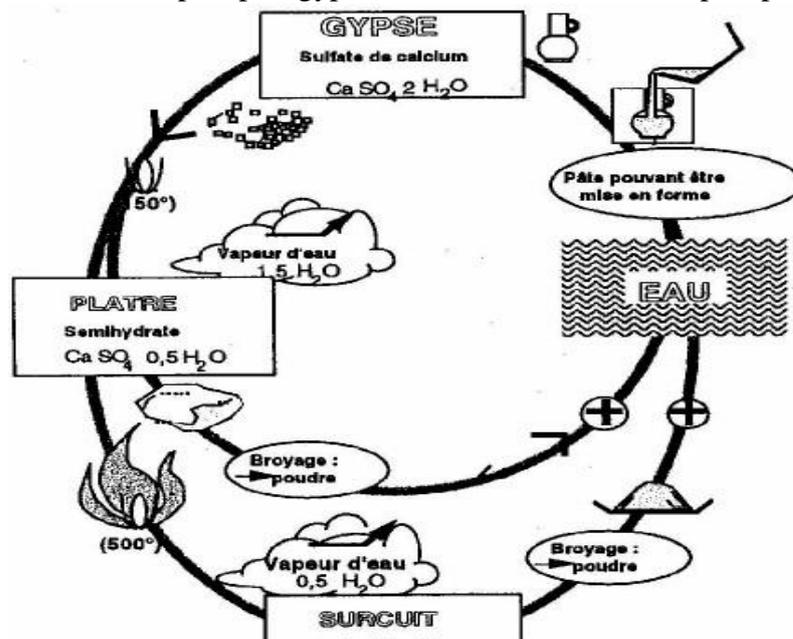


Figure 1-1 : Cycle des systèmes sulfates de calcium— eau

[7]

couramment utilisé. Le cycle des sulfates de calcium dans l'eau est présenté dans la (**Figure1.3**). Le gypse naturel ou artificiel est chauffé pour donner du semi-hydrate ou poudre de plâtre. Celle-ci est ensuite gâchée avec de l'eau pour former du plâtre pris de même formule chimique que le gypse de départ. Le rapport minimal entre la masse d'eau et la masse de poudre de plâtre (rapport E/P) nécessaire à l'hydratation est de 18,6% en masse ($E/P = 0,186$). Les plâtres sont habituellement gâchés à des rapports E/P plus élevés (typiquement égal à 0,8) pour obtenir une pâte fluide et facile à utiliser. Toutefois, plus la quantité d'eau utilisée pour le gâchage est importante, plus le matériau final est poreux, entraînant une diminution des propriétés mécaniques.[7]

1.2.6 Microstructure du plâtre pris :

Elle est constituée de feuillets comme la montre la (**Figure I.4**), chaque molécule d'eau est liée à un atome de calcium et à un atome d'oxygène de son feuillet, et encore à un atome du feuillet adjacent, dans la structure du gypse on retrouve deux types de liaisons chimiques :

- Des liaisons ioniques (fortes) dans les feuillets $Ca^{2+}SO_4^{2-}$ dues aux différences de charges électriques.
- Des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions desulfate. L'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion de calcium, celles-ci sont beaucoup moins fortes que les liaisons ioniques $Ca^{2+}SO_4^{2-}$. [7].

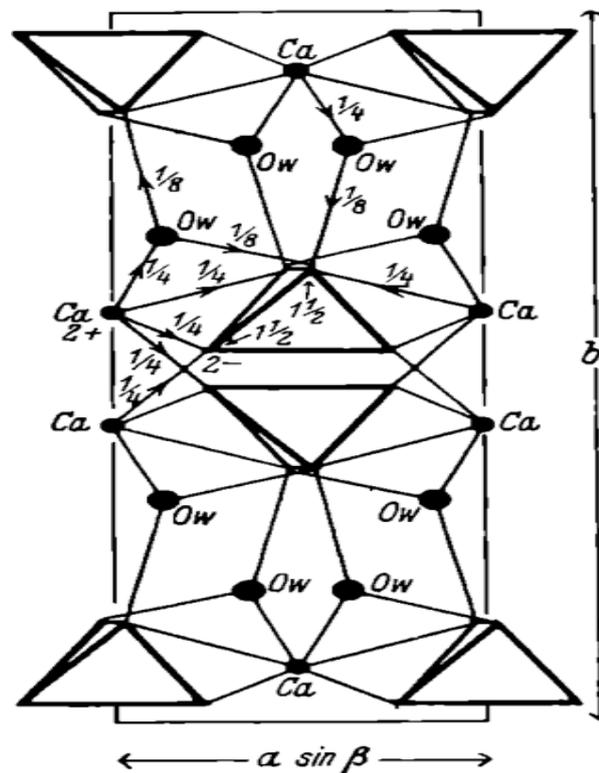


Figure 1-2 : : Projection de la structure du gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ par WOOSTER en 1936

1.2.7 Comportement de plâtre :

1.2.7.1 Comportement mécanique du plâtre sec :

Le plâtre est considéré être à l'état sec lorsqu'il subit un séchage en étuve à 45°C et une humidité relative de 20% jusqu'à masse constante. Il est très important de fixer un protocole de séchage car l'humidité influence très nettement les propriétés mécaniques du plâtre.

La loi de comportement du plâtre pris sec est traditionnellement enregistrée en flexion 3 ou 4 points. Le comportement obtenu est linéaire, avec une rupture brutale et fragile, quelle que soit la vitesse d'essai imposée. Les premières propriétés étudiées sont les plus facilement mesurables : dureté, module d'Young et contrainte à la rupture. Afin de les relier à la structure du matériau, le paramètre le plus simple et le plus couramment utilisé est la porosité totale. Elle est habituellement déterminée à partir des densités du gypse pur et du plâtre ou en tenant compte de la masse minimale d'eau nécessaire à l'hydratation du semi-hydrate. Une relation entre les propriétés mécaniques et la porosité totale est alors déterminée.

1.2.7.2 Comportement mécanique du plâtre en présence d'eau :

Après la détermination des propriétés du plâtre pris sec, il convient d'étudier l'effet de l'humidité. L'influence néfaste de l'eau sur les propriétés mécaniques du plâtre pris est bien connue : dans une atmosphère humide ou après une inondation, des plaques de plâtre installées au plafond d'une pièce se voilent sous leur propre poids. [7]

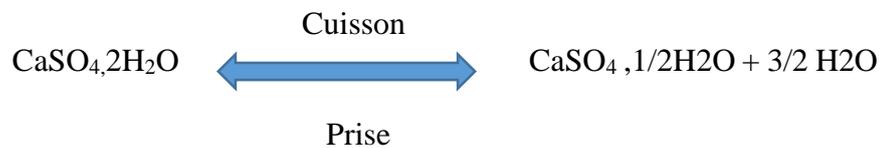
1.2.7.3 Comportement physique :

a) La prise :

Les produits résultant de la déshydratation thermique du gypse ont la propriété, lorsqu'ils se trouvent au contact de l'eau, de retrouver leur degré d'hydratation initiale et de reconstituer du gypse. Ce phénomène s'appelle la prise du plâtre. Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour décrire ce processus qui se déroule en trois étapes successives :

- Reprise de l'eau pour reformer le dihydrate.
- Cristallisation (qui constitue la prise proprement dite).
- Durcissement.

La prise est la réaction inverse de la cuisson.



b) Durcissement

Le processus de durcissement comporte trois phases :

- Dissolution des produits du semi-hydrate de Ca ;
- L'hydratation du semi-hydrate aboutissant à la formation du double hydrate de Ca ;
- La cristallisation de l'hydrate.

➤ Facteurs influents sur la prise et le durcissement

Les temps de prise et de durcissement varient évidemment avec la nature du plâtre (présence en plus du semi-hydraté d'incuits, de surcuits ...), et avec sa finesse. Les autres paramètres importants sont les suivants :

- Quantité et nature de l'eau : plus la quantité d'eau est importante plus la prise est lente ;
- Les impuretés contenues dans l'eau peuvent modifier beaucoup les temps de prise ;

- Mode et durée de malaxage ;
- Température de l'eau. L'eau chaude agit comme un retardateur de prise ;
- Adjuvants accélérateurs de prise qui renferment le sulfate hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), les acides courants (HCl , H_2SO_4 , HNO_3), le sulfate d'alumine et de potasse ($[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3]$, $[\text{K}_2\text{SO}_4]$), les aluns, et le chlorure de sodium (NaCl) [8].
- Adjuvants retardateurs de prise qui regroupent les phosphates, les acides organiques et leurs sels solubles (acide citrique et citrates), la gélatine, la colle, la caséine, les borax, les déchets résultants de la dégradation de protéines animales ou végétales, et la chaux [8].

c) Gonflement

Le plâtre augmente de volume surtout aux premières heures (18% au début de la prise puis 19% après un jour), mais il peut après plusieurs jours ou plusieurs semaines de séchage, prendre un léger retrait par rapport au gonflement maximum atteint [8].

1.2.7.4 Comportement hygrométrique :

Du fait de sa faible conductivité thermique, le plâtre peut être employé seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois. Un enduit en plâtre appliqué sur une paroi de béton ou de terre cuite forme un revêtement continu qui améliore l'isolation thermique. Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agrégats légers ont des conductivités thermiques de l'ordre de 0,18 à 0,20 $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Ils sont spécialement conçus pour cette utilisation. Par ailleurs, en raison de sa grande résistance thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre écarte le phénomène de paroi froide [9].

➤ Capacité tampon hydrique (MBV Moisture Buffer Value)

Le plâtre est un matériau hygroscopique, ce qui signifie qu'il peut libérer de l'humidité quand l'air est sec. Aussi absorber l'humidité quand l'air est humide. Ce processus aide à stabiliser l'humidité intérieure et pour prévenir des problèmes comme la consolidation et la croissance de moisissures.[9]

1.2.7.5 Comportement thermique au feu :

Sous l'action du feu le plâtre ne donne naissance à aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant, aucune fumée, ni aucun produit de décomposition combustible ou susceptible

d'activer la combustion.

Le plâtre est incombustible. Il est de classe A, un sans essai par décision de la commission européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits appartenant aux classes A « aucune contribution à l'incendie ».[10]

1.3 Généralités sur les déchets :

1.3.1 Définition d'un déchet selon la norme algérienne :

Selon l'article L541-1-1 du code de l'environnement, le nom déchet signifie tout résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur le destine à l'abandon [11]. En outre, cette définition a pour objectif de valoriser les déchets pour réemploi, recyclage, utilisation en tant qu'ajout dans les matériaux de construction ou toute autre action visant à obtenir à partir des déchets des matériaux réutilisables ou de l'énergie, et notamment de prévenir ou réduire la production et la nocivité, en agissant sur la fabrication et sur la distribution des produits.[12]

Un Déchet de chantier désigne un déchet issu des travaux de construction, de réhabilitation et de démolition de bâtiments. Les Déchets de chantier n'incluent pas les déchets issus des travaux publics.

1.3.2 Classification :

Selon l'article 5 de la loi algérienne relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, les déchets peuvent être classifiés en trois grandes catégories.

1.3.2.1 Les déchets spéciaux y compris les déchets spéciaux dangereux :

« Tous déchets issus des activités industrielles, agricoles, de soins, de services et toutes autres activités qui en raison de leur nature et de la composition des matières qu'ils contiennent ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés et les déchets inertes ».

Déchets spéciaux dangereux : « Tous déchets spéciaux qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire à la santé publique et/ou à l'environnement ».

Exemples de déchets dangereux :

- Amiante et matériaux associés,
- Peintures et vernis à solvants non aqueux (organiques, plomb...),
- Goudron et produits associés,
- Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE),
- Silicone et produits associés,
- Bois traités et produits de traitement du bois,
- Adjuvants pour béton, pour peintures, vernis,
- Déchets de démolition mélangés, contaminés ou provenant de bâtiments industriels,
- Produits contenant des métaux lourds,
- Terres de déblais contaminées.

1.3.2.2 Les déchets ménagers et assimilés (déchet non dangereux) :

Au sens de la présente loi, on entend par déchets ménagers et assimilés : « tous déchets issus de ménages ainsi que les déchets similaires provenant des activités industrielles commerciales, artisanales et autres qui, par leur nature et leur composition, sont assimilables aux déchets ménagers ».

Exemples de déchets ménagers et assimilés :

- Déchets organiques ;
- Déchets recyclables : Plastiques (polymère, polyuréthane), papiers, carton, métaux, et verres ;
- Déchets non recyclables ;
- Déchets volumineux : vieux meubles, appareils électroménagers.

1.3.2.3 Les déchets inertes :

Le terme « **déchets inertes** » est défini comme étant « *tous déchets* provenant notamment de l'exploitation des carrières, des mines, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation, qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge, et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances, susceptibles de nuire à la santé et /ou à l'environnement ». Article 5 de la loi 01-19,

Exemples de déchets inertes :

- Pierre, béton, ciment, mortier, gravier, sable, terre non contaminée ;
- Briques, tuiles ;

- Ardoise, faïence, céramique ;
- Mélange de ces différents déchets (appelés aussi Gravats) ;
- Verre ordinaire (partie vitrage uniquement).

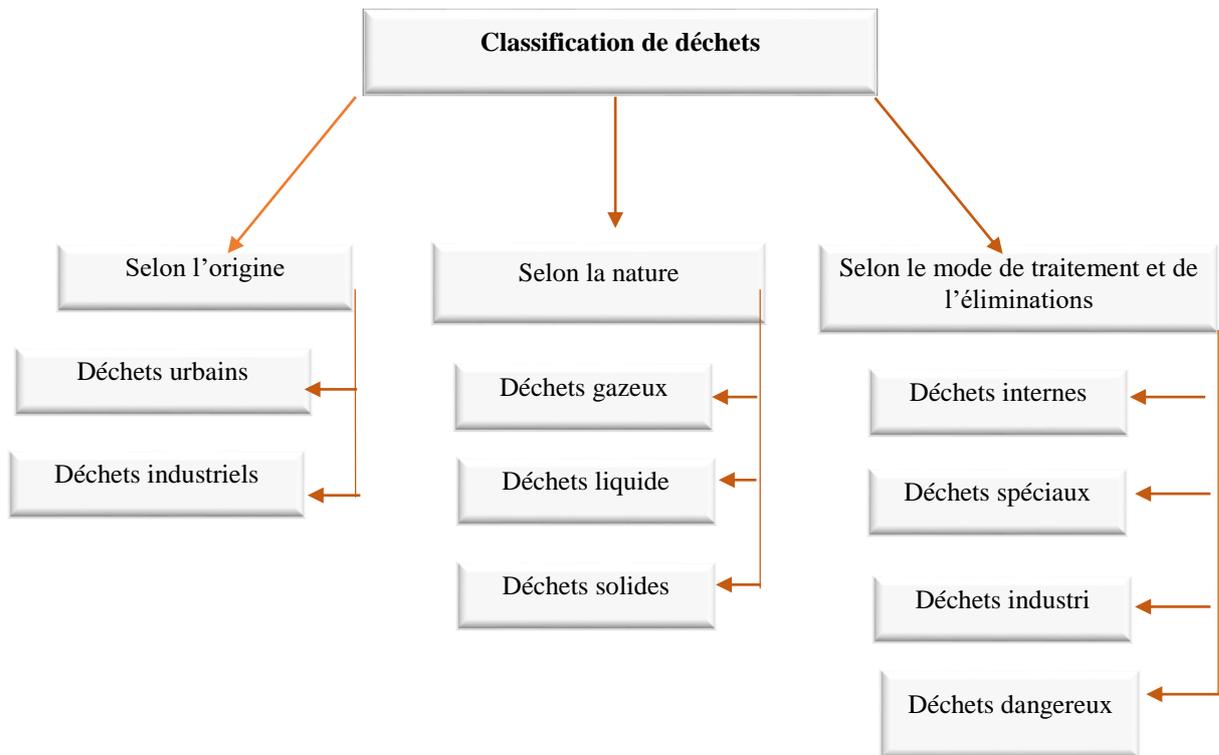


Figure 1-3 : Types et classification des déchets (Agacem et Boudouaya, 2016) [13]

1.3.3 Gestion :

La production des déchets ne fait qu'augmenter en Algérie comme partout dans le monde. Les transformations socioéconomiques et démographiques qu'a connues le pays durant ces trente dernières années ont été accompagnées par des modifications notables au niveau des quantités et de la qualité des déchets produits.

L'enquête réalisée par des services du Ministère de l'Environnement en 2005, a fait état de 2100 décharges sauvages sur le territoire national, dont 350 décharges sauvages au niveau de 40 grandes villes du pays et occupent une superficie totale de 22000 ha.

À ce jour, la principale voie de traitement des déchets en Algérie est la mise en décharge. Cette technique est souvent utilisée dans les Pays en voie de développement, mais elle aboutit souvent à des décharges incontrôlées. La notion de décharge contrôlée et les différents modes d'exploitation visant la protection de l'environnement apparaissaient pour la première fois en 1983, loi n° 83.03 du

05 février 1983, relative à la protection de l'environnement, elle précise la nocivité des déchets et demande à mettre fin à la mise en décharge brute des ordures.

En effet, la loi relative à la gestion des déchets, est une avancée qui amène des mesures positives, qui joueront un rôle dans la résorption des décharges sauvages et l'introduction de la pratique des décharges contrôlées appelée actuellement Centre de Stockage de Déchets (CSD), ou encore Centre d'Enfouissement Technique (CET), mais les textes d'application de cette dernière sont insuffisants.[14]

90 CET sont finalisés et lancés pour exploitation, et au niveau de la wilaya d'Alger, 4 CET sont en cours de lancement.

1.3.4 Recyclage :

Le recyclage consiste à transformer la matière originelle du déchet pour produire un nouveau matériau dans le but d'éviter le gaspillage pur et simple de l'objet d'origine. Cependant, l'intégrité du matériau de base est souvent mise à mal (transformation de pierre en poudre, de plastique en fibre), la quantité de matière récupérée étant faible en comparaison avec la quantité de matière fournie. À cela s'ajoute une importante dépense énergétique nécessaire pour effectuer ce procédé si bien que l'intérêt écologique même du recyclage peut être, dans bien des cas, remis en question.

