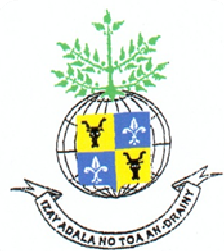


UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

Département : Science des Matériaux et Métallurgie

Option : Science et Ingénierie des Matériaux



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR MATERIAUX



Présenter par : **RABEARINTSOA Solomampionona Mamitiana.**

Soutenu le, 23 Décembre 2013.

PROMOTION 2012



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



ÉCOLE SUPÉRIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

Département : Science des Matériaux et Métallurgie

Option : Science et Ingénierie des Matériaux

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR MATERIAUX



Présenter par : **RABEARINTSOA Solomampionona Mamitiana.**

Soutenu le 23 Décembre 2013.

MEMBRES DE JURY :

- Président : Professeur titulaire ANDRIANARY Philippe Antoine.
- Examineurs :
 - Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely;
 - Docteur RANARIVELO Michel.
 - Docteur RAKOTOSAONA Rijalalaina.
 - Monsieur RAZAFINJATOVO Charles.
- Directeur de mémoire : Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric.

PROMOTION 2012

REMERCIEMENTS

Avant toute chose, il m'est indispensable de rendre grâce à DIEU Tout Puissant pour la bénédiction et l'aide qu'Il m'a fourni pour la réalisation de ce mémoire.

Je ne saurais présenter cet ouvrage sans témoigner mes remerciements à l'égard des premiers responsables de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Professeur titulaire ANDRIANARY Philippe Antoine : Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric : Chef du Département « Science des Matériaux et Métallurgies (S.M.M) », qui a accepté de m'encadrer et qui m'a aidé et conseillé pendant ce travail avec patience, compétence et compréhension. Tous mes vœux de bonheur et de réussite.

Je tiens également à remercier tous les membres de jury qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps pour examiner les résultats de mes travaux de recherche, à savoir :

- Professeur RANAIVONIARIVO Velomanantsoa Gabriely. Responsable de la formation Doctorale du Département Science des Matériaux et Métallurgie.
- Docteur RANARIVELO Michel. Maître de conférences.
- Docteur RAKOTOSAONA Rijalalaina. Maître de conférences.
- Monsieur RAZAFINJATOVO Charles. Maître assistant.

L'aide des Enseignants, des Responsables pédagogiques et professionnels, m'a été précieuse pour l'élaboration de ce mémoire de fin d'études : un savoir-faire qui m'a permis de développer une bonne faculté d'adaptation et une grande rigueur de travail. Ils constitueront un atout supplémentaire pour m'impliquer efficacement dans ce domaine ainsi que des bagages importants pour mes études. Je tiens adresser mes vifs et sincères remerciements au :

Monsieur ANDRIAMALALA Mbola Prosper : Responsable du laboratoire du Département Génie Chimique de l'E.S.P.A Vontovorona, pour les occasions que vous m'avez offertes au cours des expériences effectuées au laboratoire avec lesquelles j'ai pu faire tant de découvertes. Veuillez accepter, Monsieur, mes remerciements les plus respectueux.

Je tiens à remercier aussi les interlocuteurs qui m'ont répondu dans les différents services pour leur collaboration de près ou de loin lors de la réalisation de ce mémoire, plus particulièrement à :

- Monsieur RANDRIANARIVELO Lanja, Gérant de la Société MALAGASY GYPSUM pour les matières premières qu'il m'a fournies ;
- Le Centre National de Recherche Industrielle et Technologique (C.N.R.I.T), qui m'a aidé dans la réalisation de ce travail ;
- Monsieur RAVELOJAONA Johnson, Responsable du laboratoire d'essais mécanique du Bloc Technique à Ankatso, qui m'a suivi tout au long de mes expérimentations.

J'espère que la réalisation de cet ouvrage sera le témoignage de mon admiration et de mes remerciements.

Il ne serait pas possible d'oublier de remercier ma famille, particulièrement mes parents qui m'ont soutenu et encouragé durant mes études.

SOMMAIRE.

Titre	Page
REMERCIEMENT	I – II
SOMMAIRE	III – IV
LISTE DES ABREVIATIONS	V
UNITÉS	VI
SYMBOLES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII - IX
LISTE DES FIGURES	X-XI
AVANT – PROPOS	XII
GLOSSAIRE.....	XIII
INTRODUCTION.....	1 – 2
 <u>Première partie : « ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE. »</u>	
Chapitre I Généralité sur les gypses.	3
Chapitre II Présentation des gisements de gypse.	8
Chapitre III Fabrication du plâtre.....	12
Chapitre IV Fabrication des plaques de plâtre.	32
 <u>Deuxième partie : « ÉTUDES EXPÉRIMENTALES. »</u>	
Chapitre I Méthodes expérimentales.....	41
Chapitre II La plaque de plâtre.....	47
Chapitre III Résultats expérimentaux et interprétations.....	58

Troisième partie :

« ÉTUDES D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIO-ÉCONOMIQUE. »

Chapitre I L'étude d'impact sur l'environnement.....	73
I.1.1.2. Les espaces naturels transformés.....	75
Chapitre II Etude socio-économique.....	82
ANALYSE ET SUGGESTION.....	90-91
CONCLUSION GÉNÉRALE	92
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	93-95
ANNEXES	A-1 – A-10
TABLE DES MATIERES.	

LISTE DES ABREVIATIONS

E.S.P.A : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo ;

T : Température ;

d : Densité ;

BA : Bord aminci ;

BAR : Bord demi-ronde ;

BRA : Bord rond aminci ;

BR : Bord rond ;

BC : Bord chanfreiné ;

BD : Bord droits ;

PVC : Polychlorure de vinyle ;

PAN : Pyridylazonaphtol ;

TEA : Triéthanolamine ;

EDTA: Ethylène Diamine Tétra Acétique ;

M.O : Maître de l'ouvrage ;

E.I.E : Etude d'impact sur l'environnement ;

ACV : Analyse de Cycle de Vie ;

UF : Unité fonctionnelle ;

DVT : Durée de vie typique ;

TCV : Total cycle de vie.

TVA : Taxe Valeur Absolue.

H.I.M.O : Haute Intensité de Main d'Œuvre.

UNITÉS

cm : Centimètre ;

mm : Millimètre ;

cm² : Centimètre carré ;

daN : DécaNewton ;

daNm : DécaNewton mètre ;

daN/m² : DécaNewton par mètre carré ;

daN/m³ : DécaNewton par mètre cube ;

daN/ml : DécaNewton par mètre linéaire ;

Kg : Kilogramme ;

Kg/m² : Kilogramme par mètre carré ;

Kg/m³ : Kilogramme par mètre cube ;

g : Gramme ;

g/L : gramme par litre ;

m : Mètre ;

m² : Mètre carré ;

MN : MégaNewton ;

MPa : MégaPascal ;

°C: Degré Celsius ;

W : Watt ;

W/m°C : Watt par mètre degré Celsius ;

W/mK : Watt par mètre degré Kelvin ;

MJ : MégaJoule.

Ar : Ariary.

FORMULE CHIMIQUE

$\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_{1/2}$: Sulfate de calcium semi hydraté ;

H_2O : Eau ;

CaCO_3 : calcite ;

CaSO_4 : Anhydrite

CaO : Chaux ;

SO_3 : Trioxide de soufre ;

MgO : Magnesie ;

CO_2 : Carbonate ;

$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$: Alumine et sesquioxyde de fer ;

$\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$: Dolomite ;

H_2SO_4 : Acide sulfurique ;

SO_2 : Dioxyde de soufre ;

$\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$: Hydrate à 2 molécules d'eau ;

HClO_4 : Acide perchlorique ;

Fe_2O_3 : Oxyde de fer ;

Al_2O_3 : Oxyde d'Aluminium ;

$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$: Acétate d'ammonium;

$\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$: Acide acétique;

HCl : Acide chlorhydrique ;

Ba : Barium.

LISTE DES TABLEAUX


Titre	Page
Tableau 1: Composition chimique en pourcentage massique du plâtre [3].	6
Tableau 2: Composition minéralogique en pourcentage massique du plâtre [3].	6
Tableau 3: Valeur de la conductivité thermique de quelques matériaux à 20[°C]. [14].	25
Tableau 4: Variation de la résistance mécanique en fonction du temps. [8].	28
Tableau 5: Exemples de normalisation de la plaque de plâtre à bord aminci (BA). [9].	36
Tableau 6: Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue avant la mise en forme.	50
Tableau 7: Classification de la plaque de plâtre pour l'homogénéisation.	50
Tableau 8: Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue après la mise en forme.	51
Tableau 9: Mesures enregistrées lors de l'essai de flexion trois points.	62
Tableau 10: Résultats d'après les théories des calculs.	63
Tableau 11: Résultats d'identification des caractéristiques mécaniques en traction.	68
Tableau 12: Détermination du module d'Young.	69
Tableau 13: Consommation des ressources naturelles.	74
Tableau 14: Pollution environnementale. [9].	75
Tableau 15: Valeur des «  ». [21].	84
Tableau 16: Sous détail des prix de l'extraction du gypse.	85
Tableau 17: Sous détail des prix de la fabrication du plâtre.	86
Tableau 18: B.D.Q.E pour la fabrication d'une plaque de plâtre BA 13 (e = 12,5 [mm] ; l = 1 200 [mm] et L = 2 400 [mm] de dimensionnement).	88
Tableau 19: Classement de la réaction au feu des matériaux selon la norme NF P. 92.507.... A-II-1	
Tableau 20: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de l'anhydrite soluble CaSO ₄ III.	A-II-8
Tableau 21: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la variété "β".	A-II-8
Tableau 22: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "30[%] CaSO ₄ III - 70 [%]β ".	A-II-8
Tableau 23: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "40[%] CaSO ₄ III - 60 [%]β ".	A-II-9

Tableau 24: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "50[%] CaSO ₄ III - 50 [%]β ".	A-II-9
Tableau 25: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "60[%] CaSO ₄ III - 40 [%]β ".	A-II-9
Tableau 26: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "70[%] CaSO ₄ III - 30 [%]β ".	A-II-10
Tableau 27: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de l'anhydrite soluble CaSO ₄ III.	A-II-10
Tableau 28: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel du semi-hydrate de variété "β".	A-II-10

LISTE DES FIGURES

Titre	Page
Figure 1: Cristal prismatique.....	5
Figure 2: Cristal aplatis	5
Figure 3: Carte de gisement de gypse de Madagascar.	9
Figure 4: Localisation de la zone d'étude.	10
Figure 5: Processus de fabrication du plâtre.	12
Figure 6: Four culés.....	14
Figure 7: Four verticaux.	15
Figure 8: Four à cylindre rotatif.	16
Figure 9: Four cyclone.	17
Figure 10: Autoclave.	18
Figure 11: Processus de déshydrations de gypse [nos enquêtes].	20
Figure 12: Carreau de plâtre.....	30
Figure 13: BA (bord aminci).	34
Figure 14: BRA (bord rond aminci).	34
Figure 15: BAR (bord demi-ronde).....	34
Figure 16: BR (bord rond).....	34
Figure 17: BC (bord plein chanfreiné).	34
Figure 18: BD (bord droit).	35
Figure 19: Cloisons de distribution.	38
Figure 20: Cloisons séparative alternée.	38
Figure 21: Cloisons de grande hauteur.....	39
Figure 22: Schéma de procédé de fabrication de plaque de plâtre.	47
Figure 23: Structure de plaque.	52
Figure 24: Homogénéisation de la plaque.....	53
Figure 25: Essai de flexion simple ou flexion trois points.	54
Figure 26: Mode opératoire de l'essai de flexion trois points (prise d'essai).	55
Figure 27: Courbes de flexion des plaques de plâtre cuit avant sa mise en forme.....	64
Figure 28: Courbes de flexion des plaques de plâtre par homogénéisation de deux types de plâtre.....	64
Figure 29: Courbes de flexion de la plaque de plâtre cuit après sa mise en forme.	65

Figure 30: Courbes de traction des plaques de plâtre cuit avant sa mise en forme.....	66
Figure 31: Courbes de traction des plaques de plâtre par l'homogénéisation de deux types de plâtre.....	66
Figure 32: Courbes de traction des plaques de plâtre cuit après sa mise en forme.....	67
Figure 33: Diagramme rationnel des plaques de plâtre cuit avant sa mise en forme.....	69
Figure 34: Diagramme rationnel des plaques de plâtre par homogénéisation de deux types de plâtre.....	70
Figure 35: Diagramme rationnel des plaques de plâtre cuit après sa mise en forme.	70
Figure 36: Schéma de procédé de fabrication.	77
Figure 37: Détermination des éléments majeurs du plâtre.....	A-II-2
Figure 38: Processus de production d'une plaque de plâtre.....	A-II-3
Figure 39: Acheminement du gypse depuis la carrière.	A-II-4
Figure 40: Broyage.....	A-II-4
Figure 41: Cuisson.	A-II-4
Figure 42: Dosage du plâtre.	A-II-5
Figure 43: Ajout de l'amidon.	A-II-5
Figure 44: Gâchage du plâtre	A-II-5
Figure 45: Formage de la plaque.....	A-II-5
Figure 46: dimensionnement et séchage de la plaque.	A-II-6
Figure 47: Resciage et banderolage des bords.	A-II-6
Figure 48: Stockage avec le conditionnement en lots.....	A-II-6
Figure 49: Presse de type TESTWELL (Appareil utilisé pour l'essai mécanique.).....	A-II-7

AVANT-PROPOS

Le présent travail représente ma mémoire de fin d'études à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (E.S.P.A) qui a été élaboré et synchronisé avec les études expérimentales passé dans le laboratoire du Département Génie Chimique et du Bloc Technique de l'E.S.P.A. Ce mémoire concerne «LA FABRICATION DE PLAQUE DE PLÂTRE A PARTIR DU GYPSE D'ANTSAKOAMARO/AMBONDROMAMY.» proprement dite.

Ainsi, pendant ces études expérimentales, nous avons eu l'occasion de compléter nos acquis théoriques, en même temps d'assimiler la fabrication de plaque de plâtre à partir du gypse d'Antsakoamaro/Ambondromamy.

En effet, ce mémoire de fin d'études constitue un objet essentiel dans le contenu de la formation, car il contribue à la fois à une formation technique et professionnelle. Autrement dit, d'une part sa réussite nous permet de décrocher notre diplôme d'Ingénieur, et d'autre part il nous permet d'avoir une expérience dans le monde du travail surtout dans ce domaine et que nous puissions développer plus facilement nos connaissances en Entreprise, dans la Société.

GLOSSAIRE.

Le temps de prise : Durée au cours de laquelle le plâtre conserve sa consistance pâteuse.

Exploitation : Ensemble des opérations qui permettent l'abattage, l'enlèvement, l'extraction du minerai et d'assurer tous les services annexes d'une mine dans sa phase de production.

Sterile : Substance minérale naturelle ne présentant pas d'intérêt économique.

Galerie : Nom générale désignant une voie de communication horizontale, ou à peu près horizontale.

Le stuc : C'est un mélange de plâtre, de colle forte et de matière colorés. Le stuc est réalisé à partir de plâtre spéciaux, généralement des surcuits.

Le staff : C'est un plâtre armé aux fibres végétales.

Gisement : Tout gîte naturel de substances minérales économiquement exploitable dans les conditions du moment où prévue pour l'avenir.

Gîte : Lieu de concentration d'un ou plusieurs minéraux utiles.

INTRODUCTION.

Du point de vue économique, Madagascar est un pays connu par la potentialité de ses ressources minières. La production de ces produits, notamment le gypse, ne cesse de s'accroître. Madagascar en possède de nombreux gisements, dont les réserves sont importantes et/ou les effets conjugués du feu et de l'eau sur ce gypse que l'on appelle "la pierre à plâtre" est connue à travers le monde.

Le plâtre est un produit facile à produire. Il permet de réaliser des enduits sur maçonnerie, des protections au feu pour les structures, de carreaux de plâtre et de plaque de plâtre.

C'est un liant hydraulique et grâce à sa grande souplesse d'utilisation, il est utilisé hors du secteur de la construction, dans de nombreux domaines comme l'industrie céramique, médical, dentaire ou l'agriculture.

Utiliser le plâtre pour la fabrication d'une plaque de plâtre, c'est offrir plus de liberté à la création architecturale et garantir un cadre de vie agréable.

La plaque multicouche carton – plâtre – carton est l'objet de constantes améliorations. Elle permet de réaliser des surfaces verticales, horizontales ou inclinées, elle s'intègre ainsi parfaitement à tous les types de construction neuve ou la rénovation, les projets simples ou les futuristes, les aménagements intérieurs (cloisons, doublages ou plafonds), planes sans désaffleure ni joint apparent ainsi des éléments courbés. Elle favorise l'harmonie des bâtiments avec leur environnement.

Face aux enjeux environnementaux, les industriels mènent une politique active en matière de gestion de déchets de fin de vie de leurs produits. Le plâtre comme le papier sont recyclables.

Dans une perspective de développement durable, grâce à ses qualités, le plâtre a naturellement trouvé sa place dans tout projet en minimisant l'impact sur son environnement durant tout son cycle de vie.

Depuis quelques décennies, rapidement évolué dans le sens de la substitution de notions scientifiques à des usages traditionnels, elle est le produit d'une série de sélection opérée au cours des temps lors des multiples essais. C'est pourquoi nous avons choisi comme thème de mémoire «LA FABRICATION DE PLAQUE DE PLÂTRE A PARTIR DU GYPSE D'ANTSAKOAMARO/AMBONDROMAMY.» pour renforcer et récapituler nos connaissances dans le domaine. Cette étude a pour but de :

- Analyser une nouvelle mise en forme d'une plaque de plâtre :

Peut-on réaliser une plaque de plâtre à partir d'une poudre de gypse cuite après sa mise en forme ?

- Comparer ces qualités à celle des plaques de plâtre existantes sur le marché :

Une comparaison avec les autres mises en forme d'une plaque de plâtre sur le marché est nécessaire pour vérifier les qualités de nos produits.

- Améliorer la compétitivité commerciale de nos produits :

La forte concurrence commerciale nous pousse à étudier la rentabilité d'une future fabrication industrielle de ce type de plaque de plâtre.

Compte tenu de ces éléments, nous allons suivre le plan ci-après pour développer ce thème. Tout d'abord, une étude bibliographique dans laquelle nous allons rassembler les données nécessaires pour la compréhension de notre travail. Ensuite, nous exposerons les différentes manipulations que nous avons effectuées ainsi que les principaux résultats de nos essais dans les études expérimentales. Enfin, comme il est évident que ces caractéristiques sont recherchées par tous les commerçants, nous allons étudier l'évolution socio-économique et l'impact environnemental de nos produits dans cette dernière partie.

Après les analyses et les suggestions faites, nous terminerons par une conclusion générale.

Première partie :

« ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE. »

Chapitre I Généralité sur les gypses.

I.1. Origine.

C'est une roche sédimentaire d'origine chimique, en générale de couleur blanche ou jaunâtre. Au microscope, les cristaux présentent des formes et des couleurs variées. Elle est souvent associée à des marnes, dissoute à l'origine dans l'eau de mer : les lagunes marines sursalées se sont évaporées, déposant le gypse: c'est une roche saline.

I.2. Définition.

