

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE M'HAMED BOUGARA –BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de Génie Des Matériaux

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme Master

Spécialité : Génie de matériaux

Option : Sciences des Matériaux pour la Construction Durable

THEME

**Etude et caractérisation physique et
mécanique de plâtre recyclé**

Réalisé Par :

-MERMAT FARES.

-KICHE ABDNOURE.

Sujet Proposé et suivi par :

Mme RABHI .B.



Résumé

Le recyclage du plâtre mis en jeu deux grands volets, économique et environnemental, réduire le prix de revient tout en préservant la nature par les tonnages élevés de déchets encombrants qu'on peut récupérer.

Par ce travail expérimental nous avons essayé de contribuer à la valorisation du déchet plâtre et voir la possibilité de son réintroduction dans la chaîne de fabrication des matériaux à base de plâtre

Afin d'atteindre notre objectif nous avons procédé à la récupération de déchets de plâtre disponibles (déchet de plâtre de construction et déchet de plâtre utilisé en orthopédie) ensuite ces matériaux ont été traités (concassés, broyés et tamisés).

Les échantillons obtenus ont été classés selon le refus sur tamis en plâtre gros et plâtre fin.

Etant donné que le plâtre est déjà hydraté suite à son gâchage lors de son premier emploi, il a subi un traitement thermique afin de récupérer ses propriétés liantes.

Le plâtre ainsi récupéré a subi une série d'essais de caractérisation physicomécaniques en comparaison avec un plâtre témoin.

Les résultats d'essais physiques et mécaniques sont acceptables surtout pour le plâtre fin.

L'analyse minéralogique montre que le recyclage du plâtre a été réussi à cause du taux élevé en Basanite (semi hydrate) présent.

Mots clés : Plâtre, déchet, recyclage, semi hydrate.

Remerciement



Dédicas



Dédicas





Table des matières

Remerciement.....	III
Dédicas.....	II
Table de Figures.....	IV
Table de Tableaux.....	V
Introduction générale.....	1
Chapitre I :	3
I.1.Définition de plâtre :	4
I.2.Historique :	4
I.3.Le gypse :	5
I.3.1. Le gypse naturel :	5
I.3.2.Gypse de synthèse :	6
I.3.3. Caractérisation de gypse :	7
I.3.3.1. Structure cristalline de gypse naturel :	7
I.4.Les anhydrites :	9
I.4.1.La réaction d'hydratation du plâtre autrement dit la prise du plâtre :	10
I.5.Définition de semi-hydrates :	12
I.5.1.Le semi-hydrate β :	12
I.5.2.Le semi-hydrate α :	13
I.6.Propriétés chimiques et physiques de plâtre semi hydrate :	13
I.6.1. Les semi-hydrates α :	13
I.6.2. Les semi-hydrates β :	13
I.7.principaux propriétés du plâtre :	15
I.7.1.Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie :	15
I.7.2.Humidité des locaux :	16
I.7.3. Isolement acoustique :	18
I.7.4.Correction acoustique :	19
I.7.5.Résistance au feu :	19
I.8.Fabrication du plâtre :	19
I.8.1. L'extraction :	19
I.8.2.Concassage-calibrage :	20
I.8.2 .1.Concasseur à mâchoire :	21

I.8.2.2.concasseur à cylindre dentés :	21
I.8.2.3.Concasseur à cylindre unique et mâchoire :	21
I.8.2.4.Concasseur à percussion (à marteaux):	21
I.8.3.La cuisson :	21
I.8.3.1.La cuisson du plâtre bêta :	22
I.8.3.2.La cuisson du plâtre alpha :	23
I.8.4.Le broyage:	24
I.8.4.1.Le broyage standard :	24
I.8.4.2.Le broyage / sélectage :	24
I.8.5.L’homogénéisation et l’adjuvantation :	24
I.8.6.Le contrôle et la validation des produits :	24
I.8.7.Conditionnement et la logistique :	25
II -Recyclage du plâtre :	25
II.1. introduction :	25
II.2. La valorisation des déchets à base de plâtre :	28
II.2. 1.Les tonnages et la qualité des déchets :	29
II.2. 1.1.Les filières d’élimination :	29
Chapitre II :	31
Matériels et méthodes de caractérisations	31
II.1.Protocole d’essais :	32
II.2.Essais physique :	34
II.2.1. Détermination de la finesse de mouture :	34
II.2.2.Détermination de la consistance normale :	34
II.2.2.1. Equipements et matériaux :	35
II.2.2.2. Réalisation de travail :	35
II.2.2.3.Détermination du temps de prise :	36
II.2.2.3.1. Equipements et matériaux :	37
II.2.2.3.2. réalisation de travail :	37
II.3.Détermination des résistances mécaniques à 14 jours :	38
II.3.1. Objet et domaine d’application :	38
II.3.2. moules et éprouvettes.	38
II.3.2.1. moule :	38
II.3.2.2. Préparation des éprouvettes :	40

II.3.2.3 .nombre d'éprouvettes essayées :.....	41
II.4. Essai de rupture par compression :.....	42
II.4.1.Appareillage :.....	42
II.4.1.1.Dispositif de compression :.....	42
Consistant en deux plaques en métal, d'au moins 10 mm	42
II.4.1.2. Machine d'essai :	42
II.4.1.3. Mode opératoire :	43
II.4.1.4.Expression des résultats :	43
II.5.Essai de rupture par flexion :.....	44
II.5.1. Appareillage :.....	44
II.5.1.1. Dispositif de flexion.....	44
II.5.1.2. Machines d'essai :.....	44
II.5.1.3. modes opératoires :	45
II.5.1.4. Résultats :.....	45
II.6.1.Mesure de la masse spécifique :.....	46
II.6.2.Principe :	46
II.6.3.Appareillage :.....	46
II.6.4.Mode opératoire :.....	46
II.6.5.Expression du résultat :	47
II.7.Analyse structurale par diffraction de rayon X « DRX » :.....	48
II.7.1.Définition :	48
II.7.2.principe :.....	48
Chapitre III :.....	50
Résultats et discussions	50
III.1 Introduction :.....	51
III.2.1.Détermination de la consistance normal :.....	51
III.2.2.Détermination de début et fin de prise de différent type de plâtre :.....	52
III.3 .Résistance mécanique à la rupture par compression :.....	53
III.3.1.la résistance mécanique de rupture par flexion :.....	55
III.4.Analyse minéralogique du pâtre avant et après recyclage :	57
III.4 Essai physique :.....	59
III.4.1.Détermination de la masse spécifique :.....	59
Conclusion générale :.....	60

Table de Figures

Figure I.1 : Différents systèmes de cristallisation de gypse	6
Figure I.2 : Morphologie du cristal de gypse.	7
Figure I.3 : structure cristalline du gypse	8
Figure I.4 : solubilité des différentes phases du sulfate de calcium en fonction de la température.....	11
Figure I.5 : photo prise au MEB de la forme des cristaux d'hémi hydrate β	12
Figure I.5 : photo prise au MEB de forme d'hémi hydrate β ($5\mu\text{m}$).....	12
Figure I.6 : photo prise au MEB de forme d'hémi hydrate α ($5\mu\text{m}$).....	13
Figure I.7 : extraction du gypse à ciel ouvert.	20
Figure I.8 : concassage du gypse.....	20
Figure I.9 : four de cuisson du gypse	22
Figure I.10 : le déchet de plâtre récupéré	25
Figure I.11 : le recyclage de plâtre.	26
Figure I.12 : le cycle de vie de plâtre.	27
Figure I.13 : Déchets de plâtre sur un chantier de déconstruction.	28
Figure II.1 : régime opté pour le recyclage du plâtre.	34
Figure II.2 : détermination de la consistance normale.	36
Figure II.3 : détermination de temps de pris par appareil de Vicat.	38
Figure II.4 : Moule 4X4X16.	39
Figure II.5 : remplissage des éprouvettes.....	40
Figure II.6 : malaxeur a mortier.	41
Figure II.7 : les éprouvettes.....	42
Figure II.8 : appareil pour essai de compression.....	43
Figure II.9 : essai de flexion.....	45
Figure II.10 : mesure de la masse spécifique	47
Figure II.11 : d'effraction des rayons.....	48
Figure II.12 : DRX Philips X'pert.....	49
Figure III.1 : la consistance normale.	51
Figure III.2 : le début de prise.	52
Figure III.3 : fin de prise.	53
Figure III.4 : Les résistances à la compression de différents plâtre	54
Figure III.5 : les résistances mécaniques à la flexion de différents plâtre	55
Figure III.6 : les résistances mécaniques à la flexion avec des éprouvettes avec fibre.	56
Figure III.7 : Analyse minéralogique du plâtre avant recyclage.	57
Figure III.8 : Analyse minéralogique du plâtre après recyclage.....	58

Table de Tableaux

Table des matières	II
Tableau I.1 : Caractéristiques des semi-hydrates α et β	14
Tableau II.1 : les étapes du recyclage du plâtre	32
Tableau III.1 : Consistance normale de différents types de plâtre	51
Tableau III.2 : Résultats de début et fin de prise de différent type de plâtre.....	52
Tableau III.3 : Résistance mécanique à la compression.....	53
Tableau III.4 : Résistance à la flexion.....	55
Tableau III.5 : Résistance à la flexion avec fibre.....	56
Tableau III.6 : détermination de la masse spécifique	59

Introduction générale

Les déchets de construction sont le plus souvent mis en décharge, seule une petite partie peut être traitée. Une quantité limitée de déchets de construction est déjà réutilisée comme matériau pour la construction, en tant que matière première secondaire. Elle est aussi employée comme matériau de base pour l'aménagement de routes. La législation à venir obligera véritablement les industriels à recycler le plus possible tous leurs déchets, et à les transformer en matière première réutilisable primaire ou secondaire. De nouveaux procédés doivent être développés par le secteur de l'industrie. Réutiliser ou recycler les déchets doit devenir une habitude nécessaire quand cela est possible.

Le plâtre est un matériau de construction, constitué de gypse (roche naturelle) ayant subi un processus de broyage et de cuisson. Le plâtre est un matériau totalement et indéfiniment recyclable : une fois sec, il retrouve les caractéristiques du gypse et peut être recuit et préfabriqué indéfiniment, à condition que les déchets de plâtre soient correctement triés et ne contiennent pas trop d'additifs.

Le recyclage des déchets de plâtre est une voie qui est utilisée depuis longtemps dans certains pays, qui ont interdit le stockage des déchets de plâtre dans les centres d'enfouissement pour éviter les nuisances olfactives. En Europe, le Danemark a anticipé la transposition des directives permettant à une société locale de développer une technologie de recyclage mobile.

En Algérie, pays en cours de développement, il n'existe pas une vraie politique de recyclage de déchet surtout le déchet plâtre bien qu'on fait face à un problème de d'épuisement de ressources naturelles et que ce matériaux présente d'excellentes propriétés d'isolation thermique et phoniques, ce matériau présente un grand pouvoir hygrométrique à l'intérieur des maisons ainsi qu'une bonne résistance au feu. Pour la sécurité, la santé, l'esthétisme, la performance, le confort, dans le cadre de tout projet de construction du plus simple au plus complexe le plâtre est toujours la solution idéale.

Pour des enjeux économiques et environnementaux le recyclage du plâtre est sans doute la bonne solution. Par ce travail on va faire une petite contribution dans le cadre d'études réalisées sur le recyclage de se matériaux, pour cela on a procède au recyclage de différents déchets de plâtre par leur triage et traitement ensuite leurs traitement thermique afin de voir si notre plâtre va récupérer ses propriétés liantes ensuite, différents essais de caractérisation sont réalisés.

Le manuscrit s'étale sur trois chapitres :

Le premier chapitre se subdivise en deux parties, la première concerne des généralités sur le plâtre et la deuxième partie s'intéresse au recyclage du plâtre.

Le deuxième chapitre décrit le protocole de travail ainsi que les différentes méthodes expérimentales utilisées pour la caractérisation des matériaux. Le dernier chapitre est consacré aux résultats obtenus et à leurs interprétations.

Le manuscrit est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I :

Généralités sur le plâtre

I.1. Définition de plâtre :

Les plâtres sont surtout connus comme matériaux de confection des modèles de travail.^[1]Le gypse constitue la matière première du plâtre. Ce di-hydrate de sulfate de calcium ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), 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 : température, pression, environnement etc...

Un certain nombre de composants solubles dans l'eau (Chlorure, sulfates, borates...) sont ajoutés à la poudre d'héli-hydrate pour ajuster le temps et l'expansion de prise. [2]

I.2. 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.

La faible température nécessaire à la production de plâtre et l'abondance de gypse naturel dans la nature sous forme de support pour fresques murales (fouilles en Anatolie) expliquent cette ancienneté d'utilisation. L'un des premiers exemples d'utilisations du plâtre en construction est l'assemblage de blocs de pierre constituant la grande pyramide de Kéops.

Plus récemment, la généralisation de l'emploi du plâtre est liée à un édit de Louis XIV.

Promulgué en 1667, Cet édit faisait suite à l'incendie de Londres l'année précédente, le plâtre étant déjà connu pour sa résistance au feu, imposant l'utilisation d'un enduit de plâtre dans les maisons à ossature de bois.

Actuellement, le plâtre est utilisé soit directement en enduit, ou bien en éléments préfabriqués, carreaux ou plaques (couche de plâtre entre deux cartons). C'est un matériau particulièrement adapté à une utilisation intérieure, 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 $0.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$, contre 1,15 pour un enduit de ciment ou 50 pour de l'acier.