Dans l'article L.541-1-1 du Code de l'Environnement, le recyclage est défini comme toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage. Le recyclage est une opération de valorisation de la matière.

1.3.5 Réutilisation :

Selon l'article L.541-1-1 du Code de l'Environnement la réutilisation est toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés à nouveau. Elle consiste à utiliser une nouvelle fois un objet, mais cette fois-ci selon les mêmes principes que sa précédente utilisation.

La réutilisation est considérée comme une technique permettant une prolongation optimale de la durée de vie d'un matériau.

La réutilisation est une opération qui s'amorce lorsqu'un propriétaire d'un bien usagé s'en défait sans le remettre directement à une structure dont l'objet est le réemploi. Le bien usagé prend alors un

statut de déchet. Il subit ensuite une opération de traitement des déchets appelée « préparation en vue de la réutilisation », lui permettant de retrouver son statut de produit. Il peut alors bénéficier à un détenteur qui lui donnera une seconde vie.

1.4 Principales sources de production des déchets du secteur de la construction :

Les déchets du secteur de la construction proviennent de plusieurs sources :

- Déchets de mise en œuvre initiale (en atelier ou sur chantier).
- Déchets liés à la rénovation / maintenance.
- Déchets liés à la démolition.
- En outre il est important de garder à l'esprit que le processus de fabrication des matériaux et composants de construction alimente aussi le flux des déchets (déchets en phase de production des produits de construction en industrie). Néanmoins une grande majorité de ces déchets sont réinjectés / réexploités dans les processus de fabrication.
- Un chantier de construction neuve produit généralement moins de déchets qu'un chantier de démolition ou de rénovation lourde. En outre, une rénovation légère est souvent à l'origine de faibles quantités de déchets.

1.5 Valorisation et recyclage des déchets dans les matériaux de construction :

La valorisation des déchets de construction est un procédé qui est en plein essor. À cet effet, le gouvernement algérien a comme objectif pour augmenter le taux de recyclage global et par matière, et d'éradiquer les décharges sauvages.

La valorisation des déchets dans le secteur de construction visant à réduire l'impact environnemental des activités de construction.

Quelque exemple :

Recyclage du béton (béton concassé)

Le bois (les poutres, planchers)

Les matériaux isolants (les polyols)

1.5.1 Les plastiques :

Les matières plastiques sont des polymères auxquels sont ajoutés certains additifs tels que des pigments, des stabilisants, etc.

Ces polymères synthétisés par polymérisation de monomères sont obtenus à partir du pétrole.

L'incorporation des plastiques dans les matériaux de construction tel que les mortiers et le béton est une méthode pour améliorer les propriétés mécaniques et thermiques de ces matériaux

- Par exemple les polyéthylènes qui renforcent le béton et améliorent la résistance à la traction et augmentent la durabilité de béton
- Mortier : amélioration de la cohésion, réduction de la fissuration
- Plâtre : amélioration de la flexibilité et l'adhérence et renforce la résistance à la traction et la flexion [15]

1.5.1.1 La mousse polyuréthane :

La valorisation et le recyclage des déchets de mousse polyuréthane (PU) dans les matériaux de construction représente une solution prometteuse pouvant réduire les impacts environnementaux associés à ces déchets plastiques. Plusieurs méthodes et applications spécifiques dans lesquelles la mousse polyuréthane recyclée est réutilisée pour des usages dans le secteur de la construction [16]

Le type de mousse à base polyuréthane a été étudié par microscopie électronique à balayage (MEB), avant d'être broyée et utilisée dans le plâtre .

Comme le montrent les figures 6 et 7, la mousse a une structure cellulaire. Les cellules de la mousse sont ouvertes dans certaines zones, probablement en raison de la manipulation ou à cause du procédé de découpe de la mousse.[17]

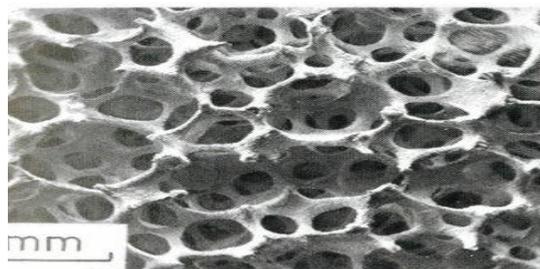


Figure 1-6 : Image MEB de la mousse

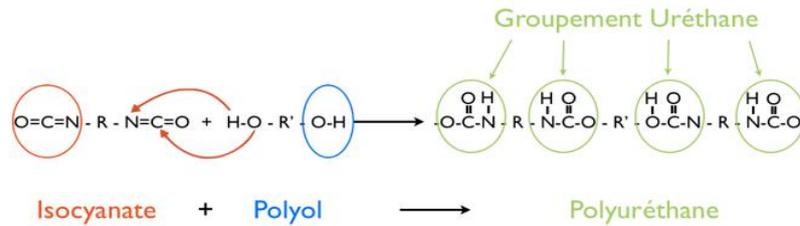


Figure 1-7 : formation chimique de polyuréthane

1.5.1.2 Méthodes de recyclages de la mousse polyuréthane :

Le recyclage de la mousse polyuréthane présente plusieurs défis en raison de sa composition chimique et de sa structure. Cependant, diverses méthodes ont été développées pour recycler ce matériau de manière efficace. Voici un aperçu des principales méthodes de recyclage de polyuréthane : [18]

– **Recyclage physique :**

La méthode de recyclage physique consiste à broyer les déchets de mousse de polyuréthane, en changeant uniquement leur forme physique. Les particules solides écrasées n'ont pas d'activité réactive, mais permettent de fabriquer directement de nouveaux produits en polyuréthane en tant que matières premières.¹⁹

– **Recyclage chimique :**

Le recyclage chimique implique la décomposition de la mousse en ses composants chimiques de bases. Cela peut être réalisé par plusieurs procédés :

- **Glycolyse** : cette méthode utilise des glycolyses pour décomposer les liaisons polyuréthane, produisant des polyols qui peuvent être réutilisés pour fabriquer de nouveau polyuréthane.
- **Hydrolyse** : utilisation de l'eau à haut température et pression pour décomposer le polyuréthane en amines et polyols.
- **Pyrolyse** : décomposition thermique de polyuréthane en l'absence d'oxygène pour produire des gaz et des huiles pouvant être utilisés comme combustibles ou matières premières chimiques.[20]

– **Recyclage énergétique :**

Le polyuréthane peut être incinéré pour produire de l'énergie. Bien que cette méthode soit moins favorable du point de vue environnemental, elle permet de récupérer l'énergie contenue

dans le matériau. Cependant, des précautions doivent être prises pour contrôler les émissions de substances nocives lors de l'incinération.

– **Recyclage en boucle fermée :**

Cette méthode vise à réutiliser directement les déchets de polyuréthane dans la production de nouveaux produits polyuréthane sans passer par une décomposition complète. Par exemple, les chutes de fabrications peuvent être réintégrées dans le processus de production. [21]

– **Méthodes innovantes :**

La recherche continue à explorer de nouvelles méthodes de recyclage du polyuréthane. Par exemple, certaines techniques biologiques utilisant des enzymes spécifiques capables de décomposer le polyuréthane sont en cours de développement. [22]

1.5.1.3 Application dans les matériaux de construction :

La mousse polyuréthane trouve diverses applications dans les matériaux de construction pour des fins d'isolation et de production de matériaux composites.

- **Isolation thermique et acoustique :**

- **Panneaux d'isolation :** les déchets de mousse polyuréthane broyé et agglomérés peuvent être utilisés pour fabriquer des panneaux d'isolation thermique pour les bâtiments.
- **Isolations en vrac :** les granulés de mousse de polyuréthane utilisé comme isolant en vrac dans les cavités murales, les toitures et les planchers.

- **Matériaux composites :**

- **Incorporation dans les matériaux :** les particules de mousse PU mélangées avec des matériaux légers ou plastique ou minéraux pour créer des composites utilisés dans divers produits de construction, tel que des profilés, remplissage des panneaux et des éléments décoratifs. [23]

1.6 Conclusion :

Le plâtre et la mousse de polyuréthane, bien que différents en composition et en propriétés, peuvent être utilisés de manière complémentaire dans divers projets de construction et de rénovation. Le plâtre offre une finition esthétique et une résistance au feu, tandis que la mousse polyuréthane fournit une isolation supérieure et une capacité de remplissage des cavités. Leur utilisation conjointe

permet d'optimiser les performances thermique, acoustique et esthétique des différentes constructions.

2 Chapitre II

Caractérisation des matériaux et procédés expérimentaux

2.1 INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons présenter les techniques expérimentales adoptées pour la caractérisation des matériaux utilisés. Les résultats obtenus sont présentés et discutés afin de mettre en évidence les propriétés essentielles et utiles ayant motivé leur utilisation.

2.2 Caractérisation des matériaux :

- Les matériaux utilisés dans notre recherche sont :
- Le Plâtre.
- La mousse polyuréthane.
- L'eau de robinet.

2.2.1 Le plâtre :

Le plâtre utilisé dans cette étude est un plâtre de moulage fabriqué en Algérie, issu du gisement de gypse de El Adjiba, willaya de Bouira.

On prend en considération :

- Pureté du plâtre : un plâtre de bonne qualité avec une pureté élevée
- Taille des particules : une taille de particule uniforme garantit une consistance homogène
- Densité
- Absorption d'eau
- Propriétés thermiques

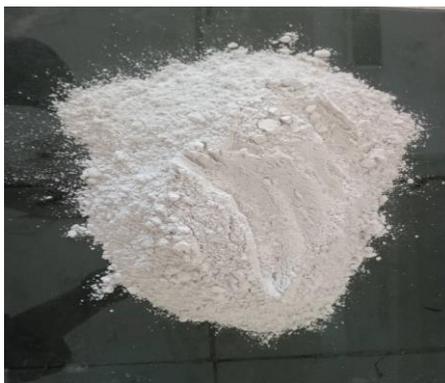


Figure 2- 1 Le plâtre utilisée

La composition chimique du plâtre est donnée dans le tableau II.1.

Tableau 2-1 : Composition chimique de plâtre

Eléments	Teneur %
SiO ₂	0 ,7
Al ₂ O ₃	0,1
Fe ₂ O ₃	0 ,08
CaO	39,15
MgO	0,53
SO ₂	50 ,95
K ₂ O	0,03
Na ₂ O	0,09
Perte au feu	8,35

Le tableau II.1 montre que les principaux composants du plâtre sont le CaO et le SO₂ qui représentent 39,15% et 50,95%, respectivement. Ceci affirme que le composant le plus essentiel dans ce plâtre est le sulfate de calcium. Cette composition peut varier en fonctions de la source du plâtre et du procédé de fabrication.

2.2.1.1 Masse volumique apparente et absolue :

La masse volumique d'une substance, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume.

Elle est généralement notée par les lettres grecques ρ (rhô) ou μ (mu). On utilise ces deux notations en fonction des habitudes du domaine de travail.

La masse volumique apparente et absolue des différents granulats est déterminés conformément à la norme **NF P 18-558**

2.2.1.2 Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente est le rapport de la masse d'échantillon sec M au volume total apparent V . Il s'agit de remplir un volume de 1 cm^3 et déterminer sa masse M par peser.

L'essai consiste à

Remplir sans vibration un récipient de masse M_1 et de volume 1litre, posé au-dessous de l'axe d'entonnoir avec la poudre de plâtre (**figure 2.2**).

Le récipient arasé par une réglette et nettoyé à son extérieur est à nouveau pesé, soit M_2 sa masse.



Figure 2- 1 : Masse volumique apparente.

La masse volumique apparent est calculée par :

$$\rho_{app} = \frac{M_2 - M_1}{V} \text{ (g / cm}^3\text{)}$$

$$V = 1000 \text{ cm}^3 ; \quad M_{vide} = 445,25 \text{ g}$$

Tableau 2-2 : Masse volumique apparente.

Essais	M_1 (g)	M_2 (g)	ρ_{app} (g /cm ³)
1	445,25	1252,63	0,807
2	445,25	1249,55	0,804
3	445,25	1247,05	0,801
			Moy= 0,804

La masse volumique apparente du plâtre est de 804 kg/m³.

2.2.1.3 Masse volumique absolue : (NFP 18-558)

La masse volumique absolue (ρ_s) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le plâtre, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Pour déterminer celle-ci, on utilise un pycnomètre de 100 ml. Pour des raisons techniques et pour opérer dans de bonnes conditions, le pycnomètre a été remplacé par une fiole de 100 ml. Le volume du liquide déplacé détermine le volume absolu V_s des grains solides.

L'essai consiste à :

- Peser le pycnomètre, muni de son bouchon soit M_1 sa masse.
- Peser une quantité de plâtre dans le pycnomètre, soit M_2 sa masse.
- On ajoute dans le pycnomètre le benzène jusqu'au 2/3 de sa hauteur, soit M_3 sa masse.
- Agiter pendant 1h. soit M_4 sa masse. **Figure 2.3**

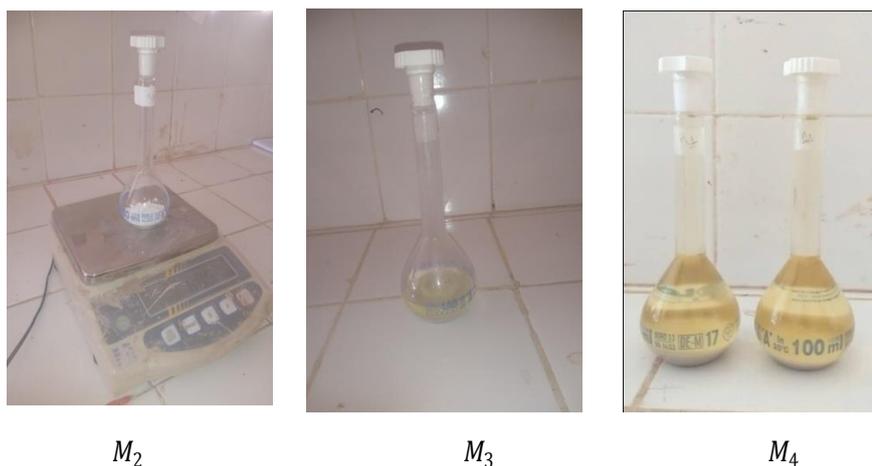


Figure 2- 4 : la masse volumique absolue (le pycnomètre)

Trois essais de mesure de la masse volumique absolue ont été réalisés et montrés sur le tableau II.3.

Tableau 2-3 : Masse volumique absolue

Essaie	$M_1(g)$	$M_2(g)$	$M_3(g)$	$M_4(g)$	$\rho \text{ kg/m}^3$
1	54,85	63,76	148,20	142,22	2668,87
2	53,98	64,94	148,85	141,15	2926,21
3	54,81	59,63	145,60	142,31	2759,68
					2785

La masse volumique absolue du plâtre est de 2785 kg/m³.

2.2.1.4 Distribution granulométrique :

La granulométrie est l'étude de la distribution des tailles d'éléments composant un échantillon de la sédimentation. La distribution granulométrique joue un rôle essentiel dans les caractéristique physique et mécanique. On évalue la distribution granulaire du plâtre en effectuant une analyse granulométrique par sédimentations conformément aux normes [NF P 94-057] des éléments passant à travers le tamis de 0,08 mm

Préparations de la solution

- Dans un récipient, mélanger 30 cm³ de défloculant composée de 5% d'hexamétophosphate de sodium (Na₂(PO₃)₆,10H₂O) avec 500 cm³ de l'eau distillée afin d'obtenir 530 cm³ d'une suspension défloculante.
- La solution est verrée dans et on la verse dans un éprouvette contenant 50g de l'échantillon dont le diamètre des grains inférieur à 0.08mm, puis laissé reposer pendant 12h. le mélange à été soumis à une l'agitation mécanique pendant environ 3 minutes.
- La quantité d'eau distillée ajoutée 500cm³ (pour séparer les particules fines).
 - La suspension obtenue est versée dans l'éprouvette graduée de 500cm³ à 'aide d'une pompe. Le récipient de l'agitation et on le complète à 500cm³.

❖ L'essai :

La suspension panant légèrement agitante avec agitateur manuel une minute afin l'homogénéiser. Il important de plonge le densimètre avec précaution immédiatement après déclenchement du chronomètre, ensuit, on fait le premier lecteur à 30 secondes, et des lecteur successive à 1 minute et

deux minutes. Après le troisième lecteur, on retire le densimètre et on prend la température à 1/10 de degré près (on replonge de densimètre dans l'éprouvette contenant l'eau).

Après faire des lecteurs à 5,10,20,40,80 minutes,2,4,24 heures, plongé lentement le densimètre 15 seconde avant lecteur et on retire aussitôt le lecteur fait et on prend à chaque fois la température de la suspension.