Etymologiquement, le gypse vient du mot gréco-latin « gypsum », qui signifie pierre à plâtre.

La molécule qui constitue le gypse est le sulfate de calcium semi-hydrate ($\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$), il réagit rapidement avec l'eau (H_2O).

I.3. Types. [1].

On a deux types de gypse :

- Le gypse naturel ;
- le gypse de synthèse.

I.3.1. Le gypse naturel.

I.3.1.1. *Albâtre.*

Variété de gypse massif à grains fins ; elle est translucide. A noter que ce terme n'est pas propre au gypse mais il s'étend aux calcaires.

I.3.1.2. *Gypse fibreux.*

Variété en couches à fibres parallèles, ou en concrétions à fibres courbés. On les trouve dans les fissures ou au contact de l'anhydrite. Elle correspond à la pierre à plâtre où provient souvent de l'évolution de l'anhydride soluble naturel.

I.3.1.3. *Gypse saccharoïde.*

Variété dont le nom dérive du latin *saccharum* ou du grec *sakkharon*, sucre, qui est un gypse en masses granulaires compactes et grossières.

I.3.1.4. Ordite.

Variété qui est en fait une pseudomorphose de gypse d'un minéral non identifié, découverte à Orda, PermskayaOblast, Oural, Russie.

I.3.1.5. Gypse macle fer de lance.

Formé de gros cristaux associés par deux. Sa structure est feuilletée, facilement clivable.

I.3.1.6. Gypse terreux.

Souvent impure, existence de calcaire, d'argile ou de silice.

I.3.2. Le gypse de synthèse.

Ce sont des sous-produits d'une réaction de fabrication industrielle ou de résultat de traitement d'effluent contenant de l'acide sulfurique (H_2SO_4).

Le gypse de synthèse ou gypse chimique provient notamment de :

- La fabrication de l'acide phosphorique (phosphogypse) ;
- La fabrication des autres acides minéraux comme l'acide citrique ;
- La fabrication d'acide fluorhydrique (fluorogypse) ;
- La fabrication d'acide borique (borogypse).
- La désulfuration de gaz (désulfogypse) ;

Il peut aussi prévenir de :

- L'industrie d'obtention de sel marin pour la neutralisation des eaux résiduelles acides ;
- la neutralisation de gaz et fumé contenant le dioxyde de soufre (SO_2) ;
- le traitement de certaines solutions salines résiduaires ; etc.

I.4. Caractéristiques.

I.4.1. Caractéristiques physiques. [2].

I.4.1.1. *Forme.*

Une forme de cristaux en grande taille, généralement aplatis ou prismatiques et allongés parallèlement.



Figure 1: Cristal prismatique.



Figure 2: Cristal aplatis

I.4.1.2. *Couleur.*

La couleur du gypse est généralement blanche, incolore ou limpide mais souvent coloré par des impuretés (oxyde de fer, dolomie, argile,...), du jaune au rouge, parfois grisâtre ou brunâtre.

I.4.1.3. *Densité.*

Le gypse est une roche tendre de densité entre 2,2 à 2,4 selon le degré d'impuretés : elle est entièrement cristallisée lorsqu'elle est suffisamment pure.

I.4.1.4. *Dureté.*

La plupart des gypses ont un indice entre 1,5 et 2 sur l'échelle de dureté Shore. Elle se laisse facilement rayer à l'ongle.

I.4.1.5. *Clivage.*

Facile, parfait.

I.4.1.6. *Eclat.*

Vitreux, nacré.

I.4.1.7. *Minéraux semblable.*

Cryolite, calcite, anhydrite.

I.4.1.8. *Magnétisme.*

Nul.

I.4.1.9. Effervescence.

Elle n'est pas effervescente avec les acides, elle n'est pas une roche calcaire.

I.4.2. Composition chimique. [3].

Voici quelques exemples de la composition en pourcentage massique du plâtre :

Composition chimique du gypse	Pourcentage massique du plâtre [%]
Eau de carrière	0,52
Eau de constitution	18,88
Chaux CaO	31,55
Sulfate SO ₃	42,85
Magnésie MgO	0,86
Carbonate CO ₂	2,33
Alumine et sesquioxyde de fer Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	0,52
Silice et autre insoluble	2,40

Tableau 1: Composition chimique en pourcentage massique du plâtre [3].

I.4.3. Composition minéralogique. [3].

Voici quelques exemples de la composition en pourcentage massique du plâtre :

Composition minéralogique du gypse	Pourcentage massique du plâtre [%]
Humidité	0,52
CaSO ₄ , 2H ₂ O	90,20
Anhydrite CaSO ₄	1,60
Calcite CaCO ₃	0,73
Dolomite CaCO ₃ , MgCO ₃	3,94
Impureté (quartz, argile, ...)	3,01

Tableau 2: Composition minéralogique en pourcentage massique du plâtre [3].

I.5. Utilisation. [4] [5] [6].

- Le gypse est essentiellement utilisé en cimenterie et en plâtrerie ;
 - Cimenterie.

Le gypse est ajouté au clinker de 3 à 4 [%] en poids. Son rôle consiste à différer et régulariser la prise du ciment.

- Plâtrerie.

Le gypse perd son eau, se déshydrate : Sous l'action de la chaleur, il se transforme en plâtre (le gypse est la roche qui permet de fabriquer industriellement le plâtre). Les 3/4 de l'eau que renferme le gypse ne sont que faiblement combinés, et les produits obtenus vont varier en fonction de :

- la température de cuisson,
 - la durée de la cuisson,
 - le degré hygrométrique de l'air ambiant et de la pression.
- le gypse a servi d'amendement des sols : le gypse apporte les ions calcium et le sulfate nécessaires à la croissance des plantes, en étant l'augmentation du pH comme dans le cas de l'apport de chaux ;
- le gypse entre dans la composition de charge pour les peintures, les colles, les papeteries et les verreries ;
- dans l'industrie alimentaire, le gypse est utilisé pour la purification des eaux de brasserie. Il est aussi utilisé pour réduire la teneur en tarte et contrôler la clarté des vins, et enfin, il est utilisé comme support de nourriture pour les poissons.

Chapitre II Présentation des gisements de gypse.

II.1. Formation géologique de gisement de gypse d'Antsakoamaro.

II.1.1. Bassin sédimentaire.

La formation d'un bassin sédimentaire peut s'expliquer par la dépression à fond peu accidenté, largement évasé, à flancs en pente douce, de dimension très variable, qui a été un lieu de sédimentation.

II.1.2. Formation géologique.

Dans les marnes jurassiques d'Antsakoamaro, le gypse se forme en grande masse clivable, incolore et limpide. La présence de gypse est intercalée par de bélemnites et de septaria.

II.1.2.1. Bélemnite.

Une bélemnite est un mollusque céphalopode à la coquille fuselée. Les bélemnites ont vécu du Jurassique inférieur jusqu'à la fin du Crétacé. Ce sont les Céphalopodes fossiles les mieux connus après les Ammonites. Leur longueur varie de 1 [cm] à 1 [m]

II.1.2.2. Septaria.

Les nodules à septaria sont des structures généralement calcaires que l'on rencontre dans des marnes couches argileuses. Ce sont des nodules qui se sont d'abord formés, dans un milieu réducteur, autour d'un noyau de matières organiques (débris végétaux ou animaux) venus s'échouer sur la vase fine d'un fond marin.

II.2. Descriptions.

II.2.1. Réserve. [5].

Pour la situation géographique de Madagascar, il existe de nombreux sites d'exploitation, connus ou non ; Madagascar compte beaucoup de gisement de gypse. Ils sont en général de type banc de gypse. Il se peut qu'il existe des gypses en forme de lamelles qui s'éparpillent. L'estimation de la réserve est de l'ordre de cent million de tonne. Tout au long du versant de Nord-Ouest et dans le moyen Ouest de l'Ile, Ambondromamy et Mampikomy ; mais surtout dans la région de Toliary.

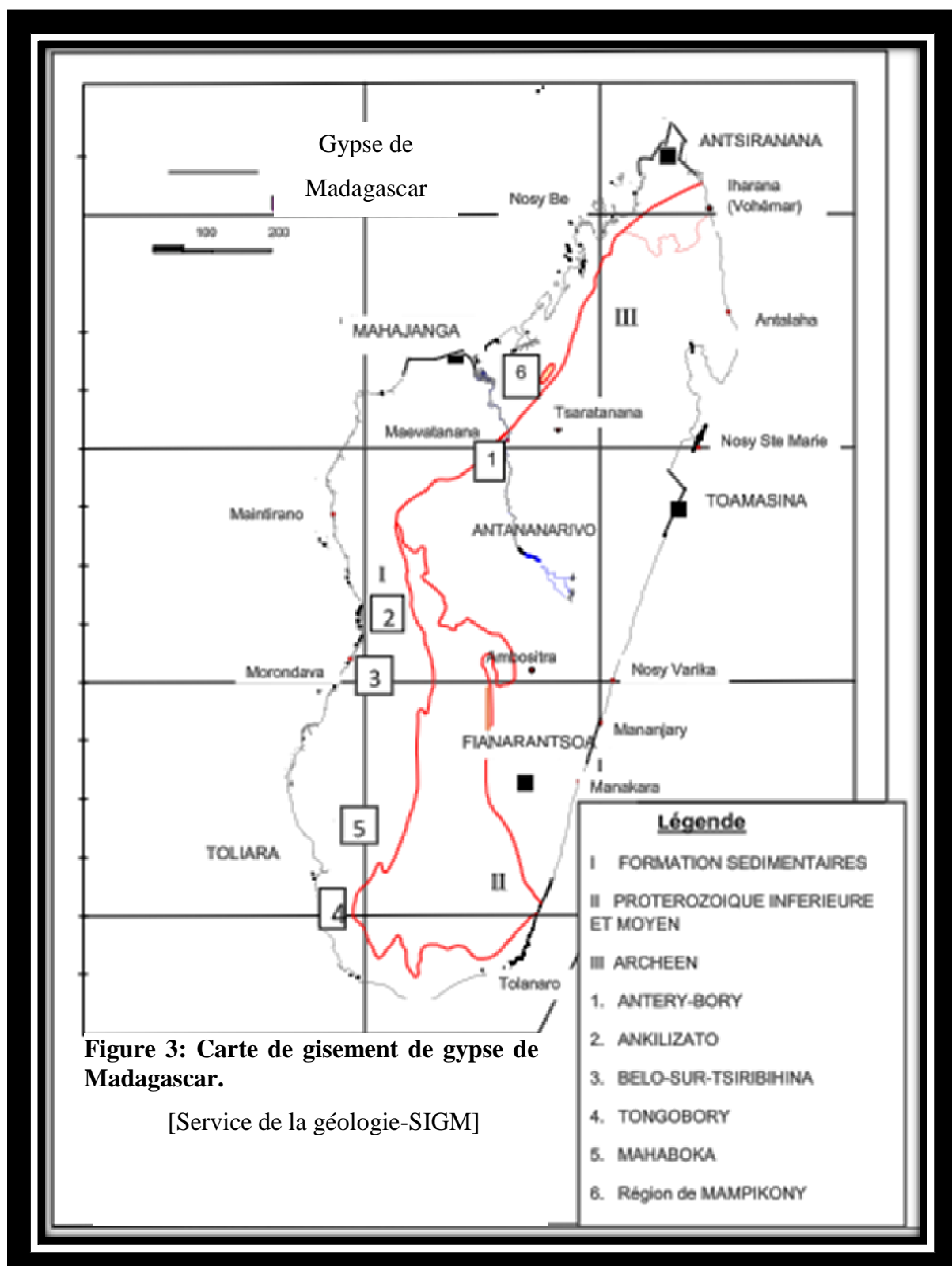


Figure 3: Carte de gisement de gypse de Madagascar.

[Service de la géologie-SIGM]

II.2.2. Variétés de gisement de gypse existant.

Le gisement de gypse à Madagascar est en générale de type banc de gypse où il se présente dans la nature sous forme de couche de gypse où la première couche se trouve sous le sol stérile puis les autres sont intercalées par des fronts de taille.

II.2.3. Gisement de gypse à Antsakoamaro.

Notre gypse provient du gisement d'Antsakoamaro.

II.2.3.1. Situation géographique.

Antsakoamaro se situe à 17 [Km] d'Ambondromamy, sur la RN6 menant à Antsiranana. Le site est facilement accessible en période sèche ce qui n'est pas le cas en période de pluie.

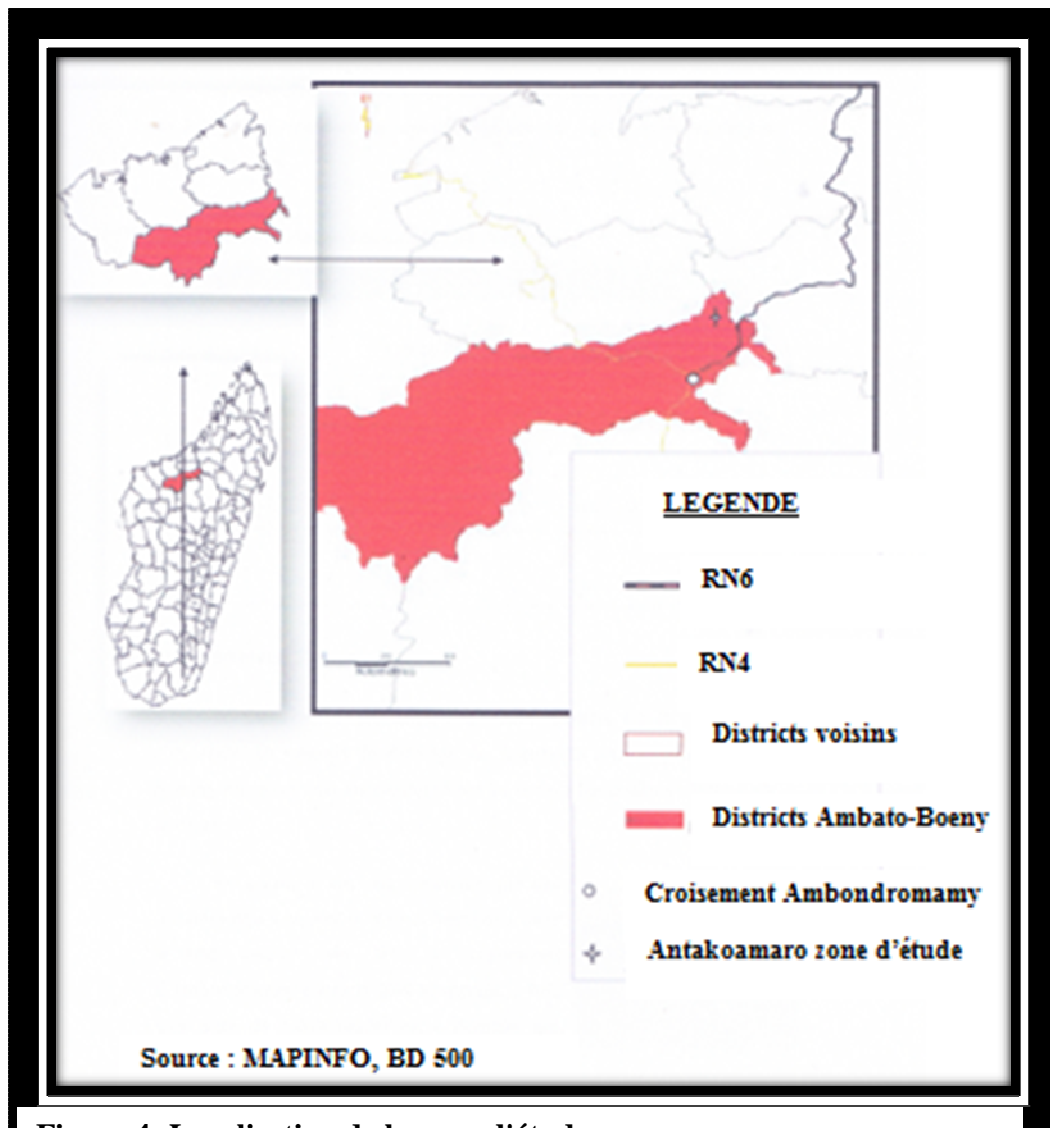


Figure 4: Localisation de la zone d'étude.

II.2.3.2. Exploitation. [5].

L'exploitation des gypses dans le gisement d'Antsakoamaro est à ciel ouvert. La méthode d'exploitation est semi – artisanale.

Le gypse peut se trouver sous le sol stérile, environ 1[m] d'épaisseur. Il faut donc enlever la couche du sol stérile pour atteindre la première couche de gypse. Pour la deuxième, la troisième et les autres couches existantes, elles peuvent avoir de 10 à 20[m] de profondeur puisqu'elles se trouvent généralement dans une structure stratigraphique dont il y a des répétitions des couches.

L'exploitation peut s'expliquer comme suit :

a. Travaux de découverte.

Ces travaux comportent le défrichement et le décapage. Ils consistent à enlever la terre végétale et la végétation encombrante : arbres, arbustes par une pelle hydraulique.

b. Travaux d'extraction.

Les travaux d'extraction ou d'abattage se font avec une pelle ; trier ensuite séparer par un crible et quelque fois manuellement.

c. Remblayage.

Le remblayage est, en général, utilisé pour l'aménagement du site excavé. Elle consiste à limiter au minimum les mouvements des terres durant le déblayage d'un terrain c'est-à-dire à éviter de les transporter sur un long trajet.

Chapitre III Fabrication du plâtre.

Le plâtre, il est connu depuis la plus haute Antiquité, c'est un matériau de construction Ignifuge, il est utilisé sous forme de pâte constituée d'un mélange de poudre et d'eau, ou préparé sous forme de plaque.

III.1. Définition.

La pierre est généralement extraite de son origine puis elle passe en cuisson. A la sortie du four, les divers produits obtenus par son cuisson, les semi-hydrates et les surcuits se présentent sous forme d'une poudre blanche non caustique et se collant aux doigts que l'on appelle « le plâtre ».

La molécule qui constitue la poudre de plâtre est le sulfate de calcium semi-hydrate ($\text{CaSO}_4, 1/2\text{H}_2\text{O}$), il réagit rapidement avec l'eau (H_2O). C'est un liant hydraulique renfermant 21 [%] de son poids d'eau combinée.

III.2. Processus d'obtention des plâtres.

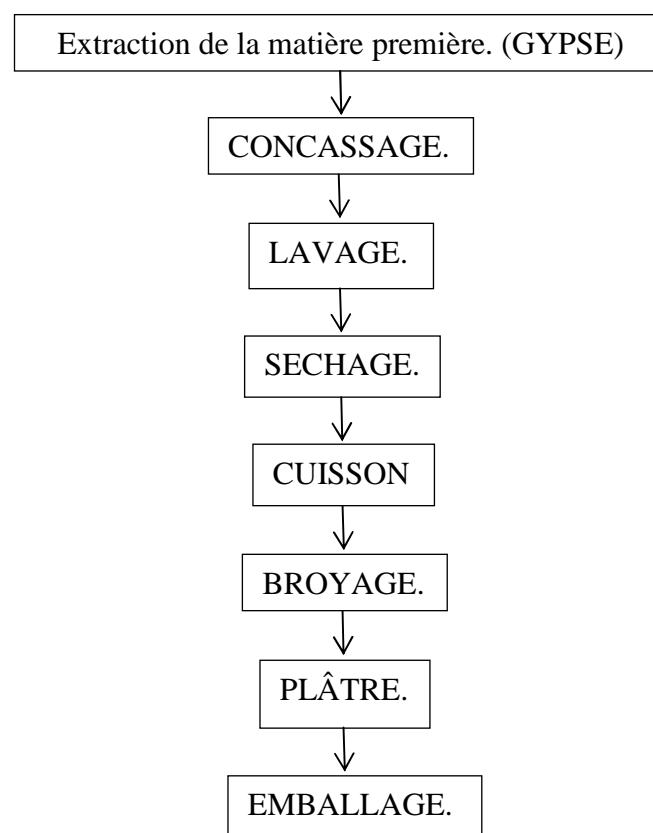


Figure 5: Processus de fabrication du plâtre.