Ces propriétés s'expliquent par la très grande porosité du matériau (l'air est un excellent isolant) et par présence d'eau de structure (environ 20 %). Le plâtre dégage de l'eau en présence de chaleur, stabilisant ainsi la température murale à des valeurs inférieures à 200 °C. Une couche de plâtre de 1 m^2 et de 10 mm d'épaisseur représente une réserve d'eau de 1,4 litre, qui va se dégager et limiter la progression de feu, sans aucun dégagement de gaz toxique ou de fumées. [3]

I.3. Le gypse :

Le gypse est un sulfate de calcium di-hydraté de formule chimique $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est considéré comme le matériau de base de la fabrication industrielle des plâtres. Il existe deux grandes catégories de gypses : les gypses naturels et les gypses synthétiques :

I.3.1. Le gypse naturel :

Le gypse appartient à la famille des évaporites qui sont des roches sédimentaires les plus solubles dans l'eau. On considère généralement que le gypse résulte de l'évaporation de l'eau des lagunes marines sursaturées. Les gisements les plus importants datent de l'ère secondaire ou tertiaire. Le gypse est présent en quantités relativement importantes dans la nature. Il existe de nombreuses gisements dans le monde : en France, au Mexique, en Espagne etc...

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

- Sous forme macro cristallisée : le gypse lamellaire, le fer de lance, le gypse lenticulaire.
- Sous forme micro cristallisée, l'albâtre le gypse fibreux, le gypse saccharoïde le gypse éolien.



Rose de sable



Gypse saccharoïde

Figure I.1 : Différents systèmes de cristallisation de gypse

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

I.3.2. Gypse de synthèse :

Le gypse de synthèse est le produit d'une réaction chimique industrielle. Les principales sources de gypse chimique sont :

La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) par attaque du phosphate naturel.

- La fabrication d'autres acides minéraux (acide borique : brogypse, acide fluorhydrique : fluor gypse) ou organique : organo-gypse (acide citrique, tartrique, etc...)
- La fabrication de l'oxyde de titane (TiO_2) conduit également à une production de gypse appelé titanogypse.
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux SO_2 (énanhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux.
- La désulfuration des gaz et fumées : l'oxydation de l'anhydride sulfureux SO_2 (énanhydride sulfurique) puis sa réaction avec de la chaux, produit un gypse appelé désulfogyps.

Pour des raisons techniques et économiques, la production de gypse de synthèse est limitée. En effet, l'élimination des impuretés produites au cours de ce type nécessite des traitements chimiques coûteux.

Concernant le plâtre utilisé dans cette étude, il est issu de la cuisson de gypse naturel provenant d'Espagne. [4]

I.3.3. Caractérisation de gypse :

Le gypse est un minéral tendre dans l'échelle de Mohs*¹, qui compte 10 degrés (dureté 1,5 à 2 selon la face cristalline). Il est soluble dans l'eau (1,75 g/l à 0°C, 2,1 g/l à 38 °C et 1,69 g/l à 100 °C, avec augmentation de solubilité dans l'eau salée). Selon les impuretés, sa couleur est très variable, blanc, beige, gris, jaune, rouge etc...

Il se présente sous forme cristalline en variétés compactes grenues (gypse saccharoïde) ou fines (albâtre), en grands cristaux prismatiques (fer de lance ou pieds d'alouettes), en cristaux lamellaires ou fibreux, ou encore il est amorphe. La densité du minéral est de 2,31 à 2,33. [5]

I.3.3.1. Structure cristalline de gypse naturel :

Le gypse ou sulfate de calcium di-hydraté ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) cristallise dans le système monoclinique (Figure I.2) [6]

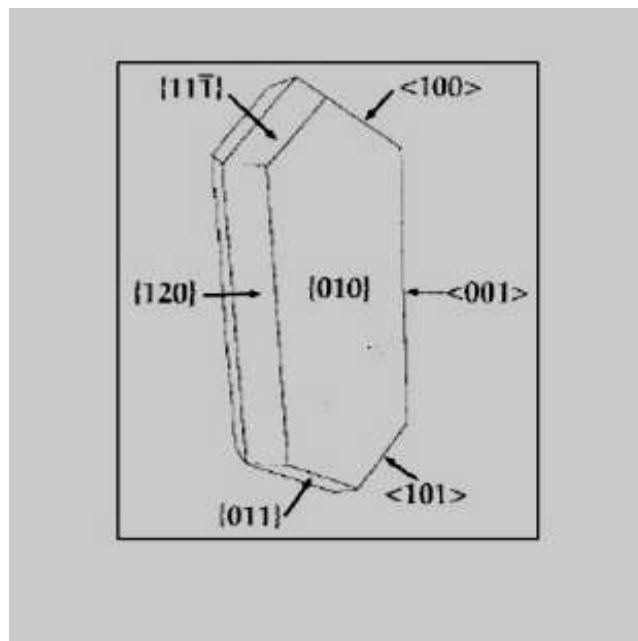


Figure I.2 : Morphologie du cristal de gypse.

Les éléments constituant la structure du gypse sont les suivants : des ions SO_4 formant des tétraèdres dont l'atome central est le soufre et les sommets des atomes d'oxygène ; des atomes de calcium, chaque atome est relié à huit atomes d'oxygène dont deux appartiennent à des molécules d'eau, chacune étant liée à deux atomes d'oxygène de deux tétraèdres SO_4 différents et à un atome de calcium.

Le gypse présente une structure feuilletée en couches parallèles dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate CaSO_4 . Chaque couche de sulfate est constituée de chaînes $\text{Ca-SO}_4\text{-Ca-SO}_4$. Chaque molécule d'eau présente deux types de liaisons avec les couches de sulfate : d'une part une liaison avec son propre feuillet, d'autre part une liaison faible avec le feuillet adjacent.

L'existence de cette grande inégalité entre les forces de liaison et en particulier l'existence de la liaison faible, explique la facilité de clivage suivant le plan parallèle aux couches et la forte anisotropie de dilatation. [7]

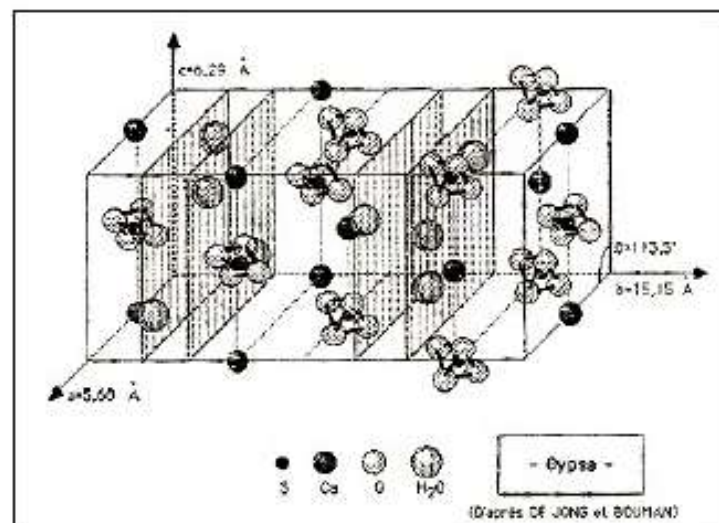


Figure I.3 : structure cristalline du gypse

À l'échelle moléculaire, il présente une structure feuillée dans laquelle alternent une couche d'eau et deux couches de sulfate de calcium comme il est présenté dans la (FigureI.3). [8]

En effet la structure de gypse présente au-dessus (Figure I.3) montre bien qu'elle avait des molécules d'eau dans sa structure, ce qui conduit par cuisson du gypse à des changements de structure par déshydratation avec l'apparition de plusieurs variétés structurales et on obtient également le plâtre.

I.4. Les anhydrites :

L'anhydrite naturelle de formule chimique CaSO_4 se rencontre dans les formations gypseuses et salifères, ou dans certains gîtes métallifères. On considère qu'elle s'est formée, comme le gypse, par évaporation de l'eau de mer, mais elle peut également résulter d'une déshydratation lente du gypse sous l'effet d'une pression importante lors de plissements géologiques [9].

L'anhydrite est aussi obtenue à des températures élevées lors de la cuisson du gypse selon la température de cuisson du gypse, on peut obtenir les anhydrites I, II ou III qui présentent des structures cristallographiques différentes.

L'anhydrite III est la première forme allotropique obtenue à 200 °C. Elle est soluble dans l'eau et se réhydrate très rapidement en semi hydrate au contact de l'eau en phase vapeur, au cours d'une réaction appelée réversion :



L'anhydrite III de structure hexagonale se transforme en anhydrite II de structure orthorhombique vers 220 °C pour le semi hydrate α et vers 350 °C pour le semi hydrate β

L'anhydrite II est une espèce stable thermodynamiquement qui se réhydrate lentement au contact de l'eau liquide.

À 1230 °C, l'anhydrite II se transforme en anhydrite I de structure cubique qui ne se réhydrate que très difficilement. L'anhydrite I est instable à température ambiante et se décompose à 1250 °C ? Selon la réaction :



I.4.1. La réaction d'hydratation du plâtre autrement dit la prise du plâtre :

La première étude de la prise du plâtre est due à Lavoisier 1768. Dès cette époque, Lavoisier parle d'un processus de cristallisation II dit Si, après avoir enlevé au gypse son eau par le feu, on la lui rend, il la reprend avec avidité, il se fait une cristallisation subite et irrégulière, et les petits cristaux qui se forment se confondant les uns avec les autres, il en résulte une masse très dure. [10]

Le Chatelier propose ensuite un mécanisme en 1887, fondé sur un phénomène de dissolution-précipitation. Le principe de Chatelier repose essentiellement sur la différence de solubilité entre le semi hydrate α et β sont données sur la figure 1

Du fait de la plus grande solubilité des semi hydrates (9,00 g/L) à température ambiante, la solution en équilibre avec le plâtre est en sursaturation par rapport au gypse. Les ions Ca_2+ et SO_4 provenant du semi hydrate se déposent sur les germes de gypse et les cristaux croissent pour le Chatelier, les deux phénomènes (dissolution et précipitation) sont simultanés.

Cependant, des techniques contemporaines (calorimétrie, conductimètre...) ont montré l'existence d'une phase de latence juste après la dissolution de semi hydrate, ce qui a conduit de nombreux auteurs à développer des modèles plus élaborés. Les différences avec la théorie de le Chatelier sont subtiles, mais permettent de rendre compte de la période latence. On considère ici que c'est un équilibre de solubilité qui fixe la teneur en semi hydrate de la solution, et non un équilibre dynamique résultant de la compétition entre la dissolution et la précipitation. Le système se stabilise alors, et cette compétition n'intervient que plus tard, après la germination du gypse.

Une autre théorie, dite « colloïdale » est due à Michaelis propose un mécanisme selon lequel la période de latence correspondrait à la formation d'un hydrate supérieur du di hydrate, autour des particules de semi hydrate en cours de dissolution. Cette couche d'eau adsorbée est à rapprocher d'une structure gel qui est ensuite de la germination du gypse. [11]

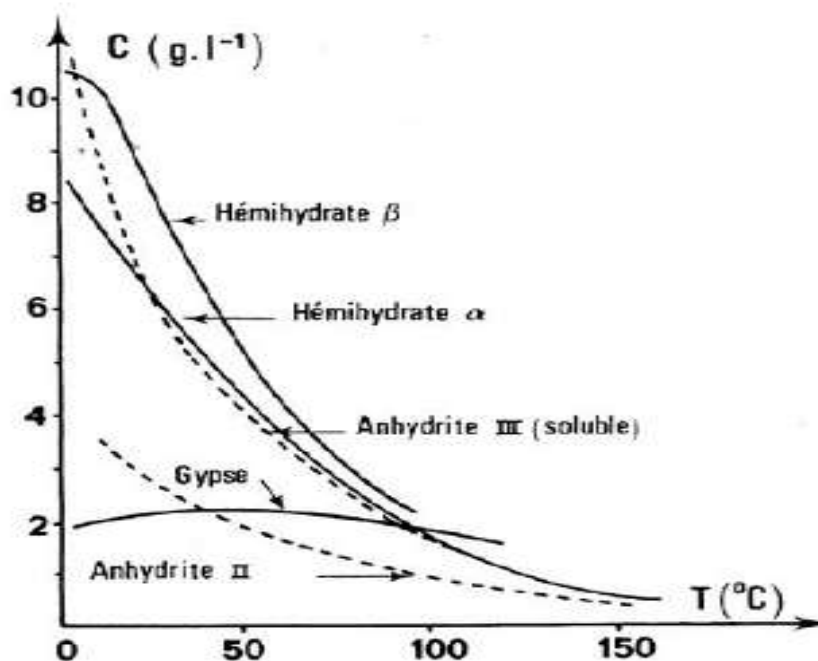


Figure I.4 : solubilité des différentes phases du sulfate de calcium en fonction de la température.

La prise du plâtre est une réaction du type dissolution –germination – croissance, elle est donc très sensible au milieu dans lequel elle se produit. La présence de défauts, tels que la présence d'impuretés dans le récipient de gâchage ou d'impuretés extérieures, est à l'origine des germes de di hydrate. Aussi, l'utilisation d'un malaxeur à grande vitesse peut broyer des cristaux de gypse fraîchement formés et favoriser la formation de nouveaux germes. la seconde notion à prendre en compte, afin de comprendre ce phénomène de germination-croissance, est celle de «diamètre critique »[12]

Le diamètre critique est le diamètre qui permet au germe de gypse de ne pas disparaître lors de perturbations locales de saturation (gradient de concentration en Ca^{2+} et SO_4^{2-} par exemple)

Ces perturbations peuvent intervenir au cours de l'ajout d'accélérateur ou de retardateur. En effet, lorsqu'une baisse de saturation en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} aura lieu, le germe tendra à passer en solution pour ré-saturer la solution autour de lui. S'il est trop petit il disparaîtra, s'il a un diamètre suffisant, il diminuera et se remettra à croître lorsque la saturation aura repris.