Figure 2- 5 : L'essai sédimentométrique

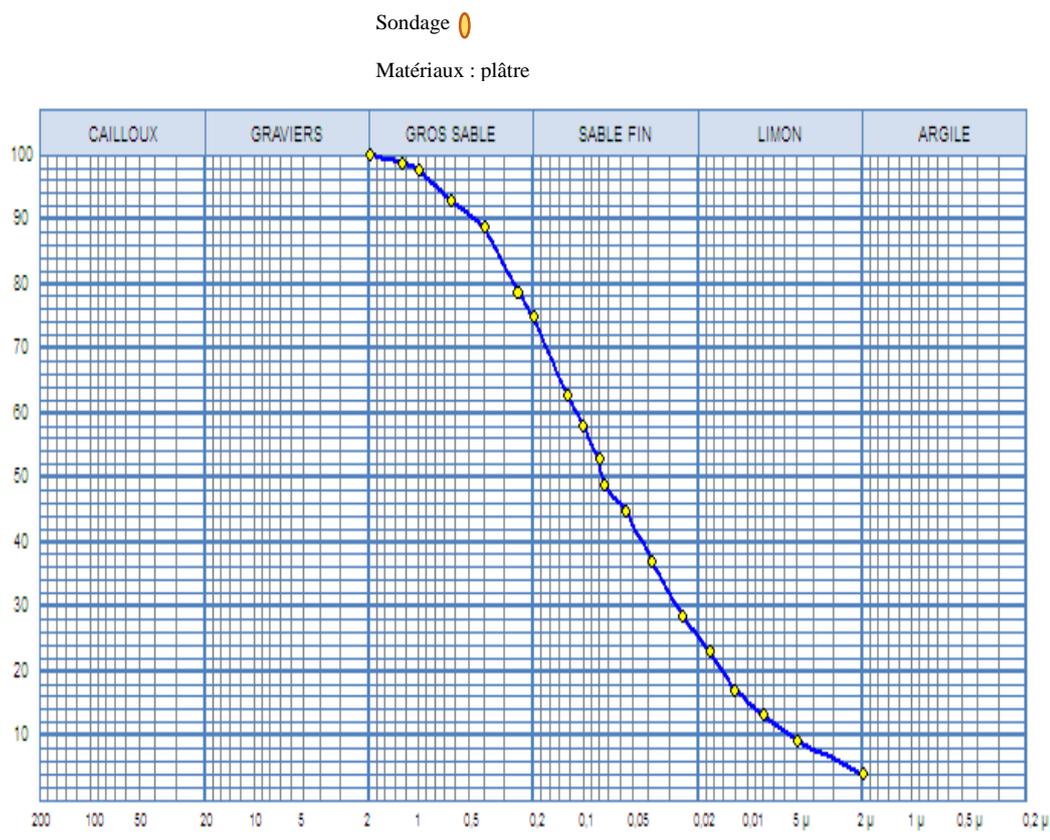


Figure 2- 6 : courbe granulométrique de plâtre

La distribution granulométrique montre que le plâtre utilisé est un plâtre fin.

2.2.1.5 Surface spécifique (surface Blaine)

La surface spécifique est une caractéristique couramment utilisée pour quantifier la finesse d'un produit. La finesse d'une poudre est généralement exprimée par sa surface massique ; la surface totale des grains contenus dans une unité de masse de poudre. Selon la norme : **NF EN 196-6. P15-476**

L'essai consiste :

- Placer la surface conique de la cellule dans le rodage conique au sommet du manomètre
- Fixer le dessus du cylindre avec un bouchon approprié.
- Ouvrir le robinet d'arrêt et amener par une aspiration modérée le niveau du liquide manométrique jusqu'à la ligne la plus haute
- Fermer le robinet d'arrêt et observer que le niveau de liquide de manométrie reste constant. Refaire l'essai de fuites jusqu'à ce que le joint étanche amélioré conduise à un niveau de liquide constant.
- Ouvrir le robinet d'arrêt et ajuster par une aspiration modérée le liquide manométrique au niveau de la ligne la plus haute. Fermer le robinet d'arrêt. Enlever le bouchon du sommet du cylindre. Le fluide manométrique va commencer à couler. Démarrer le chronomètre lorsque le liquide atteint la deuxième ligne et l'arrêter lorsque le liquide atteint la troisième ligne.
- Répéter la procédure sur le même lit de plâtre et relever les valeurs de t (s)

La surface spécifique de Blaine se calcule en observant le temps mis par un volume d'air constant, dans des conditions normalisées et une température déterminée pour traverser une couche de plâtre compactée en utilisant un perméabilimètre de BLAINE. **Figure 2.6**



Figure 2- 7 : Perméabilimètre de BLAINE

La masse du corps d'épreuve (plâtre) est obtenue par la pesé d'un lit de plâtre de porosité 0,5 à mettre dans la Cellule du perméabilimètre.

$$M = 0,5 * \rho * v$$

$$\rho = 2,785 \text{ (g/cm}^3\text{)} : \text{masse volumique absolue du plâtre}$$

$$V = 1,82 \text{ cm}^3 : \text{Volume du lit de plâtre dans la cellule du perméabilimètre Blaine}$$

$$M = 0,5 * 1,82 * 2,785 = 2,534 \text{ g}$$

La surface massique S est donnée comme suite :

$$S = \frac{k}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{0,1\eta}} \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

K= constant de l'appareil. (K=3,215)

e = porosité du lit (e = 0,5)

t= temps mesuré en secondes (s)

ρ = masse volumique absolue du plâtre (kg/m³)

η = 0,00001839 Pa.S : viscosité de l'air à la température de l'essai (T= 20°C).

Durant cet essai, quatorze lectures du temps d'écoulement de l'air ont été effectuées. La moyenne arithmétique des quatorze lectures (temps en secondes) a été enregistrée.

Tableau 2-4 : Temps d'écoulement de l'air

Lecteurs	Temps (s)
Lecteurs 1-4	50,20
	51,03
	50,71
	50,09
Lecteurs 5-8	50,98
	50,40
	50,09
	50,49
Lecteurs 9-12	50,07
	50,45
	50,40
	50,43
Lecteurs 13- 14	50,72
	51,18
	50,71

La surface spécifique du plâtre est : $S = \frac{3,215}{2,785} \times \frac{\sqrt{0,5^3}}{1-0,5} \times \frac{\sqrt{50,71}}{0,001356}$

$$S = 4287 \text{ cm}^2/\text{g}.$$

2.2.2 La mousse polyuréthane :

La figure ci-dessus montre les broyats de déchets de mousse polyuréthane utilisée dans cette étude



Figure 2- 8 : Les broyats de déchets de mousse polyuréthane

2.2.2.1 La masse volumique apparente :

Pour déterminer la masse volumique apparente de la mousse polyuréthane,

On mesure, par le biais d'un pied coulisse, les dimensions des échantillons de mousse polyuréthane de forme parallélépipédique pesés préalablement avec une balance de précision 0,01g (figure 2.8).



Figure 2- 2 : Echantillons de mousse polyuréthane

Les résultats de calcul de la masse volumique de la mousse polyuréthane sont résumés dans le tableau II.5.

Tableau 2-5 : Masse volumique de la mousse polyuréthane

Essai	Masse (10^{-9} Kg)	Volume ($10^{-3} m^3$)	ρ (Kg/m^3)
1	0,210	7237,2	29,02
2	0,230	7931,35	29,00
3	0,330	12420	26,57
			28,20

La masse volumique de la mousse polyuréthane est de 28,2 kg/m³.

2.2.2.2 Capacité d'absorption d'eau (eau de gâchage) :

L'essai d'absorption d'eau consiste en un prélèvement d'un échantillon de mousse polyuréthane de masse sèche 1g et l'arroser par l'eau du robinet jusqu'à saturation. La masse de l'échantillon saturé diminuée de sa masse sèche donne la quantité d'eau absorbée. La quantité d'eau absorbée est de 4,56 g.

2.2.3 Diffraction des rayons X (DRX) :

La diffractions des rayons X est une technique puissante utilisée pour analyser la structure cristalline des matériaux. Lorsqu'il s'agit de plâtre, ou sulfate de calcium d'hydraté, cette méthode permet de déterminer les arrangements atomiques et les dimensions des cellules unitaires dans le cristal. [24]

L'essai consiste à ;

- Préparer le l'échantillon broyé en une poudre fine pour assurer une distribution homogène des cristaux.
- La poudre est montée sur un porte -échantillon.
- L'échantillon est placé dans un diffractomètre à rayons X, ou il est exposé à un faisceau de rayons X et les données de diffraction sont collectées.
- L'analysassions des données sont programmée à l'aide de logiciel spécifique pour identifier les pics de diffraction et déterminer la structure cristalline.



Figure 2- 10 : appareil DRX

Les figures Figure 2-10 et Figure 2-11 représentent l'analyse par diffraction des Rayon X de la poudre de plâtre et le mousse polyuréthane.

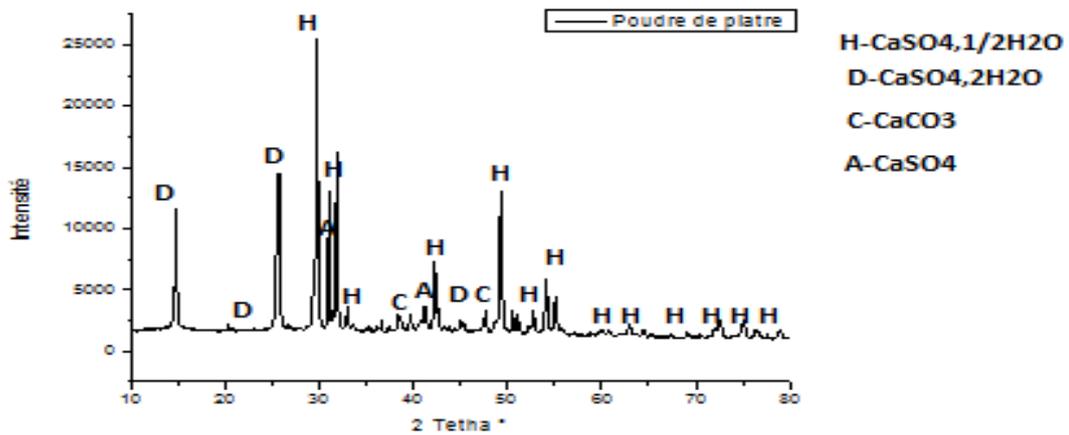


Figure 2- 11 Analyse DRX de la poudre de plâtre

Le plâtre utilise présente aussi quelque impureté de type carbonate de calcium (CaCO₃) issues probablement des matières organiques calcinées. La présence d’anhydrite est très faible.

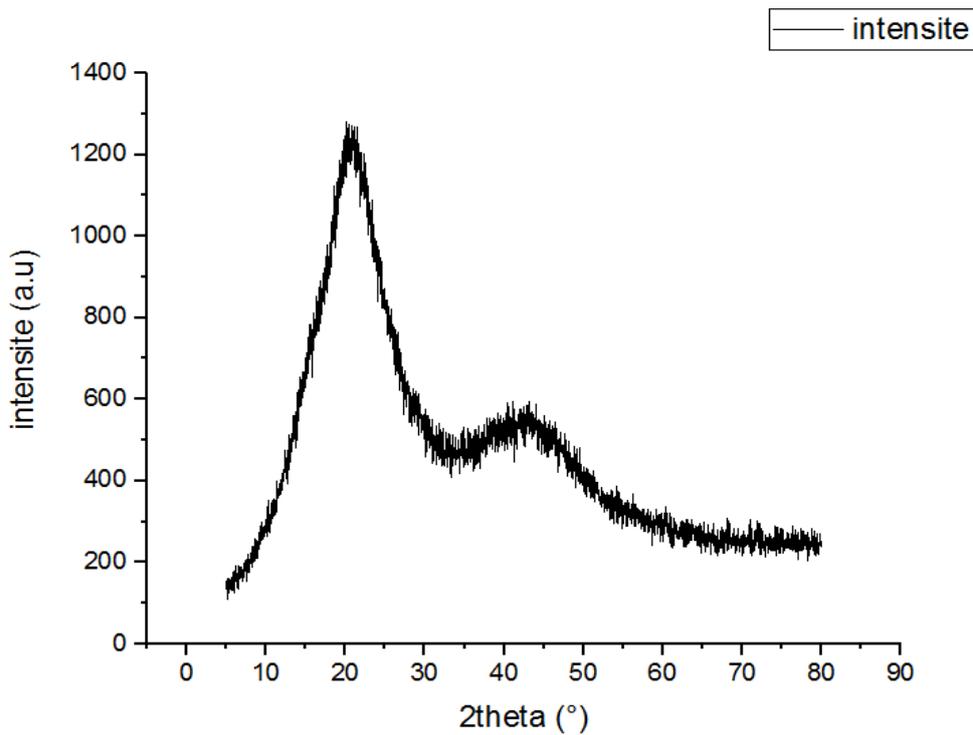


Figure 2- 12 Analyse DRX de la mousse polyuréthane

En analysant la figure 2.11, on remarque que :

Deux larges pics ont été détectés lors de la diffraction des rayons X (DRX).

Courbes du polyuréthane pur. Il s'agit d'un motif typique des matériaux. Avec un faible degré de cristallinité.

Le pic observé à $2\theta=20^\circ$ correspondent aux plans cristallins du cristal cubique.

2.2.4 Infrarouge :

L'analyse infrarouge est une méthode couramment utilisée en spectroscopie pour identifier les composantes et les propriétés chimique des matériaux qui utilise les propriétés de la lumière infrarouge [25].

L'essai consiste :

- Préparer le l'échantillon broyé en une poudre fine pour assurer une distribution homogène des cristaux.
- Ensuite mélange l'échantillon soigneusement avec le KBr (Bromure de potassium), prépare le mélange sous forme de pastilles à l'aide d'une presse hydraulique.
- Placer l'échantillon préparer dans le chemin optique du spectrophotomètre.
- Lancer l'analyse pour obtenir le spectre infrarouge .



Figure 2- 13 : Préparation de la pastille pour essai Infrarouge

Les figures suivantes représentent l'analyse infrarouge de de la poudre de plâtre et la pâte de plâtre et les mousse polyuréthane :

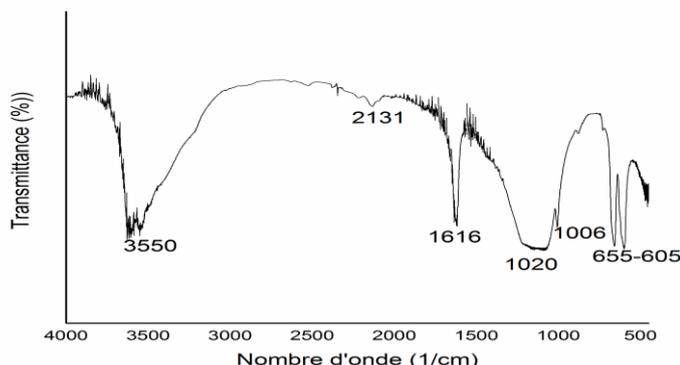


Figure 2- 14 Analyse infrarouge de poudre de plâtre

On peut voir sur le spectre IFTR représenté sur les figures, des bandes caractéristiques au gypse peut être identifiées par :

- Des doublets centrés à environ 1020 cm^{-1} , 1006 cm^{-1} , 655 cm^{-1} et 605 cm^{-1} qui correspondent aux élongations de la liaison S-O du sulfate de calcium (SO_4^2)
- Des bandes caractéristiques de l'eau constitutive qui apparaissent au-dessus de 3000 cm^{-1} vers 3550 cm^{-1} (liaison O-H) et d'une bande (doublet) vers 1616 cm^{-1} - 2131 cm^{-1} (O-H) qui correspondent à des modes de vibrations d'élongation et de déformation de la liaison O-H

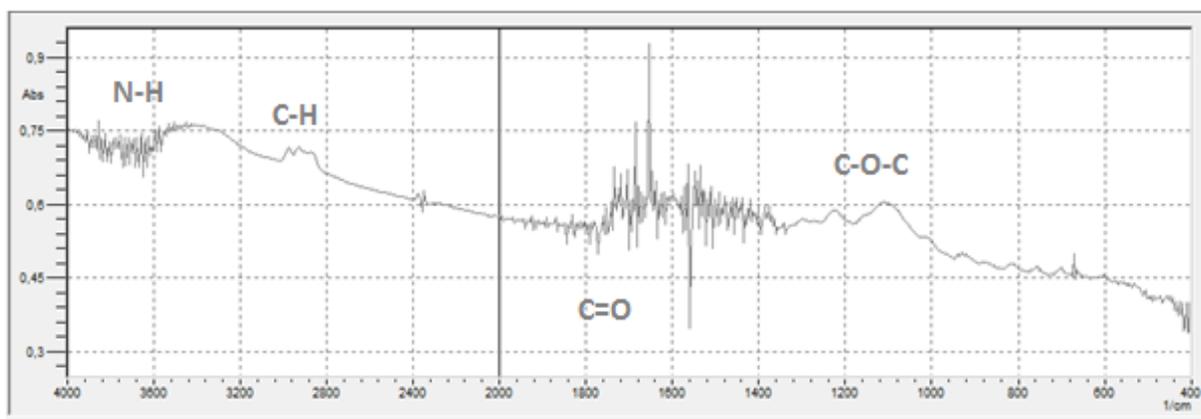


Figure 2- 15 : Infrarouge de la mousse polyuréthane

En analysant les résultats présentés par la Figure II.14 on remarque que :

- Un pic fort autour de 3300 cm^{-1} : indique la présence de liaisons N-H.
- Un pic fort autour de 1720 cm^{-1} : correspond à l'élongation C=O des groupes carbamate.
- Un pic modéré autour de 1200 cm^{-1} : indique la présence de liaisons C-O-C des groupes éther.

Plusieurs petits pics entre 2850 et 2950 cm^{-1} : indiquent les liaisons C-H des chaînes alkyles

Des pics faibles autour de 2270 cm^{-1} : indique une absence de diisocyanate n'ayant pas réagi

2.3 Fabrication et conservation des pâtes de plâtre :

Pour déterminer les critères de substitution d'une partie du plâtre par les broyats de mousse polyuréthane, des essais ont été effectués sur l'ajout de charges légères dans des matrices à base de plâtre.

La nomenclature des divers échantillons comprend le plâtre, qui sert de référence ainsi que divers mélanges nommés en fonction du rapport volumique entre la poudre de plâtre et les broyats de déchets de mousse polyuréthane (**Tableau II.6**).