III.2.1. Extraction de la matière première. [3] [7] [8] [9] [10] [11].

Le gypse est extrait du sol dans des carrières à ciel ouvert ou des carrières souterraines.

III.2.1.1. Extraction du gypse à ciel ouvert.

Le gypse est extrait en décapant dans un premier temps les couches de terre en surface. Cette méthode est celle qui permet d'extraire le gypse avec un minimum de perte mais n'est pas pratiquée que si la première couche n'est pas trop profonde.

III.2.1.2. Extraction souterraine.

Lorsque l'épaisseur des terres de recouvrement est importante (supérieure à 5 fois l'épaisseur de gypse) ou que la couche de gypse se trouve sous un site classé ou protégé, l'extraction se fait en galeries souterraines par méthode des chambres et piliers abandonnés.

III.2.2. Concassage.

Le gypse est concassé à l'aide d'un concasseur afin de réduire la dimension de ses grains à un diamètre inférieur à 40 [mm].

III.2.3. Lavage.

Après le concassage le gypse est lavé soigneusement par l'eau traitée par le JIRAMA pour éliminer les impuretés qui l'accompagnent.

III.2.4. Séchage.

Avant de l'introduire dans le four, le gypse passe dans un séchoir constitué par un cylindre rotatif qui débite 60 [T/h] de gypse (ou séché pendant 2 heures et plus à l'air libre ou dans une étuve à 30 [°C]).

III.2.5. Cuisson.

III.2.5.1. Méthode de cuisson.

a. Méthode artisanale.

Pour la méthode artisanale, la cuisson se fait directement et par voie sèche c'est-à-dire les combustibles et les pierres à plâtres sont en contact direct ou en absence des adjuvants ; elle se fait sous pression atmosphérique ou sous faible pression partielle de vapeur d'eau.

b. Méthode industrielle.

Dans cette méthode, la cuisson peut se faire directement ou indirectement, par voie sèche ou par voie humide c'est-à-dire la cuisson est indirecte si les gypses et les combustibles ne sont pas en contact direct, et la cuisson est par voie humide si la déshydratation du gypse se fait en présence d'autres additifs (solution saline concentré).

*III.2.5.2. Types de fours suivant les méthodes de cuisson.***a. Méthode artisanale.**

De nombreux types de fours sont utilisés pour ce mode de fabrication dont voici quelques exemples.

➤ Fours culés :

C'est le plus ancien, il est formé de trois murs d'équerre, où les blocs sont entassés au-dessus d'un foyer grossier chauffé au bois ou coke, durant un temps variant de 3 à 5 jours. La cuisson est irrégulière et les blocs sont envoyés aux broyeurs c'est-à-dire les produits obtenus sont irréguliers donc de résistance médiocre.

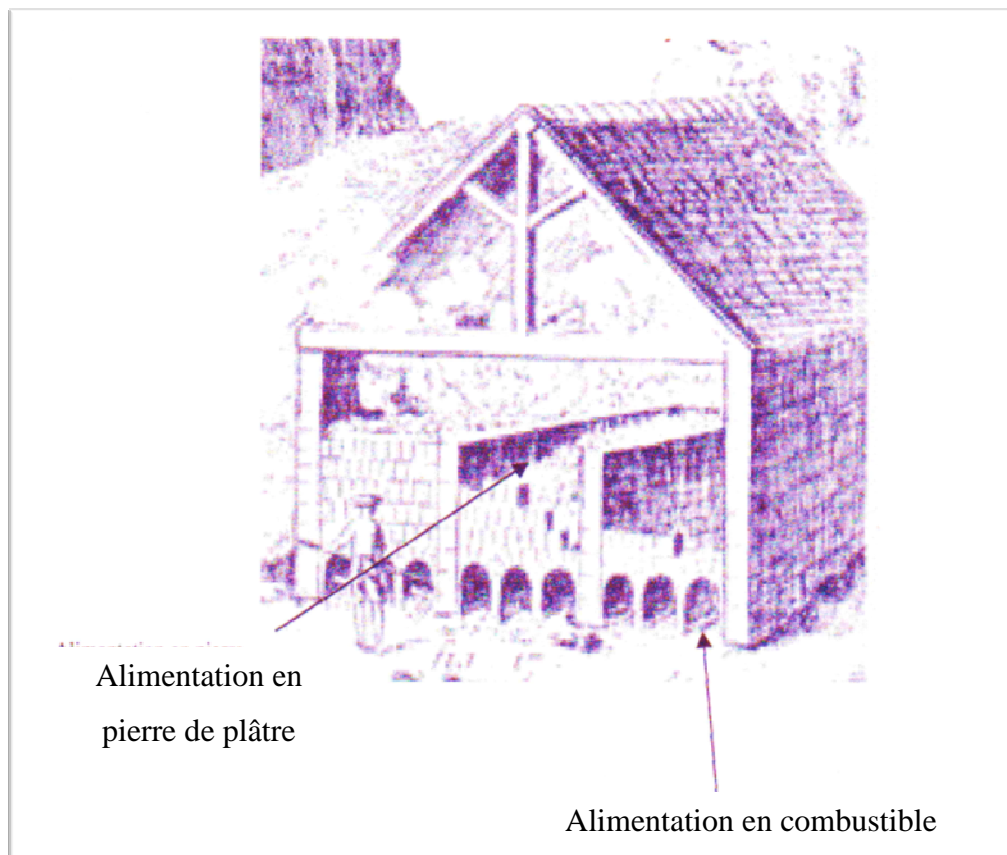


Figure 6: Four culés.

➤ Fours verticaux (analogues aux fours à chaux).

De dimension, 2[m] de diamètre et de 2 [m] de hauteur, une voûte est construite en bas du four pour l'alimentation du combustible (en générale le bois). Le four est alimenté en gypse de telle façon que les gypses de grande taille sont en bas et ceux de petite taille sont en haut.

L'inconvénient c'est que la cendre reste dans le produit.

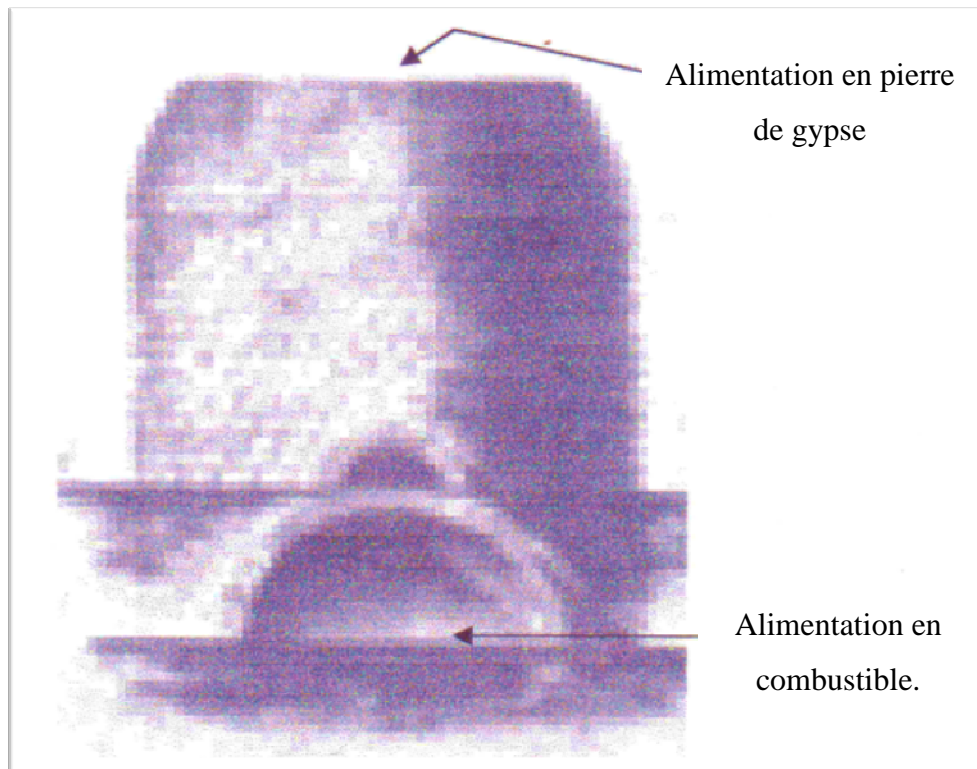


Figure 7: Four verticaux.

➤ Fours boulanger.

Les braises et les cendres retirées sont remplacées par du gypse en couche de 10 à 40 [cm]. La cuisson est irrégulière et nécessite beaucoup de main d'œuvre. Le processus dure 24 heures : 9 heures de chauffage et 15 heures de cuisson.

b. Méthode industrielle.

Pour ce mode de fabrication, le four utilisé dépend du type de plâtre qu'on veut obtenir.

Plusieurs types de fours existent aussi dans ce mode de fabrication du plâtre et nous allons citer quelques-uns.

- Pour le chauffage direct.

Les fours à cylindres rotatifs à contre-courant ou co-courant : Ils ressemblent aux fours utilisés dans la fabrication du ciment, mais ils sont moins longs (20 [m] de long et 1,50 [m] de diamètre) et l'opération a lieu en atmosphère sèche. Les gaz chauds assurent la cuisson par contact direct avec la pierre. Le combustible est le fuel, ou le gaz. La cuisson est très régulière et contrôlée (canne pyrométrique en relation avec un galvanomètre enregistreur), elle a lieu entre 130 et 160 [°C].

Ce type de four est caractérisé par une cuisson continue.

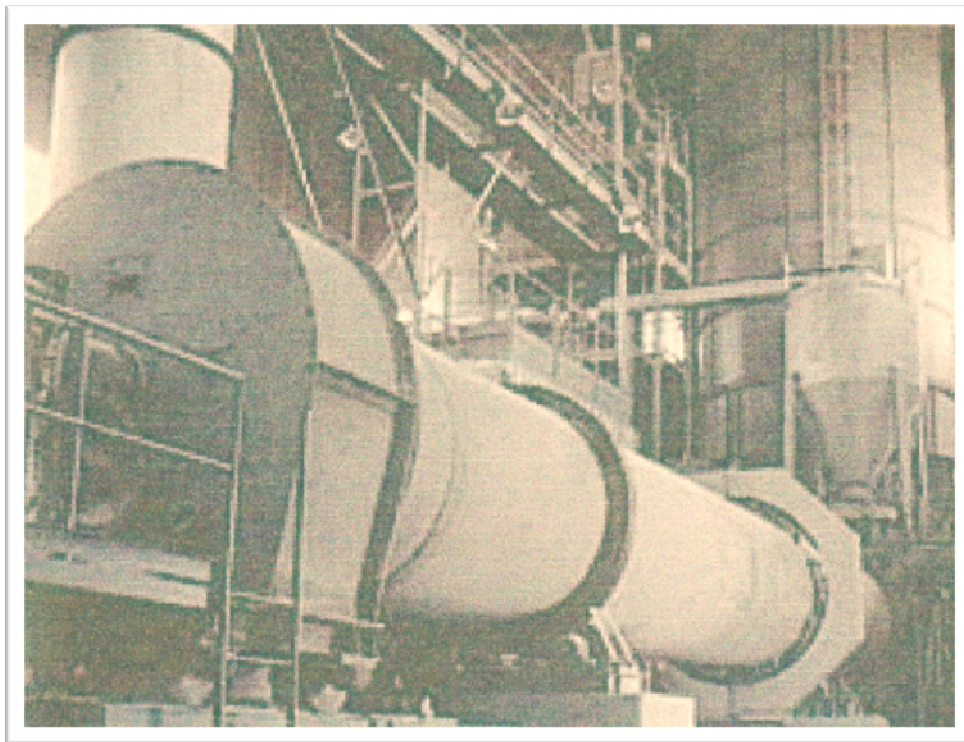


Figure 8: Four à cylindre rotatif.

- Pour le chauffage indirect.

- *Four cyclone.*

Ce type de four est caractérisé par son fonctionnement continu et automatique, et sa consommation d'énergie est faible.



Figure 9: Four cyclone.

○ *L'autoclave.*

L'autoclave ressemble à une grosse cocote minute, elle peut être verticale ou horizontale ; les calories sont apportées directement ou indirectement, la cuisson se fait sous pression de 2 à 7 bars. L'autoclave fonctionne de façon discontinue.

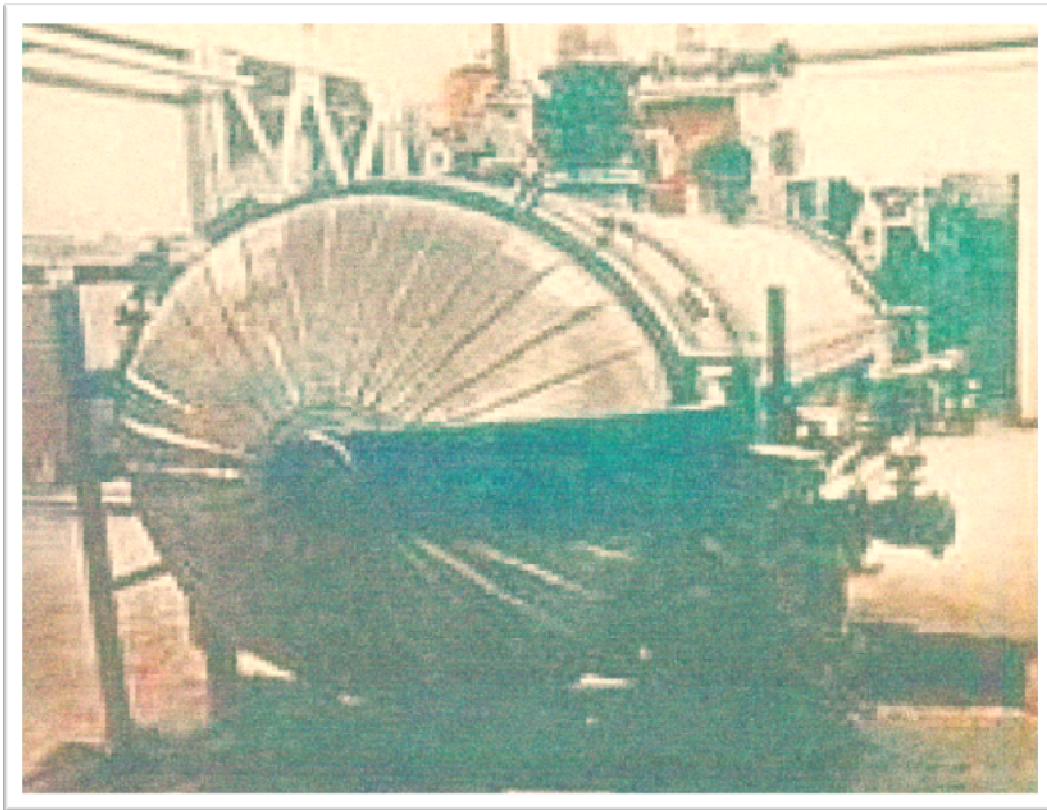


Figure 10: Autoclave.

III.2.5.3. Type de plâtre suivant la température de cuisson. [7]

La cuisson permet d'obtenir une déshydratation plus ou moins poussée du gypse, elles varient selon la variation de la température de cuisson de la pierre à plâtre et le produit de base désiré.

a. A une température supérieure à 100 [°C].

A cette condition de température. La cuisson s'effectue soit en autoclave sous pression (2 à 12 atmosphère) soit dans une solution saline concentrée. Ce procédé est utilisé pour obtenir le semi-hydrate de variété α (à prise lente), qui est compact ($d = 2,76$), cristallin, faiblement soluble dans l'eau avec laquelle il donne des produits fluides.

b. A des températures variées entre 110 et 180 [°C].

Grâce à cette condition de température, elle permet d'obtenir le semi-hydrate de variété β (à prise rapide). Il est composé de 94 [%] de CaSO_4 et 6 [%] H_2O de cristallisation.

c. A partir de 180 [°C] ou $180 < T < 250$ [°C].

On obtient de l'anhydrite soluble CaSO_4III (très avide d'eau donc instable), ce produit est considéré comme étape intermédiaire dans la transformation des hémi-hydrates en anhydre II.

d. A des températures variées entre 400 et 600 [°C].

Le surcuit ou anhydrite insoluble CaSO_4II (encore capable de faire prise en se combinant à l'eau "plâtre hydraulique") il est produit industriellement à ces températures.

e. Entre 600 et 900 [°C].

Le gypse est cuit à mort c'est-à-dire on obtient un produit inerte incapable de faire prise.

f. Au-delà de 1 100 [°C].

On obtient l'anhydrite soluble CaSO_4II (à prise très lente, environs 15 jours et plus) ou il est connu sous le nom "d'Estrichgyps" (le plâtre Allemand à plancher).

g. Au-delà de 1 350 [°C].

L'anhydrite fond et se dissocie en chaux vive CaO et SO_3 .