Les faciès des cristaux, leur enchevêtrement, la nature et la quantité de contacts inter cristallins et donc les propriétés mécaniques du matériau final sont largement influencés par les conditions de température et de pH la présence d'adjuvants, etc.

I.5. Définition de semi-hydrates :

Les semi-hydrates (ou les demi-hydrates), sont obtenus au début de l'opération de déshydratation du gypse :

La température est environ 150 °C selon la réaction suivante :

150 °C à 160 °C



- La teneur en eau variée de 0,15 à 0,66 %.

On trouve deux types des semi-hydrates α et β . [13]

I.5.1. Le semi-hydrate β :

Les plâtres β sont obtenus dans des fours à pression atmosphérique ils sont comme plâtre de construction ou préfabrication.

Un bon four de cuisson de plâtre β sera celui qui permettra d'obtenir une grande régularité de cuisson du plâtre avec une composition aussi proche que possible des 100 % de semi-hydrate afin d'avoir un temps de prise long, de l'ordre de 15 à 17 mn (suivant la qualité de la pierre).

Le plâtre obtenu ne devra également pas comporter d'incuit car ils accélèrent le début de prise du mélange ce qui peut gêner le remplissage des moules. On préférera un plâtre cuit à des températures légèrement supérieures et comportant des traces d'anhydre-3.

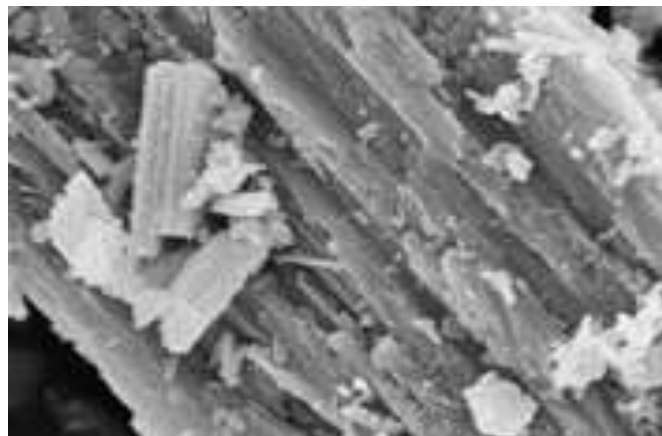


Figure I.5 : photo prise au MEB de forme d'hémi hydrate β (5 μ m).

I.5.2. Le semi-hydrate α :

Les plâtres α sont obtenus dans des autoclaves afin de cuire le gypse sous pression (en le général autour de 6 à 9 bars). On obtient alors des plâtres durs, très liquide (car le gain de gypse cuit sous pression n'a pas explosé et sa surface de contact avec l'eau est faible). Ces types de plâtres sont utilisés en tant que plâtre de modelage pour la décoration et la réalisation d'objets d'arts (statues...) mélangés à du plâtre β , ils sont utilisés pour les plâtres α ont des caractéristique de résistance mécaniques élevées grâce à des taux de gâchage (Eau/plâtre) très faible de 0,25 à 0,5 d'eau pour 1 de plâtre.

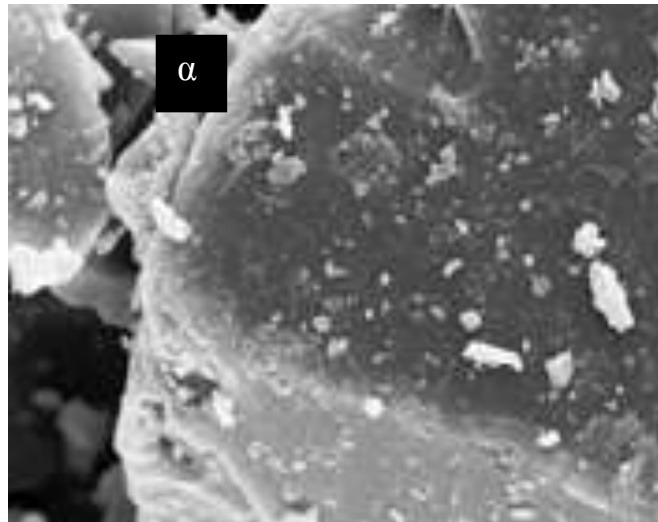


Figure I.6 : photo prise au MEB de forme d'hémi hydrate α (5 μ m)

I.6. Propriétés chimiques et physiques de plâtre semi hydrate :

I.6.1. Les semi-hydrates α :

- Les semi- hydrates α sont compacts et cristallins.
- Sa solubilité dans l'eau est inférieure à celle du composé β .
- Le contact avec l'eau donne un mélange fluide.
- C'est un constituant de très haute qualité, utilisé en particulier, comme plâtre dentaire.
- Ils possèdent une grande résistance mécanique.
- Leur temps de prise est inférieur à celle des semi hydrate β . [14]

I.6.2. Les semi-hydrates β :

- Il est floconneux et il présente des fissures écailleuses.
- Sa solubilité dans l'eau est supérieur à celle de composé α .

- La combinaison avec de l'eau donne un mélange plus épais.
- Il nécessite une grande quantité d'eau pour le gâchage.
- Leur temps de pris est plus long.
- Ils possèdent une faible résistance mécanique (10 fois moins que les semi hydrate α).
- Il est considéré comme un constituant essentiel de plâtre préfabriqué. [15]

Tableau I.1 : Caractéristiques des semi-hydrates α et β

Les caractéristiques	Semi-hydrate α	Semi-hydrate β
Masse volumique	2.76	2.63
Teneur en eau (%)	6,2	6,2
Masse moléculaire (Cm3)	145,15	145,15
Volume moléculaire (g)	52,4	55,2
Temps de prise (min)	15 à 20	25 à 35
Expansion mm/m	2,8	1,8
Résistance à la traction (sec) Mpa	6,5	1,3
Système cristallin	Rhomboédrique	Rhomboédrique
Solubilité dans l'eau à 20 °C(en g de Ca SO4 pour 100 CM)	0,36	0,74
Chaleur d'hydratation à 258 Cal/mol de gr	Vois humide 4100	Vois humide 4600
Chaleur spécifique molaire Cal/mol de gr	16,95-0,039	11,48-0,06
Solubilité dans l'eau à 3°C, 9/ 100 ml	0,825	1, 005
Cristallisation	Compacte	Spongieuse
Surface spécifique	Faible	Elevée
Gâchage saturation	Fort	Faible

I.7.principaux propriétés du plâtre :

I.7.1.Isolation thermique et régulation de l'hygrométrie :

Du fait de sa faible conductivité thermique, le plâtre peut s'employer seul ou associé à d'autres matériaux pour améliorer l'isolation thermique des parois (C 3 370). Un enduit 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 qui ont des conductivités thermiques. Les plâtres spéciaux qui incorporent des charges d'agrégats légers qui ont des conductivités thermiques de l'ordre de $0,18$ à $0,20 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$

Sont particulièrement destinés à cet usage. En outre, du fait de sa forte inertie thermique et de sa faible conductivité thermique, le plâtre élimine le phénomène de paroi froide le plâtre permet de plus –en association avec des matériaux isolants minéraux ou de synthèse ayant des conductivités thermique très faibles ($0,03$ à $0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$), qui sont des matériaux spécifique de l'isolation mais qui ne constituent pas comme lui des matériaux de construction- de réaliser des systèmes d'isolation efficace.

Ainsi, dans une atmosphère maintenue à 20 °C et à 85% d'humidité relative, le plâtre perd la totalité de son eau non combinée, soit sensiblement 50% de sa masse, en moins de 30 jours. Des mesures de laboratoire ont prouvé que ce résultat est identique à celui qui ainsi, dans une atmosphère maintenue à 20 °C et 85% d'humidité relative, le plâtre perd la totalité de son eau non combinée, soit sensiblement 50% de sa masse, en moins de 30 jours. Des mesures de laboratoire ont prouvé que ce résultat est identique à celui qui peut obtenu par un traitement en étuve à 50 Poursuivi jusqu'à masse constante. Ce séchage s'effectue d'ailleurs quelle que soit l'humidité relative de l'air ambiant et le plâtre continue à perdre son eau non combinée même lorsque l'humidité relative devient très élevée, de l'ordre de 95% . Il résulte encore d'essais de laboratoire que le plâtre séché, maintenu en milieu isotherme mais placé en ambiance saturée, reprend après un temps comparable à celui du séchage, une humidité d'environ 1% en masse.

Des essais ont effectués sur des plâtres préalablement séchés, puis maintenus à une humidité relative constante élevée (95%) et soumis à des cycles de température de 12 °C d'amplitude (entre 12 et 24 °C) et de durée variable de $4,6$, 12 et 24 h . les mesures faites, en pesée.

Continue, établissent que le plâtre absorbe l'eau lorsque la quantité d'eau vapeur dans l'atmosphère augmente, c'est-à-dire quand la température croit. De plus, le plâtre perd

sensiblement la masse d'eau absorbée dans le cas contraire ; la masse d'eau entre le plâtre et l'atmosphère (qui augmente avec la durée du cycle) représente de 0,1 à 0,2 % de la masse du plâtre. Le plâtre est donc capable de jouer un rôle important, même en tant compte de la vitesse des échanges dépend évidemment de la nature du plâtre, de sa compacité de son taux de gâchage, de sa surface de contact avec l'ambiance, comme des conditions hygrométriques de celle-ci bien entendu, le plâtre, par la contribution du il apporte par ailleurs à l'isolation thermique, favorise l'élimination des ph néoménies de paroi froide. Mais, il reste qu'en cas de condensation d'eau à sa surface, le plâtre est capable de l'absorber-et de s'opposer ainsi au ruissellement – pour la rejeter ensuite dès que les conditions hygrométriques s'y prêtent.

I.7.2.Humidité des locaux :

Le plâtre est un matériau poreux et, bien qu'il soit rarement laissé nu et qu'il soit souvent recouvert de peinture, de papier ou de tissu, il doit très généralement être examiné comme tel du point de vue des échanges hygrométriques avec l'atmosphère ambiante, car, mis à part les peintures laquées des salles d'eau ou certains revêtements plastifiés, les couches minces de peinture ou de papier, comme les tissus, sont perméables. Un certain nombre de données expérimentales et d mesures de laboratoire permettent de situer le rôle que le plâtre qui peut contribuer à amortir lesdites variations au cours du temps. On sait par exemple qu'un ouvrage en plâtre exécuté avec un pourcentage d'eau de gâchage courant, abandonné à lui-même, perd progressivement son eau excédentaire, plus ou moins rapidement selon les conditions hygrothermiques de l'ambiance, pour parvenir à un état d'équilibre qui reste constantes. Par les parois est essentiellement régie par la loi de masse et la loi de fréquence. La transmission indirecte par les éléments adjacents est plus difficile encore à saisir et à évaluer et il n'en est pas tenu compte dans les mesures de laboratoire ; dans la pratique, on admet qu'elle introduit une chute d'isolation de l'ordre de 5 à 7 dB (A). Selon les lois de masse et de fréquence, l'isolation d'une paroi est fonction de sa masse propre et de la fréquence des sons pour une fréquence donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique croit proportionnellement au logarithme de masse par mètre carré de la paroi. De même, pour une masse donnée, l'indice d'affaiblissement acoustique est proportionnel au logarithme de la fréquence sonore. La loi de masse, cependant, ne tient pas compte de la fréquence de la paroi. Cette fréquence, fonction mathématique de la masse et de la rigidité de la paroi correspond, par un phénomène analogue à une résonance, à une perte d'isolement. Cette fréquence critique est d'autant plus gênante qu'elle se situe vers les fréquences plus élevées. À l'égard de ces lois le plâtre n'occupe pas une situation privilégiée

puisque sa masse volumique relativement faible le défavorise plutôt, notamment vis-à-vis de la loi de masse.

Mais il s'agit là de lois théoriques visant des éléments homogènes et l'on sait depuis longtemps réaliser des cloisons légères généralement constituées par un assemblage de matériaux différents auxquelles les lois de masse et de fréquence ne s'appliquent plus et qui sont tout à fait capables d'assurer une bonne isolation.

Les possibilités du plâtre trouvent aussi bien leur application dans la recherche de l'amélioration de l'isolation d'une paroi existante que dans la construction de cloisons à hautes performances acoustiques. Ainsi, dans le cas d'un mur ayant une certaine masse, le doublage au moyen d'un élément léger en plâtre peut apporter une amélioration considérable. D'une manière générale, on peut noter que l'isolation obtenue par doublage est d'autant meilleure que les deux parois ont des épaisseurs et des masses différentes et que la lame d'air qui les sépare assure une meilleure liaison, notamment grâce à un remplissage avec un isolant.

Les éléments légers du type plaques de parement en plâtre permettent, par assemblage sur des ossatures métalliques, de constituer des cloisons à double paroi ayant des caractéristiques

Acoustiques élevées et s'adaptant même dans certains cas à la réalisation des cloisons séparatives de logements.

L'isolation acoustique des cloisons, des doublages et des plafonds repose sur la désolidarisation des deux parements de l'ouvrage. Ainsi est formé un système masse-ressort-masse. Le parement situé coté émission, par sa flexibilité, limite la transmission par rayonnement de l'énergie sonore. Le matelas d'air et/ou le matelas fibreux présentent un effet amortisseur absorbant une partie de l'énergie sonore qui lui est transmise. Le second parement, coté réception, ne retransmet, du fait de sa flexibilité, qu'une partie de l'énergie sonore qui lui est transmise, l'utilisation d'ossatures doubles désolidarisées améliore encore les performances acoustiques. Ce système constructif permet d'obtenir des performances supérieures à celles d'une paroi unique de masse équivalente. Selon la masse des parements et leur écartement, les performances possibles couvrent toute la gamme des exigences allant jusqu'à un indice d'affaiblissement acoustique pondéré de 69 dB (A) pour une cloison d'une épaisseur totale de 225 mm et d'une masse surfacique de 70 kg/m².