Tableau 2-6 : rapport volumique entre la poudre de plâtre et les broyats de déchets de mousse polyuréthane

Formulation%	Quantité de plâtre(g)	Quantité de mousse(g)	L'eau(g)
0%	1000	0	600
1%	990	0,25	594
3%	970	0,75	582
5%	950	1	570
10%	900	2,5	540
20%	880	5,5	528
30%	770	8,25	419,37
40%	660	11	435,16
50%	600	15	413,4
60%	480	18	352,08
70%	360	21	290,76
80%	240	24	299,44
90%	180	27	216,12

La quantité d'eau de gâchage a été choisie sur la base de l'essai de consistance normalisée de la pâte de plâtre de référence.

L'essai consiste à déterminer la quantité de l'eau de gâchage optimale qui définit une consistance dite normalisée ; elle est en fonction du rapport E/P. L'essai a été réalisée selon la norme **NF B12-401**.

Pour ce faire, il faudrait s'équiper d'une salle climatisée de température de $20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$, un moule tronconique de 40 mm de hauteur, de diamètre de 65 mm à sa partie supérieur et de 75 mm à sa base, un récipient normalisé, une balance, une burette graduée, une spatule et un chronomètre.

La procédure de l'essai passe par les étapes suivantes :

- Verser 250g de plâtre dans le récipient.
- Ajouter une quantité d'eau (on commence par un rapport E/P=0,5).
- Mélanger pendant 30 s, laisser reposer pendant 60 s.
- Remplir le moule tronconique avec la pâte obtenue et araser la surface, puis soulever le moule à la verticale.
- Mesurer le diamètre (\emptyset) de la galette formée et calculer le diamètre moyen de la galette, ce dernier il est précisé d'après la norme (**NF B12-401**) comme suite :
 - $150 \text{ mm} \leq \emptyset \leq 210 \text{ mm}$: la consistance est normalisée.
 - $\emptyset \leq 150 \text{ mm}$: la pâte est trop ferme et il faut recommencer l'essai avec plus d'eau.
 - $\emptyset \geq 210 \text{ mm}$: la pâte est trop fluide et il faut refaire l'essai avec un nouveau rapport E/P. jusqu'à l'abstention de la valeur recherchée.

Les résultats obtenus de l'essai de consistance de la pâte de plâtre de référence (P0) sont présentés sur la figure 17 et tableau 8

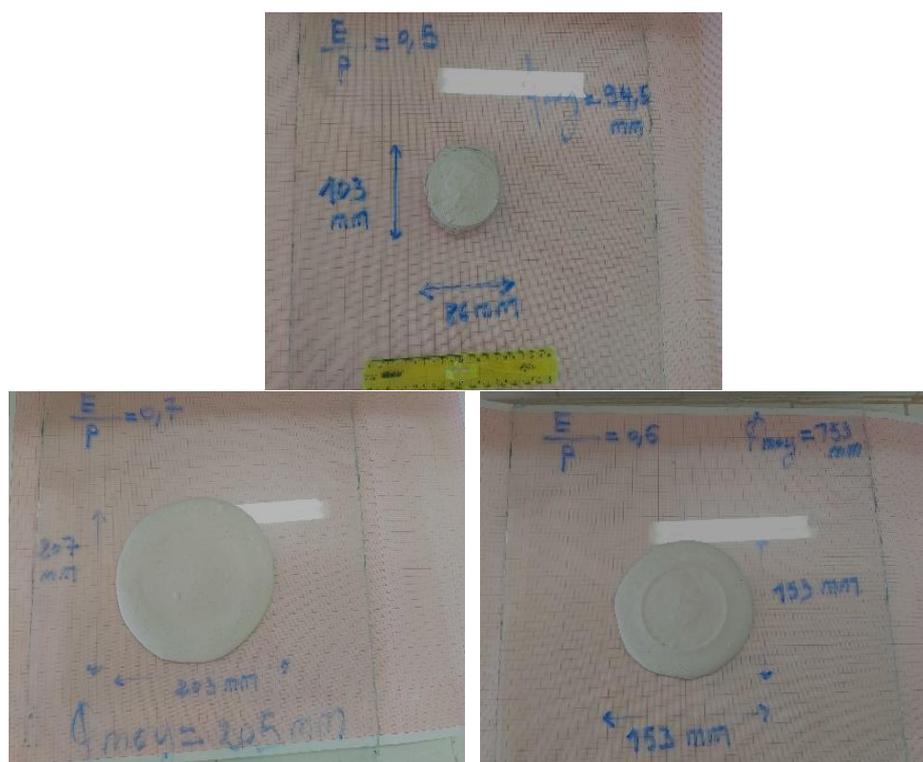


Figure 2- 3 : Essai de consistance du plâtre de référence (P0)

Tableau 2-7 : Diamètre moyen de la galette d'étalement de la pâte de plâtre de référence

Pâte	Quantité de plâtre (g)	Quantité d'eau (g)	E/P	\varnothing_{moy} (mm)
1	250	125	0,5	94,5
2	250	150	0,6	153
3	250	175	0,7	205

Le rapport E/P a été fixé à 0,6 pour tous les mélanges (avec ou sans mousse polyuréthane).

Avant d'effectuer la confection des corps d'épreuves, il faut tout d'abord, mesurer les différentes proportions (en volume) des composants ; plâtre et broyats de la mousse polyuréthane.

Les deux éléments sont mélangés à sec à l'aide d'une spatule dans une gamelle jusqu'à obtention d'un mélange homogène. Le mélange est sec , ensuite, saupoudré sur l'eau de gâchage et malaxé manuellement pendant 30 seconds conformément aux exigences de la norme **NF EN 13279-2**. Laisser reposer le mélange dans la gamelle 6 secondes. Cela permettra aux réactions chimiques entre

les composants de se stabiliser et d'atteindre une certaine consistance. Enfin, le mélange obtenu est versé en trois couches dans des moules de dimensions 4x4x16 cm³ couverts avec un film transparent et conservé à température ambiante pendant 24 heures. Ce temps permettra au plâtre de durcir complète . Après le durcissement, les échantillons sont démoulés et inspectés visuellement.

Les mélanges les plus moussés sont ceux comprenant les teneurs les plus élevées en broyats de mousse polyuréthane. (Figure 2.17)



Figure 2- 17 : Fabrication et conservation des pâtes de plâtre avec/sans la mousse polyuréthane

2.3.1 Essai Etalement :

L'essai d'étalement a été réalisé sur les pâtes de plâtres incorporant les différents teneurs en mousse polyuréthane afin d'évaluer l'effet de cette dernière sur la consistance du plâtre. Le rapport E/P a été fixé à 0,6 et la quantité d'eau absorbée par la mousse a été prise en considération dans les mélanges testés. La procédure de l'essai est telle qu'elle a été décrite dans l'essai de consistance normalisé.

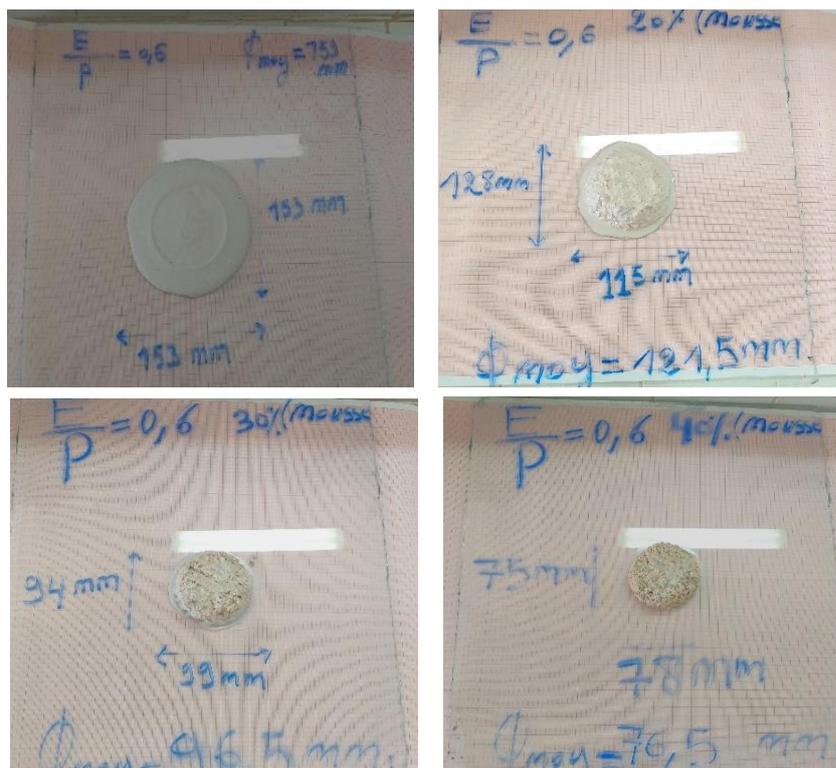


Figure 2- 4 : Essais de consistances des mélanges plâtre - mousse

2.3.2 Essai de prise :

Dès que le plâtre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenue sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée la pâte reste plus ou moins malléable, mais au bout d'un certain temps, le matériau devient de plus en plus difficile à travailler et sa température augmente : il fait prise et s'apparente à un solide.

Le but de l'essai consiste à déterminer les temps de début et de fin de prise des pâtes de plâtre avec ou sans broyat de mousse polyuréthane conformément à la norme **NF P 15 – 573** en utilisant l'appareil de Vicat. (Figure 2.18)

L'essai se déroule en suivant les étapes suivantes :

- Nettoyer le moule et la plaque de base de l'appareil de Vicat.
- Appliquer une fine couche de gelée de pétrole ou d'un autre lubrifiant approprié sur la surface supérieure de l'embase afin d'éviter les fuites pendant l'essai.
- Régler l'appareil de Vicat muni de l'aiguille par abaissement de celle-ci jusqu'à la plaque de base plane et par ajustement du repère au zéro de l'échelle.
- Relever l'aiguille en position d'attente.
- Préparer la pâte de plâtre comme pour l'essai de consistance en introduisant la quantité d'eau déterminée pour la pâte de consistance normalisée.
- Introduire rapidement la pâte dans un moule tronconique sans tassement excessif (le moule étant placé sur la plaque de base plane) et placer l'ensemble dans l'axe de l'aiguille de l'appareil de Vicat.
- Amener l'aiguille à la surface de l'échantillon.
- Lâcher l'aiguille sans vitesse initiale, cette dernière s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 2 min d'attente), relever la distance d séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.
- Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (~ 5 mn) jusqu'à ce que $d = 6\text{mm} \pm 1\text{mm}$.
- Nettoyer l'aiguille à chaque opération. Pour tester l'effet de la mousse sur la prise de plâtre et l'adhérence entre le plâtre et la mousse polyuréthane, l'essai a été recommencer pour des pourcentages successifs, il convient de prendre en considération la quantité de l'eau de gâchage absorbée par la mousse polyuréthane



Figure 2- 19 : Essai de pris

2.4 Caractérisation des pâtes à l'état durci

2.4.1 Porosité, densité apparente et absorption d'eau

Les essais de porosité ouverte, de densité apparente et d'absorption d'eau ont été effectués sur trois éprouvette de forme cubique ($40 \times 40 \times 40$) mm^3 de chaque formulation séchée dans une étuve à $40^\circ C$ jusqu'à masse constante ;

Soit M_s la masse sèche de l'échantillon. Les éprouvettes sont immergées totalement dans l'eau pendant 24 heures, puis placées sur un linge sec pour être soigneusement et rapidement essuyées, soit la masse saturée en eau. Les éprouvettes sont ensuite placées dans un dessiccateur plein d'eau, sous vide pendant 1heure, enfin, elles sont retirées pour être pesées par pesée hydrostatique, soit M_{ph} cette pesée. Ces masses sont obtenues en mesurant la moyenne de trois échantillons. (Selon la procédure américaine ASTM C 67-03a)

La porosité, la densité apparente, et l'absorption d'eau sont déterminées par les formules suivantes :

$$Pr (\%) = \frac{M_{st} - M_s}{M_{st} - M_{ph}} \times 100 \quad D = \frac{M_s}{M_{st} - M_{ph}}$$

$$A (\%) = \frac{(M_{st} - M_s)}{M_s \times 100}$$



Figure 2- 20 : Procédures des essais de porosité, densité et absorption d'eau

2.4.2 Coefficient d'absorption d'eau par capillarité :

Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est à évaluer en se basant sur la norme EN 1015-18. Pour faire, les prismes de pâte de plâtre et de mousse polyuréthane sont rompus en deux parties, puis séchés à masse constante. La face cassée de chaque échantillon est plongée dans l'eau sur une épaisseur de 5 mm à 10 mm pendant 10 minutes et 90 minutes. Après une période de 10 minutes, les échantillons sont retirés de l'eau, essuyés rapidement avec un chiffon humide et pesés ; soit M_1 sa masse. Les échantillons sont immédiatement remis dans l'eau et retirés après 90 minutes. La masse M_2 est mesurée en suivant la même procédure que la masse M_1 .



Figure 2- 5 : Essai d'absorption d'eau par capillarité

L'expression suivante permet de calculer le coefficient d'absorption d'eau par capillarité :

$$C = 0,1 (M_2 - M_1) [\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0.5})]$$

2.4.3 Rétention d'eau :

L'essai de rétention d'eau consiste à déterminer la quantité d'eau retenue par le plâtre après un certain temps d'immersion dans l'eau et séchage à 40 °C. **NF EN 1015 -8**

- Après l'essai d'absorption d'eau par capillarité les échantillons sont séchés à une température de 40 °C jusqu'à masse constante, soit M_s la masse sèche.
- Puis immergés dans l'eau pendant 2 heures \mp 2min
- Retirés les échantillons, essuyés superficiellement pour enlever l'excès d'eau puis pesés immédiatement, soit M_{st} la masse saturée.
- Sécher à 40 °C pendant 48 heures, soit M_s la masse sèche.

Le calcul se fait comme suit :

$$\text{Rétention d'eau (\%)} = \frac{M_{st} - M_s}{M_s}$$

2.4.4 Auscultation sonore par ultrason :

La méthode pour déterminer les propriétés élastiques d'une pièce présentant une surface courbe, comprenant l'émission de faisceaux d'ondes ultrasonores en direction d'un point d'impact sur la surface de la pièce de manière à générer la transition d'ondes dans ladite pièce, est caractérisée par le fait que connaissant l'épaisseur d_1 de la pièce audit point d'impact selon une première direction D_1 perpendiculaire au plan tangent en ce point et l'épaisseur d_2 selon une seconde direction D_2 format un angle à déterminer par rapport à la première direction. [26]

On effectue :

- o Une mesure du temps t_1 mis par des ondes longitudinales transmises pour parcourir dans la pièce la distance d_1 à partir dudit point d'impact.
- o Une mesure du temps t_2 mis par des ondes transversales transmises dans la pièce pour parcourir la distance d_2 à partir dudit point d'impact.

On détermine le module de Young du matériau à partir des vitesses longitudinale (V_L) et transversale (V_T).

Le calcul se fait comme suite [26] ;

$$V_l = \frac{d_l}{t} \text{ m/s} \quad V_t = \frac{d_t}{t_2} \text{ m/s}$$

$$E_l = V_l^2 \frac{\rho(1+\vartheta)(1-2\vartheta)}{1-\vartheta} \text{ MPa}$$

$$E_t = V_t^2 2\rho(1 + \vartheta) \text{ MPa}$$

Selon certains référence $\vartheta = 0$

d_t : longueur transversale semi directe



Figure 2- 22: Essai ultrason

2.4.5 Résistance mécanique en flexion :

L'essai consiste à estimer les résistances à la traction par flexion des éprouvettes prismatiques de mélange plâtre–mousse polyuréthane de dimensions $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Le prisme est soumis à une charge croissante jusqu'à sa rupture (**figure 2. 22**).



Figure 2- 23 : Essai de résistance à la flexion

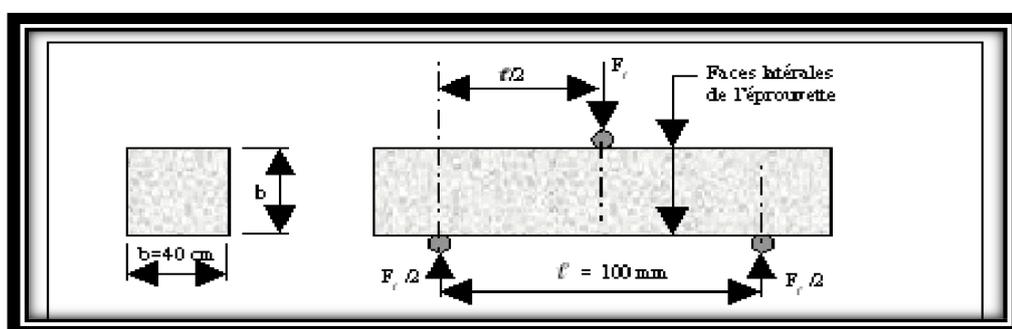


Figure 2- 24 : Schéma mécanique de l'essai de rupture par flexion [28]

2.4.6 Résistance mécanique en compression :

L'essai de résistance mécanique à la compression a été réalisé en appliquant une charge de 1300 N/s sur les moitiés de prismes issus de l'essai de résistance à la flexion. À l'aide d'une machine de compression flexion par traction

- Disposer les éprouvettes entre les plaques en acier, de sorte que les faces du prisme qui collaient aux parois du moule soient en contact avec les plaques sur une section de (40 cm×40 cm).
- Laisser la plaque supérieure s'incliner jusqu'à ce que le contact entre l'éprouvette et la plaque soit parfait **Figure 2.24** L'axe de rotation de la plaque supérieure passe par le centre des surfaces sur lesquelles la compression s'exerce. **Figure 2.25**



Figure 2- 25 : Essai de résistance à la compression

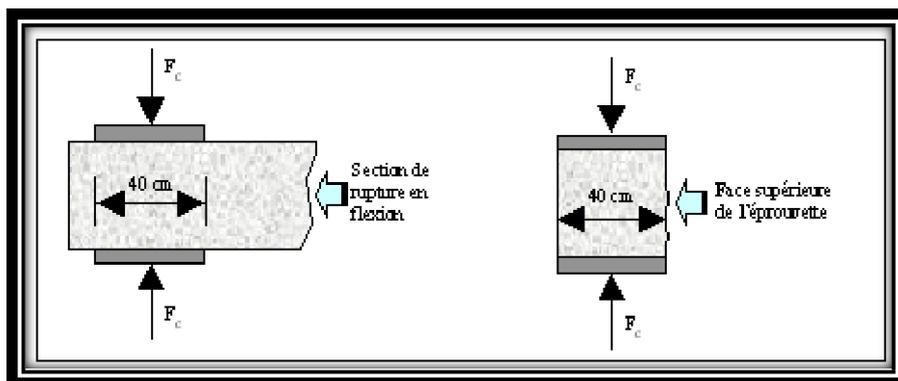


Figure 2- 6 : Dispositif de l'essai de rupture en compression.[28]

2.4.7 Conductivité thermique

L'étude consiste à examiner l'effet du remplacement partiel du plâtre par la mousse polyuréthane à différents pourcentages sur la conductivité thermique du plâtre pris. Pour la mesure de cette Caractéristique, un CT-mètre à fil Chaud a été utilisé. C'est un appareil aisément transportable, conçu pour évaluer de manière précise les caractéristiques de résistance thermique de divers matériaux tels que le plâtre.