Le processus de déshydratation du gypse se présente comme suit :

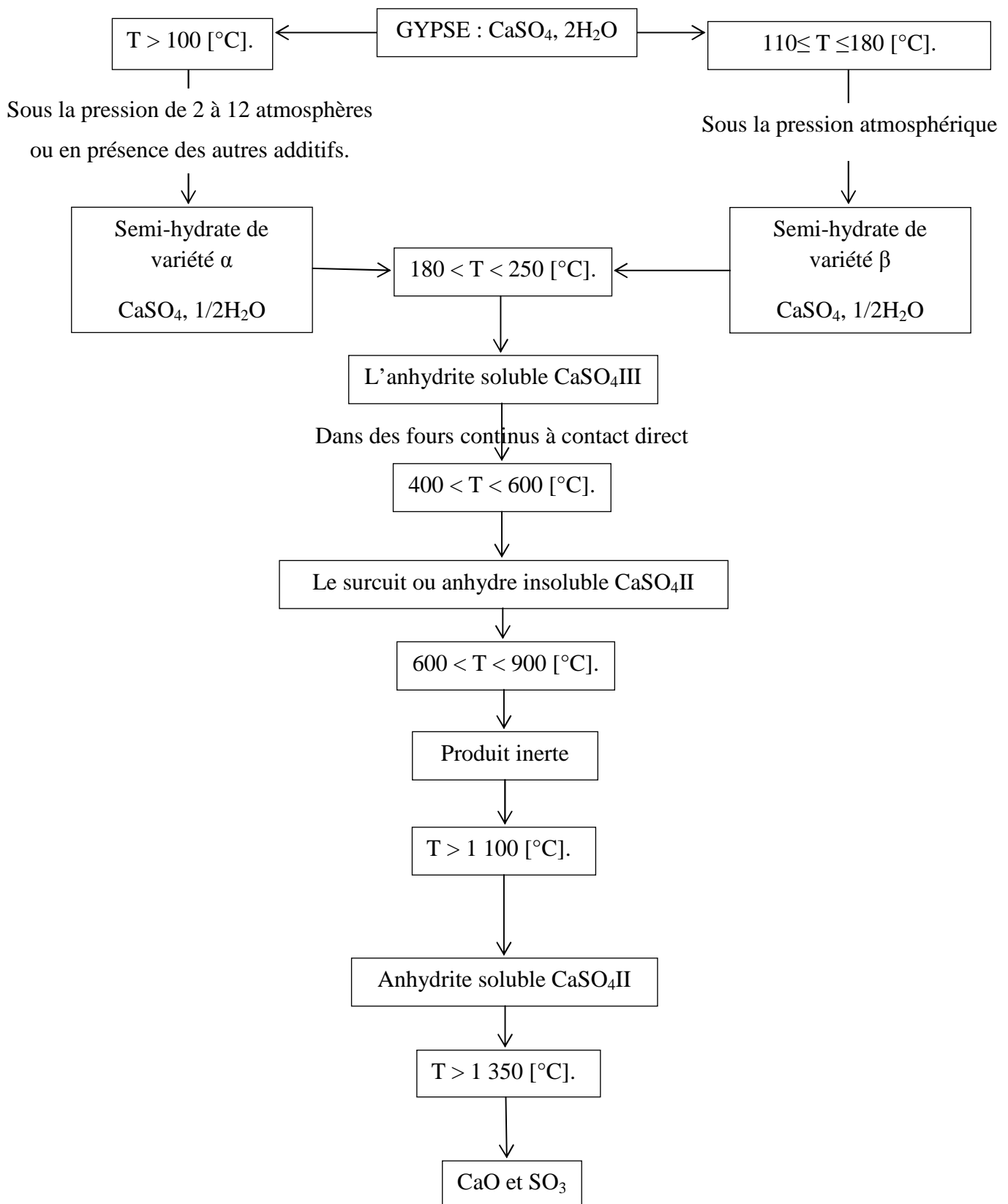


Figure 11: Processus de déshydrations de gypse [nos enquêtes].

*III.2.5.4. Type de plâtre suivant leurs variétés et mélanges.***a. Les plâtres ordinaires ou plâtres de construction.**

Les plâtres de construction qui nous intéressent plus particulièrement sont moins finement moulus et moins purs (cendres, calcaire, gypse, etc.)

Le plâtre de construction est constitué de semi-hydrate $\text{CaSO}_4, 1/2 \text{H}_2\text{O}$ et de surcuit (environ 30[%]).

On distingue parmi les plâtres de construction.

➤ Les plâtres fins :

Le plâtre fin qui compte en moyen 15 [%] de résidu sur le tamis de 324 mailles au centimètre carré (360 microns de côté intérieur de maille) ; ce plâtre est donc nettement moins fin que le ciment et le plâtre à mouler.

➤ Les plâtres gros :

Ce type de plâtre est un peu moins fin que le précédent (30 [%] de résidu en moyen au tamis de 324 mailles)

➤ Les plâtres à carreau :

Le Caroplatre est un carreau de plâtre, selon la norme EN.12.859 : 2001 ; 35 % de résidu sur le tamis de 324 mailles.

b. Les plâtres spéciaux.

Ils sont essentiellement formés d'hémi-hydrate finement broyé.

➤ Le plâtre à mouler :

Produit très blanc, très fin et presque exclusivement constitué par de l'hémi-hydrate.

➤ Le plâtre aluné :

Il est préparé à partir du plâtre très régulier, trempé dans un bain d'eau chaude refermant 10 à 15 [%] d'alun de potasse en dissolution. Après égouttage et séchage, le mélange est recuit à une température supérieure à 50 [°C] puis broyé après refroidissement.

➤ Les stucs :

C'est un mélange de plâtre ordinaire, plâtre à mouler et poussière de pierre jouant le rôle de pigment, gâché avec de l'eau où l'on a dissout à chaud de la gélatine (ou de la caséine) ou de la colle forte de Flandre qui retardent la prise. Cela permet de gâcher un pâte plastique

moins d'eau. On peut aussi adjoindre des oxydes métalliques au moment gâchage, et obtenir, si le mélange n'est pas homogène, veines colorées comparables à celles du marbre.

Le stuc acquiert une grande dureté, il peut être poli d'un mois pour imiter le marbre

➤ Le staff :

C'est un plâtre armé par des fibres ou filasses de chanvre, gâché à la colle d'amidon puis collé dans les moules en bois ou métalliques, préalablement enduits de gélatine.

c. Plâtres composites divers. [12].

➤ Le plâtre hydraulique :

Le plâtre hydraulique est une sorte de ciment sursulfaté à la chaux 6 [%] + 20 [%] de gypse, + 74[%] de laitier granulé broyé (ou 37 [%] seulement + 37 [%] de cendres volantes).

➤ Le plâtre à la chaux éteinte non éventée, c'est-à-dire fraîchement éteinte :

Ce produit donne des enduits résistants si le mélange est bien homogène. De teneur en chaux entre 10 à 15[%].

Il s'applique par couches successives de plus en plus fines. Lorsqu'on incorpore du sable au mélange, on peut réaliser l'enduit en une seule couche.

III.2.6. Broyage.

Après cuisson et refroidissement, le plâtre doit être broyé et tamisé pour obtenir une poudre très fine.

III.2.7. Elaboration des produits finis. [13].

Cette phase comporte divers opération à savoir :

III.2.7.1. Stockage des produits de base de silo.

Qui a pour but de refroidir, de stabiliser et d'homogénéiser le plâtre venant du four.

III.2.7.2. Blutage.

Les grains sont à nouveau broyés et tamisés pour donner au plâtre son aspect de mouture ou de blutage.

III.2.7.3. Ensachage.

Le plâtre est alors commercialisé en sac. Son ensachage est entièrement automatisé en usine.

III.2.7.4. Stockage en usine.

Le plâtre est stocké pendant une quinzaine de jours pour avoir le temps de se stabiliser, ce qui améliore sa qualité.

III.3. Propriétés. [7] [8] [10] [11] [14] [15] [16] [17].**III.3.1. Propriétés principales.***III.3.3.1. Plâtre gros.*

- Le refus au tamis de 800 μ varie entre 5 et 20[%] ;
- Eau de gâchage : 75 à 100[%] ;
- Temps de prise : 8 à 25 [mn] ;
- Consommation : 8[Kg/m²].

III.3.3.2. Plâtre fin.

- Le refus au tamis de 800 μ < 1[%], et le refus à 200 = 25[%] ;
- Eau de gâchage : 40 à 100[%] ;
- Temps de prise : 30 à 60 [mn] ;
- Consommation : 8 à 12 [Kg/m²].

III.3.2. Résistance au feu (Ignifuge).

Par définition « la résistance au feu » indique le temps durant lequel, lors d'un feu, un élément de construction (paroi, plafond, planché, porte, etc.) conserve ses propriétés physiques et mécaniques.

Pour le plâtre, c'est un matériau incombustible de classe M0 sous la norme NF.P. 92.507. Lors d'un incendie, la plâtre (le gypse) libère 18 à 20[%] de son eau de constitution c'est-à-dire elle absorbe ainsi la chaleur et retarde la montée en température. La face non exposée reste inférieure à $T = 140[^\circ\text{C}]$ prévue par la réglementation prévoyant de la classification « coupe-feu » ; ex : une porte métallique non revêtue ne présente aucune résistance au feu ; revêtue de 2 [cm] d'un enduit de plâtre, elle résiste 1h30 mn au feu.

III.3.3. Conductivité thermique.

En générale, la conductivité thermique c'est un indicatif pour voir dans quelle mesure les matériaux sélectionnés transmet la chaleur ; cette conductivité s'exprime la quantité de chaleur transmet en 1[s], 1[m] de matériau homogène pour un écart de température de 1[°C] entre les deux faces ; plus la valeur est petite plus le matériau est isolant. Elle est caractérisée par le coefficient lambda λ [$W/m^{\circ}C$] ou [W/mK].

[W] : l'unité de puissance ;

[m] : l'unité de longueur (épaisseur/surface : $[m/m^2] = [m^{-1}]$) ;

[°C ou K] : l'unité de la température.

Par exemple :

La conductivité thermique du plâtre peut varier de 0,18 à 0,58 [$W/m^{\circ}K$] et celui du mortier de chaux est de 0,85 [$W/m^{\circ}K$] donc le plâtre conduit beaucoup moins bien que le mortier de chaux.

Voici quelques valeurs pour λ en $[W/m^{\circ}K]$.

Matériaux	conductivité thermique λ $[W/m^{\circ}K]$ valeur pour une température de 20[°C]
Adobe (terre crue)	0,32
Brique (terre cuite)	0,84
Terre (sèche)	0,75
Mortier de chaux	0,87
Carton	0,07
Mousse du polyuréthane rigide	0,025
Polystyrène expansé	0,036
Bois de chêne	0,16
Bois de noyer	0,14
Bois de pin (parallèle aux fibres)	0,36
Bois de pin (perpendiculaire aux fibres)	0,15
Contreplaqué	0,11
Plâtre (En fonction de sa masse volumique qui peut varier de 600 – 1 500 $[Kg/m^3]$)	0,18 - 0,56

Tableau 3: Valeur de la conductivité thermique de quelques matériaux à 20[°C]. [14].

III.3.4. Isolation du bâti (la résistance thermique).

Pour le plâtre c'est un mauvais conducteur de la chaleur, donc c'est un bon isolant thermique. Cette propriété est due à la structure poreuse du plâtre, qui résulte du départ de l'eau lors du séchage. L'isolant thermique est caractérisée par le coefficient de « la conductivité thermique » $\lambda = 0,35[\text{W/m.K}]$ pour le plâtre en moyenne.

La résistance thermique est bien c'est l'inverse, sa exprime tout simplement la qualité isolant d'une paroi. Elle est représenté par le coefficient R et se coefficient se calcul comme suit :

$$R = \frac{\text{épaisseur du matériau}}{\text{conductivité thermique de ce matériau}}$$

III.3.5. Performance acoustique.

Le plâtre peut contribuer une grande performance acoustique.

Elles sont obtenue grâce :

- Au procédé d'assemblage multi couche ;
- à la continuité que les enduits portent aux éléments sur lesquels ils sont appliqués ;

De ces conditions, entraine une dissipation de l'énergie acoustique avec amortissement de la vibration sonore.

III.3.6. Propriétés physiques et chimiques.

Le plâtre est cinq fois plus soluble dans l'eau salée à 60 [g/L] que dans l'eau douce (maximum de solubilité dans les eaux saumâtres, deux fois plus salées que l'eau de mer).

On ne peut pas armer le plâtre comme le ciment, mais on le fait parfois en utilisant des armatures étamées à l'étain.

De même, on ne peut clouter le plâtre qu'avec des clous de cuivre ou, à la rigueur, de fer étamé.

(On peut aussi se servir d'armatures ou de clous galvanisés, mais au moyen de zinc).

Il faut en effet observer que le zinc impur est attaqué par le plâtre, et en particulier le zinc contenant du plomb, ce qui arrive fréquemment (de 1 à 2[%] en poids de zinc).

Les corrosions du fer et du zinc de nature électrochimique.

Le zinc pur (zinc électrolytique) n'est pas attaqué par le plâtre.

Le plâtre adhère mal au bois et aux agrégats lisses.

Le plâtre est un matériau poreux. Il est éventable et perméable à la vapeur d'eau. Humide, le plâtre favorise l'apparition de moisissures ; ce qui accélère sa dégradation.

III.3.7. Propriété d'expansion.

L'hydratation du plâtre est accompagnée d'une expansion de l'ordre de 0,3 à 1,5 suivant les plâtres, suivie d'un léger retrait dû à l'évaluation de l'eau ($1/10^e$ du gonflement). Cette propriété d'expansion rend le plâtre particulièrement apte aux moulages, le plâtre pénètre en force dans tous les creux du moule.

III.3.8. Prise et durcissement.

III.3.8.1. Phénomène de la prise.

Lorsque l'on gâche le plâtre avec de l'eau, il s'y combine pour revenir au dihydrate originel par une réaction rapide s'accompagnant d'une forte élévation de température et d'une légère augmentation de volume ; c'est le phénomène de prise.

D'après Le Chatelier, le phénomène de prise se déroule comme suit:

- Le plâtre se dissout jusqu'à saturation ;
- le plâtre s'hydrate au sein d'une solution sursaturée en provoquant la précipitation de microcristaux assemblés en macles : les fines aiguilles enchevêtrées forment une masse solide par évaporation de l'eau en excès.

Mélangé à l'eau, le plâtre se transforme en hydrate à 2 molécules d'eau ($\text{SO}_4\text{Ca} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), par réaction inverse de sa fabrication ; il y a dégagement de chaleur et légère expansion (1 % du volume gâché) ; par durcissement et séchage, le plâtre ayant fait prise subit un léger retrait, sans toutefois effacer l'expansion lors de la prise.

III.3.8.2. Durcissement.

La quantité d'eau de gâchage du plâtre n'agit pas seulement sur la rapidité de prise et de durcissement ainsi que la compacité du produit, mais comme pour les plâtres de ciment, son action est très sensible sur les résistances mécaniques.

Le durcissement est progressif et la résistance continue à croître entre 2 heures et 4 jours après le gâchage.

Durée [jours]	Traction [MPa]	Compression [MPa]
1	4	5
2	7	12
4	8	28

Tableau 4: Variation de la résistance mécanique en fonction du temps. [8].

La durée du plâtre varie d'environ 55 à 80 sur l'échelle de durée Shore. Elle dépend de la proportion d'eau utilisée lors du gâchage.

*III.3.9. L'eau de gâchage. [7] [12].**III.3.9.1. Convenance.*

Pour convenir à la confection d'un produit à base de plâtre, les eaux ne doivent convertir ni composées risquant d'attaquer chimiquement le plâtre, ni des particules en suspension dont la qualité pourrait modifier ses qualités originelles.

Dans la catégorie des eaux susceptibles de convenir à la confection d'un produit à base de plâtre, on trouve :

- Les eaux potables (qui bien évidemment conviennent) ;
- Les eaux de recyclage provenant du lavage d'une pierre à plâtre à condition de vérifier leur aptitude, il est possible de les utiliser après passage des bassins de décantation ;
- Les eaux de pluie et de ruissellement, les eaux pompées.

A côté, les catégories d'eaux ne devant pas être utilisées comprennent :

- Les eaux usées ;
- Les eaux vannes ou contenant des détergents ;
- Les eaux industrielles susceptibles de contenir des rejets organiques ou chimiques.

Ces différentes eaux doivent obligatoirement subir des analyses concluant à leur non nocivité avant emploi.

III.3.9.2. Influence.

Le gâchage est une opération qui consiste à mélanger soigneusement le plâtre à l'eau jusqu'à obtenir une substance consistante, crémeuse et douce.

L'eau de gâchage a une influence très sensible sur la rapidité de prise et sur le durcissement et la résistance.

La rapidité de prise est d'autant plus grande que la qualité d'eau se rapproche d'avantage de la quantité nécessaire à l'hydratation seule, et aussi que le moteur est fine.

La qualité d'eau strictement nécessaire pour hydrater le plâtre SO_4Ca , $1/2 \text{ H}_2\text{O}$ représente théoriquement 25 [%] de son poids, soit 26,5[%] du poids du sel anhydre.

En effet, 172 [g] de gypse cristallisé $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ correspondent à 136 [g] de sel anhydre CaSO_4 et 145 [g] d'hémi hydrate $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$.

La qualité d'eau nécessaire strictement à la prise varie toutefois un peu, tout un restant de l'ordre de 25[%], en raison des impuretés (calcaire), des incuits (gypse) et des surcuits (anhydrite soluble et parfois plâtre mort).

En emploi couramment 75[%] d'eau pour les plâtre fins et 65[%] pour les plâtres gros.

Il faut s'efforcer de ne jamais dépasser 85[%] d'eau, et mieux, si possible, 80 [%].

Selon le pourcentage adopté, on dit que le plâtre est gâché clair ou qu'il est gâché serré.

Le plâtre aluné, à prise nettement plus lente, se gâche avec 35[%] d'eau seulement, en moyenne, ce qui est une des causes essentielles de sa qualité.

Le plâtre gâché avec beaucoup d'eau est forcément poreux, donc hygroscopique, perméable et assez peu résistant mécaniquement.

III.4. Utilisations. [9].

- Dans le domaine du bâtiment :
 - Enduits.

Les plâtres fin pour les plafonds.

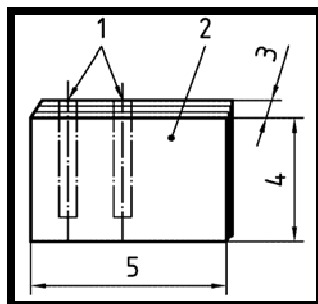
Les plâtres gros pour les murs et cloisons.

- Le Caroplastre ou carreau de plâtre.

Selon la norme EN.12.859 : Le plâtre à carreau pour la confection du carreau de plâtre de dimensions 66× 50 [cm] et d'épaisseur 5,7 ou 10 [cm].

Hydrofuge pour résister à l'humidité (pièces humide : cuisine, salle de bains, buanderie,...). Ils ne sont pas destinés à réaliser des plafonds.

Légende :



1. Cavité préformées.
2. Face.
3. Epaisseur.
4. Hauteur.
5. Longueur.

Figure 12: Carreau de plâtre.

- Plaque de plâtre.
- Le plâtre à plancher.
- Béton de plâtre...

- Dans le domaine de la médecine :
 - Appareils dentaires.
 - Bande à plâtre...
- Dans le secteur de l'industrie céramique :
 - Fabrication de moule de coulage.
 - Calibrage dans les industries de porcelaine.
 - Art (maquettes statuaire)...
- Dans le domaine de l'éducation :
 - Craies...

Intérêt sur le plâtre.

- Avantage :
 - Permet des applications de rénovation ;
 - protection contre les incendies ;
 - produit léger et relativement bon marché.
- Inconvénients :
 - Est sujet aux moisissures, notamment dans des conditions favorisant la condensation (on doit les conserver dans un endroit sec ou il devient inutilisable);
 - produit beaucoup de poussières lors de sa manipulation et/ou lors de travaux ultérieurs (comme lorsqu'on souhaite forer un trou dans un mur de plâtre) ;
 - le plâtre s'effrite facilement.

Chapitre IV Fabrication des plaques de plâtre.

Si l'utilisation du plâtre dans la construction n'est pas nouvelle, c'est en 1894 aux Etats Unis qu'est inventé le concept de la plaque de plâtre (plasterboard).

La technique de la plaque de plâtre est apportée en France à la fin de la seconde guerre mondiale par la société Placoplatre (filiale du Groupe Saint Gobain) et a créé les sociétés Plâtre Lambert, SAMC, Plâtrières de Crozon et Garandeau.

IV.1. Définitions.

IV.1.1. Plaque de plâtre.