I.7.3. Isolement acoustique :

Le domaine de l'acoustique [C3 362] est un domaine délicat. L'appréciation du rôle que le plâtre peut y jouer l'est donc tout autant. Il est possible, de dégager quelques données qui éclairent le sujet, étant du reste précisé qu'il ne sera nullement question ici de l'isolation aux bruits de chocs ou d'équipement qui relèvent de techniques particulières. Les considérations suivantes sont limitées aux bruits aériens.

L'acoustique obéit naturellement à des lois théoriques, mais dans les applications qu'on en fait, au plan pratique, elle relève davantage de l'art que de la science par les soins qu'elle exige, par les précautions sans lesquelles en particulier la moindre faille. Le moindre pont phonique risquent d'en anéantir les résultats puisqu'un tel pont suffit à permettre la transmission des vibrations des ambiances qu'il met en communication par la continuité des murs et cloisons qu'ils apportent, les enduits manuels ou projetés assurent une isolation aux transmissions de bruits aériens et une garantie contre les ponts phoniques résultant de fissures, de la porosité des matériaux, etc...

Cette continuité des murs et des cloisons est également réalisée dans l'emploi des divers éléments préfabriqués de cloison à base de plâtre correctement mis en œuvre, avec lesquels l'intégralité des joints d'assemblage fait nécessairement l'objet d'un collage ou d'un masticage ininterrompu qui reconstitue la continuité de écran acoustique isolant les locaux adjacents.

Le plâtre, cependant, obéit aux lois générales de l'acoustique. Du point de vue théorique, la transmission directe de l'énergie sonore conditions qui lui sont imposées par la géométrie et les matériaux du local, peut communiquer à ce dernier une acoustique ou moins satisfaisante.

Le plâtre, grâce à son aptitude au moulage, à la préfabrication comme à la constitution d'éléments décoratifs à reliefs, se prête à la réalisation de panneaux, de structures architecturales ou ornementales capables de supprimer ou d'atténuer les réverbérations gênantes des bruits ou des sons émis dans une pièce.

Le coefficient d'absorption phonique (coefficient de Sabine) d'une plaque de parement en plâtre de 12 mm, perforée et posée sur une couche de 18 mm de laine minérale, est de 0,74 alors que celui d'une couche de 50mm de laine minérale est de 0,93. Cela montre qu'il est aisé de constituer des parois absorbant une fraction importante des sons et n'en renvoyant qu'une faible partie.

I.7.4. Correction acoustique :

La transmission de l'énergie sonore se fait aussi, à l'intérieur d'un même local, par réflexion sur les différentes parois qui en limitent le volume. C'est le phénomène de la réverbération qui, selon les

Enfin, 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.

I.7.5. Résistance au feu :

L'une des propriétés les plus caractéristiques du plâtre est son comportement remarquable au feu, qui a été reconnu et éprouvé de tout temps, Cette protection a pu autrefois être obtenue grâce à d'élardes garnissages de plâtre remplissant complètement les intervalles séparant les éléments de construction. Elle peut aussi consister en enduits projetés de plâtre spéciaux (spécial feu) ou en enduits traditionnels comportant, de préférence, une armature légère de solidarisation ancrée sur l'ouvrage.

Elle peut être réalisée par un enrobage fait au moyen d'éléments préfabriqués du type plaques de plâtre (avec ou sans carton superficiel) ou du type moulé, comme les carreaux de plâtre. Mais si cette protection par le plâtre, ancienne d'emploi, peut se présenter sous différentes formes, en s'adaptant aux modes de construction, elle repose toujours sur le même principe. L'excellent comportement du plâtre au feu résulte de plusieurs propriétés.

Le plâtre est incombustible. Il est classé A 1 sans essai par décision de la commission européenne du 4 octobre 1996 établissant la liste des produits appartenant aux classes à « aucune contribution à l'incendie ».

I.8. Fabrication du plâtre :

I.8.1. L'extraction :

Le plâtre provient du gypse, un minéral essentiellement composé de sulfate de calcium hydraté. Il peut être extrait à ciel ouvert ou en carrière souterraine. Dans le cas de l'usine COLPA, c'est la carrière de (Manhargypse) qui fournit le gypse très réputé pour sa pureté, sa blancheur et sa régularité de teneur en humidité, qualités indispensables à la production des plâtres de spécialité...



Figure I.7 : extraction du gypse à ciel ouvert.

I.8.2. Concassage-calibrage :

Le concassage a pour but de réduire le gypse extrait de la carrière en produits plus fins. Généralement, après un concassage, il ne subsiste plus de blocs dont la dimension est supérieure à 100mm. Ce gypse devient donc transportable sur des bandes par exemple, et peut être envoyé en usine pour le traitement ultérieur.



Figure I.8 : concassage du gypse

De très nombreux types de concasseurs existent sur le marché et peuvent traiter jusqu'à (1 200 à 1 300 t/h).

Voici quelques types de concasseur utilisés dans l'industrie, leur principe peut être retenu dans le cadre de cette étude.

I.8.2.1. Concasseur à mâchoire :

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

I.8.2.2. concasseur à cylindre dentés :

Les deux cylindres tournent en sens inverses. Les rendements.

I.8.2.3. Concasseur à cylindre unique et mâchoire :

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

I.8.2.4. Concasseur à percussion (à marteaux) :

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

S'il est nécessaire de réduire la granularité des morceaux provenant de concassage, on opère un broyage primaire.

Le concasseur peut, dans certains cas, être accompagné d'un crible pour trier les éléments qui sont déjà suffisamment fine et ne pas surcharger l'appareil. Un crible peut aussi, dans certaines circonstances, éliminer des impuretés fines et indésirables (argiles fines, marnes, lœss...).

Dans le cas où le gypse est particulièrement tendre, on peut coupler le concassage avec un criblage, de façon que du crible soit recyclé vers le concasseur. On peut, dans ce cas, faire parfois l'économie d'un poste concassage secondaire.

Tous ces postes, homogénéisation, concassage primaire et éventuellement concassage primaire plus criblage, fonctionnent en générale indépendamment de l'usine et ont pour but de fournir à matière dont elle a besoin.

La suite des opérations s'effectue dans l'atelier de cuisson et fait part intégrante de la chaîne de fabrication des plâtres.

I.8.3. La cuisson :

Elle permet d'obtenir, par une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, les divers éléments constitutifs du plâtre.

La déshydratation du gypse est la base de la fabrication des plâtres. Il est connu que suivant les conditions dans lesquelles s'opèrent cette déshydratation, les caractéristiques des plâtres obtenus seront différentes.

La déshydratation des gypses est donc fonction de la température, de la durée de cuisson, de la nature du gypse, de la granulométrie mais également d'autres paramètres comme la pression de vapeur d'eau.



Figure I.9 : four de cuisson du gypse

On procède à la cuisson suivant deux principes essentiels :

- La cuisson en voie sèche (destinée pour la fabrication du plâtre bêta).
- La cuisson en voie humide (destinée pour la fabrication du plâtre alpha).

I.8.3.1. La cuisson du plâtre bêta :

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

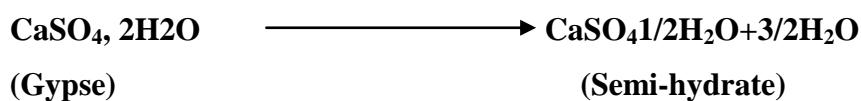
I.8.3.2. La cuisson du plâtre alpha :

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

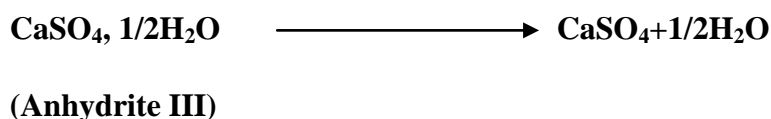
- Processus de cuisson du plâtre.
 - **déshydratation du gypse :**

Dans les 20.93% d'eau contient le gypse, 5.20% sont fortement combinés et correspondent à $1/2\text{H}_2\text{O}$, tandis que 15.73% sont faiblement combinés et correspondent à $3/2\text{H}_2\text{O}$.

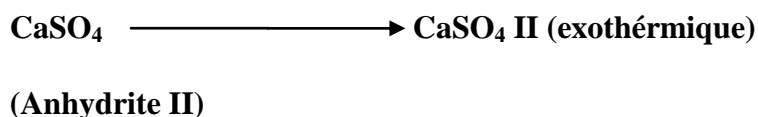
Par l'action plus au moins prolongée de la chaleur en atmosphère de la vapeur d'eau dégagée par la cuisson on obtient entre 110°C et 160°C , élimination de l'eau faiblement combinée, ce qui laisse le semi-hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$, l'élément essentiel du plâtre.



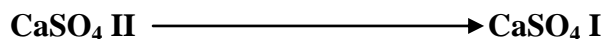
Lorsqu'on porte le gypse à des températures plus élevées environ 200°C , on rencontre une nouvelle transformation anhydre dans laquelle le semi-hydrate donne du sulfate de calcium CaSO_4 anhydre. Ce sulfate anhydre connu sous le nom d'anhydrite soluble ou anhydrite **III**.



Si on continue à chauffer, le sulfate anhydre précédent, subit entre 220°C , et 350°C , une nouvelle transformation qui, sans qu'elle modifie sa composition, conduit à une anhydrite **I**.



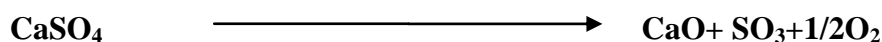
A température encore plus élevée, aux environs 1225°C , on note un phénomène endothermique correspondant à une nouvelle transformation (sans modification de composition) celle de l'anhydrite **II** en anhydrite **I** (CaSO_4I).



(Anhydrite II)

Au-delà de 1450°C, l'anhydrite I, se dissocie en CaO (chaux vive) et SO₂.

Cette décomposition peut également se produire à une température plus basse dans un milieu oxyde réducteur (des 880°C si le four est fortement ventilé).



I.8.4. Le broyage:

Après la cuisson, les pierres sont broyées selon 2 principes :

I.8.4.1. Le broyage standard :

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).

I.8.4.2. Le broyage / sélectage :

Comme dans le broyage standard, le plâtre est broyé par des marteaux en rotation puis aspire à travers une « cage d'écureuil » en rotation. Selon son poids (donc sa taille), le grain de plâtre, soumis à 2 forces opposées (centrifuge et aspiration), traverse ou non la cage d'écureuil.

I.8.5. L'homogénéisation et l'adjuvantation :

Sur le site industriel, on dénombre 5 mélangeurs. Aux mélanges de plâtre beta (dans des proportions très variables selon l'usage que l'on souhaite du produit final).

On ajoute des adjuvants. Ces derniers donneront au matériau une cinétique particulière, une expansion spécifique, une fluidité contrôlée et autres caractéristiques précises. Tout au long du processus, le plâtre fait l'objet de nombreux prélèvements et contrôles. Cela permet de corriger le produit et de l'améliorer jusqu'à ce qu'il colle parfaitement au cahier des charges du client.

I.8.6. Le contrôle et la validation des produits :

En amont (à l'extraction), l'humidité et la pureté du gypse font l'objet de contrôles périodiques. Ensuite, des échantillons sont prélevés tout au long du processus de fabrication et contrôlé par le laboratoire qualité de l'usine qui se consacre totalement à ce travail. Ces contrôles permettent la validation définitive des produits finis ainsi que le pilotage des paramètres de conduite de cuisson, de broyage et de mélange. Ils sont garants de la qualité plâtres mis en vente. [16]

I.8.7. Conditionnement et la logistique :

L'usine dispose de plusieurs silos repartis sur différents postes de chargement en vrac qui permettent une logistique en flux tendu. Les expéditions en vrac représentent plus de 50% de la production, le reste se faisant en Bigbags R et en sacs [17].

II -Recyclage du plâtre :

II.1. introduction :

L'industrie du plâtre utilise du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et en fait du plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

Le plâtre se retrouve davantage dans la construction, sous forme aussi de blocs ou de plaques de plâtre. Le fait d'ajouter des éléments traités dans les différents matériaux n'a aucune influence sur le processus de production des plaques de plâtre. Dans certains pays, on retrouve déjà 30% de matériaux en plâtre recyclés dans la production des plaques, sans aucune incidence sur la qualité de celles-ci.

L'industrie du plâtre utilise du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et en fait du plâtre ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

Le plâtre se retrouve davantage dans la construction, sous forme aussi de blocs ou de plaques de plâtre. Le fait d'ajouter des éléments traités dans les différents matériaux n'a aucune influence sur le processus de production des plaques de plâtre. Dans certains pays, on retrouve déjà 30% de matériaux en plâtre recyclés dans la production des plaques, sans aucune incidence sur la qualité de celles-ci.



FigureI.10 : le déchet de plâtre récupéré

L'organigramme suivant représente les différentes étapes de recyclage du plâtre :



Figure I.11 : le recyclage de plâtre.