Le CT-mètre se compose de deux éléments qui sont l'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester ; et la sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.

Une sonde en forme d'anneau est conçue pour s'intégrer entre deux surfaces planes de l'échantillon à évaluer (**Figure 2.26**). La sonde permet de réaliser les mesures de conductivité thermique.

Les échantillons sont testés après 7 jours de durcissement et séchage jusqu'à masse constante à 40 °C,



Figure 2- 27 : Appareil CT-mètre.

2.4.8 Comportement hygrométrique : valeur de la capacité tampon hydrique (Moisture Buffer value MBV) :

La valeur de la capacité tampon hydrique (Moisture Buffer value MBV) permet d'évaluer la capacité des matériaux à stocker et à libérer l'humidité de l'air ambiant. Sa mesure est définie par différents protocoles dont celui du projet NORDTEST (Rode et al., 2005).

Les échantillons sont testés après 7 jours de durcissement et séchage jusqu'à masse constante à 40 °C pour chaque formulation, trois échantillons de dimension (4*4) sont considérés,

Selon NORDTEST (Rode et al., 2005) les recommandations sont les suivants [29] :

Il est essentiel que les échantillons soient étanches sur toutes les surfaces, à l'exception d'une ou deux surfaces d'échange. (Figure 2.27)

- L'épaisseur de l'échantillon doit dépasser la profondeur de pénétration.
- Il est nécessaire de stabiliser les échantillons à une température de 23°C , 50% HR puis de les exposer à des niveaux d'humidité de 8 heures à 75% HR et 16 heures à 33% HR.
- Les échantillons sont pesés de manière régulière durant l'essai : trois fois lors de la phase d'absorption et deux fois lors de la phase de désorption. On effectue les pesées à l'aide d'une balance avec une précision de 0,001 g.



Figure 2- 28 : Essai MBV

La valeur MBV est calculée selon l'équation suivante [30] :

$$MBV = \frac{\Delta_m}{A \cdot (HR_{haute} - HR_{bas})} \text{ (g/(cm}^2 \cdot \%HR))$$

- $\left\{ \begin{array}{l} A: \text{ la surface exposée (cm}^2) \\ \Delta_m: \text{ la variation de masse (g) pendant les cycles d'absorption, désorption d'humidité} \\ HR_{haut,bas} : \text{ le niveau de l'humidité relative haut et bas.} \end{array} \right.$

2.5 Conclusion :

Le travail présent dans ce chapitre traite séparément les caractéristiques des matériaux de basse utilise dans l'étude expérimentale. C'est une étape nécessaire avant d'entamer l'étude expérimentale de ces mortiers.

Les résultats obtenus indiquent que l'adjuvante répond aux critères requis pour être utilisée dans un mortier.

3 Chapitre III

Résultats et interprétations

3.1 Introduction :

Ce chapitre a pour objectif de caractériser l'effet des broyats de déchets de mousse polyuréthane sur les différentes propriétés de plâtre.

L'étude des propriétés mécaniques pourrait permettre de déterminer le taux de la mousse polyuréthane critique au-delà duquel les propriétés mécaniques de plâtre sont fortement influencées. La norme NF EN 196-6 fixe les résistances mécaniques et EN 1015-18 fixe les résistances physiques. Les résistances mécaniques obtenues seront comparées aux résistances minimales normatives.

Nous allons donc présenter les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des échantillons aux différents pourcentages considérés. En outre, les interprétations des résultats des différents essais réalisés seront effectuées.

3.2 Résultats des essais physiques

3.2.1 Etat frais :

3.2.1.1 La masse volumique :

Les résultats de calculs de la masse volumique des échantillons sont représentés dans la **Figure 3.1**

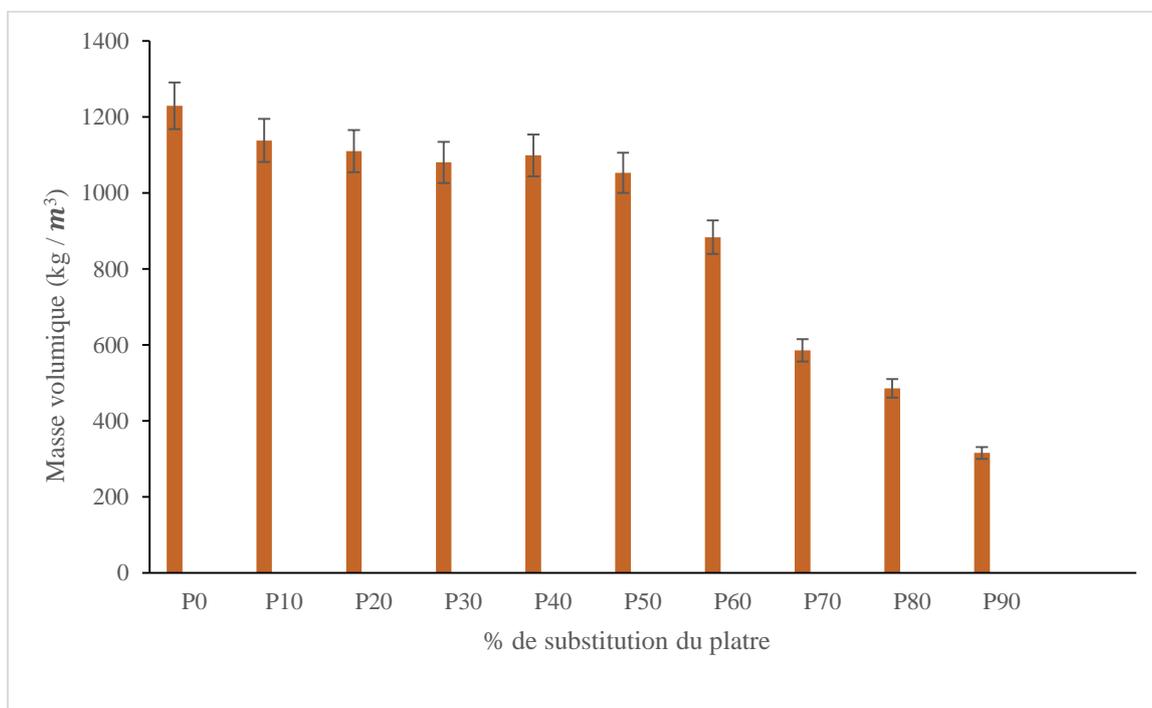


Figure 3-1 : Masse volumique des différents mélanges de plâtre et la mousse de polyuréthane

En observant les données, nous pouvons constater qu'à mesure que le pourcentage de la mousse polyuréthane augmente dans le mélange, la masse volumique diminue. Ceci peut être attribué au fait que la mousse est moins dense que le plâtre qu'elle a remplacé en formant un matériau composite léger. L'incorporation croissante de la mousse polyuréthane introduit des bulles d'air et des pores grâce à la structure cellulaire de la mousse qui réduit la densité globale du mélange.

3.2.1.2 Etalement :

D'après l'essai de consistance ; la quantité d'eau optimale pour gâcher 250 g de plâtre est de 150g avec un rapport E/P = 0,6 (Chapitre II tableau II.8).

La figure 3.2 suivante représente l'effet de la substitution partielle du plâtre par la mousse polyuréthane sur la consistance des pâtes.

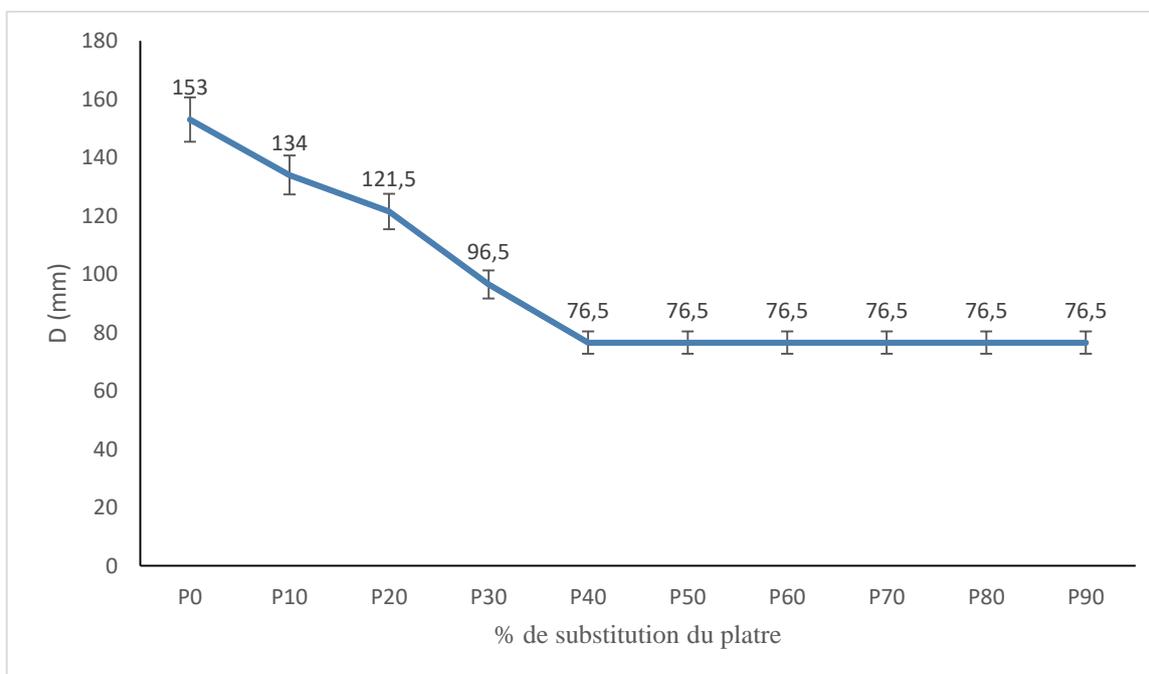


Figure 3-2 : l'influence de la mousse polyuréthane sur la consistance de plâtre

La Figure 3.2 montre une diminution progressive de la consistance du mélange de plâtre et la mousse polyuréthane par rapport au plâtre de référence, elle passe de 153 mm à 0% à 134 mm pour un taux de substitution de 10%, à 121,5 mm à 20% et à 96,5 mm à 30%. A partir d'un taux de substitution de 40%, la pâte prend la forme et le diamètre du moule tronconique (65 mm à la partie supérieure et 75 mm à la base du moule), en effet la réaction de durcissement du plâtre repose sur une réaction chimique entre le plâtre et l'eau formant du sulfate de calcium et que la mousse crée une structure hétérogène.[31]

3.2.1.3 La prise :

La figure 3.3 suivante représente l'effet de l'ajout de la mousse polyuréthane sur la prise du plâtre.

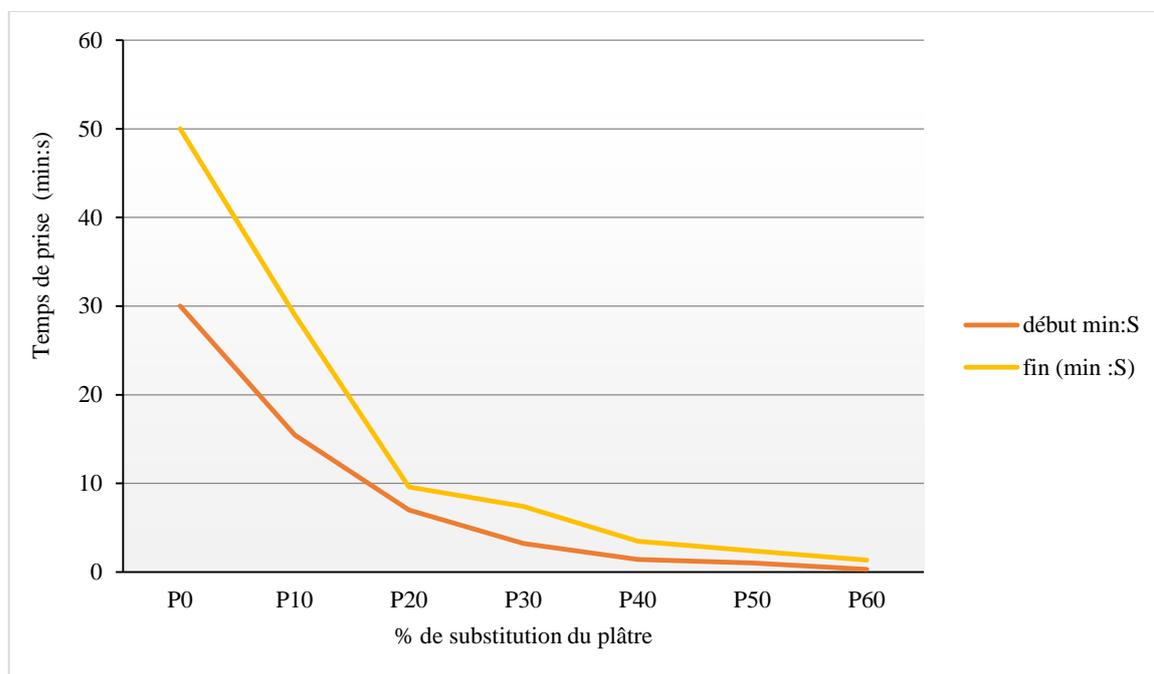


Figure 3-3 : Influence de la mousse polyuréthane sur la prise de plâtre

En analysant les résultats présentés par la Figure 3.3, on remarque que l'ajout de polyuréthane à différentes quantités semble avoir un impact significatif sur les temps de début et de fin de prise. Le temps de début de prise est réduit d'environ de moitié d'un taux de substitution à un autre pour atteindre 30 secondes seulement dans les mélanges contenant 60% et plus de mousse polyuréthane. La fin de prise est également influencée par le volume de la mousse polyuréthane. En effet, la fin de prise est accélérée de 20 minutes à un volume de la mousse de 10%, puis à 20 minutes autres à 20%. Dans les mélanges contenant 30% et plus de mousse polyuréthane, la vitesse de la baisse du temps de prise ralentit et ne semble pas être très influencée par le volume croissant de la mousse, en effet la réaction de durcissement du plâtre repose sur une réaction chimique entre le plâtre et l'eau formant du sulfate de calcium et que la mousse crée une structure hétérogène.

L'augmentation de la quantité de polyuréthane et la diminution visuelle de la quantité d'eau et a un effet cumulatif sur l'accélération de la prise du plâtre.

La prise de la pâte de référence P0 est la plus lente de tous les mélanges. Ceci est dû à la quantité d'eau de gâchage qui est assez importante qui retarde la cristallisation du dihydrate (gypse). En effet, en présence d'eau, l'hémihydrate (plâtre) passe en solution, le dihydrate se forme en fixant une partie de l'eau de la solution, la solution devient sursaturée en sulfate qui précipite ; en excès d'eau de gâchage le sulfate est dispersé et prends plus de temps à se précipiter.