La « **plaques de plâtre** » est un matériau de construction industrialisée couramment utilisé pour la finition des murs et des plafonds intérieurs. Elle est constituée de plâtre moulé entre deux couches de carton qui est à la fois son parement et son armature. Ces caractéristiques sont définies par la norme NF 72-302.

IV.1.2. Les cartons.[18]

Les cartons sont des matériaux légers et rigides de même origine que le papier ordinaire, qui s'éloignent cependant des caractéristiques et usages de ce dernier selon sa composition, épaisseur et structure. Du point de vue du grammage, le passage du papier au carton se fait à 224 [g/m²] et 175 [μm] d'épaisseur.

Les usages des cartons sont principalement l'emballage et l'industrie de l'édition, mais aussi toutes les industries de cartonnage ou ses qualités d'isolant phonique, mécanique et électrique sont utilisées. Il est utilisé aussi comme matériau support de réalisation dans l'emboîtement de luxe.

Les cartons utilisés dans la fabrication des plaques de plâtre sont livrés en rouleau. L'épaisseur est de 0,1 [mm]. Selon la norme NF.P.92.507, ces cartons ont des classements au feu de M0 à M1. Il s'enflamme vers 300[°C].

*IV.1.2.1. Intérêt sur les cartons.***a. Avantage :**

- Relativement économique à fabriquer pour une vaste gamme mécanique et esthétique quelle que soit ses dimensions ;
- à la manipulation :
 - léger et facile à travailler par découpage, pliage ;
 - facile à imprimer ;
 - supportant différents types d'assemblage (agrafage, collage, pattes) ;
 - facile et peu encombrant à stocker à plat ;
 - adaptable à différentes contraintes par contre-collage (protection, imperméabilisation, contact alimentaire, etc.), vernissage ou pelliculage (brillance), dorure ou boîtage de luxe) ;
 - apte à subir différents traitements ;
- recyclable et biodégradable.

b. Inconvénients :

Non traité, le carton craint l'humidité et le feu aussi bien lors du stockage que de l'utilisation, tout comme le bois. En surface, le carton reste sensible à l'usure de son revêtement.

IV.2. Procédé de fabrication.**IV.2.1. Chaîne de production.**

- On place la première plaque de carton sur un tapis ;
- le plâtre est préalablement mélangé avec de l'eau dans un malaxeur et sa température est maintenue à 70[°C] ;
- le deuxième carton est ensuite posé (avec pressage à l'aide d'une presseuse) ;
- on laisse la plaque séchée (temps moyen de séchage 1h 30mn) ;
- après refroidissement, les plaques sont coupées aux dimensions voulues ;
- banderolage des bords ;
- stockage : horizontalement sur une surface plate et environnement sec. Ceci est également valable pour les conditions de transport.

IV.2.2. Dans l'usine.

IV.2.2.1. Fabrication de la plaque.

La chaîne de fabrication des plaques de plâtres est sur 350 à 450 [m], selon la vitesse moyenne de la chaîne. Cette distance permet à la plaque de plâtre de perdre une partie de son humidité et de devenir semi-rigide avant de passer dans le four, appelé sécheur.

Elles sont constituées d'une âme en plâtre recouverte sur chaque face par une feuille de carton lisse qui prennent en sandwich du plâtre, servant à la fois d'armature et de parement et dont les bords sont :

- Soit amincis BA, afin de permettre la dissimulation des joints, au moyen d'une bande noyée dans une enduit ;



Figure 13: BA (bord aminci).

- Soit arrondis SB (sans bande), joint étant bourré, en général en deux passe, au moyen d'un enduit spécifique, ou au contraire laissé tel quel, sans aucun traitement, l'arrondi affirmant le joint de décoration ;



Figure 14: BRA (bord rond aminci).



Figure 15: BAR (bord demi-ronde).



Figure 16: BR (bord rond).

- Soit chanfreiné BC, emploi et mise en œuvre identiques aux bords arrondis ;



Figure 17: BC (bord plein chanfreiné).

- Soit droits BD.



Figure 18: BD (bord droit).

IV.2.2.2. Dimensionnements standard d'une plaque de plâtre.

Selon la norme NF.P.72.302, les dimensions standard d'une plaque de plâtre en commerciales sont :

- Epaisseurs [mm] : 6 ; 9,5 ; 12,5 ; 15 ; 18 ; 20 ; 23 et 25.
- Largeur [cm] : 40 ; 60 ; 90 ; 120 et 125.
- Longueur [cm] : 200 ; 240 ; 250 ; 260 ; 280 ; 300 ; 320 ; 360 et 421.

Voici quelques exemples de dimensionnement de la plaque de plâtre à bord aminci sur le marché :

Produit	Dimensions [mm]		
	Epaisseur	Largeur	Longueur
Placoplatre BA 10	9,5	1 200	2 500
			2 600
Placoplatre 600 BA 13	12,5	600	2 500
Placoplatre BA 13	12,5	1 200	2 000
			2 400
			2 500
			2 600
			2 700
			2 800
			3 000
			3 200
Placoplatre BA 15	15	1 200	3 600
			2 500
Placoplatre BA 18	18	1 200	3 000
			2 500
			2 600
			2 800
Placoplatre BA 25	25	900	3 000
			2 500
			2 600
			2 800

Tableau 5: Exemples de normalisation de la plaque de plâtre à bord aminci (BA). [9].

IV.3. Finitions.

Différents finitions sont possibles. La finition des bords se fait par exemple lors de la production. Ces bords, dans le sens de la largeur sont enrobés de carton.

A la demande du client différentes ou d'autres finitions sont aussi possibles. L'une des possibilités est la finition des bords de chaque côté.

IV.4. Utilisations.

Les applications les plus courantes de la plaque de plâtre se situent dans la seconde œuvre du bâtiment et concernent principalement les partitions ou cloisons et contre cloisons ou doublages, ainsi que les plafonds.

IV.4.1. Mise en œuvre.

Elles se posent par vissage sur des rails ou des montants en bois, des montants métalliques, semelle résiliente et profil en U PVC ou par collage direct sur les supports maçonnés au moyen d'un mortier adhésif.

Exemple : Pour les cloisons en plaque de plâtre sur ossature métallique.

L'utilisation des plaques de plâtre comme des cloisons sur ossature métallique se divise aujourd'hui en trois secteurs, qui sont les suivants :

- Les cloisons de distribution ;

Le type de cloisons de distribution le plus répandu a pour désignation, le code « x/d » :

- x : représentant l'épaisseur finie de la cloison ;
- d : représentant la hauteur du profilé.

Le parement, c'est-à-dire le nombre de plaques de chaque côté de l'ossature, peut être soit simple, soit double, mais égale de chaque côté (cloison symétrique).

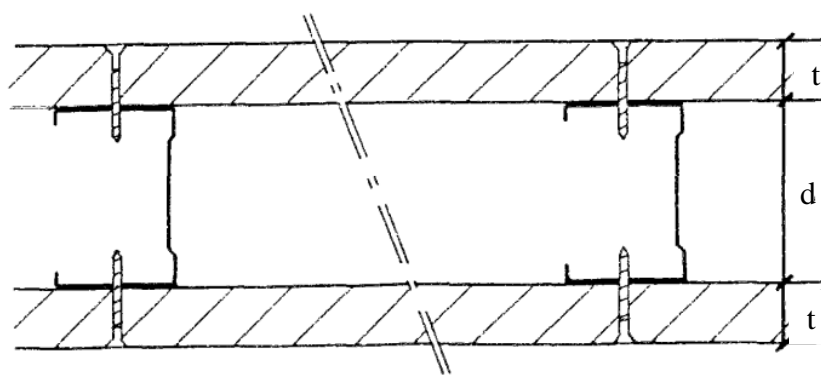


Figure 19: Cloisons de distribution.

- les cloisons séparatives d'appartement ;

Les parois séparatives sont généralement caractérisées par leur épaisseur totale finie ; elles ont pour principale caractéristique sur leur ossature verticale alternée.

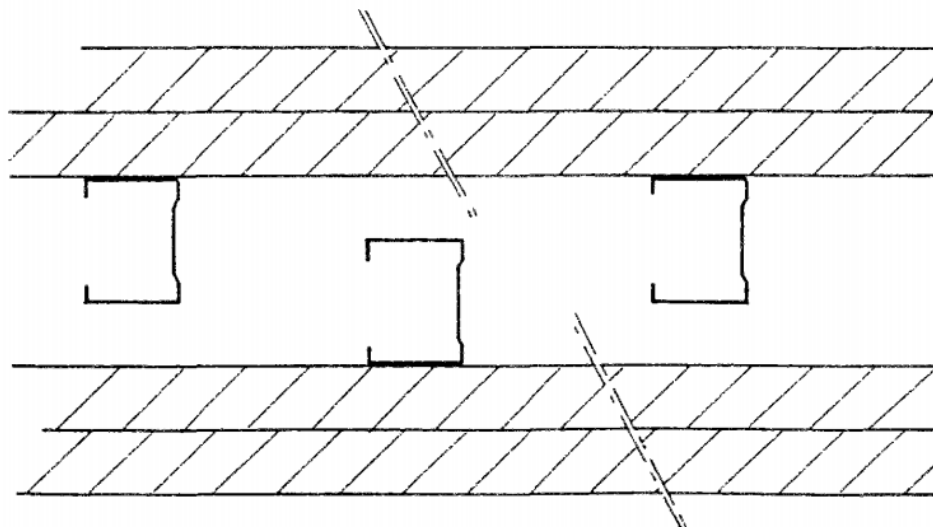


Figure 20: Cloisons séparative alternée.

- les cloisons à haute performances.

Celles-ci sont de deux types :

- Les cloisons de grande hauteur, utilisées dans les bâtiments administratifs, halls d'exploitation, cinéma, etc. elles peuvent atteindre plus de 10 [m] de hauteur.

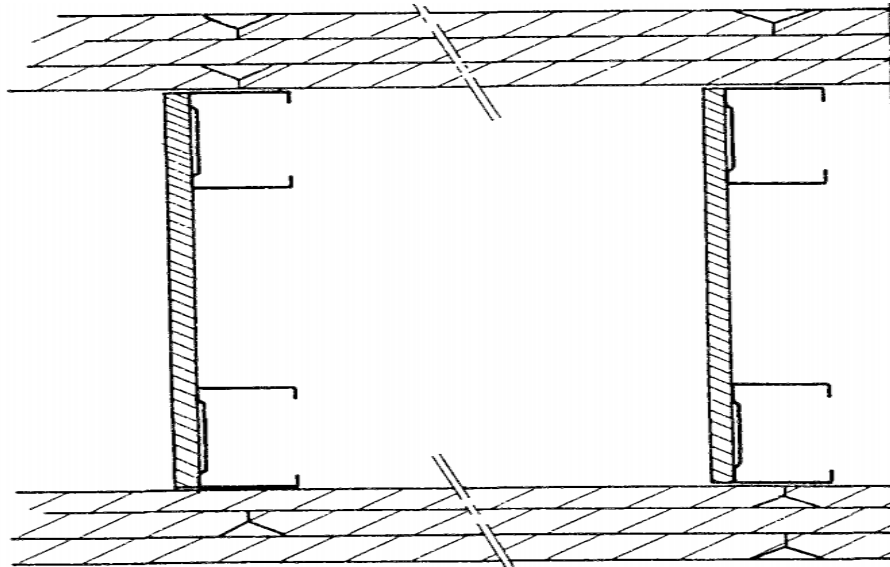


Figure 21: Cloisons de grande hauteur.

- Les cloisons à haute performances acoustiques et/ou thermique, caractérisées par leur épaisseur totale et leur coefficient acoustique ou/et leur conductivité.

Remarque : [18].

Les vis, elles sont destinées à la fixation des plaques sur l'ossature métallique. Elles comportent une tête de profil adapté à cet usage. Ce profil permet une pénétration progressive dans la plaque et un affleurement satisfaisant sans toutefois couper le carton.

Conclusion.

Madagascar possède de nombreux gisements de gypse, y compris Antsakoamaro, caractérisé par l'abondance de gypse naturel.

Mais il existe deux types de gypse, le gypse naturel et le gypse de synthèse qui sont utilisés dans plusieurs domaines mais le plus essentiel dans la fabrication du ciment et du plâtre dont on distingue trois types, les plâtres ordinaires ou plâtres de construction, les plâtre spéciaux et les plâtres composites divers utilisés dans les arts, les industries, et les habitats.

La fabrication du plâtre, l'intérêt c'est qu'il permet d'économiser, dans de nombreux cas, le ciment, qui exige beaucoup plus de charbon pour sa fabrication ; (80 [Kg] de charbon suffisent pour cuire une tonne de plâtre, alors il en faut 400 [Kg] pour obtenir une tonne de ciment) [12]. En raison de sa solubilité, le plâtre ordinaire ne peut être utilisé pour les extérieurs, sauf s'il est revêtu d'un enduit imperméable. Les meilleurs sont les peintures à l'huile (qui ne sont pas altérées par saponification comme sur les mortiers de ciment Portland).

Le plâtre est non seulement plus avantageux à ce titre et ses applications sont très vastes avec de grand avantage, à titre d'exemple le plâtre est léger et ces produits sont donc légers.

Ces produits par exemple les cloisons de plâtre, ainsi que les enduits, sont un excellent isolant thermique très ignifuge et insonore. « La plaque de plâtre », quant à elle, on peut dire qu'elle est formée de plâtre laminé entre deux feuilles de carton. Lors de l'évaporation au cours de la sollicitation thermique, elle consomme une partie importante de l'énergie thermique reçue par la cloison. La plaque de plâtre a ainsi comme effet de retarder l'élévation de la température dans la structure.

Quelles sont alors les différentes étapes à suivre pour fabriquer les plâtres et les plaques de plâtre ? Les détails seront développés dans la deuxième partie de ce travail.

Deuxième partie :

« ÉTUDES EXPÉRIMENTALES. »

Chapitre I Méthodes physique et mécanique du gypse.

I.1. Caractéristique du gypse.

Nous avons effectuées des analyses chimiques du gypse d'Antsakoamaro au sein du laboratoire du Département Génie-Chimique de l'E.S.P.A-Vontovorona. Les méthodes utilisées sont décrites ci-dessous.

I.1.1. Détermination de l'humidité.

I.1.1.1. But de l'essai.

Il s'agit de définir la quantité d'humidité de la pierre à plâtre.

I.1.1.2. Mode opératoire.

- Peser 5[g] d'échantillon en poudre (≤ 100 [μm]) ;
- mettre celui-ci dans un capsule de porcelaine ;
- peser la capsule et son contenu, soit cette masse " m_1 " ;
- le mettre dans une étuve à une température de 60 [$^{\circ}\text{C}$] ;
- après quelques minutes, enlever et laisser refroidir ;
- peser et remettre à nouveau dans l'étuve (toujours à la température de 60 [$^{\circ}\text{C}$]) ;
- après quelques minutes, enlever et laisser refroidir à nouveau ;
- peser, chauffer, refroidir, ..., on a un cycle fermé jusqu'à l'obtention d'un poids constant, soit cette masse " m_0 ".

$$\text{La teneur en humidité} = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 [\%]$$

I.1.2. Détermination de la teneur en eau.

I.1.2.1. But de l'essai.

Il s'agit de définir l'eau de constitution de la pierre à plâtre.

I.1.2.2. Principe de l'essai.

C'est après l'élimination de l'humidité qu'on détermine la teneur en eau.

I.1.2.3. Mode opératoire.

- Peser 5 [g] de l'échantillon sans humidité ;
- le mettre dans un creuset ;
- peser le creuset et son contenu, soit cette masse " m_1 " ;
- le mettre dans un four et chauffer à 300 [°C] pendant 3 heures ;
- enlever le creuset du four et laisser refroidir ;
- peser le creuset et son contenu à nouveau, soit cette masse " m_0 ".

$$\text{La teneur en eau} = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 [\%]$$

I.1.3. Déterminations des éléments majeurs.

La matière première à étudier est le gypse. De ce fait pour la détermination des éléments majeurs des minerais, on a deux méthodes :

- Soit par fusion alcaline ;
- soit l'attaque par acide.

Sur laboratoire, on a effectué la méthode attaque par acide.

I.1.3.1. Préparation du filtrat.

- Peser 1[g] d'échantillon en poudre (≤ 100 [μm]) ;
- mettre celui-ci dans une capsule de porcelaine de 120 [mL] ;
- ajouter quelques gouttes d'eau distillée et agiter avec la baguette de verre ;
- additionner 5 [mL] d'acide perchlorique HClO_4 puis agiter de nouveau ;
- mettre la capsule et son contenu sur bain de sable jusqu'à évaporation total de l'acide ;
- enlever et laisser refroidir ;
- verser 50 [mL] de HCl 10 [%] dans la capsule ; agiter lentement pour mélanger ;
- remettre au bain de sable pendant 12 [mn] ;
- filtrer le contenu de la capsule avec du papier filtre moyen ;
- recueillir le filtrat dans une fiole jaugée de 500 [mL] ;
- nettoyer la capsule avec $\frac{1}{4}$ de papier filtre pour rattraper le dépôt de silice ;
- laver respectivement, la capsule et le filtre avec de l'eau distillée bouillante jusqu'à la disparition de la réaction avec AgNO_3 , tout en filtrant jusqu'à la dernière goutte ;
- laisser refroidir le filtrat puis ajuster au trait de jauge avec l'eau distillée ;

- homogénéiser bien en agitant.

Le filtrat pour la détermination de la teneur en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO et MgO.

1.1.3.2. Détermination en oxyde de fer.

- Pipeter 100 [mL] de filtrat et verser dans un bécher de 600 [mL], puis ajouter 200 [mL] d'eau distillée ;
- agiter avec un agitateur magnétique ;
- Additionner 6 gouttes de bleu de bromophénol (jaune)
- Ajouter quelques gouttes de NH_4OH 50 [%] jusqu'au virage bleu foncé ;
- Verser rapidement, 20mL de HCl 0,1 N + 15 [mL] de solution tampon ;
- Ajouter 20 gouttes d'acier salicylique (violet noir) ;
- Chauffer à $47[^\circ\text{C}]$ pendant 1mn 30 s ;
- Titrer avec EDTA jusqu'au virage jaune-paille ;
- Faire la lecture du volume de l'EDTA versé, sur la burette graduée.

N.B : Réserver cette solution notée A pour la détermination de la teneur en Al_2O_3 .

Expression des résultats :

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = V \times f_{\text{EDTA}/\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

V : volume d'EDTA versé pour le dosage de Fe_2O_3

1.1.3.3. Analyse de la teneur en alumine.

- A la solution A, ajouter :
 - Quelques gouttes de $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$ (acétate d'ammonium) coloration bleu ;
 - 5 [mL] de $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{H}$ (acide acétique) ;
 - 3 gouttes de complexonate de cuivre ;
 - 10 gouttes de P.A.N (rose violacée).
- porter à l'ébullition de la solution, tout en agitant ;
- titrer avec de l'EDTA jusqu'à la coloration jaune paille ;
- lire le volume V d'EDTA versé.