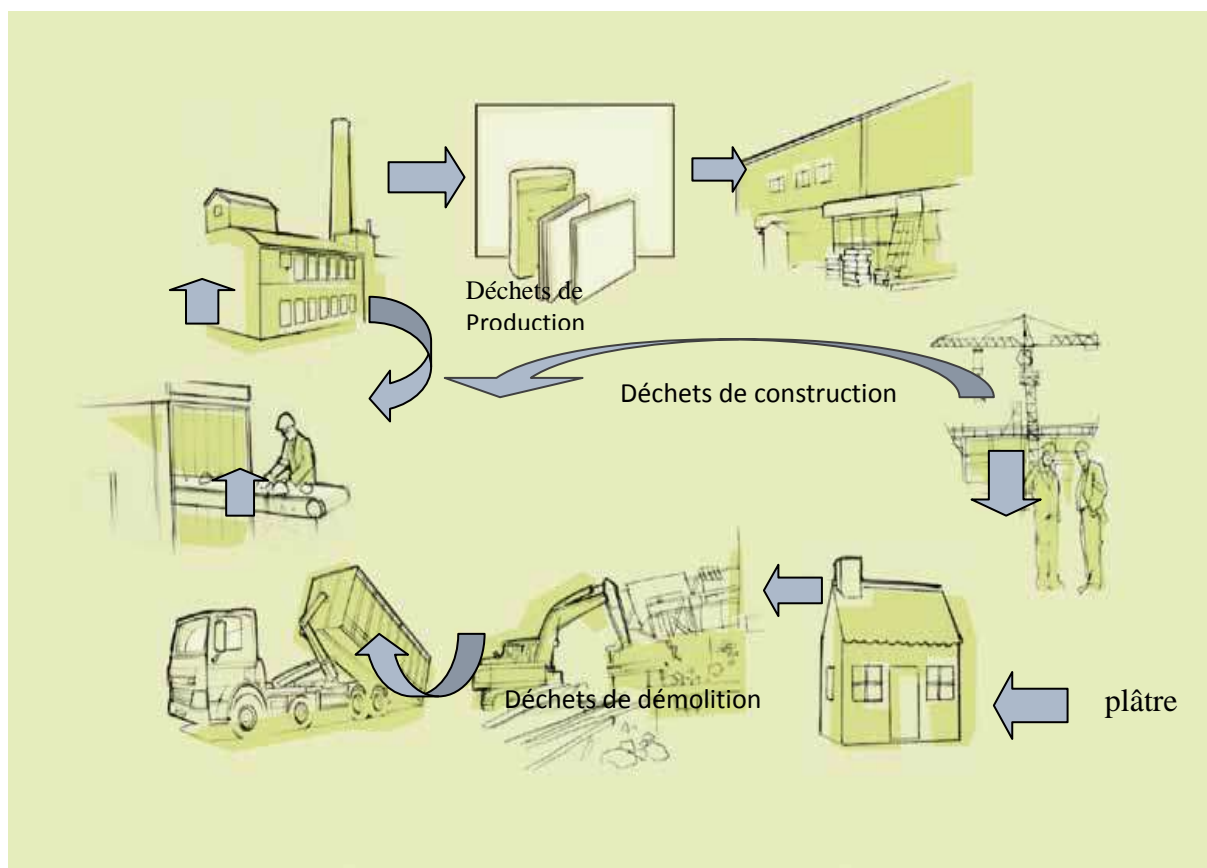


Figure I.12 : le cycle de vie de plâtre.

Depuis plusieurs années, l'Union Européenne encourage ses états membres à trouver une solution au volume sans cesse grandissant des déchets.

Croissante aussi, est la demande en matières premières. Mais leur stock est limité. Et vertigineux devient le coût de la plupart d'entre elles.

Toutes ces circonstances ont conduit à une série de propositions de loi obligeant notamment les différents acteurs de l'industrie à recycler au maximum leurs déchets de construction. C'est ainsi que les différents gouvernements régionaux belges appliquent aujourd'hui ces directives à travers une législation rigoureuse.

Les déchets de construction sont le plus souvent mis en décharge, seule une petite partie peut être traitée dans des incinérateurs. Une quantité limitée de déchets de construction est déjà réutilisée comme matériau pour la construction, en tant que matière première secondaire. Elle est aussi employée comme matériau de base pour l'aménagement de routes.

La législation à venir obligera véritablement les industriels à recycler le plus possible tous leurs déchets, et à les transformer en matière première réutilisable primaire ou secondaire. De

nouveaux procédés doivent être développés par le secteur de l'industrie. Réutiliser ou recycler les déchets doit devenir une habitude nécessaire quand cela est possible.

L'industrie européenne du plâtre se retrouve parfaitement dans cette nouvelle perspective.

L'industrie du plâtre en Belgique démontre dans cette brochure qu'elle est déjà très proactive dans ce domaine en recyclant dès aujourd'hui toutes sortes de déchets constitués de plâtre sous forme de matière première primaire. L'Association Belgo-Luxembourgeoise de Gypse (ABLG) se fait un devoir d'adhérer aux directives européennes pour voir 70% minimum de toute la production, des déchets de construction et de démolition sous forme de matière première utilisable.

II.2. La valorisation des déchets à base de plâtre :



Figure I.13 : Déchets de plâtre sur un chantier de déconstruction.

Les déchets à base de plâtre sont recyclables certes mais sont maintenant recyclés grâce notamment à l'engagement des producteurs de plaques de plâtre. Les tonnages en jeu sont très importants et vont encore aujourd'hui en majorité en centre de stockage. Peu de solutions de valorisation existaient jusqu'à présent, la filière d'amendement agricole ou de valorisation matière en cimenterie absorbant des tonnages très marginaux. La mise en place du recyclage dans la production de plaques de plâtre est très progressive mais présente de solides atouts pour

adresser la problématique de ce déchet de manière systémique. Le succès de la mise en place de cette filière pourrait bien entraîner l'ensemble des déchets de chantiers vers la voie de la valorisation et permettre aux différents acteurs économiques de gérer les matériaux de construction de manière plus durable.

II.2. 1. Les tonnages et la qualité des déchets :

Il est très difficile de déterminer avec précision les tonnages de déchets de plâtre générés chaque année. Cela tient essentiellement au fait de l'hétérogénéité des sources de ces déchets. On se contente donc d'une estimation assez imprécise qui donne les déchets de plâtre par habitant à environ 7-8 kg/an. En France les tonnages avoisinent les 450 000 tonnes. En Algérie il n'y a pas de vraie politique de recensement de taux de déchet de plâtre, bien que c'est un matériau utilisé dans le domaine de construction.

La moitié de ces déchets provient des chutes de pose qui sont évaluées à environ 5 % des volumes utilisés sur un chantier. Ce taux de chute varie fortement d'un chantier à l'autre, en fonction de la nature du chantier mais aussi de la typologie du metteur en œuvre. L'autre moitié des tonnages est générée lors des opérations de déconstruction qui devient une pratique de plus en plus répandue car exigée par les maîtres d'ouvrage.

II.2. 1.1. Les filières d'élimination :

La réglementation européenne concernant la gestion des centres de stockage a été transposée dans les législations des Etats Membres. En France, les déchets de plâtre doivent être préférentiellement stockés en casier mono matériau dans les décharges de catégorie 2 (ISDND ou installation de stockage de déchets non dangereux). A ce jour cette disposition est très peu appliquée.

En France, le nombre d'ISDND admettant les déchets des entreprises avoisinent les 100 unités sans compter celles de très petites tailles qui sont encore gérées par les municipalités. La quantité de déchets admissibles par arrêté préfectoral varie de 50 kt à 1000 kt par an. A l'heure actuelle, très peu de ces centres spécialisés se sont vus interdire l'admission des déchets à base de plâtre en mélange. On compte en France seulement 10 casiers spécifiques acceptant des déchets de plâtres.

Le prix d'admission est très variable d'une zone à l'autre. Les plus élevés sont en région Rhône Alpes aux alentours de 90 euros la tonne TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes) comprise. On estime la moyenne française à environ 80 euros/tonne.

Chapitre II :

Matériels et méthodes de caractérisations

II.1. Protocole d'essais :

Afin d'atteindre notre objectif nous avons procédé à la récupération de déchets de plâtre disponibles (déchet de construction et déchet médicale utilisé en orthopédie) ensuite ces matériaux ont été traités (concassés, broyés et tamisés).

Les échantillons obtenus ont été classés selon le refus sur tamis en plâtre gros et plâtre fin.





Etant donné que le plâtre est déjà hydraté suite à son gâchage lors de son premier emploi, doit subir un traitement thermique afin de récupérer ses propriétés liantes.

Le plâtre ainsi récupéré a subit une série d'essais de caractérisation physicomécaniques en comparaison avec un échantillon témoin.

Le tableau suivant représente les étapes suivis pour le recyclage du plâtre.

Tableau II.1 : les étapes du recyclage du plâtre

N°	Etapes	
Etape -1-	Récupération du plâtre	
Etape -2-	Concassage	

<p>Etape -3-</p>	<p>Broyage</p>	
<p>Etape -4-</p>	<p>Tamisage</p>	
<p>Etape -5-</p>	<p>Cuisson</p>	
<p>Etape -6-</p>	<p>Produit fini</p>	

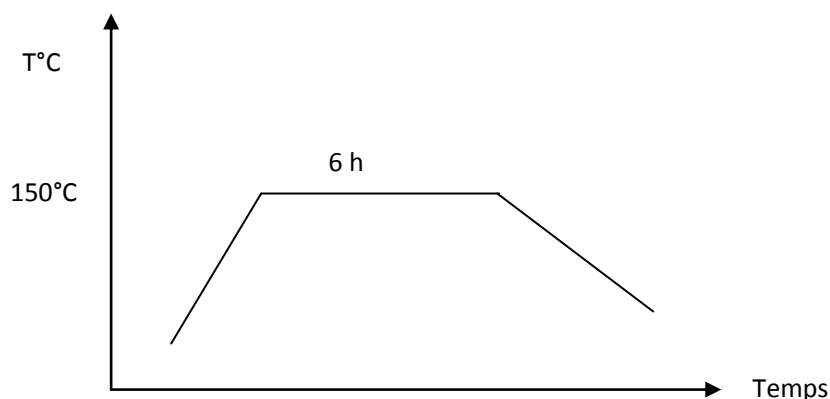


Figure II.1 : régime opté pour le recyclage du plâtre.

II.2. Essais physique :

II.2.1. Détermination de la finesse de mouture :

La finesse de mouture est déterminée par tamisage manuel ou mécanique Ensemble de tamis de contrôle, en bronze phosphoreux ou acier inoxydable, de 200mm de diamètre, à mailles carrées de 800 μ m, 400 μ m, 200 μ m, 100 μ m.

Plâtre grossier >250.

➤ **balance** : précisé à 0.1 g prés.

Plâtre fin <250.

➤ **Dessiccateur.**

II.2.2. Détermination de la consistance normale :

C'est la détermination de la masse de plâtre (en grammes) qui s'humecte bien lorsqu'elle est saupoudrée dans 100 g d'eau. Ce taux de gâchage est fortement variable en fonction de la qualité du plâtre mais le taux de gâchage à saturation normal pour des plâtres de préfabrication est d'environ 120 à 180 g.

➤ **le taux de gâchage :**

C'est le rapport « EAU / PLATRE » du mélange. Là aussi, il peut varier fortement. Un taux de gâchage moyen se situera de 0.80 à 0.85.

II.2.2.1. Equipements et matériaux :

- viscosimètre de sou tard.
- balance technique.
- tasse en porcelaine.
- couteau métallique.
- spatule métallique.
- plâtre.
- Eau.

II.2.2.2. Réalisation de travail :

- préparer pour le travail le viscosimètre de sou tard. Il se compose d'un cylindre de diamètre 50 mm et de la hauteur 100 mm et d'un vase carré de dimension 300*200 mm sur lequel sont imprimé des cercles de diamètre de 6 à 20 cm.
- mouiller avec de l'eau la surface intérieure du cylindre, et placer au centre du verre.
- peser 200 g de plâtre avec une précision de 1 g.
- verser le plâtre dans une tasse en porcelaine ou se trouver le volume connu d'eau potable 75 à 95% de la masse de plâtre préparé (à partir de qualité de plâtre). L'échantillon est mélangé soigneusement et rapidement pendant 30s.
- laisser reposer la pâte pendant 60 s.
- mélanger la pâte deux fois à l'aide d'une spatule métallique et verser dans le cylindre de viscosimètre, en lever la pâte qui déborde à l'aide d'un couteau, la durée de ces deux opérations ne doit pas dépasser 30s.
- soulever rapidement et verticalement le cylindre, la pâte s'affaisse et forme sur le verre une galette.
- mesurer le diamètre de la galette.
 - Si $D = 12$: consistance normale.
 - Si $D < 12$: refaire l'essai en augmentant la quantité d'eau de gâchage.
 - Si $D > 12$: refaire l'essai en diminuant la quantité d'eau de gâchage.

Pour la quantité d'eau optimale exprimée la consistance normale en pourcent par formule masse d'eau

$$CN = \frac{\text{masse d'eau}}{\text{masse de plâtre}} \times 100\% \quad (1)$$



FigureII.2 : détermination de la consistance normale.

II.2.2.3.Détermination du temps de prise :

Le temps de prise le plus courant est. Appelé « temps-couteau ». Le test consiste à verser sur une plaque de verre un mélange d'eau et de plâtre correspondant au taux de gâchage. Toute les 10s, on tranche la galette avec la lame d'un couteau. Le moment ou le sillon ainsi réalisé ne referme plus est appelé temps de début de prise. Pour les plâtres de préfabrication, il se situe 1et 4 minutes.

La fin de prise est atteinte lorsque la pression du pouce sur la galette ne fait plus sortir d'eau et ne laisse pas d'empreinte.

Il existe également une méthode par mesure de température : la réaction d'hydratation de l'hémi-hydrate en hydrate-double est exothermique. Tant que la n'est pas terminée, le système dégage de la chaleur. En plaçant le mélange eau-plâtre dans une enceinte isolée, et en mesurant la température toutes les 30s, en pourra établir la courbe thermique du mélange. Lorsque la température se stabilise, la prise est terminée. Il est à noter que certains fabricants de carreaux de plâtre utilisent ce système pour déclencher l'extrusion des carreaux.