3.2.2 Etat durci :

3.2.2.1 Porosité :

Les résultats de calcul de la porosité sont représentés dans la figure 3.4

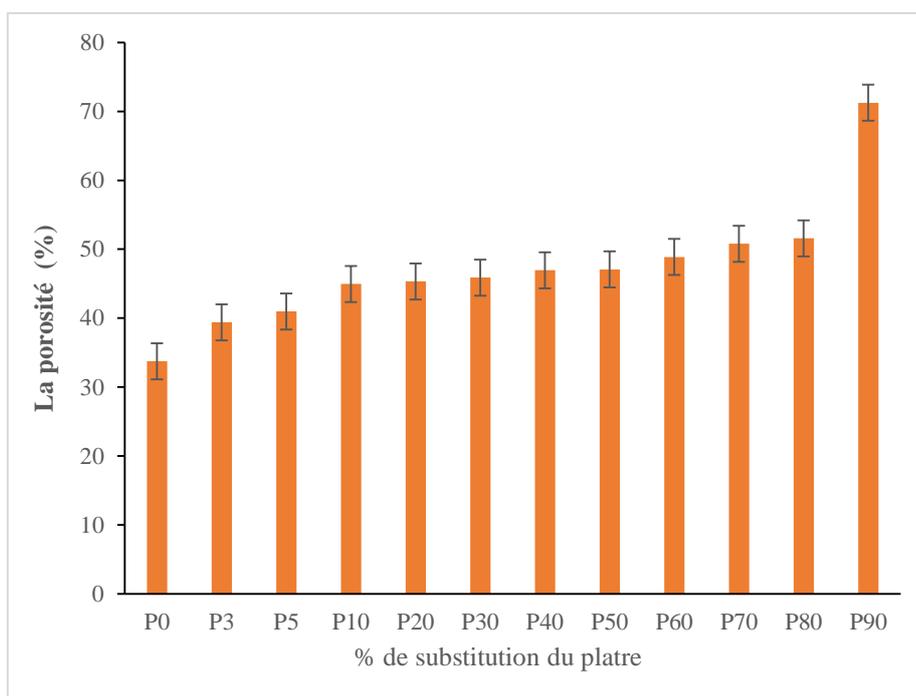


Figure 3-4 : Porosité des différentes formulations

En analysant les résultats représentés par la **figure 3.4**, nous constatons que la pâte de plâtre de référence (P0) a une porosité moindre par rapport aux autres mélanges incorporant les différents pourcentages de la mousse, ceci qui signifie que la pâte P0 est moins poreuse que les autres pâtes contenant la mousse de polyuréthane. De plus, L'incorporation croissante de la mousse polyuréthane augmente respectivement la porosité, cette augmentation peut être expliquée par la porosité importante de la mousse polyuréthane et par la formation de bulles d'air dans les mélanges lors du malaxage ; plus le taux de substitution volumique en mousse augmente plus l'échantillon devient poreux.[32]

3.2.2.2 Densité apparente :

Les résultats de calcul de la densité apparente sont représentés dans la **figure 3.5**

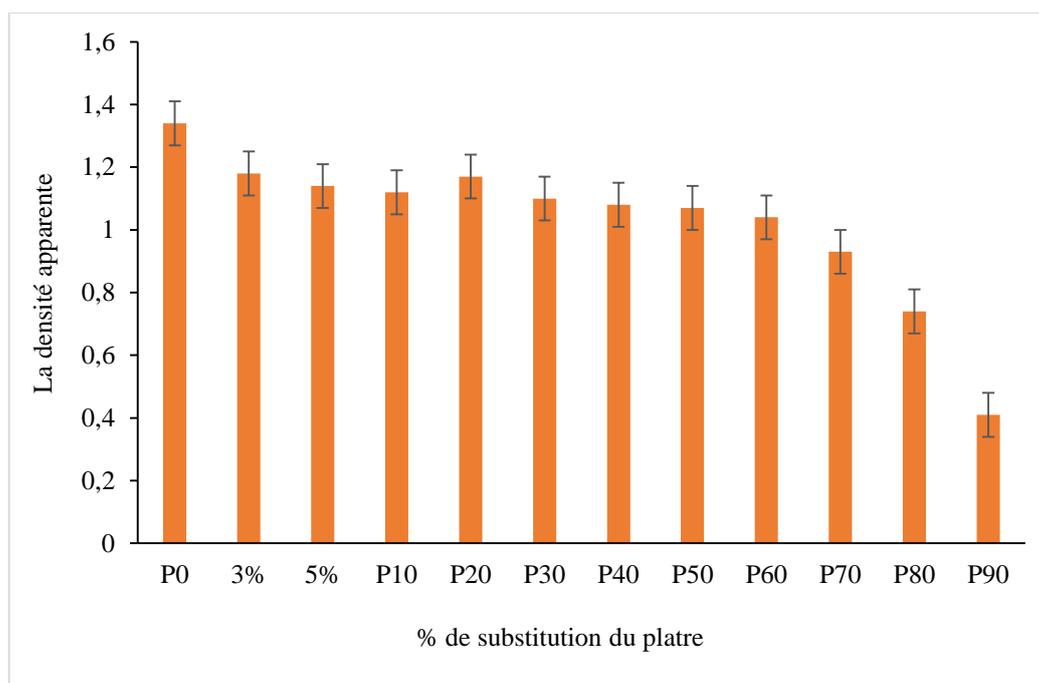


Figure 3-5 : Densité apparente des différents mélanges

En analysant les résultats présentés par la Figure 3.5, on remarque que la densité apparente des pâtes diminue en augmentant le pourcentage de la mousse.

Une explication de cet effet est, la mousse de polyuréthane incorporée est de faible densité. En outre l'augmentation de la quantité de polyuréthane incorporée requiert une grande quantité d'eau pour malaxer le mélange, impliquant en conséquence une augmentation de la porosité du matériau.

3.2.2.3 Absorption d'eau :

Les résultats de calcul de l'essai d'absorption d'eau sont représentés dans la **figure 3.6**

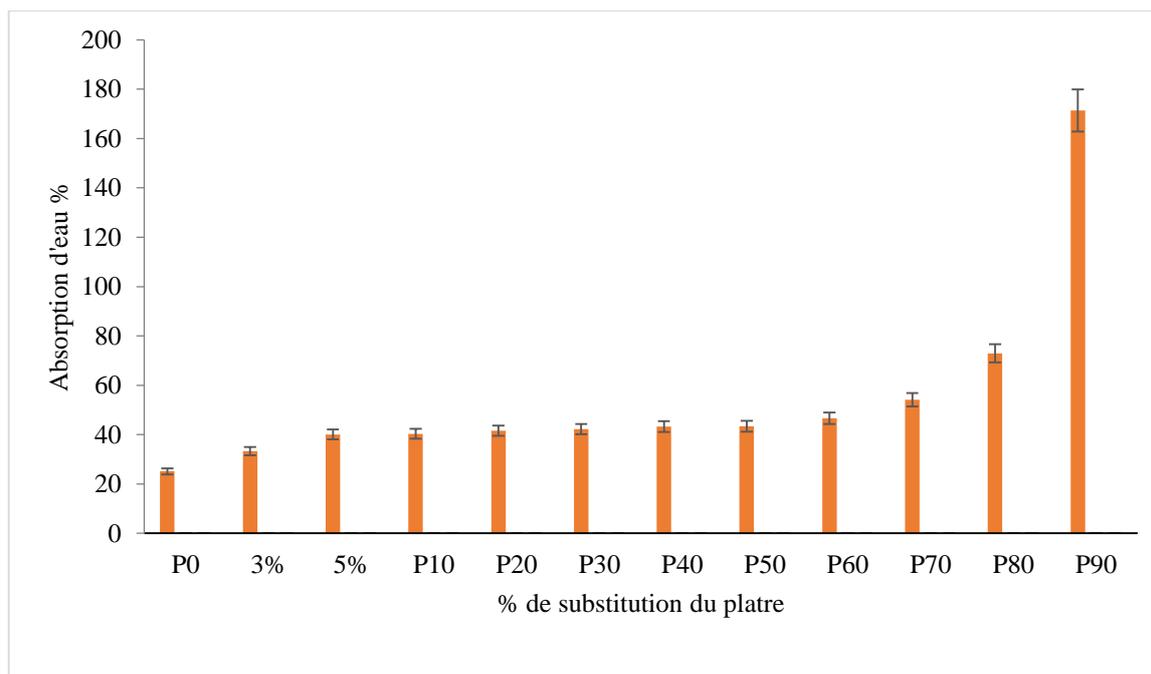


Figure 3-6 : Absorption d'eau des différents mélanges

En analysant les résultats présentés par la Figure 3.6, on remarque que l'absorption d'eau du plâtre augmente en augmentant le pourcentage de la mousse polyuréthane. Le taux augmente respectivement, de 8% à environ 21% lorsque le plâtre a été remplacé par 3% et 60% de mousse polyuréthane. Pour des taux de substitution allant de 70% à 90%, l'absorption d'eau augmente significativement et atteint un maximum de 171,39 %.

Les résultats mettent en évidence une augmentation de la quantité d'eau absorbée en fonction de l'incorporation croissante de broyats de mousse polyuréthane dans le plâtre, en effet, la plus faible densité des échantillons est liée à une plus forte porosité qui facilite par conséquent l'absorption d'eau.

3.2.2.4 Coefficient d'absorption d'eau par capillarité :

Les résultats de calcul de l'essai d'absorption d'eau par capillarité sont représentés dans la **figure 3.7**

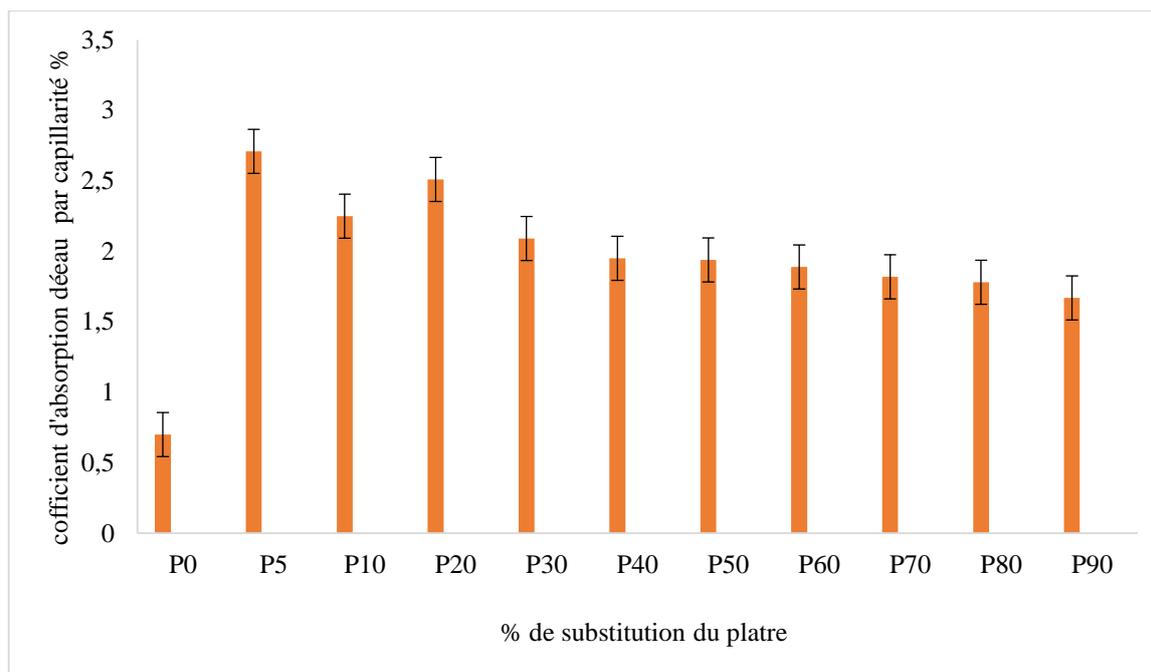


Figure 3-7 : Coefficient d'absorption d'eau par capillarité

De la Figure 3.7, on voit bien que le coefficient d'absorption d'eau par capillarité de la pâte de plâtre de référence est nettement inférieur à ceux des mélanges de plâtre et mousse polyuréthane. Ceci signifie que la pâte de référence a une structure plus homogène et plus compacte qui assure moins de voies capillaires par lesquelles l'eau peut être absorbée par rapport. La mousse polyuréthane rend la structure du mélange irrégulière et plus ouverte à la circulation de l'eau par capillarité.[32]

La baisse du coefficient d'absorption d'eau par capillarité quand la quantité de la mousse augmente peut s'expliquer par le fait que la mousse de polyuréthane, absorbe une grande partie d'eau de gâchage, par conséquent, elle se dilate et augmente de volume dans l'échantillon, ceci peut serrer et obturer les réseaux capillaires.

3.2.2.5 Rétention d'eau :

Les résultats de calcul de l'essai rétention d'eau sont représentés dans la **figure 3.8**

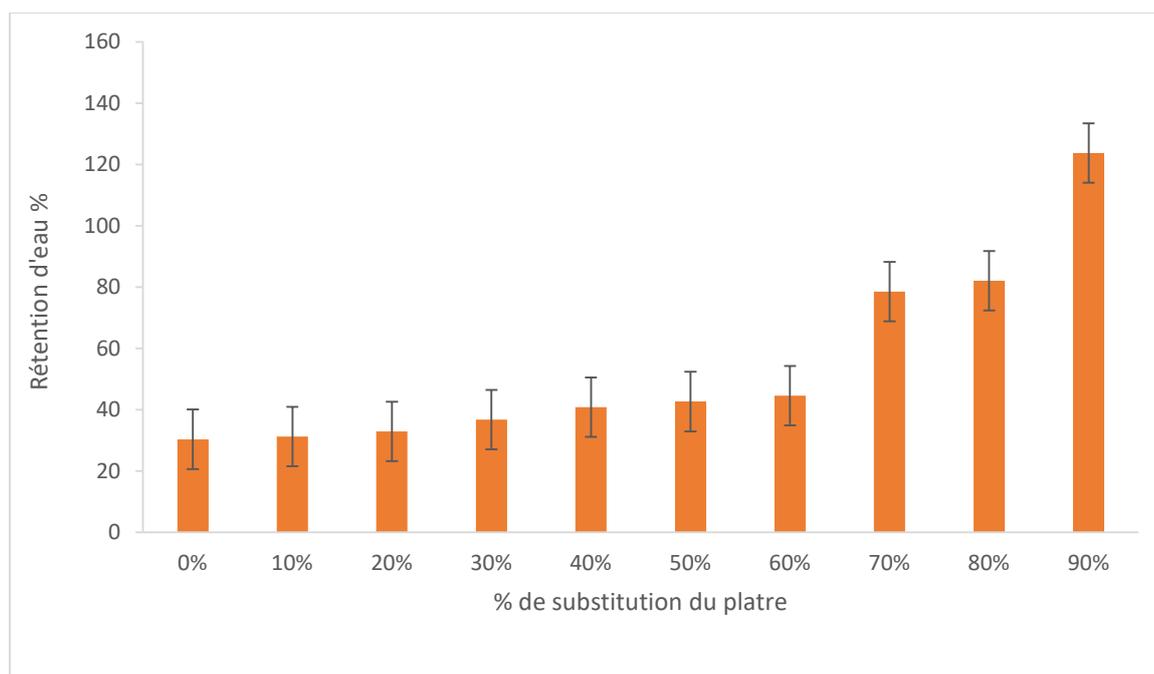


Figure 3-8 : Rétention d'eau

En analysant les résultats présentés par la Figure 3.8, on remarque que le plâtre de référence a une faible capacité de rétention d'eau, 30,38 %, par rapport aux autres mélanges. La rétention d'eau augmente successivement avec le taux de la mousse polyuréthane, cette augmentation avoisine 14% pour un taux de mousse arrivant à 60%, cependant, ce coefficient prend soudainement une accélération remarquable à partir d'un taux de 70% et franchit 123,70 % dans la pâte P90.

La mousse de polyuréthane a une tendance à se dilater ce qui peut augmenter le volume de l'échantillon qui peut créer des espaces où l'eau peut être retenue.

3.2.3 Résultats des essais mécaniques

3.2.3.1 La flexion :

Les résultats de calcul de l'essai de flexion sont représentés dans la **figure 3.9**

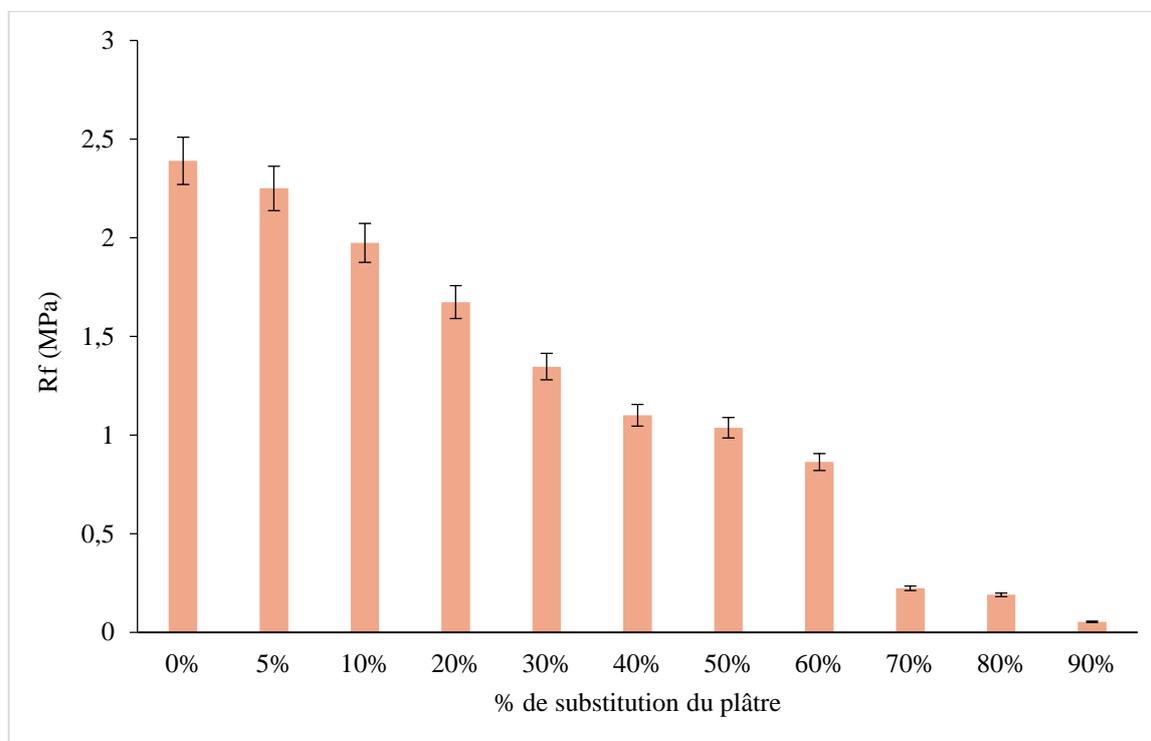


Figure 3-9 : Résistance à la flexion (Rf)