Expression des résultats :

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = V \times f_{\text{EDTA}/\text{Al}_2\text{O}_3}$$

V : volume d'EDTA versé pour le dosage de Al_2O_3

1.1.3.4. Analyse de la teneur en oxyde de calcium.

- Pipeter 50 [mL] de filtrat puis verser dans un bécher de 60 [mL] et ajouter 200 [mL] d'eau distillée.
- agiter avec un agitateur magnétique puis ajouter 2 gouttes d'hélianthine (coloration rose) ;
- additionné quelques gouttes de NH_4OH 50 [%] jusqu'à obtention de coloration jaune ;
- verser rapidement 20 [mL] de triéthanolamine 33 [%] puis 40 [mL] de $NaOH$ 2N ;
- ajouter du réactif de PATON et REEDER (rouge violet) ;
- titrer avec l'EDTA jusqu'à l'obtention de coloration bleue ;
- relever la valeur du volume de l'EDTA versé.

Expression des résultats :

$$\%CaO = V \times f_{EDTA/CaO}$$

1.1.3.5. Analyse de teneur en magnésium.

- Pipeter 50 [mL] de filtrat et le mettre dans un bécher de 200 [mL], puis additionner 200 [mL] d'eau distillée ;
- agiter avec un agitateur magnétique ;
- ajouter une goutte d'hélianthine (rose claire) puis quelques gouttes de NH_4OH 50 [%] jusqu'à coloration jaune ;
- verser rapidement 30 [mL] de triéthanolamine 33 [%] ;
- verser aussi le volume " V " de l'EDTA pour le dosage de CaO ;
- ajouter 10 [mL] de NH_4OH concentré et 6 gouttes d'indicateur de MgO (coloration rose) ;
- titrer avec de l'EDTA jusqu'au virage incolore, noter le volume versé " V1 ".

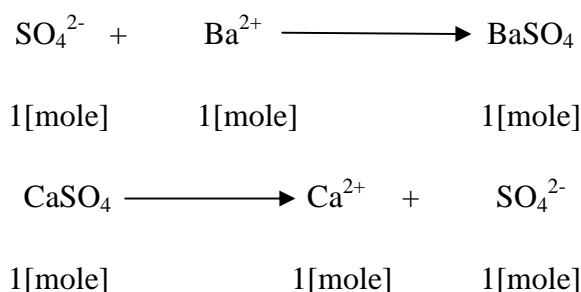
Expression des résultats :

$$\%MgO = (V1 - V) \times f_{EDTA/MgO}$$

I.1.3.6. Détermination de teneur en CaSO_4 .

- Peser 5 [g] d'échantillon en poudre (≤ 100 [μm]) ;
- mettre celui-ci dans un creuset à platine ;
- le peser à nouveau, soit cette masse la masse initiale ;
- commencer l'attaque en introduisant peu à peu 50 [mL] de l'acide chloridrique HCl 0,2N ;
- agiter avec un agitateur magnétique puis chauffer progressivement jusqu'à l'ébullition ;
- rincer à fond le creuset et son couvercle avec de l'eau distillée chaude, tout en récupérant la solution d'attaque et de lavage dans la capsule en porcelaine ;
- après dégagement gazeux, rincer à nouveau le creuset toujours avec de l'eau distillée chaude et placer la capsule sur un bain de sable ;
- verser goutte à goutte la solution de chlorure de baryum 10[%] (en maintenant l'ébullition) ;
- continuer de chauffer pendant 2 mn après avoir versé la quantité de baryum suffisante (la quantité est suffisante lorsqu'il y a formation de trouble constante dans la solution) ;
- filtrer par décantation sur papier filtre par tiède avec de l'eau distillée chaude ;
- laisser refroidir à la température ambiante ;
- enlever et mettre le papier filtre et son contenu dans une capsule de porcelaine ;
- chauffer progressivement jusqu'à 800 [$^{\circ}\text{C}$] pendant 1 heure ;
- enlever le creuset du four et laisser refroidir ;
- le peser à nouveau soit cette masse la masse après calcination.

Expression des résultats :



$$m_{\text{CaSO}_4} = n_{\text{CaSO}_4} \times M_{\text{CaSO}_4}$$

où

$$n_{CaSO_4} = \frac{m_{initiale}}{M_{BaSO_4}}$$

Donc :

$$m_{CaSO_4} = \frac{m_{initiale}}{M_{BaSO_4}} \times M_{CaSO_4}$$

La masse après calcination \longrightarrow 100 [%]

m_{CaSO_4} \longrightarrow La teneur en $CaSO_4$ [%]?

$$\text{La teneur en } CaSO_4 = \frac{m_{CaSO_4}}{\text{La masse après calcination}} \times 100 \text{ [%]}$$

Chapitre II La fabrication jusqu'à l'obtention.

II.1. Processus de fabrication de plaque de plâtre.

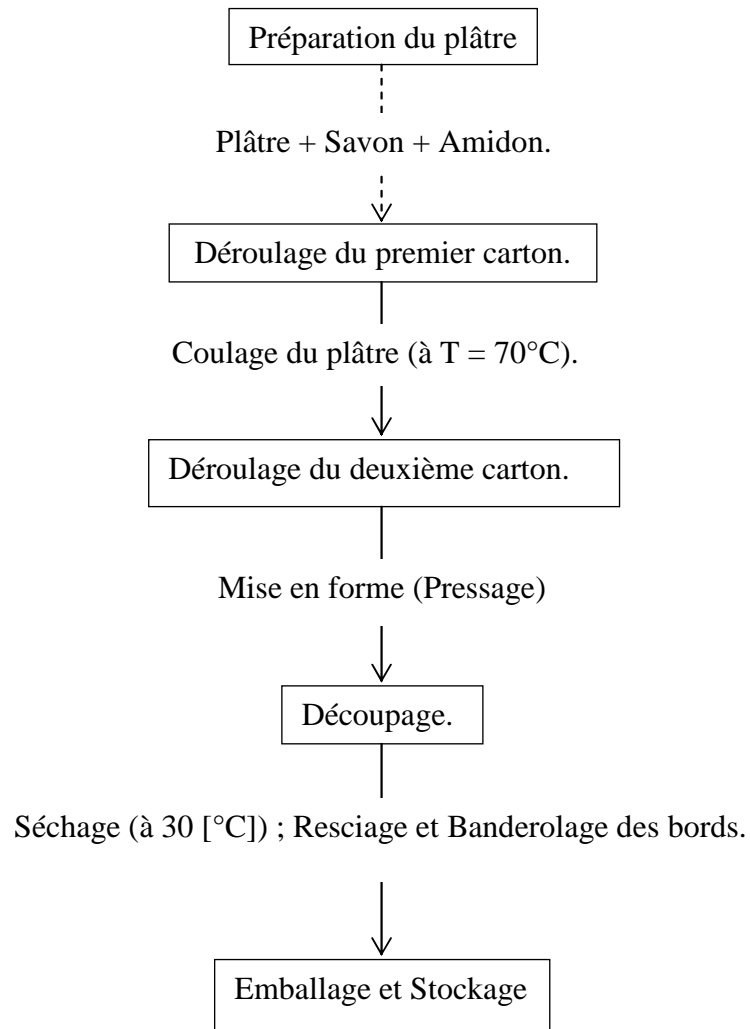


Figure 22: Schéma de procédé de fabrication de plaque de plâtre.

II.2. Fabrication au laboratoire.

Vue les appareillages au laboratoire nous avons dû adapter les processus de la fabrication de la plaque de plâtre à un processus conforme à ses appareils pendant la réalisation.

Ici, nous avons deux différents types de fabrication de la plaque de plâtre, on les caractérise suivant leur mise en forme, ces opérations s'effectuent comme suit :

- Cuisson avant la mise en forme ;
- cuisson après la mise en forme.

II.2.1. Cuisson avant la mise en forme.

II.2.1.1. Préparation de la matière première.

- Laver les pierres avec de l'eau traitée par le JIRAMA à la température ambiante, jusqu'à la disparition des impuretés visuelles ;
- laisser sécher graduellement à l'air libre ;
- réduire la taille de la pierre à une granulométrie environ inférieure à 40 [mm] à l'aide d'un marteau, cette opération est dite concassage ;
- mettre celui-ci dans un broyeur à boulet ;
- tamiser à l'aide d'un tamis pour avoir de granulométrie ≤ 100 [μm] ;
- recueillir les grains passant puis les mettre dans le four pendant 3heures minimum :
 - à 205 [°C] pour l'anhydrite soluble CaSO_4 III ;
 - et à 150 [°C] pour le semi-hydrate de variété β .

II.2.1.2. Chaîne de fabrication.

On a deux différentes chaînes de fabrication pour ce type de procédé :

- Plaque de plâtre avec l'anhydrite soluble ou le semi-hydrate de variété β .
- L'homogénéisation des deux variétés :

a. Plaque de plâtre avec le surcuit ou semi-hydrate.

Le but c'est d'avoir une plaque de plâtre avec ces deux types de plâtre afin de connaître ces caractéristiques.

➤ Procédé de la mise en forme :

- Avec l'anhydrite soluble CaSO_4 III ou le semi-hydrate de variété β ;
- ajouter quelques grammes d'amidon (1[%]) pour avoir une meilleure adhésion entre le plâtre et le carton ;
- additionner du savon (5[%]) pour le phénomène d'émulsion ;
- malaxer à l'aide d'un outil malaxeur jusqu'à l'obtention d'une mélange parfaite ;
- installer le premier carton dans le moule en bois ;
- gâcher avec de l'eau bouillante (plus la température augmente plus il y a plus de bulle et l'eau utilisée est l'eau traitée par le JIRAMA) à un dosage exacte pour chaque type de mélange ;
- bien homogénéiser en malaxant ;
- remplir le moule avec le mortier obtenu ;
- placer le deuxième carton sur le mortier dans le moule ;
- le compresser à l'aide d'un outil de presse ;
- laisser sécher avec un certain temps dans l'étuve à 30 [°C] ;
- enlever le modèle (démoulage) ;
- couper la plaque à une dimension voulue.

b. L'homogénéisation des deux variétés.

Le but c'est d'avoir un plâtre de variété différente telle que l'anhydrite soluble CaSO_4 III avec le semi-hydrate de variété β pour réaliser une plaque de plâtre.

➤ Procédé de la mise en forme.

Au départ, on mélange l'anhydrite soluble CaSO_4 III avec le semi-hydrate de variété β à un pourcentage recommandé pour l'homogénéisation des deux variétés ; après on a le même procéder que celle de la précédente.

II.2.2. Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue avant la mise en forme.

II.2.2.1. Plaque de plâtre avec l'anhydrite soluble CaSO_4 III ou avec le semi-hydrate de variété β .

Nos études sont basés sur l'homogénéisation de ces différents types de plâtre c'est-à-dire de l'anhydrite soluble CaSO_4 III avec le semi hydrate de variété β . Pour ce faire, il faut réaliser d'abord une plaque de plâtre à 100 [%] de chaque type de ses plâtres afin de comparer nos expériences à la fin où ils sont représentés dans le tableau ci-après.

Plaque de plâtre	Eau de gâchage [%]
Semi-hydrate de variété β	70
Anhydrite soluble CaSO_4 III	85

Tableau 6: Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue avant la mise en forme.

II.2.2.2. Pour l'homogénéisation des deux types de plâtre.

Nous avons mélangé l'anhydrite soluble CaSO_4 III avec le semi-hydrate de variété β pour la confection de plaque de plâtre à partir du gypse d'Antsakoamaro/Ambondromamy.

Classe	Anhydrite soluble CaSO_4 III [%]	Semi-hydrate de variété β [%]	Eau de gâchage [%]
30-70	30	70	74
40-60	40	60	76
50-50	50	50	78
60-40	60	40	79
70-30	70	30	81

Tableau 7: Classification de la plaque de plâtre pour l'homogénéisation.

II.2.3. Cuisson après la mise en forme.

Le but c'est d'avoir une nouvelle mise en forme d'une plaque de plâtre (à octroyer un gain de temps, une rentabilité fructueuse et en plus une sécurité très fiables) afin de faciliter les tâches pour la réalisation.

II.2.3.1. Préparation de la matière première.

La préparation de la matière première est ici la même que celle de la précédente mais la différence est la démarche de la cuisson, c'est-à-dire on réalise le processus de la fabrication avec la poudre de gypse (≤ 100 [μm]) et la cuisson ne s'effectue qu'après la mise en forme.

II.2.3.2. Chaîne de fabrication.

Généralement, la mise en forme d'une plaque de plâtre après la cuisson est analogue à celle de la mise en forme avant la cuisson. Mais au lieu d'utiliser le plâtre, ici on utilise la poudre de gypse (≤ 100 [μm]). On a alors le même processus que pour la chaîne de fabrication d'une plaque de plâtre citée ci-dessus sauf qu'après la mise en forme (ou après le démoulage) on doit effectuer les opérations suivantes :

- mettre la plaque dans le four pendant 3heures pour la cuisson ;
- laisser refroidir puis sortir la plaque du four ;
- couper la plaque à une dimension voulue.

II.2.3.3. Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue après la mise en forme.

Plaque de plâtre	Eau de gâchage [%]	Température de cuisson [°C]
Semi-hydrate de variété β	70	150
Anhydrite soluble	85	205

Tableau 8: Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue après la mise en forme.

Remarque :

L'eau bouillante favorise d'une part l'effet d'adhésion de l'amidon, c'est-à-dire la liaison du plâtre avec le carton et d'autre part il favorise la réaction du savon, plus il y a de la température plus il y a plus de bulle, on dit aussi le phénomène d'émulsion.

II.3. Caractérisation mécanique de la plaque.

Les plaques de plâtre sont définies comme étant un élément de construction dans le bâtiment, elles sont destinées à séparer dans chaque étage les divers pièces d'un même logement ou des locaux appartenant à un même usager ou à niveaux différents les pièces d'une maison unifamiliale et elles n'interviennent pas dans la stabilité du bâtiment lui-même.

La science des matériaux permet de concevoir non seulement l'objectif technique qui peut passer par une sélection de matériau dans une base existante mais aussi par la conception d'un nouveau matériau adapté au mieux à l'application visée et de son procédé de fabrication.

Ici la plaque de plâtre est considérée comme homogène et continu où nous allons étudier les comportements elastoplastique mécanique de ce matériau. Nous avons effectué ces études au bloc technique de l'E.S.P.A à Ambohitsaina (Ankatso).

Cette caractérisation mécanique est menée sur un type de plaques : Plaques standards de 12,5 [mm] d'épaisseur BA13, qui sont les plaques les plus utilisées.

II.3.1. Rappel sur la théorie des plaques.

Les plaques sont des structures tridimensionnelles dont une dimension, l'épaisseur « h » est petite en comparaison des deux autres.

L'hypothèse de base est donc que dans cette direction, la contrainte est nulle.

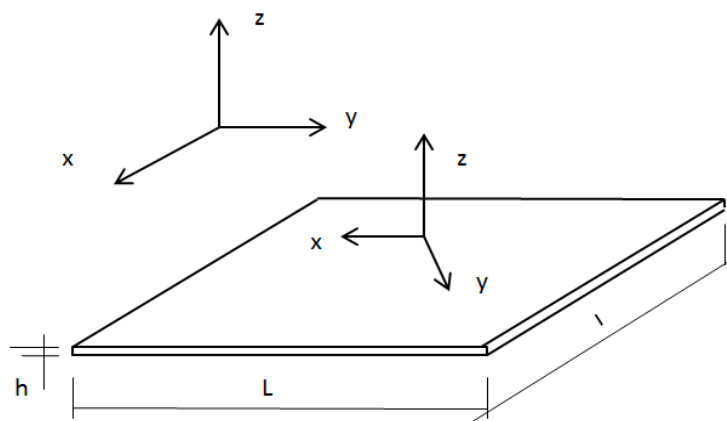


Figure 23: Structure de plaque.

Les plaques sont classées en deux catégories :

- Plaques épaisses, avec $1/20 < h/L < 1/4$;
- plaques minces, avec $h/L < 1/20$.

II.3.2. Homogénéisation de la plaque.

La modélisation de la plaque comme un composite multicouche ne pose pas de problème en elle-même. La différence réside dans la caractérisation de chaque matériau constituant la plaque, à savoir le plâtre et les cartons. Il existe une différence entre les caractéristiques de ces matériaux à l'état vierge et après passage par le processus de fabrication (assemblage, séchage, etc.).



Figure 24: Homogénéisation de la plaque.

Cette différence notable est mise en évidence dans une étude sur la caractérisation des plaques de plâtre. Cette différence est due à des réactions chimiques et à des problèmes de migration des constituants du cœur en plâtre et d'une partie des ajouts vers les cartons durant le séchage.

Dans nos cas, on a considéré notre plaque (carton-plâtre-carton) comme homogène et continu durant toutes l'étude dans cette partie expérimentales.

II.3.3. Objectif de l'étude.

A une connaissance suffisante et détaillée du comportement assez complexe des plaques de plâtre, de leur mise en œuvre et de leurs constituants est nécessaire pour toute approche de dimensionnement et de conception.

Malgré que le choc est le mode de sollicitation le plus pénalisant, on s'est limité dans cette étude dans le cas du chargement statique appliqué perpendiculairement au plan de la mise en œuvre d'une plaque de plâtre.

Durant toute l'étude, on néglige l'effet de l'humidité, en supposant que les plaques de plâtre sont dans un état sec dans leur milieu ambiant d'utilisation normale.

L'objectif de ce travail est donc de nous permettre de déterminer les niveaux de contraintes, de déformations et de charges maximales pour une plaque de plâtre.

II.3.4. Essai de flexion.

Pendant l'essai de flexion, nous avons dû effectuer l'essai de flexion trois points (flexion simple).

II.3.4.1. Définition.

Un essai de flexion trois points est le dispositif expérimental le plus simple pour éviter la flexion simple.

L'essai de flexion trois points permet de solliciter en flexion une plaque de plâtre reposant sur deux appuis en appliquant une charge à équidistance des deux appuis.

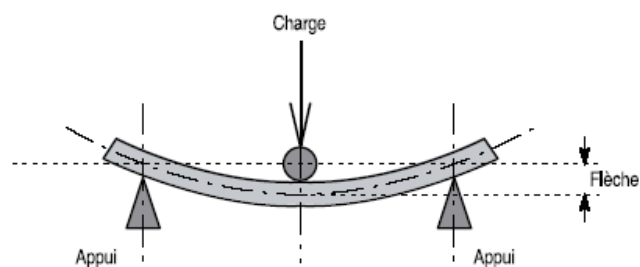


Figure 25: Essai de flexion simple ou flexion trois points.

II.3.4.2. But.

C'est de déterminer la résistance mécanique à la rupture de la plaque de plâtre soumis à la contrainte de flexion.

II.3.4.3. Mode opératoire.

Une charge croissante est appliquée directement sur la plaque de plâtre. Lors d'une déformation linéaire, la charge statique est interrompue pour permettre de mesurer la flexion linéaire de la plaque de plâtre au bout d'une minute environ. Ensuite, une nouvelle charge plus importante est appliquée pour obtenir une nouvelle déformation linéaire de la plaque de plâtre. Ce protocole est répété jusqu'à la rupture de la plaque.

Prise d'essai : La plaque de plâtre de 200 [mm] de longueur, de largeur 130 [mm] et d'épaisseur 12,5 [mm] avec face d'appuis parfaitement parallèles.