II.2.2.3.1. Equipements et matériaux :

- appareil de vivat.
- balance technique.
- tasse en porcelaine.
- couteau métallique.
- spatule métallique.
- Chronomètre.
- plâtre (médical, construction, et témoin).
- eau potable.

II.2.2.3.2. réalisation de travail :

- graisser la surface intérieure du moule tronconique.
- préparer de la tasse en porcelaine la quantité d'eau correspondante à la consistance normale de 200 g de plâtre.
- peser 200 g de plâtre avec une précision de 1 g.
- verser 200 g de plâtre à vitesse constante dans l'eau et malaxer pendant 30s.
- placer le moule sur l'appareil de Vicat et mettre l'aiguillé au contact avec la surface de la pâte et fixant la vis.
- verser la pâte dans le moule tronconique et araser sa surface par le couteau métallique, la durée de cette opération ne doit pas dépasser 30s.
- libérer l'aiguillé en la laissant s'enfoncer par son propre poids dans la pâte. Remarquer la distance entre l'extrémité de l'aiguillé et la surface de l'appareil de Vicat. Répéter cette opération toutes les 30s en changement chaque fois le lieu du chute de l'aiguillé.
- déterminer les délais de prise d'après la condition suivante
 - **début de prise** : l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant de gâchage et celui où l'aiguillé ne pénètre plus jusqu'au fond du moule.
 - **Fin de prise** : c'est l'intervalle qui sépare l'instant du gâchage et celui où l'aiguillé ne pénètre plus dans la pâte.



FigureII.3 : détermination de temps de pris par appareil de Vicat.

II.3.Détermination des résistances mécaniques à 14 jours :

II.3.1. Objet et domaine d'application :

La présente norme algérienne spécifie des méthodes de détermination des caractéristiques mécaniques suivantes des plâtres

- Résistance à la rupture par flexion.
- Résistance à la rupture par compression.

II.3.2. moules et éprouvettes :

II.3.2.1. moule :

Le moule doit comporter trois compartiments permettant l'exécution simultanée de trois éprouvettes prismatiques de 4 cm x 4 cm x 16 cm.

Et doit être conçu pour résister aux déformations. Il doit être démontable rigide et étanche, il doit comporter un socle sur lequel il est fixé par serrage.



FigureII.4 : Moule 4X4X16.

Les dimensions intérieures de chaque compartiment, en millimètres

- longueur : 160 = 0.4 mm
- largeur : 40 = 0.1 mm
- hauteur : 40 = 0.1 mm

Les parois doivent avoir au moins 10 mm d'épaisseur. Les deux faces intérieures opposées de 40 mm x 160 mm

Doivent être planes à 0.02 mm près.

L'angle qu'elles font les moules doit être de $90 + 0.5$

Verser la pâte dans les moules en la brassant lentement.

Pour éliminer les bulles d'air, soulever la partie avant du moule cinq fois d'environ 10 mm et le laisser retomber. Lorsqu'on constate le début de la prise sur la pâte débordante, ne pas lisser la surface. Après la fin de prise, marquer les prismes sur cette surface et les démouler.

Les instruments destinés au nettoyage des moules doivent être moins durs que le métal des moules.



FigureII.5 : remplissage des éprouvettes.

II.3.2.2. Préparation des éprouvettes :

Huiles légèrement l'intérieur des moules et rendre leur joints étanches, pour éviter les pertes d'eau.

Pour confectionner les éprouvettes, utiliser un récipient à gâcher répondant aux prescriptions de 3.1.4 ou 3.2.4 de NA 524.

Gâche, en une seule fois, la quantité m de plâtre nécessaire au remplissage d'un moule de trois éprouvettes. Le volume de pâte nécessaire, compte tenu des pertes, est de 950 ml. À l'aide du rapport eau-plâtre E/P. ou fixe arbitrairement.

Calculer la quantité m de plâtre nécessaire, selon la formule

$$M = \frac{950}{0.4 + \left(\frac{E}{P}\right)} (2)$$

La masse d'eau nécessaire au gâchage $m \times (E/P)$

Verser cette quantité d'eau dans récipient conforme aux prescriptions de 3.1.4 ou 3.2.4 de NA 525.

Laisser reposer durant 1 min, puis homogénéiser la gâchée par 30 mouvements circulaires de spatule donnés en 30s. Donner ensuite 3 mouvements circulaires de spatule toutes les minutes pour remettre le plâtre en suspension, continues jusqu'à épaissir et forme un cône a la surface du gâchage quand, on la laisse tomber lentement d'une cuillère.

La méthode de gâchage peut varier suivant la consistance choisie. Cette méthode, ainsi que le mode de détermination de la consistance, doivent être notes dans le procès-verbal d'essai.



FigureII.6 : malaxeur a mortier.

II.3.2.3 .nombre d'éprouvettes essayées :

A chaque type de plâtre on à utiliser, trios éprouvettes provenant de gâchées différente doivent être réservées pour l'essai de flexion.

A chaque type de plâtre on à utiliser trios éprouvettes provenant de gâchées différente doivent être réservées pour l'essai de compression.



Figure.II.7 : les éprouvettes.

II.4. Essai de rupture par compression :

II.4.1.Appareillage :

II.4.1.1.Dispositif de compression :

Consistant en deux plaques en métal, d'au moins 10 mm et d'épaisseur de $40 \pm 0,1$ mm de largeur et de longueur supérieure à 40 mm et de tolérance de planéité 0,1.

Surface de l'éprouvette et d'exercer perpendiculairement à celle-ci, sur la bille, un effort déterminé.

II.4.1.2. Machine d'essai :

permettant, par sa construction et par ses possibilités de réglage, d'effectuer les essais avec une dispersion aussi faible que possible .Sa précision doit être de +1,5 % pour les charges les plus faibles utilisées au carus, des essais, le plateau supérieur doit avoir une dimension au moins égale à la petite dimension des éprouvettes, et au plus égale à 100mm.



Figure II.8 : appareil pour essai de compression

II.4.1.3. Mode opératoire :

Placer le dispositif de compression et l'éprouvette entre les plateaux de la presse de telle manière :

- Que l'éprouvette soit comprimée par ses faces latérales de moulage, sous une section de $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$;
- Que l'axe de la rotule du plateau supérieur passe par le centre des surfaces comprimées.
- Augmenter la charge à une vitesse telle que l'écrasement se produise entre 20 et 40 s après le début de mise en charge.

II.4.1.4. Expression des résultats :

La valeur de la contrainte de rupture à la compression, RC , exprimée en newtons par millimètre carré, est donnée par la formule où P est la charge avant provoqué l'écrasement de l'éprouvette, en newtons.

Indiquer dans le procès-verbal d'essai les RC obtenues.

Si les trois résultats obtenus pour RC ne diffèrent pas de plus de 15% de leur moyenne, retenir cette moyenne, exprimée à $\pm 0,05 \text{ N/mm}^2$.

$$R_c = \frac{P}{1600} (4)$$

Où :

A+2 % de cette moyenne, comme valeur de la contrainte de rupture.

Si un résultat diffère de plus de 15% de la moyenne, ce résultat ne doit pas être pris en considération pour le calcul de la moyenne.

Si plus d'un résultat diffère de plus de 15% de la moyenne. Recommencer l'essai sur trois nouvelles éprouvettes.

II.5.Essai de rupture par flexion :

II.5.1. Appareillage :

II.5.1.1. Dispositif de flexion :

Pourvu de deux rouleaux d'appui de 10 mm de diamètre distants de $100 \pm 1 \text{ mm}$, et d'un rouleau de chargement de même diamètre

Les trois plans verticaux passant par les axes des trois rouleaux être parallèles et doivent le rester pendant l'essai, un des rouleaux d'appuis et chargement doivent

Pouvoir osciller légèrement par rapport à leur milieu dans leur plan vertical, pour permettre une distribution uniforme de la charge sur la largeur de l'éprouvette prismatique. En évitant tout effort de torsion ces plaques sont en acier dure elles sont guidées sans frottement appréciable au cours de l'essai, de manière à avoir la même projection horizontale. L'une d'elles peut être inclinée légèrement pour permettre le contact parfait avec l'éprouvette.

II.5.1.2. Machines d'essai :

Dans laquelle le dispositif de flexion est adapté, permettant de mesurer de faibles charges avec une précision de 1% dans quatre cinquièmes supérieurs de l'échelle de mesurage.



FigureII.9 : essai de flexion

II.5.1.3. modes opératoires :

- Procéder à trois déterminations
- Faire croître la charge P progressivement, de façon que la rupture se produise de 20 à 40s après le début de la mise en charge.
- Veiller à ce que les arêtes de l'éprouvette soient bien perpendiculaires aux rouleaux et à ce que le rouleau supérieur soit bien équidistant des rouleaux inférieurs outre la charge maximale supportée par l'éprouvette.

II.5.1.4. Résultats :

La valeur de la contrainte par flexion, R_f . Exprimée en newtons par millimètre carré, est donnée par la formule :

$$R_f = \frac{6M}{b^3} = 0.0234P \quad (3)$$

Où :

M : est le moment de flexion, en newtons millimètre.

b : est le coté, en millimètre, de la section carré de l'éprouvette.

P : est la charge de rupture, en newtons.

Indiquer dans le procès-verbal d'essai, les valeurs de P et de R_f obtenues pour les trois éprouvettes préciser l'âge de ces dernières et les conditions de séchage, si les trois résultats obtenus pour R_f ne diffèrent pas de plus de 15% de leur moyenne, retenir cette moyenne exprimée à $+ 0.05N/mm^2$ ou à 2% de cette moyenne en choisissant l'expression correspondant à la tolérance le plus large, comme valeur de la contrainte de rupture.

Si un résultat diffère de plus de 15% de la moyenne, ce résultat ne doit pas être pris en considération pour le calcul de la moyenne.

Si plus d'un résultat diffère de 15% de la moyenne, recommence l'essai sur trois nouvelles éprouvettes.

II.6.1.Mesure de la masse spécifique :

II.6.2.Principe :

Mesure de la masse volumique par pesés dans l'eau avec un volume constant.

La méthode du pycnomètre est utilisée pour les matières plastiques avant formage, telles que poudres à mouler, comprimés ou granulés.

II.6.3.Appareillage :

- Balance précise à 0,1 mg
- Pycnomètre de 50 ml
- Récipient thermo-régulé
- Liquide d'immersion : eau distillée ou autre liquide convenable.

II.6.4.Mode opératoire :

- Poser le pycnomètre sur la balance, faire le zéro.
- Remplir le pycnomètre de liquide jusqu'au repère.
- Peser le volume de liquide.
- Vider le pycnomètre.
- Introduire le lot de matière à tester dans le pycnomètre
- Peser le lot.
- Compléter le remplissage du pycnomètre avec le liquide.
- Peser l'ensemble eau + matière.
- Répéter l'essai sur 4 échantillons.

II.6.5.Expression du résultat :

On utilise la formule suivante :

$$M_{SP} = \frac{m_1 * d_{liquide}}{m_3 - m_0}$$

La masse volumique du matériau testé est la moyenne arithmétique des 4 déterminations

$$d_{liquide} = 0.86$$



Figure II.10 : mesure de la masse spécifique

II.7. Analyse structurale par diffraction de rayon X « DRX » :

II.7.1. Définition :

La diffraction de rayon X est une méthode d'analyse physico-chimique couramment employée pour déterminer la structure cristalline d'un matériau. Elle s'applique à des milieux cristallins possédant un arrangement ordonné.

Les méthodes diffracta métrique nous fournissent plusieurs informations :

Phases cristallines, structure cristalline, paramètre de maille, distribution des atomes etc...

II.7.2. principe :

Les rayons « X », ayant une longueur d'onde de l'ordre de 1 Å, peuvent être diffractés par les structures tri-périodiques que constituent les cristaux. En effet, des maxima d'interférences (pics de diffraction) apparaissent dans certaines directions des rayons « X » diffusés par le cristal. Ces directions sont données par les conditions de Laue, dont, on peut déduire la relation de Bragg :

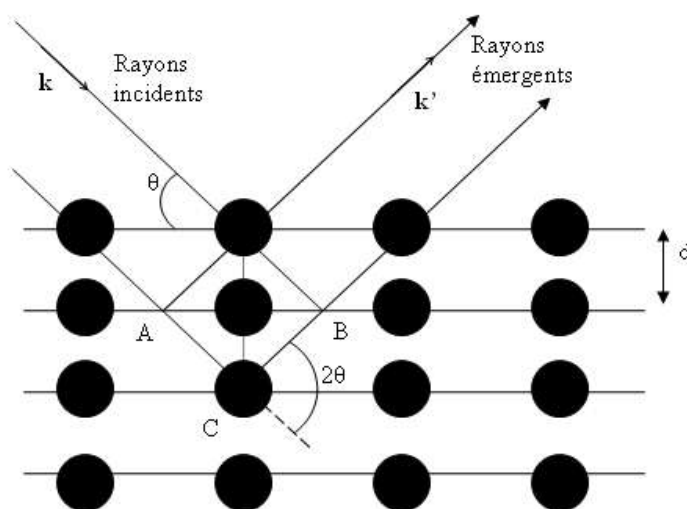


Figure II.11 : d'effraction des rayons.

Où θ est le demi-angle de diffusion, d_{hkl} la distance interarticulaire séparant les plans définis par les indices de Miller (h, k, l) et n un nombre entier positif.

Les intensités du maximum des pics sont proportionnelles au facteur de structure, qui est l'amplitude diffusée par les atomes de la maille du cristal.