La figure 3.9 présente l'évolution des résistances à la flexion des différentes formulations de mélange plâtre et mousse de polyuréthane. D'après ces histogrammes, on constate une diminution successive des résistances à la flexion par rapport au plâtre de référence. La résistance de P0 est de 1,53 MPa chute à 0,83 MPa dans P30 ; cette diminution est due à la nature moins rigide de la mousse par rapport au plâtre. Entre P40 et P60, on remarque une diminution modérée de la résistance à la flexion. Ce qui signifie que la mousse commence à avoir un impact notable mais pas encore critique sur la résistance. La plus grande diminution semble se produire entre P80 et P90 d'ajout de mousse de polyuréthane. Cela indique que l'excès de mousse influence considérablement la résistance à la flexion.[33]

3.2.3.2 La compression :

Les résultats de calcul de l'essai de compression sont représentés dans la **figure 3.10**

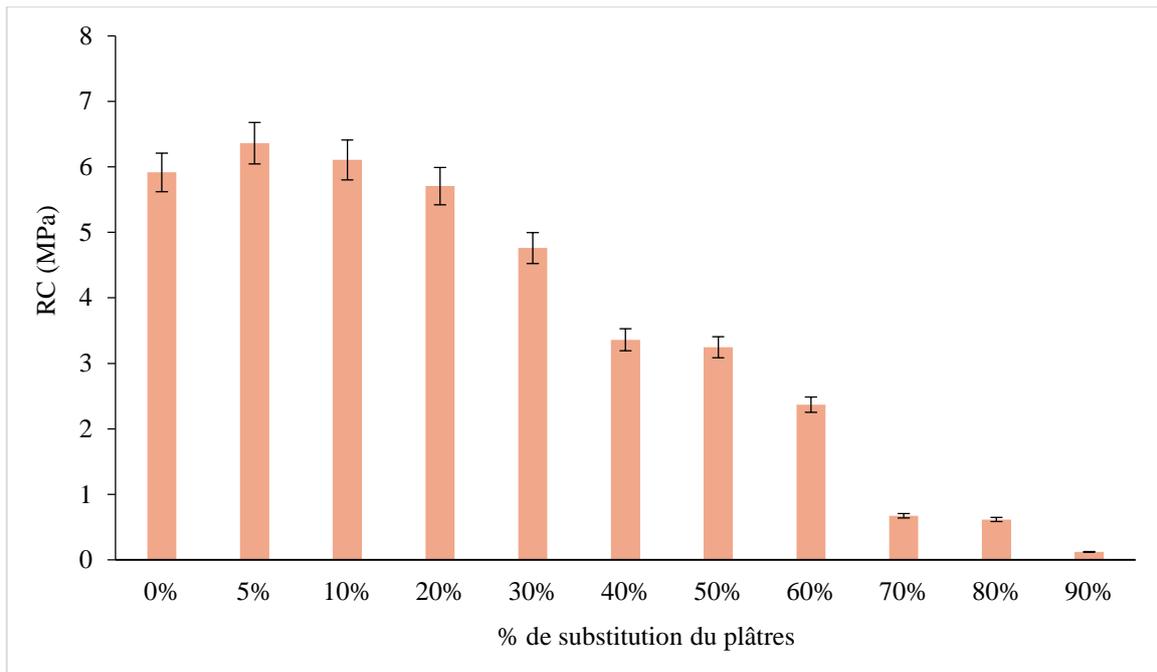


Figure 3-10 : : Résistance à la compression (Rc)

La Figure 3.10 présente l'évolution des résistances à la compression des différentes formulations de mélange plâtre et mousse de polyuréthane formulés. D'après ces histogrammes, on constate une augmentation successive de la résistance à la compression de P5 par rapport au plâtre de référence P0, cela indique que même une petite quantité d'ajout de mousse de polyuréthane peut avoir un impact positif sur la résistance à la compression. La résistance à la compression commence à diminuer successivement à partir de P20 jusqu'à P60 et une diminution de manière drastique, cela implique que les concentrations élevées de mousse de polyuréthane ont un effet très néfaste sur la résistance à la compression du plâtre.

3.2.3.3 La conductivité thermique :

Les résultats de calcul de l'essai de la conductivité thermique sont représentés dans la **figure 3.11**

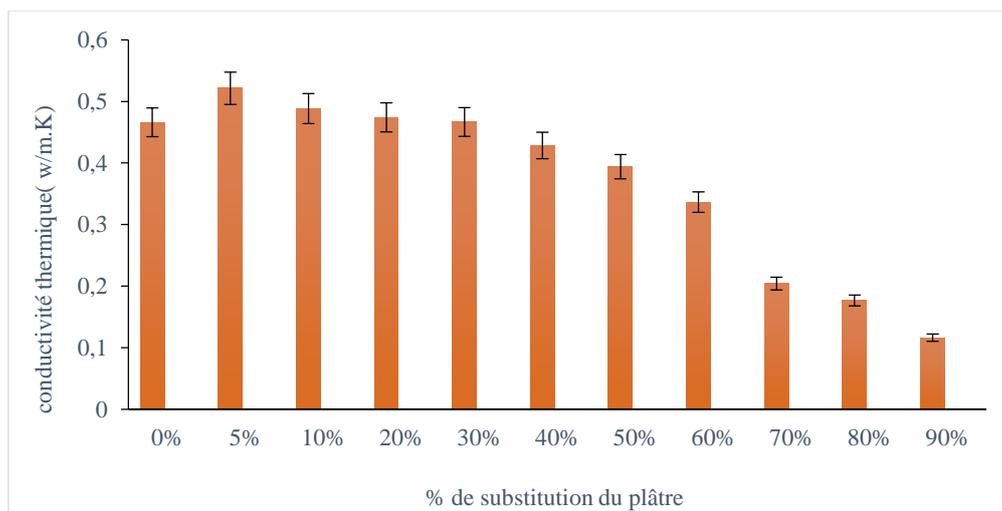


Figure 3-11 : Résultats de la conductivité thermique

En analysant les résultats présentés par la Figure 3.11, on remarque que la conductivité thermique augmente légèrement à des faibles à moyenne concentrations de la mousse de polyuréthane P5, P10 et P20 par rapport au plâtre seul P0 ; l'incorporation de mousse de polyuréthane à de faibles taux peut ne pas être aussi efficace pour améliorer les propriétés isolantes du mélange. A partir d'un taux de substitution de 40%, la conductivité thermique commence à diminuer progressivement avec l'augmentation de la concentration en mousse dans les mélanges. Cela signifie que ces concentrations offrent la meilleure isolation thermique. Les concentrations à partir de P70, P80 et P90 montrent une baisse importante de la conductivité thermique, ce qui s'explique par une saturation du plâtre par la mousse de polyuréthane qui améliore les performances thermiques globales du matériau.[32]

3.2.4 Le module de Young

Les résultats de calcul des vitesses des ondes sonique et du module de Young sont représentés dans les figures 3.12 et 3.13, respectivement.

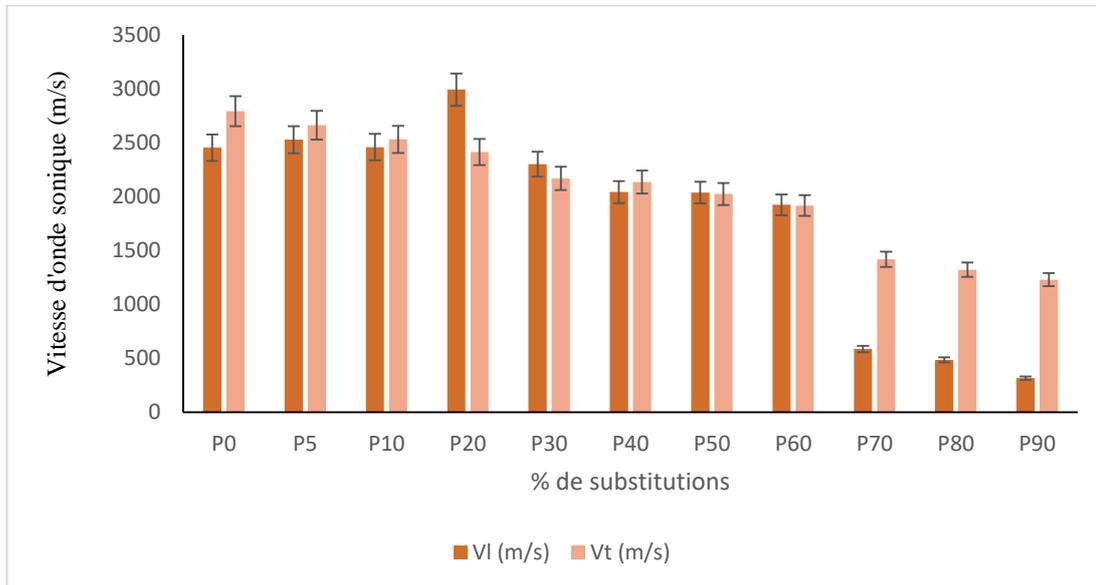


Figure 3-12 : Vitesses d’ondes sonique longitudinale (Vl) et transversale (Vt)

D’une vue globale, la figure 3.12 montre une diminution des vitesses soniques longitudinale et transversale avec l’augmentation de la mousse polyuréthane dans les mélanges.

La présence de la mousse polyuréthane peut introduire des interfaces discontinues ou des zones de faiblesse dans le matériau, ce qui peut perturber la transmission des ondes longitudinales et transversales.

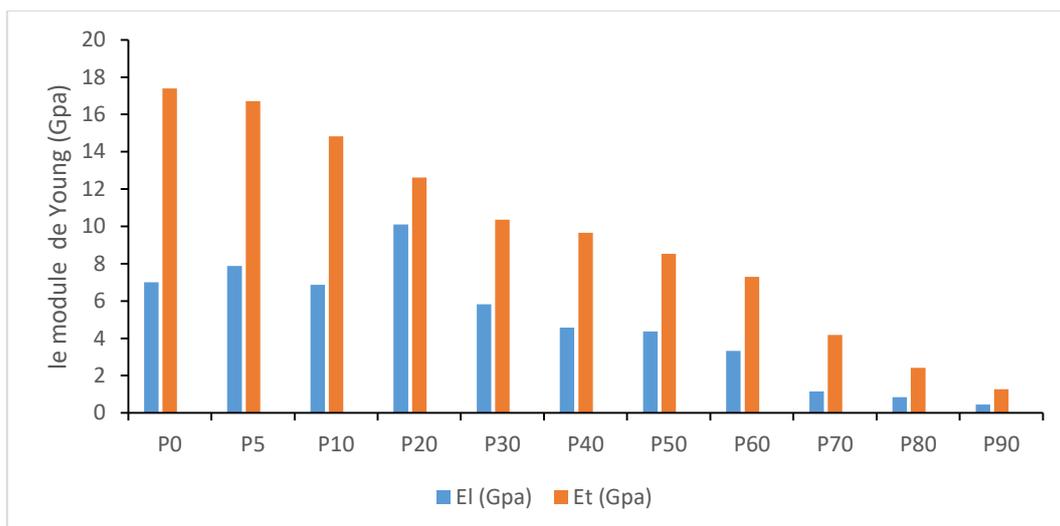


Figure 3-13 : Module de Young longitudinal et transversal

La figure 3.13 montre une diminution des valeurs de module de Young avec l’augmentation de la proportion de broyats de la mousse polyuréthane dans les mélanges.

La mousse polyuréthane est plus léger et moins dense que le plâtre, ce que peut réduire la rigidité globale du mélange. La présence des bulles d’air ou des vides dans la mousse polyuréthane peut également affaiblir les propriétés mécaniques du matériau composite.

3.2.5 Valeur de la capacité tampon hydrique (MBV) :

La figure 3.14 représente les valeurs de calcul de la valeur de la capacité tampon hydrique (MBV) des différents mélanges. La figure3.14 donne la classification des valeurs MBV selon le Nordtest Project.

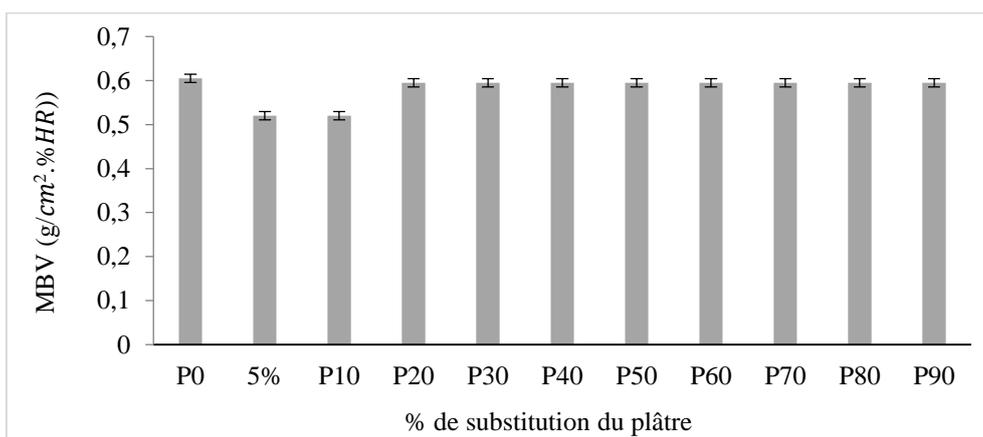


Figure 3-14 : Capacité tampon hydrique des différents mélanges

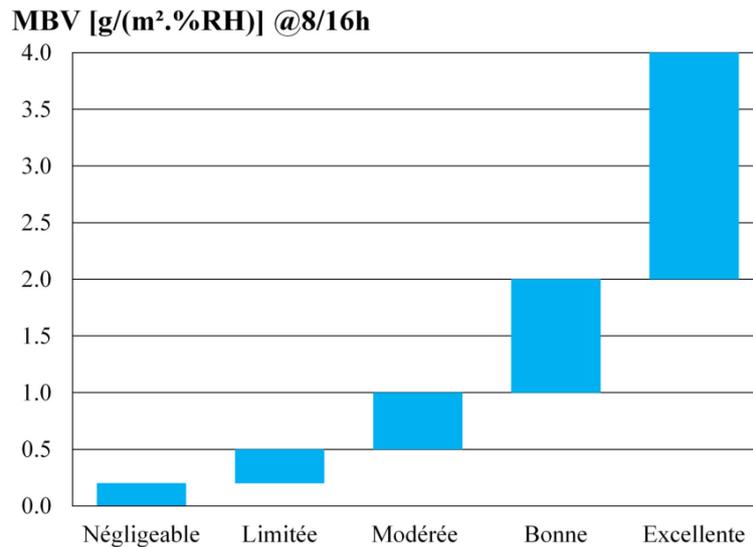


Figure 3-15 : Classification des valeurs MBV selon le Nordtest Project [Rodeet al., 2005]

De la figure 3.15, on voit bien que les valeurs moyennes MBV de tous les mélanges (plâtre seul ou mélangé à la mousse polyuréthane) varie entre 0,5205 et 0,605 (g/m².%RH). Ces valeurs appartiennent à l'intervalle $0,5 < MBV < 1$ (g/m².%RH). Selon la classification du Nortest Project [Rode et al .2005], les mélanges possèdent tous une capacité de régulation hydrique modérée. [33]

3.2.6 Infrarouge :

Les figures suivantes présentent l'analyse infrarouge de mélange de la mousse polyuréthane et le plâtre :

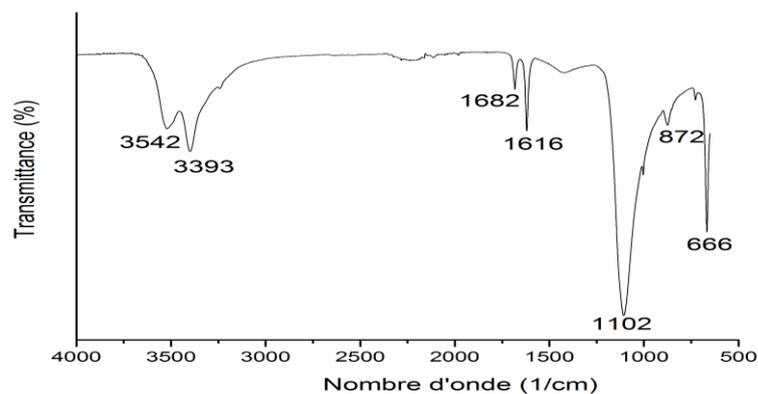


Figure 3-16 : Analyse infrarouge de pâte de plâtre

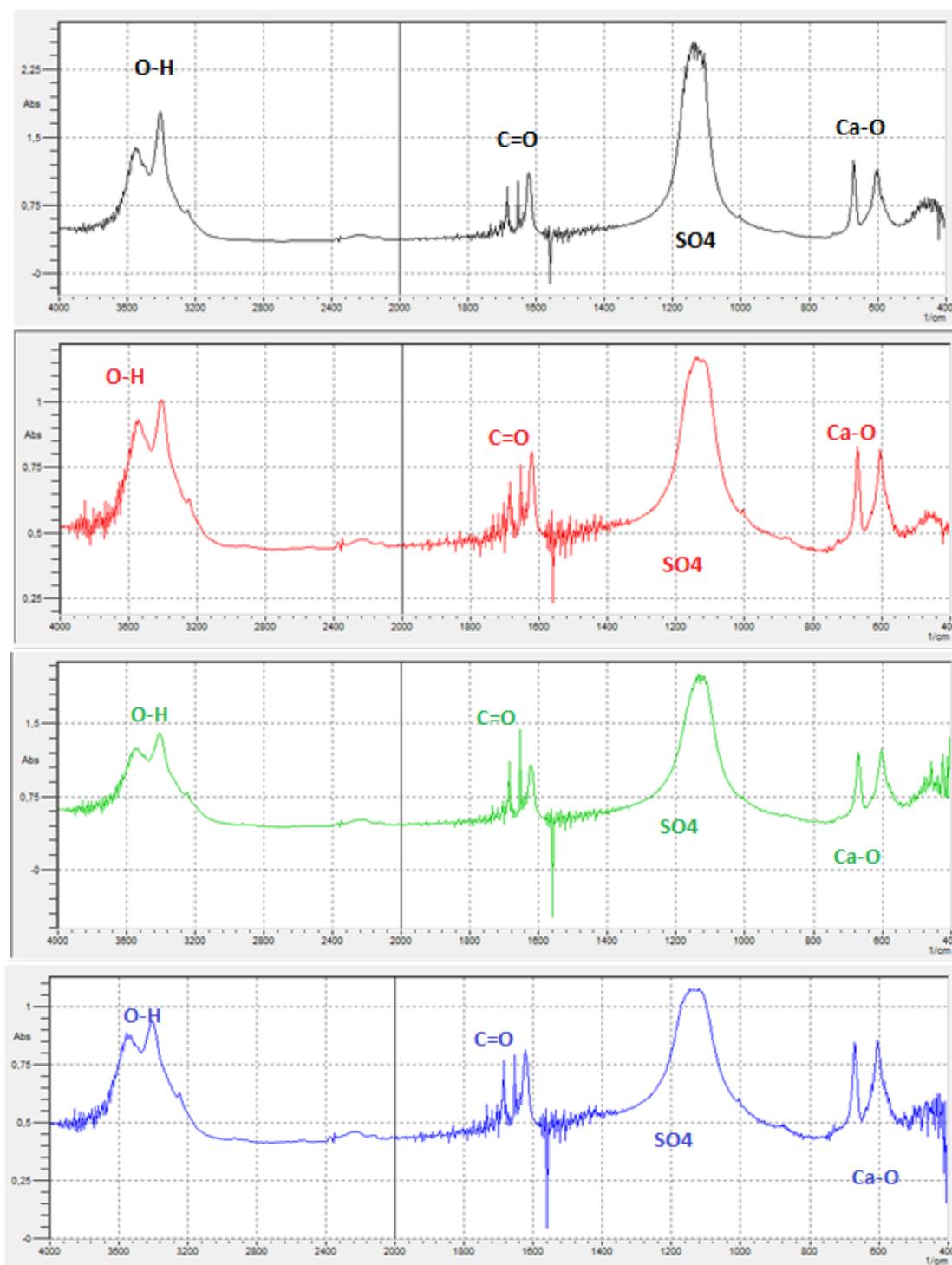


Figure 3-17 : Analyse infrarouge des mélanges plâtre et mousse polyuréthane (P30, P50, P60 et P70)

En comparaison avec le plâtre de référence, les spectres infrarouges des mélanges de plâtre et mousse polyuréthane présentent des caractéristiques différentes.