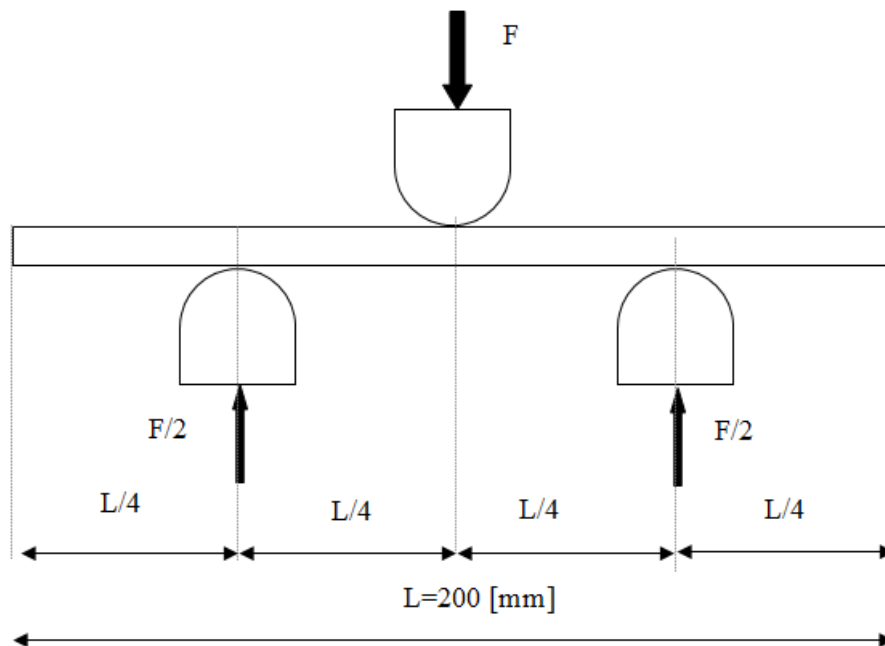


Figure 26: Mode opératoire de l'essai de flexion trois points (prise d'essai).

L'élancement de l'éprouvette (L/h) est très grand devant 1 donc on peut négliger les effets dus aux cisaillements.

II.3.4.4. Théories des calculs.

Lors d'un essai de flexion trois points, la contrainte est déterminée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

Avec les mêmes notations que précédemment ("l" est la distance des appuis inférieurs.). Tandis pour la déformation on a :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Il est possible de déterminer une relation entre le module E et la flèche f de notre éprouvette.

$$E = \frac{Fl^3}{4fbh^3} \text{ [Kg/m}^2\text{]}$$

II.3.5. Essai de traction.

II.3.5.1. But.

A une expérience physique, la réalisation de cet essai sur une éprouvette de plaque de plâtre nous permet de mesurer son degré de résistance à la rupture et de tracer la courbe Effort/Déformation.

Nous dépouillerons ensuite la courbe afin de déterminer les valeurs classiques (R_e , R_m , E , ...).

Enfin, nous établirons la courbe rationnelle pour en déterminer la loi de comportement expérimentale ($\sigma = f(\epsilon)$).

II.3.5.2. Mode opératoire.

Premièrement, on place une petite barre de la plaque entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. Deuxièmement, on enregistre l'allongement et la force appliquée, que l'on convertit ensuite en déformation et contrainte. Ce procédé se déroule comme suit :

Utilisation d'une machine électromécanique à enregistrement électronique :

- Le déplacement de la traverse se déroule à vitesse constante (0,5[mm/mn] dans nos cas) ;
- la force appliquée est mesurée à l'aide d'un capteur à jauges extensométriques ;
- l'allongement de la plaque de plâtre est mesuré par extensomètre à jauges.

II.3.5.3. Définition et dimensionnement de l'éprouvette.

L'essai est réalisé avec la plaque de plâtre de section rectangulaire $L \times l$ (200[mm] \times 130[mm])

L_0 : longueur utile initiale de la plaque de plâtre ;

S_0 : section initiale de la plaque de plâtre = 26 000[mm²] ;

L : longueur utile de la plaque de plâtre (fonction de l'effort exercé) ;

F : force appliquée à l'extrémité de la plaque de plâtre.

En déduit alors l'allongement relatif ϵ [%] :

$$e [\%] = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

Or $L_0 = k \times \sqrt{S_0};$

k : Coefficient dépendant du matériau. (Pour une plaque de plâtre : k = 1,237).

II.3.5.4. Détermination du module d'Young.

Le module d'Young (E) peut directement déterminer à partir de la courbe de traction. Il est proportionnel à la pente de la droite dans la zone élastique.

La courbe passant par le point de coordonnées (O, O), il nous suffit de lire les coordonnées d'un point avant la limite d'élastique c'est-à-dire lire directement la valeur de Fe [en Kg] à partir de la courbe de traction sur une valeur de $\frac{\Delta L}{L_0}$ avant la limite d'élastique

Avec :

$$E = \frac{F}{S} \times \frac{1}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{Fe}{S_0} \times \frac{1}{\frac{\Delta L}{L_0}} [Kg/m^2]$$

II.3.5.5. Diagramme rationnel.

A partir de l'enregistrement dans la zone de plasticité (entre A et B), nous allons établir le diagramme rationnel de la forme : $\sigma = f(\varepsilon)$, soit la contrainte en fonction de la déformation.

Ce diagramme nous permet ensuite d'établir la loi de comportement du matériau.

On a :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \times \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) [Kg/m^2]$$

$$\varepsilon = \ln\left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right)$$

$$S_0 = 2600 \times 10^{-6} [m^2]$$

Chapitre III Résultats expérimentaux et interprétations.

III.1. Caractéristiques du gypse.

III.1.1. Détermination de l'humidité.

$$\text{humidité} = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \text{ [\%]}$$

Sur laboratoire, on a : $m_0 = 19,4856 \text{ [g]}$ et $m_1 = 19,3726 \text{ [g]}$

Donc :

$$\text{l'humidité} = \frac{19,4856 - 19,3726}{19,3726} \times 100 \text{ [\%]} = 0,5833 \text{ [\%]}$$

$$\text{l'humidité} = 0,58 \text{ [\%]}$$

III.1.2. Détermination de l'eau de constitution.

$$\text{La teneur en eau} = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \text{ [\%]}$$

Dans nos cas, on a : $m_0 = 81,2176 \text{ [g]}$ et $m_1 = 65,6475 \text{ [g]}$

$$\text{La teneur en eau} = \frac{81,2176 - 65,6475}{65,6475} \times 100 \text{ [\%]} = 23,7177 \text{ [\%]}$$

$$\text{La teneur en eau} = 23,72 \text{ [\%]}$$

III.1.3. Déterminations des éléments majeurs.

C'est après la préparation du filtrat qu'on peut déterminer la teneur en Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO et MgO .

III.1.3.1. Détermination en oxyde de fer.

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = V \times f_{\text{EDTA}/\text{Fe}_2\text{O}_3}$$

V : volume de l'EDTA versé pour le dosage de $Fe_2O_3 = 0,1$

f_{EDTA/Fe_2O_3} : Facteur de l'EDTA pour $Fe_2O_3 = 1,1267$

$$\%Fe_2O_3 = 0,1 \times 1,1267 = 0,1128 [\%]$$

$$Fe_2O_3 = 0,11[\%]$$

III.1.3.2. Analyse de la teneur en alumine.

$$\%Al_2O_3 = V \times f_{EDTA/Al_2O_3}$$

V : volume de l'EDTA versé pour le dosage de $Al_2O_3 = 0,1$.

f_{EDTA/Al_2O_3} : Facteur de l'EDTA pour $Al_2O_3 = 0,7193$.

$$\%Al_2O_3 = 0,1 \times 0,7193 = 0,0719[\%]$$

$$Al_2O_3 = 0,07[\%]$$

III.1.3.3. Analyse de la teneur en oxyde de calcium.

$$\%CaO = V \times f_{EDTA/CaO}$$

$f_{EDTA/CaO}$: Facteur de l'EDTA pour $CaO = 1,5826$.

V : volume de l'EDTA versé pour le dosage de $CaO = 19,4$.

$$\%CaO = 19,4 \times 1,5826 = 30,702[\%]$$

$$CaO = 30,70[\%]$$

III.1.3.4. Analyse de teneur en magnésium.

$$\%MgO = (V1 - V) \times f_{EDTA/MgO}$$

$f_{EDTA/MgO}$: Facteur de l'EDTA pour $MgO = 1,1376$.

$$V = 0,9 \text{ et } V1 = 1,94$$

$$\%MgO = (1,94 - 0,9) \times 1,1376 = 1,1831[\%]$$

$$MgO = 1,18 [\%]$$

III.1.3.5. Détermination de la teneur en $CaSO_4$.

Comme on a :

$$\text{La teneur en } CaSO_4 = \frac{m_{CaSO_4}}{\text{La masse après calcination}} \times 100 [\%]$$

$$\text{Avec : } m_{CaSO_4} = \frac{m_{initiales}}{M_{BaSO_4}} \times M_{CaSO_4}$$

A.N

$$m_{initiales} = 21,8993 \text{ [g]}.$$

$$M_{CaSO_4} = 40,078 + 32,065 + (15,9994 \times 4) = 136,1406 \text{ [g/mole]}.$$

$$M_{BaSO_4} = 137,327 + 32,065 + (15,9994 \times 4) = 233,3896 \text{ [g/mole]}.$$

$$m_{CaSO_4} = \frac{21,8993}{233,3896} \times 136,1406 = 12,7743 \text{ [g]}$$

$$m_{CaSO_4} = 12,77 \text{ [g]}$$

Pour la teneur en $CaSO_4$, on a:

D'où ; la masse après calcination = 17,3234 [g].

$$\text{La teneur en } CaSO_4 = \frac{12,7743}{17,3234} \times 100 = 73,7401[\%]$$

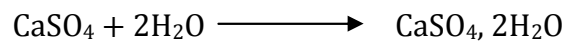
$$\text{La teneur en } CaSO_4 = 73,74[\%]$$

III.1.4. Récapitulations.

Méthode utilisée au laboratoire : « **Attaque par acide perchlorique HClO_4 .** »

Valeur obtenu :

- Après l'élimination de l'humidité (= 0,58 [%]) qu'on a obtenu la teneur en eau de notre minéral qui est égale à 19,17 [%] < 20 [%] ;
- teneur en CaO = 30,7 [%] < 32 [%] ;
- teneur en MgO = 1,18 [%] < 2 [%] ;
- teneur en Fe_2O_3 = 0,11 [%] < 1 [%] ;
- teneur en Al_2O_3 = 0,07 [%] < 1 [%].
- avec la réaction suivante :



Donc:

$$\text{La teneur en eau [\%]} + \text{La teneur en } \text{CaSO}_4 [\%] = \text{La pureté de ce minéral. [\%]}$$

$$23,72 [\%] + 73,74 [\%] = 97,46 [\%].$$

C'est-à-dire, on a un plâtre de **97,46 [%] de pureté** qui est supérieur à 80 [%].

D'après ces résultats avec ces conditions, le type de plâtre venant du gypse d'Antsakoamaro est un plâtre de construction avec lequel on peut créer un nouveau matériau de construction.

III.2. Essais mécaniques sur les plaques de plâtre.

III.2.1. Essais de flexion.

III.2.1.1. Mesures enregistrées lors de l'essai de flexion trois points.

Les diverses mesures enregistrées au cours des essais décrits précédemment sont consignées dans les tableaux ci-après et les courbe typiques représente la charge en fonction de la flèche de la plaque de plâtre.

Plaque de plâtre			Fr [Kg]	fr [mm]	Fe [Kg]	fe [mm]
Mise en forme avant cuisson.	Semi-hydrate de variété β		52	0,76	48	0,68
	Anhydrite soluble CaSO_4III		63	1,3	58	0,94
	Homogénéisation					
	β [%]	CaSO_4III [%]				
	30	70	55	0,76	51	0,62
	40	60	56	0,9	52	0,77
	50	50	58	1,05	53	0,88
	60	40	59	1	54	0,76
	70	30	60	1,8	55	1,00
Mise en forme après cuisson.	Semi-hydrate de variété β		48	0,65	46	0,58
	Anhydrite soluble CaSO_4III		62	1,3	59	0,96

Tableau 9: Mesures enregistrées lors de l'essai de flexion trois points.

D'après ce tableau on constate directement que plus le pourcentage de l'anhydrite soluble (pour la confection d'une plaque de plâtre) augmente plus la plaque peut supporter plus de charge.

III.2.1.2. Résultats d'après les théories des calculs.

Plaque de plâtre			σ [Kg/m ²]	E [Kg/m ²]	ϵ
Mise en forme avant cuisson.	Semi-hydrate de variété β		384 000	67 368	6
	Anhydrite soluble CaSO ₄ III		465 231	47 716	10
	Homogénéisation				
	B [%]	CaSO ₄ III[%]			
	30	70	406 154	71 255	6
	40	60	413 538	61 265	7
	50	50	428 308	54 388	8
	60	40	435 692	58 092	8
	70	30	443 077	32 821	14
Mise en forme après cuisson.	Semi-hydrate de variété β		354 462	72 710	5
	Anhydrite soluble CaSO ₄ III		457 846	46 959	10

Tableau 10: Résultats d'après les théories des calculs.

Ce tableau nous montre que la plaque est majorée par l'anhydrite soluble CaSO₄ III qui a une contrainte la plus élevée parmi tous ces types de plaque de plâtre quel que soit sa méthode de mise en forme et pour le module d'Young, en générale il est exprimé en [MPa ou GPa] mais ici il est exprimé en [Kg/m²] ce qui explique la rigidité et la souplesse de nos plaques, c'est-à-dire " E " est faible donc nos plaques sont souple.

III.2.1.3. Courbes de flexion.

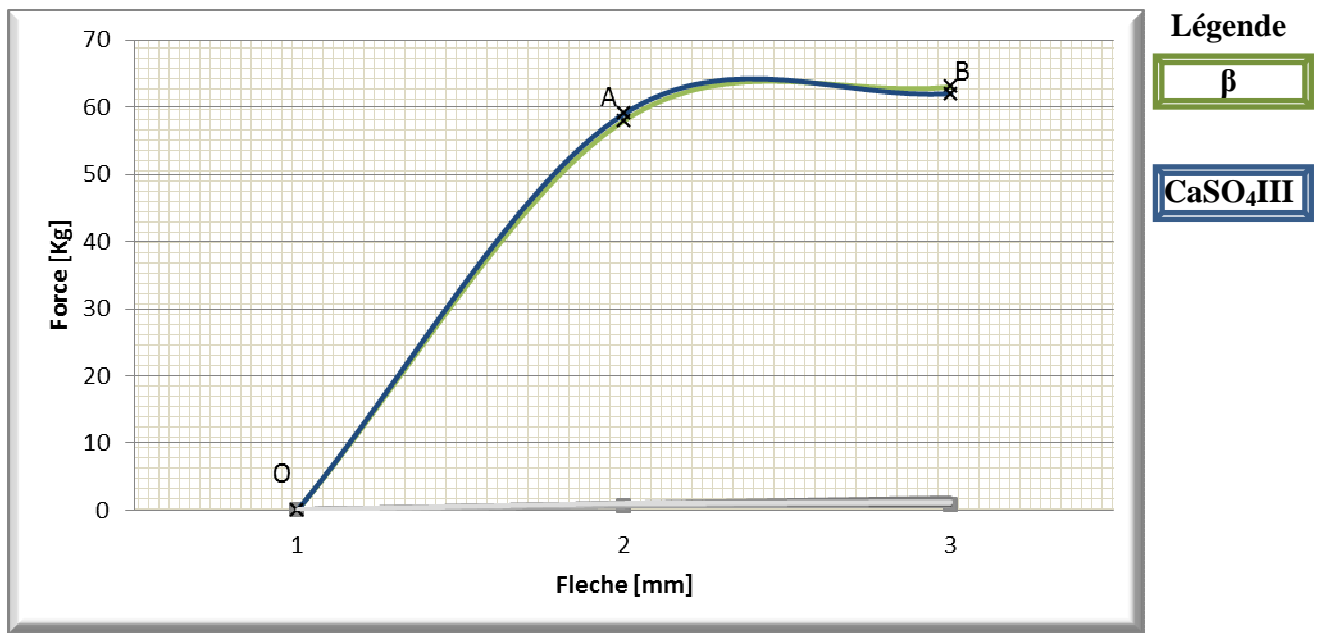


Figure 27: Courbes de flexion des plaques de plâtre cuit avant sa mise en forme.

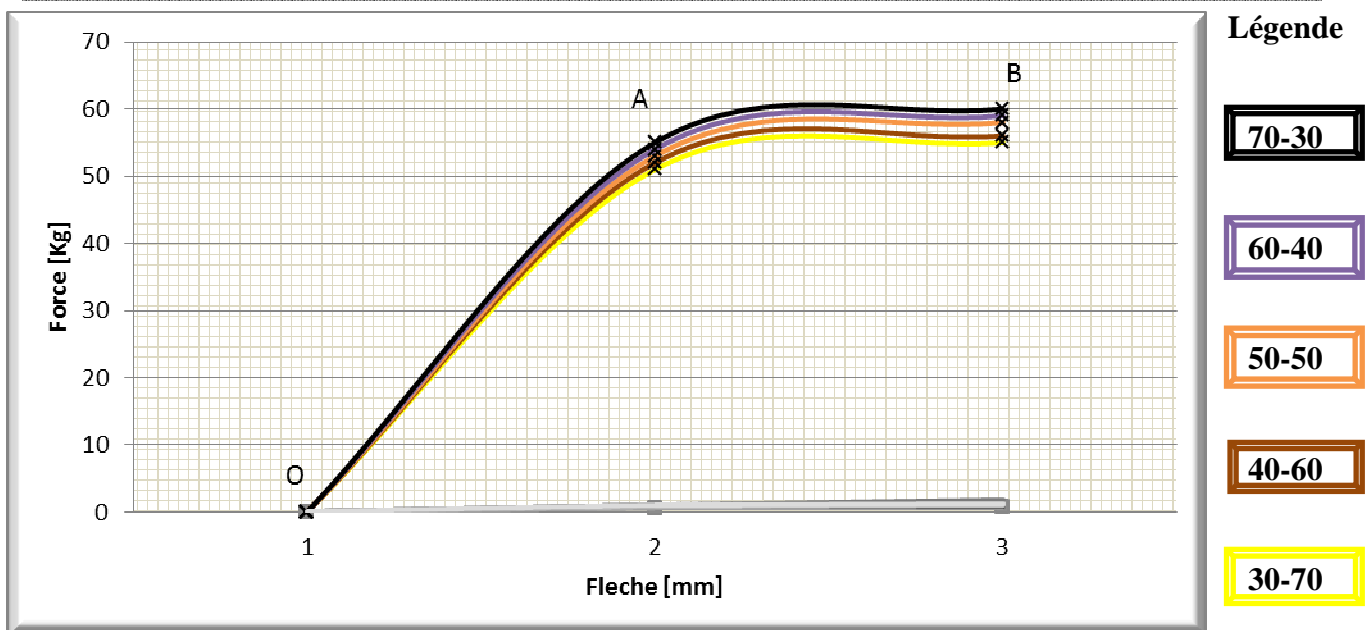


Figure 28: Courbes de flexion des plaques de plâtre par homogénéisation de deux types de plâtre.