L'appareil utilisé dans le cadre de ce travail est un diffractomètre de type Philips « X » perte. Les mesures ont été réalisées à l'université de boumer des. Les rayon-X ont été produit à partir d'une source de radiation $\text{CuK}\alpha$, ayant une longueur d'onde de 1.5418 \AA .



Figure II.12 : DRX Philips X'pert

Chapitre III :

Résultats et discussions

III.1 Introduction :

Le présent chapitre se consacre à la présentation des résultats obtenus en ce qui la caractérisation du matériau et l'interprétation des résultats, alors les résultats sont présentés suivant le même ordre de chapitre précédent pour faciliter et l'accord de chaque essai avec ses résultats obtenus.

III.2.1.Détermination de la consistance normal :

Tableau III.1 : Consistance normale de différents types de plâtre

Plâtre	Plâtre témoin fin	Plâtre témoin gros	Plâtre C. Fin	plâtre C. Gro	Plâtre M. fin	plâtre M. gros
Consistance normal (%)	70(%)	70(%)	90(%)	85(%)	100(%)	95(%)

Représentation graphique :

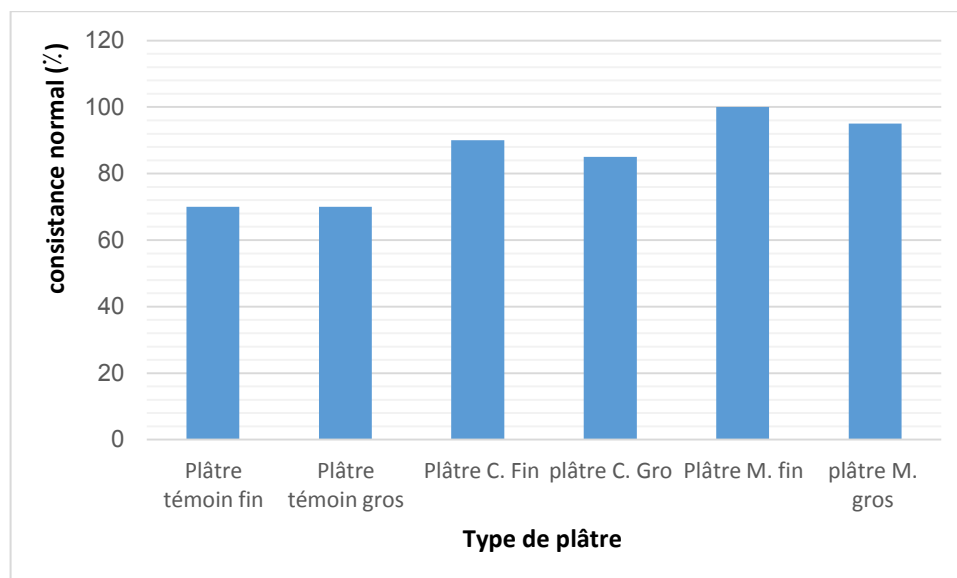


Figure III.1 : la consistance normale.

Les résultats obtenus montrent que la consistance normale pour les différents échantillons de plâtre est satisfaisante par rapport au témoin.

Le plâtre fin présente une consistance supérieure par rapport au plâtre gros ce qui traduit par un besoin d'eau supérieur due principalement à la surface spécifiques élevée pour les échantillons de plâtre fin.

III.2.2.Détermination de début et fin de prise de différent type de plâtre :

Tableau III.2 : Résultats de début et fin de prise de différent type de plâtre

Echantillon	plâtre M.F	plâtre M.G	plâtre C.F	plâtre C.G	plâtre Ti. F	plâtre Ti. G
Début	10 min	3,40 min	3,00 min	3,00 min	3,24 min	2.55 min
Fin	30 min	45 min	7,30 min	60 min	24 min	20 min

Représentation graphique :

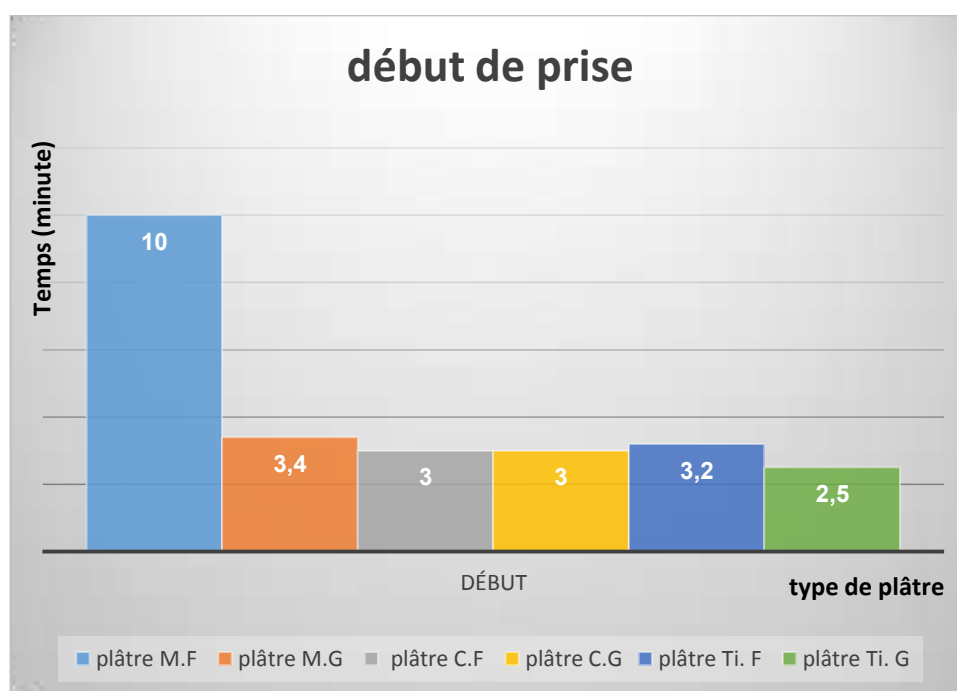


Figure III. 2 : le début de prise.

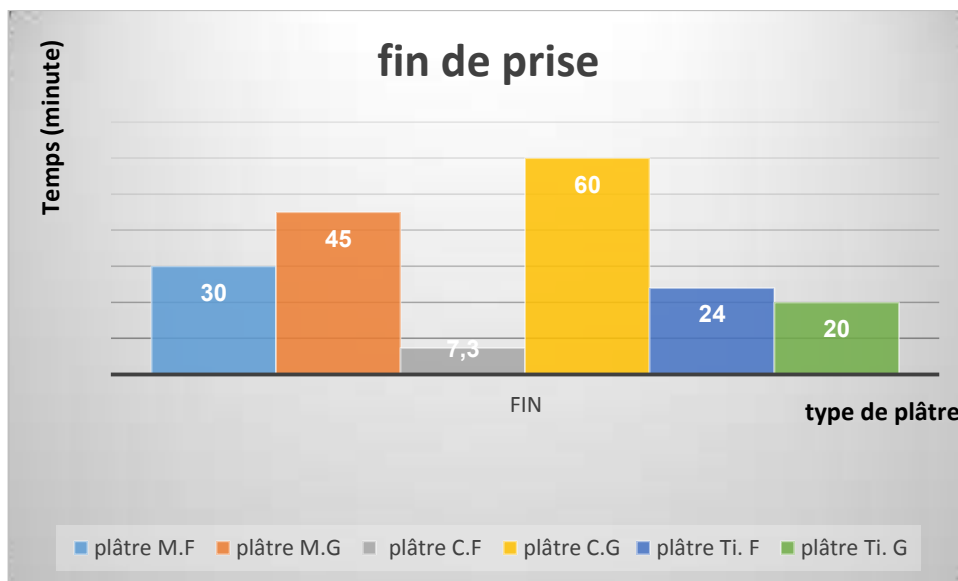


Figure III. 3 : fin de prise.

Les résultats montrent que les différents types de plâtre ont présenté des délais de prise allant de 2.55 minutes à 60 minutes. Le plâtre gros présente un retard de prise par rapport au fin, soit médicale ou de construction et par rapport au témoin aussi, ce qui est due principalement aux dimensions de grains.

III.3 .Résistance mécanique à la rupture par compression :

Les résultats des essais mécaniques sur les éprouvettes de plâtre de 4X4X16 sont représentés par le tableau(III.4) et l’histogramme de la figure III .4.

Tableau III.3 : Résistance mécanique à la compression

Plâtre	Résistance mécanique (Mpa)	
	Fin	Grossier
Plâtre témoin (PT)	10.61	08.96
Plâtre construction (PC)	08.5	08
Plâtre médical (PM)	08.8	08.3

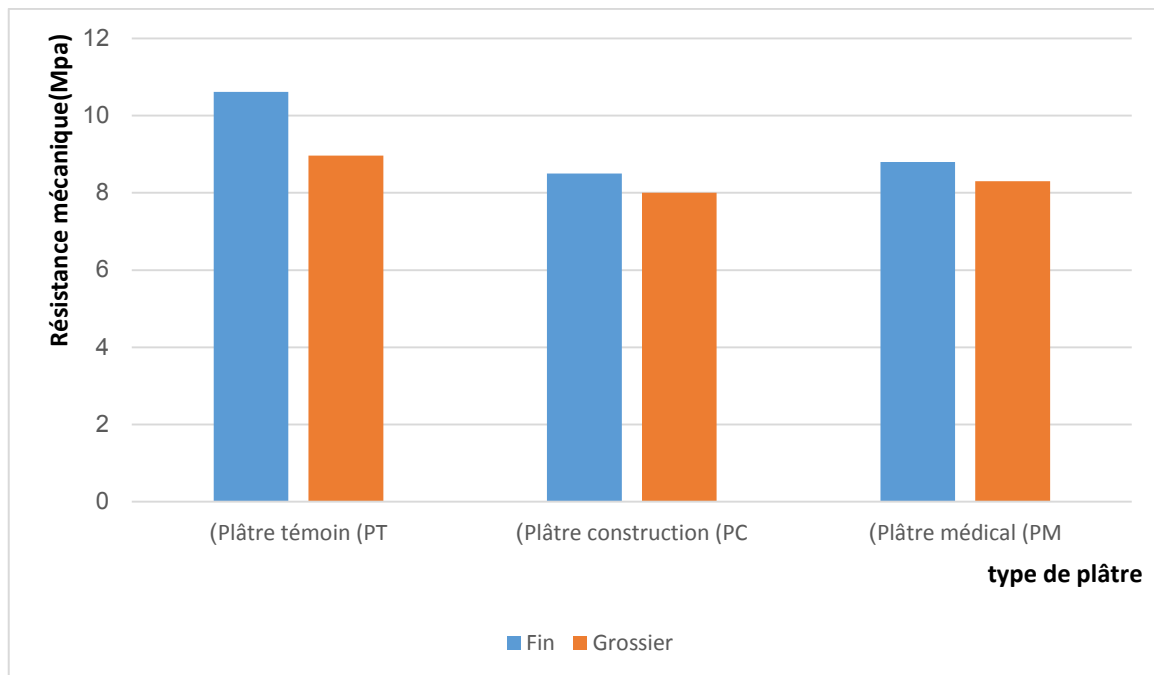
Représentation graphique :

Figure III.4 : Les résistances à la compression de différents plâtre

Interprétation :

Les résultats obtenus après l'écrasement des éprouvettes des différents plâtres représentés par le tableau III.4 et les histogrammes de la figure III.4 montrent des valeurs de résistances acceptables par rapport au témoin ou l'intervalle de variation se situe entre (10.6 - 8.0N/mm²).

La valeur la plus élevée a été enregistrée pour la variante du plâtre fin. Ce qui peut être expliqué par le fait que les propriétés liantes se manifestent plus pour cette classe de plâtre. Avec réhydratation du gypse recyclé et formation des liaisons chimiques ce qui assure la consolidation de la structure.

III.3.1. la résistance mécanique de rupture par flexion :

Tableau III.4 : Résistance à la flexion

plâtre	rupture par flexion(Mpa)	
	Fin	Grossier
Plâtre témoin (PT)	1.30	1.34
Plâtre construction (PC)	1.2	1.1
Plâtre médical (PM)	1.1	1.15

Représentation graphique :

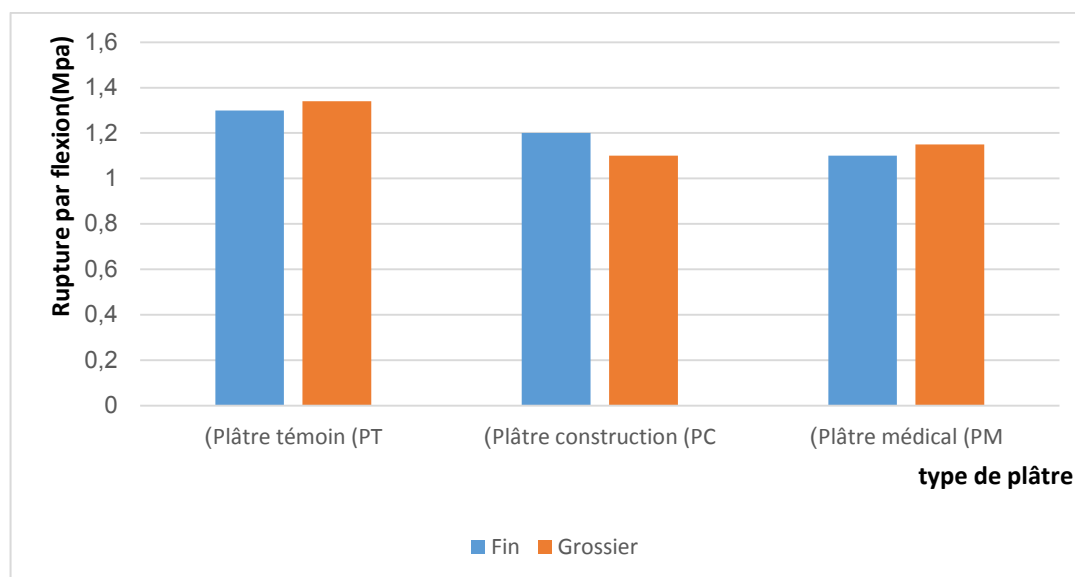


Figure III.5 : les résistances mécaniques à la flexion de différents plâtre.