Spectre de la pâte de plâtre pure

- Bande large autour de 3400 cm^{-1} : Forte et prédominante en raison de la présence d'eau (OH).
- Bande forte autour de 1100 cm^{-1} : Correspondant aux vibrations asymétriques du groupe SO_4 .
- Bandes supplémentaires autour de 670 cm^{-1} , 600 cm^{-1} et 1130 cm^{-1} : Faibles mais présentes.

Spectres des mélanges (P30, P50, P60, P70) :

- Bandes autour de 3300 cm^{-1} (N-H) et 2900 cm^{-1} (C-H) : Augmentation progressive de l'intensité avec l'augmentation de la proportion de mousse polyuréthane.
- Bande autour de 1700 cm^{-1} (C=O) : Apparition et augmentation de cette bande avec la proportion croissante de polyuréthane, absente dans la pâte de plâtre pure.
- Diminution de la bande autour de 3400 cm^{-1} : Due à la réduction relative de l'eau (OH) par rapport à la mousse polyuréthane.
- Bandes autour de 1530 cm^{-1} et 1250 cm^{-1} : Apparition et augmentation, indiquant la présence de polyuréthane.
 - En constate d'après cette analyse que la mousse de polyuréthane empêche la dissolution de SO_4 .

3.3 Conclusion

A travers les résultats des différents essais physiques, mécaniques et thermiques, qui ont été réalisés sur le plâtre avec ajout de la mousse de polyuréthane à des pourcentages croissants variés (0%, 5%, 10% jusqu'à 90%), on peut tirer les conclusions suivantes :

- La porosité, l'absorption d'eau et le coefficient d'absorption capillaires augmentent en fonction du pourcentage de substitution.
- La résistance à la flexion et à la compression diminue en augmentant le taux de la mousse de polyuréthane, mais ça reste des valeurs acceptables pour un mortier de plâtre.
- Le comportement thermique s'améliore avec l'augmentation taux de la mousse. Ce qui assure le confort thermique.
- L'incorporation de la mousse polyuréthane dans les pâtes de plâtre contribue à la diminution de la masse volumique apparente. Ceci permet d'alléger le plâtre.

Conclusion générale

Les déchets constituent un vrai problème mondial à cause des effets néfastes qu'ils peuvent engendrer sur les écosystèmes, la santé humaine et l'économie d'un pays. En effet, les déchets représentent l'un des dangers les plus graves pour l'environnement surtout par la pollution de l'eau, du sol et de l'air, ce qui impose leur bonne gestion. Cette dernière nécessite une coopération et une coordination continue entre toutes les parties prenantes, les politiques, les économistes et les scientifiques.

Ce contexte présente des méthodes permettant d'alléger des pâtes à base de plâtre en y incorporant de polymère. Le recyclage de matériaux polymère sous forme de broyats permet d'obtenir un matériau final de qualité acceptable tout en se révélant simple à mettre en œuvre et conforme aux réglementations.

Le but principal de cette recherche est d'évaluer expérimentalement l'effet de l'ajout de la mousse de polyuréthane sur les propriétés de plâtre à savoir les résistances mécaniques et physico-thermique. Pour cela le mélange à base de plâtre et celui incluant de la mousse polyuréthane ont été confectionnés avec des pourcentages croissants en mousse (P0 : P90).

L'analyse des résultats expérimentaux a permis de conclure que :

- La masse volumique a observé une diminution selon les pourcentages d'ajout l'effet prépondérant de la chute de densité revient à la faible densité des broyats du polyuréthane. La densité de polyuréthane était plus faible que celle du plâtre.
- L'incorporation croissante de la mousse de polyuréthane augmente progressivement la porosité. Cette augmentation est causée par la porosité importante de la mousse de polyuréthane et par l'augmentation de la quantité de bulles d'air dans le mélange. Cela conduit à une plus grande capacité d'absorption d'eau. En entraînant une diminution importante de la résistance. Cependant, certains échantillons formulés atteignent et dépassent le minimum requis pour la résistance à la flexion et pour la résistance à la compression.
- L'ajout de ces broyats de polyuréthane améliore cependant les propriétés thermiques en réduisant la conductibilité thermique.

ANNEXE :

- Résultats des essais de consistances des mélanges plâtre –mousse

Formulation	Quantité de plâtre (g)	Quantité de mousse polyuréthane (g)	Quantité d'eau (g)	E/P	Ø (mm)
10%	225	2,5	138,56	0,6	134
20%	200	5	123,56	0,6	1215
30%	175	7,5	108,56	0,6	96,5
40%	150	10	93 ,56	0,6	76,5

- La masse volumique de mélange de plâtre et la mousse polyuréthane

Formulation (%)	La masse volumique (kg / m³)
P0	1116,66
P5	1229,56
P10	1138,18
P20	1110, 31
P30	1080,485
P40	1098,96
P50	1053,05
P60	883,41
P70	585 ,59
P80	485,86
P90	315,68

Annexe

- Résultats des essais de prise plâtre + la mousse polyuréthane

Formulations	E/P	Quantité d'eau (g)	Quantité de polyuréthane (g)	Quantité de plâtre (g)	La prise	
					Début (min : S)	Fin (min : S)
P0	0,6	150		250	30 :00	50 ,00
P10		138,56	2,5	225	15 :45	29 ,00
P20		123,56	5	200	7 :00	9 ,58
P30		108,56	7,5	175	3 :20	7 ,39
P40		93,56	10	150	1 :40	3 ,46
P50		78,56	12,5	125	1 :00	2 ,39
P60		63,56	15	100	0 :30	1, 35

- Les résultats de Porosité, densité apparente et l'absorption

Formulations	Ms (g)	Mst (g)	Mph (g)	Pr (%)	D	A (%)
P0	104 ,02	13,014	52,75	33,75	1,34	25,11
3%	106,815	142,41	52,09	39,41	1,18	33,32
5%	101,24	138,37	47,77	40,98	1,14	40,05
P10	95,76	134,4	49,32	44,95	1,12	40,35
P20	93,25	127,45	47,36	45,33	1,17	41,55
P30	87,53	124,48	45,35	45,89	1,1	42,21
P40	85,7	122,81	43,78	46,96	1,08	43,29
P50	79,53	114,04	40,73	47,07	1,07	43,39
P60	77,01	112,94	39,44	48,88	1,04	46,65
P70	68,65	105,83	32,63	50,79	0,93	54,15
P80	51,515	85,09	19,53	51,59	0,74	72,95
P90	23,14	62,8	7,14	71,25	0,41	171,39

- Les coefficients d'absorption d'eau par capillarité

Formulations	M ₁ (à 10min)	M ₂ (à 1H30min)	C (%)
P0	170,25	177,23	0,70
5%	176,315	203,42	2,71
P10	173,59	196,055	2,25
20%	152,216	177,29	2,51
30%	161,255	182,17	2,09
40%	160,46	179,995	1,95
50%	158,34	177,71	1,94
60%	156,84	175,76	1,89
70%	119,875	138,81	1,82

Annexe

80%	107,325	125,135	1,78
90%	82,645	99,12	1,67

- Résultats Rétention d'eau

Formulation (%)	Mst (g)	Ms (g)	Rétention d'eau %
P0	174,26	133,62	30,38
P10	199,25	155,66	31,29
P20	190,76	145,30	32,91
P30	185,44	135,54	36,81
P40	183,35	130,92	40,04
P50	176,67	125,79	41,71
P60	174,48	121,56	43,53
P70	141,39	79,21	79,27
P80	136,90	75,20	82,04
P90	85,90	47,75	123,70

- Résultats de mesure du module de Young

Formulation	ρ (kg)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	E_L (Gpa)	E_T (Gpa)
P0	1116,66	2452,74	2790,90	7,01	17,40
P5	1229,56	2527,53	2660,42	7,875	16,7
P10	1138,18	2457,88	2530,41	6,86	14,82
P20	1110,31	2991,49	2412,245	10,11	12,62
P30	1080,485	2299,34	2167,51	5,82	10,36
P40	1098,96	2042,12	2133,39	4,58	9,665
P50	1053,05	2036,665	2023,765	4,365	8,534
P60	883,41	1923,75	1915,78	3,325	7,3
P70	585,59	585,59	1417,95	1,155	4,175
P80	485,86	485,86	1321,375	0,845	2,41
P90	315,68	315,68	1229,63	0,445	1,275

Annexe

- Résultats de mesure de la résistance à la flexion et à la compression

Formulations	Résistance à la flexion (MPa)		Résistance à la compression (MPa)	
	(La force kN)	La contrainte (MPa)	(La force kN)	La contrainte (MPa)
P0	1,53	2,39	9,466	6,4
5%	1 .4573	2.25	12,04	6,36
P10	1,2416	1,97	10,65	6,10
20%	1,1803	1,67	9,06	5,71
30%	0,8356	1,35	6,75	4,76
40%	0,746	1,10	5,02	3,36
50%	0,6883	1,04	4,84	3,25
60%	0,5513	0,86	3,79	2,37
70%	0,1383	0,22	1,615	0,67
80%	0,1222	0,19	1,1066	0,62
90%	0,035	0,05	0,1966	0,12

- Résultats de la conductivité thermique

Formulation %	Conductivité thermique (w /m. K)
P0	0,518
P5	0.521
P10	0,488
P20	0,474
P30	0,466
P40	0,428
P50	0,394
P60	0,336
P70	0,204
P80	0,177
P90	0,116

Annexe

- Les résultats de MBV

Formulation	MBV absorption 8H	MBV désorption 16H	MBV moyenne (g/(cm ² .%HR))
P0	0,446	0,744	0,605
5%	0,446	0,595	0,52
P10	0,446	0,595	0,52
20%	0,595	0,595	0,595
30%	0,595	0,595	0,595
40%	0,595	0,595	0,595
50%	0,595	0,595	0,595
60%	0,595	0,595	0,595
70%	0,595	0,595	0,595
80%	0,595	0,595	0,595
90%	0,595	0,595	0,595

Bibliographies

- [1] Sylvain MEILLE., “Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure“, thèse de doctorat, L’INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, 2001.
- [2] F. Teaoka., J. Takahashi: Dimensional changes and pressure of dental stones set in silicone rubber impressions. *Dent Mater*, 2000 ; 16 : drite 144.149.
- [3] M. A. Hamida : Effet de l'humidité sur les caractéristiques thermiques et mécaniques de matériaux utilisés dans la construction. Mémoire de magister, université Mentouri de Constantine, 2010.
- [4] C.N.E.R.I.B., “Recommandations pour la construction en plâtre“, Centre National d’Etudes et de Recherche Intégrées au Bâtiment, 2003.
- [5] Daligand D., Plâtre. *Techniques de l’Ingénieur, Traité Construction C 910*, 2002.
- [6] SONEB.I.M., “ Opération expérimentale d’un logement construit en mortier plâtrebanche à Rabat“, centre expérimentale du bâtiment, 1989.
- [7] D.G. Hepworth., “The manufacture and mechanical testing of thermosetting natural fibre composites “, *journal of materials science*, 2000.
- [8] DJOUDI Amina., “Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leur renforcement par les fibres végétales du palmier dattier“, thèse de magister, UNIVERSITE DE LAGHOUAT, 2001.
- [9] L’école polytechnique, 08/12/2006. Hamouda Jaffel « Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre ».
- [10] Collet, F., Pretot, S., 2012. Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Construction and Building Materials* 36, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139>.
- [11] **Abdelmoumen Chaker A.**, Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Université de Constantine. 1999.
- [12] L’article 3 de la Loi du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- [13] l’article 5 de la loi 01/19 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

Bibliographie

- [14] Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 3 – 3e trimestre 2005, Quelles solutions pour le recyclage des déchets du bâtiment. PUBLIÉ EN FÉVRIER 2006
- [15] l'article L.541-1-1 du Code de l'Environnement
- [16] Les Dossiers du CSTC – Cahier n° 3 – 3e trimestre 2005, Quelles solutions pour le recyclage des déchets du bâtiment. PUBLIÉ EN FÉVRIER 2006
- [17] GENG J, Feng F, Wang DT. Application of Polyurethane Foams in the Environmental Field and Reuse of the Materials. *Materials Review*, 2012, 26(2) : 78-83.
- [18] Wang JR, Chen DJ. The chemical and physical recycling methods for polyurethane wastes. *China Elastomerics*, 2003, 13(6): 61-65.
- [19]. Ge ZQ, Xu HX, Li ZY, et al. Treatment and Recovery Methods for Polyurethane Wastes. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2008, 6(1): 65-68
- [20] Cao MG, Cao XR. Recycling and Disposing Methods for Rigid Polyurethane Foamed Plastic Wastes. *Plastics*, 2005, 34(14): 14-18.
- [21] Xu WC, Song WS, Zhu CC, et al. The recycle and reuse of the polyurethane. *China Elastomerics*, 2008, 18(2): 65-68.
- [22] Zhang YX. Recycling Technology of Used Thermosetting Plastics. *China Plastics*, 1997, 11(3): 56-64
- [23] Jiang BX, Xue HW, Xu B, et al. Waste rigid polyurethane foam plastics recycling regenerative production insulation board. CN1631631, 2005. 06. 29
- [24] Cullity, B.D et Stock, S.R. (2001) *elements of X-Ray Diffraction*. 3rd edition. Prentice Hall
- [25] [Bellamy, L.J. (1995). *The infra-red Spectra of Complex Molecules*. London ; Chapman and Hall
- [26] METHODE DE MESURE DE PROPRIETES ELASTIQUES PAR ULTRASONS ; organisation mondiale de la propriété Intellectuelle (27.06.2013)
- [27] Contribution à l'Etude de la durabilité de mortier de plâtre thèse doctorat université Ouargla]
- [28] **NORDTEST (Rode et al., 2005 valeurs de la capacité tampon hydrique (Moisture Buffer value MBV) :**
- [29] Collet, F., Chamoin, J., Pretot, S., Lanos, C., 2013. Comparison of the hygric behaviour of three hempconcretes. *Energy and Buildings* 62, 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.010>
- [30] Veronica Calderon Universidad de Burgos. Use of polymer-based materials to manufacture plaster **Article** · October 2013

Bibliographie

[31] Matthieu Horgnies Holcim innovation Universidad de Burgos. Use of polymer-based materials to manufacture plaster **Article** · October 2013

[32] Buggy M, Odriscoll B W. Recovery of polyol from flexible polyurethane foam wastes. *Key Eng Mater*, 1994, 99: 65.

[33] Rode, C., Peuhkuri, R.H., Mortensen, L.H., Hansen, K.K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J., 2005. Moisture buffering of building materials - BYG·DTU R-126.

Références normatives :

NF P 18-558 : Granulats. Détermination de la masse volumique absolue des fines. Association française de normalisation (Afnor), Paris 1990

NF P 94-057 : l'analyse granulométrique des sols par la méthode de sédimentation. Paris 1992

NF EN 196-6. P15-476 : détermination de la finesse de ciment, partie 6 de décembre 1989

NF B12-401 : Détermination les caractéristiques de divers types de plâtres. Et les essais sur les plâtres. Paris 1987,

ASTM C 67-03a: Standard specification set by the American Society for Testing and Materials (ASTM) that outlines the test methods for sampling and testing brick and structural clay tile. États-Unis.2003

EN 1015-18 : détermination de la densité des mortiers frais et durcis utilisés pour la construction de maçonnerie. Europe 2002.

PCT/FR2012/052980 : METHODE DE MESURE DE PROPRIETES ELASTIQUES PAR ULTRASON ; organisation mondiale de la propriété Intellectuelle (27.06.2013)