Interprétation :

Les résultats d'essais de flexion réalisés sur des éprouvettes 4X4X16 sont illustrés par le tableau et l'histogramme tableau III.5 et Figure III.5.

Les résultats montrent des valeurs qui sont très proches de celles enregistrées pour le plâtre témoin.

Qui restent assez modestes.

III.3.2. la résistance mécanique de rupture par flexion avec fibre :

Afin d'améliorer la résistance mécanique surtout à la flexion nous avons procédé au fibrage de nos échantillons élaborés à base de plâtre grossier ayant donné la résistance à la flexion la plus faible avec la fibre filas utiliser couramment dans les produit à base de plâtre.

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau III.6 :

Tableau III.5 : Résistance à la flexion avec fibre.

Plâtre	Plâtre témoin grossier	Plâtre C, G	Plâtre M, G
Avant (Mpa)	1,34	1,1	1,15
Après (Mpa)	3	2,8	2,7

Représentation graphique :

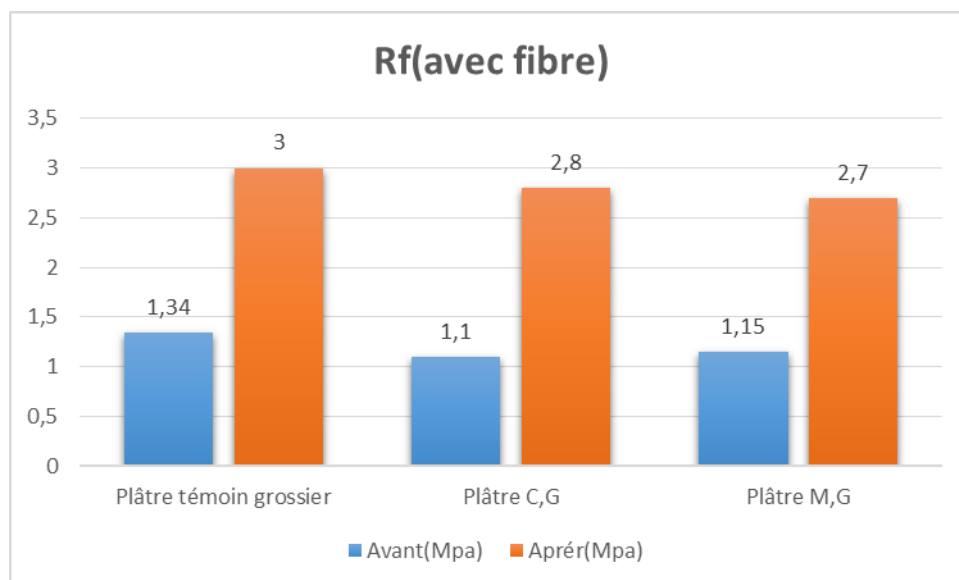


Figure III.6 : les résistances mécaniques à la flexion avec des éprouvettes avec fibre.

III.4. Analyse minéralogique du pâtre avant et après recyclage :

Pour confirmer les résultats physiques et mécaniques obtenus nous avons procédé à une analyse microstructurale par diffraction aux rayons X, cette analyse est utilisé pour caractériser la structure cristalline marquée par la répartition des atomes dans un réseau géométrique bien déterminé. Les résultats sont représentés dans les diffractogrammes des figures.III.7 et.III.8.

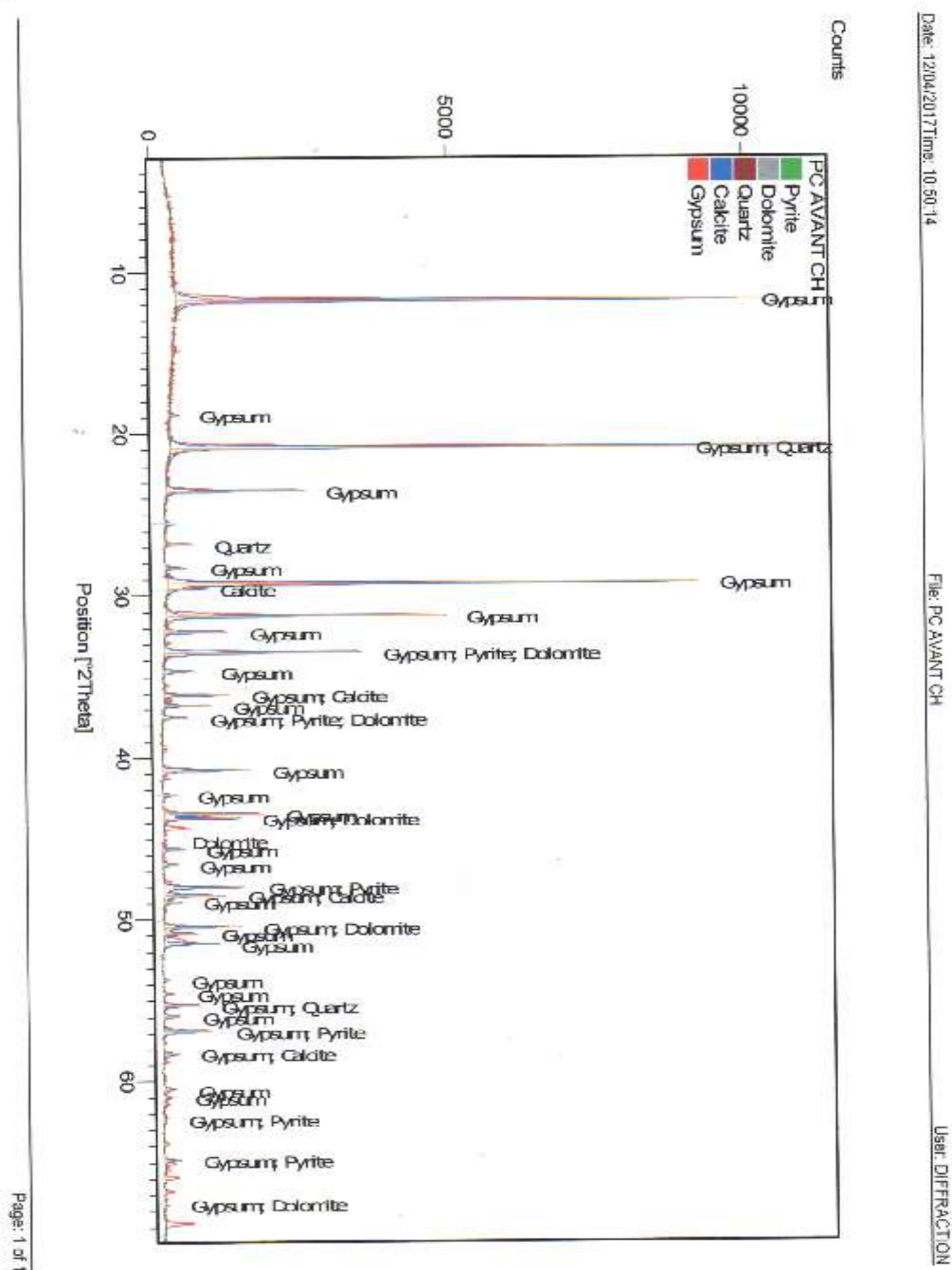


Figure.III.7 : Analyse minéralogique du pâtre avant recyclage.

Les résultats obtenus pour deux échantillons de plâtre avant et après traitement thermique sont représentés dans les figures Figure.III.7 et Figure.III.8.

Ces résultats montrent que le recyclage du plâtre a été réussi à cause du taux élevé en Basanite (semi hydrate pur) représenté par la majorité des pics du diffractogramme. Cela confirme que la température et le temps de cuisson ont été suffisants pour le recyclage du plâtre et l'obtention de l'hém- hydrate recherché.

III.4 Essai physique :

III.4.1.Détermination de la masse spécifique :

Tableau III.6 : détermination de la masse spécifique

Pycnomètre	Plâtre témoin	Plâtre C. fin	Plâtre C. Grossie	Plâtre M. fin
Vide (m0)	10	10	10	10
Avec toluène (m1)	14	14	15	14
Avec plâtre (m2)	11	11	11	11
Avec plâtre+ toluène (m3)	15	16	16	15
masse spécifique	2.40	2.00	2.15	2.40

On utilise la formule suivante :

$$M_{SP} = \frac{(m1) * d_{liquide}}{m3 - m0}$$

La masse volumique du matériau testé est la moyenne arithmétique des 4 déterminations

$$d_{liquide} = 0.86$$

Conclusion générale :

Le plâtre est un produit de construction naturel et écologique depuis Toujours. Il est tout naturellement prédestiné au recyclage. Il offre avantageusement une préférence qu'elle soit économique, écologique et sécuritaire par sa très bonne résistance au feu. On dit de lui que c'est un matériau qui boucle la boucle par excellence c'est-à-dire recyclable à 100%.

Le recyclage du plâtre mis en jeu deux grands volets économiques et environnemental, réduire le prix de revient tout en préservant la nature par les tonnages élevés de déchets encombrants récupérés.

Par ce travail expérimental nous avons essayé de contribuer à la valorisation du déchet plâtre et voir la possibilité de son réintroduction dans les chaînes de fabrication des matériaux à base de plâtre. Pour cela une investigation expérimentale a été menée sur des échantillons de plâtre récupérés des décharges de matériaux de construction ainsi que ceux récupérés des services orthopédiques des hôpitaux. Les résultats expérimentaux montrent que le plâtre peut être recyclé avec succès et cela en se basant sur les constatations suivantes :

- Les résultats d'essais physiques montrent que le plâtre fin présente une consistance supérieure par rapport au plâtre gros et un délai de prise moindre.

Un retard de prise a été enregistré pour tous les échantillons dus au taux faible en gypse qui joue le rôle d'accélérateur de prise.

- les valeurs d'essais mécaniques flexion compression restent acceptables La valeur la plus élevée a été enregistrée pour la variante du plâtre fin.

- la résistance modeste à la flexion peut être améliorée par l'addition de fibres

- l'analyse minéralogique montre que le recyclage du plâtre a été réussi à cause du taux élevé en Basanite (semi hydrate pur) représenté par la majorité de pic du diffractogramme. Cela confirme que la température et le temps de cuisson ont été suffisants pour le recyclage du plâtre et l'obtention du semi hydrate recherché.

Enfin on peut dire que le recyclage du plâtre est une opération qui n'est pas très coûteuse par rapport à ses bénéfices, économiques et écologiques.

On suggère l'installation d'unité de collecte et de recyclage de plâtre et de l'utilisation du plâtre obtenu en parallèle du plâtre fabriqué.

References Bibliographiques

- [1] G Burdairon: Abrégé de biomatériaux dentaires Masson édition, paris 1990 : p306
- [2] F Teaka, J Takahashi: Dimensional changes and pressure of dental stones set in silicone rubber impressions. Dent Mater 2000 ; 16 :drite145-149
- [3] Sylvain MEILE (Ingénieur INSA) : ETUDE DE COMPORTEMENT MECANIQUE DE PLATRE PRIS EN RELATION AVEC SA MICROSTRUC
- [4] Céline Martias. Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie. Other. Université de Toulon et de Var, 2011. French. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-0076552> submitted on 4 jan
- [5] P. Marteau «Memento roches et minéraux industriels –Gypse et anhydrite-» rapport BRGM R37772, Orléans cedex 2- France, 06/1993
- [6] l'école polytechnique, 08/12/2006. HamoudaJaffel « Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre » Thèse de doctorat
- [7] Tetyana KURYATNYK « insensibilisation a l'eau des melangesa base de sulfate de calcium par ajout de clinker sulfo-alumineux » Thèse de doctorat, Ecole doctorale MEGA de Lyon, 05/10/2007, N^o de l'ordre 2007-ISAL-0063.
- [8] Céline Martias « Synthèse et caractérisation de matériaux composites à base de sulfate de calcium destinés à la protection incendie » thèse de doctorat, université du sud Toulon Var, 14/10/2011.
- [9] Frederic Charpentier, Michel Fontaine, Jean Fouin, VirgineStelmach « le plâtre matériau noble » Rapport de concours de la Diren –ile-de –France, 2000, N^o 138
- [10] E. Karmazin, « Cinétique et mécanisme d'hydratation des sulfates de calcium semi hydratés – Etude par calorimétrie en régime isotherme », Thèse, INSA. Université de Lyon I, 1978
- [11] Par Daniel DALIGAND
- [12] D. Daligand, plâtre « techniques de l'ingénieur » Vol C910, 1-16
- [13] A. L. Lavoisier « Extrait de deux mémoires sur le gypse lus a l'académie royale des sciences » Mémoires de Lavoisier, [http : //www.lavoisier.cnrs.fr/vol.3,1765,pp.106-125](http://www.lavoisier.cnrs.fr/vol.3,1765,pp.106-125)

Références Bibliographiques

[14] W. Michaelis, « the hardening process of hydraulic cements, cement & Engineering News, 1907

[15] E. Karmazin, « Cinétique et mécanisme d'hydratation des sulfates de calcium semi hydratés – études par calorimétrie en régime isotherme »

[16] Secret de fabrication du plâtre – le plâtre industriel – L'entrevues – numéro 23 – page 13

[17] MFE : Fabrication du plâtre alpha à haute résistance du gypse de Ghardaïa. Juillet 1991