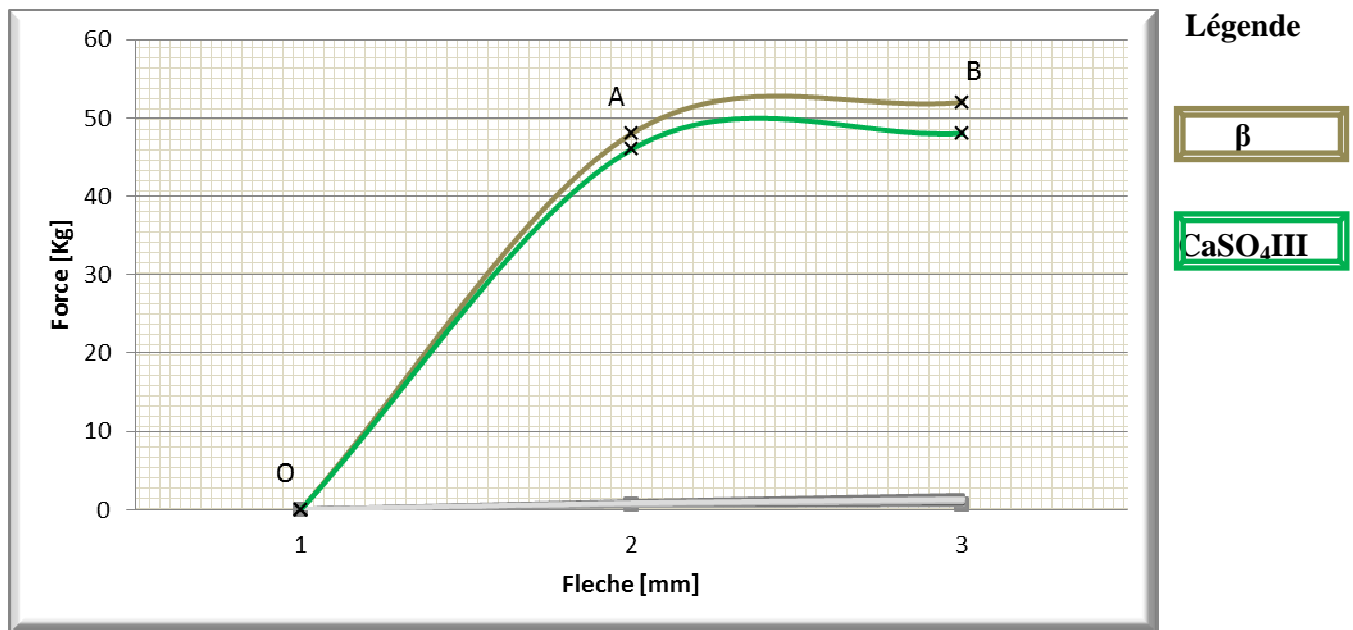


Figure 29: Courbes de flexion de la plaque de plâtre cuit après sa mise en forme.

Ces courbes nous montrent les différentes qualités de nos plaques de plâtre soumises à l'effort de flexion. On constate qu'on peut avoir des mêmes flèches sur les plaques de plâtre sollicitées à des forces différentes, ce qui implique que nos plaques de plâtre ont les mêmes caractéristiques mécanique à la rupture.

III.2.2. Essais de traction.

III.2.2.1. Définition et dimensionnement de l'éprouvette.

Pour :

$$e [\%] = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$$

Or $L_0 = k \times \sqrt{S_0}$;

Avec : k : Coefficient dépendant du matériau. (Pour une plaque de plâtre : k = 1,237) ;

D'où :

$$e = \frac{200 - 199,46}{199,46} \times 100 = 0,0027 [\%]$$

$$e = 0,0027 [\%]$$

Pour un allongement de 0,0027 [%] on peut en déduire directement la malléabilité et la ductilité de nos plaques. Avec cette valeur nos plaques de plâtre sont fragiles.

a. Les courbes tracées lors de l'essai sont de la forme : $F(N) = f(e(\%))$.

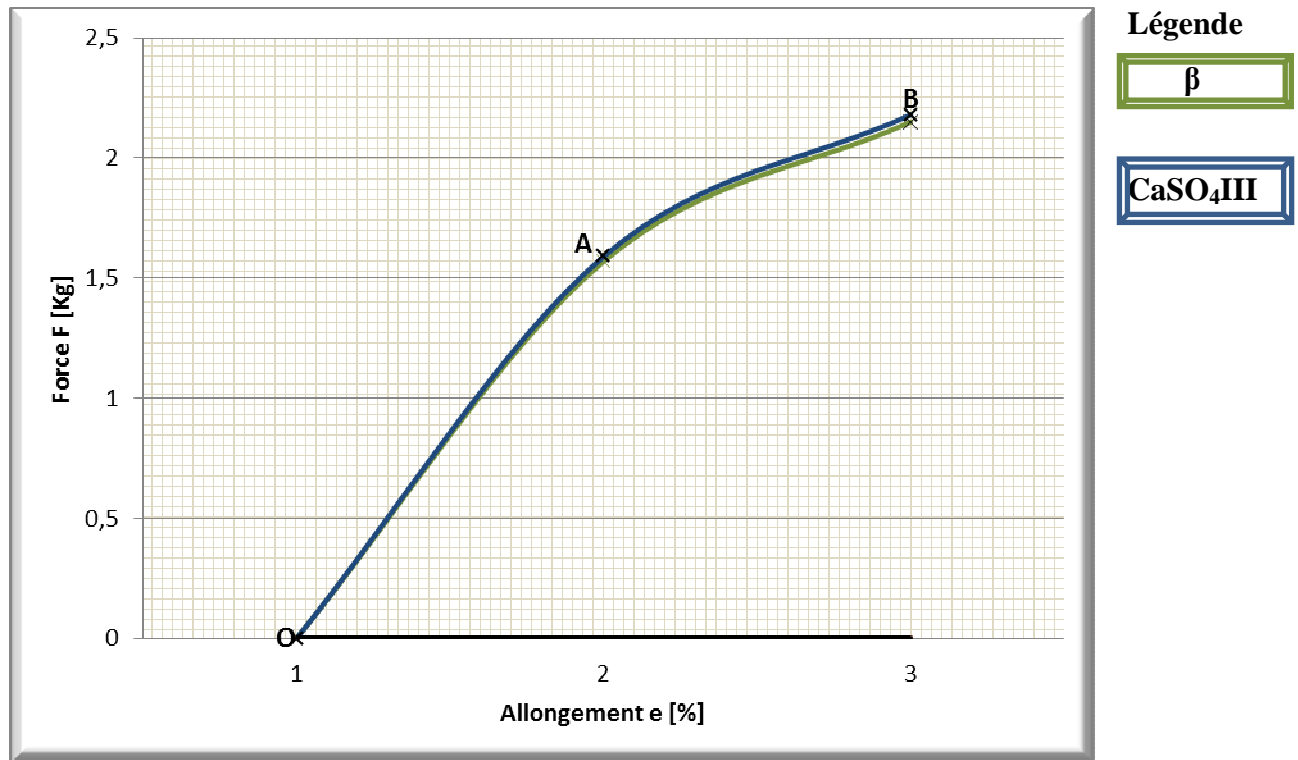


Figure 30: Courbes de traction des plaques de plâtre cuit avant sa mise en forme.

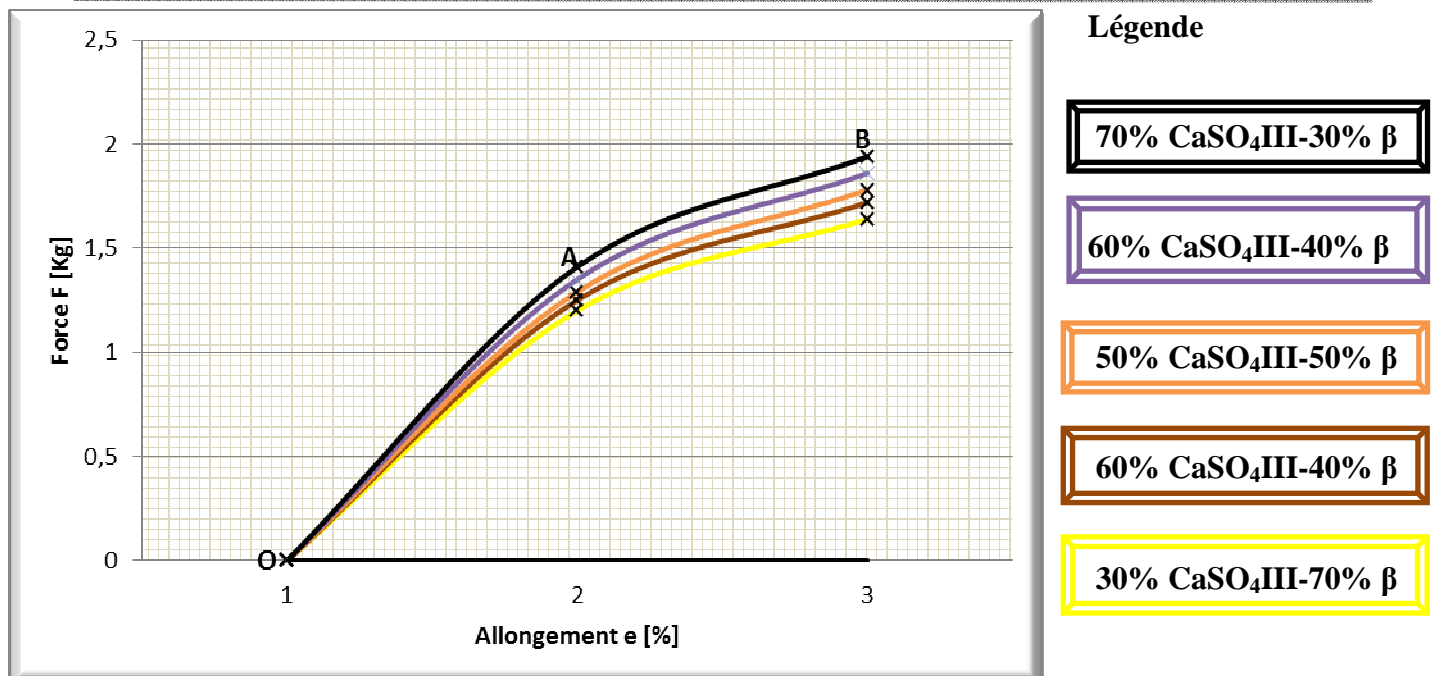


Figure 31: Courbes de traction des plaques de plâtre par l'homogénéisation de deux types de plâtre.

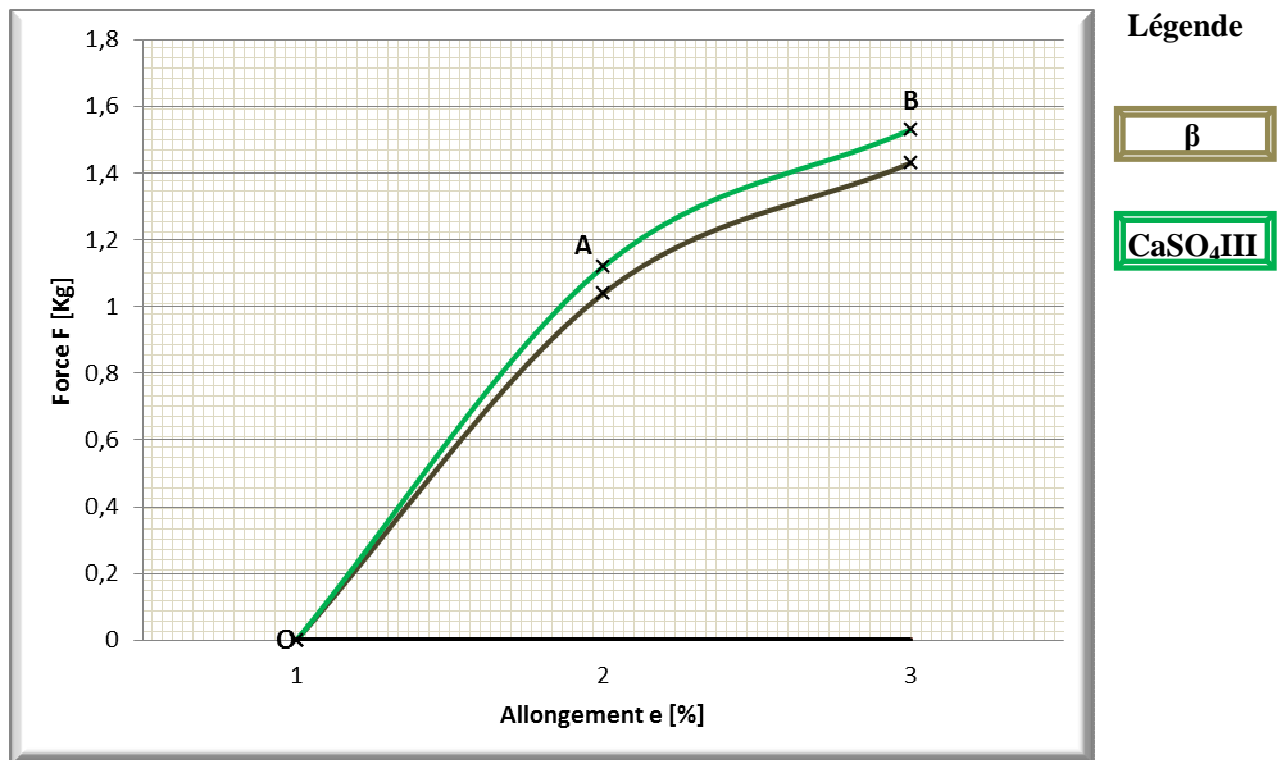


Figure 32: Courbes de traction des plaques de plâtre cuit après sa mise en forme.

On observe directement un type de courbe ayant une traction élastique/plastique - douce dont les différentes zones de la courbe obtenues sont:

- O à A : zone de déformation élastique (réversible) ;
- A à B : zone de déformation plastique non répartie. Il y a striction de la plaque de plâtre jusqu'à la rupture en B.

Et on a constaté lors de cet essai que plus le pourcentage de l'anhydrite soluble CaSO_4III augmente plus la plaque est élastique.

b. Identification des caractéristiques mécaniques de la plaque de plâtre :

F_m : charge maximale ;

F_e : charge à la limite d'élasticité ;

R_m : contrainte maximale à la rupture en traction ;

R_e : contrainte à la limite élastique ;

Plaque de plâtre			Fm [Kg]	Rm [Kg/m²]	Fe [Kg]	Re [Kg/m²]
Mise en forme avant cuisson	Anhydrite soluble CaSO ₄ III		2,15	82,8	1,57	60,3
	Semi-hydrate de variété β		1,43	54,8	1,04	40,0
	Homogénéisation					
	β [%]	CaSO ₄ III[%]				
	30	70	1,64	63,1	1,20	46,0
	40	60	1,72	66,2	1,25	48,2
	50	50	1,78	68,3	1,29	49,8
	60	40	1,86	71,4	1,35	52,0
	70	30	1,94	74,5	1,41	54,3
Mise en forme après cuisson	Anhydrite soluble CaSO ₄ III		2,18	83,8	1,59	61,1
	Semi-hydrate de variété β		1,53	59,0	1,12	43,0

Tableau 11: Résultats d'identification des caractéristiques mécaniques en traction.

C'est après cette identification qu'on peut tirer la dureté de nos plaques de plâtre à partir de la valeur des contraintes élastiques. Elles sont ici exprimées [en Kg/m²], dans ce cas on peut dire que ces valeurs sont faibles c'est-à-dire, la dureté de nos plaques de plâtre est molle.

III.2.2.2. Détermination du module d'Young.

Sur le tableau suivant, pour une valeur de $\frac{\Delta L}{L_0}$, nous lisons directement la valeur de Fe

[en Kg] pour la détermination du module d'Young :

Plaque de plâtre		Fe [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	E [Kg/m ²]
Mise en forme avant cuisson	Anhydrite soluble CaSO ₄ III	1,21	0,0010	46 390,53
	Semi-hydrate de variété β	0,80	0,00046	66 812,45
	Homogénéisation			
	β [%] CaSO ₄ III [%]			
	30 70	0,92	0,0005	70 745,56
	40 60	0,96	0,0006	61 854,04
	50 50	1,00	0,0007	54 674,56
	60 40	1,04	0,0007	57 159,76
	70 30	1,09	0,0013	32 116,52
Mise en forme après cuisson	Anhydrite soluble CaSO ₄ III	1,22	0,0010	46 970,41
	Semi-hydrate de variété β	0,86	0,00046	71 854,90

Tableau 12: Détermination du module d'Young.

Après ces déterminations, on a vérifié que nos plaques sont souples.

III.2.2.3. Diagramme rationnel.

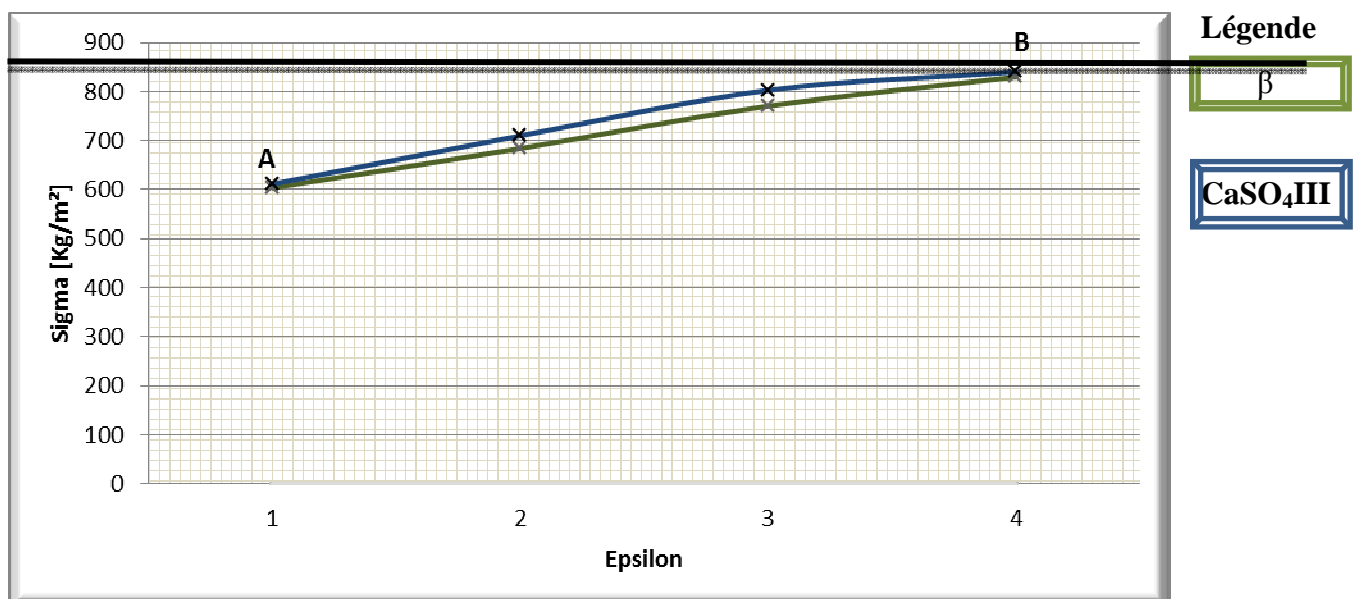


Figure 33: Diagramme rationnel des plaques de plâtre cuit avant sa mise en forme.

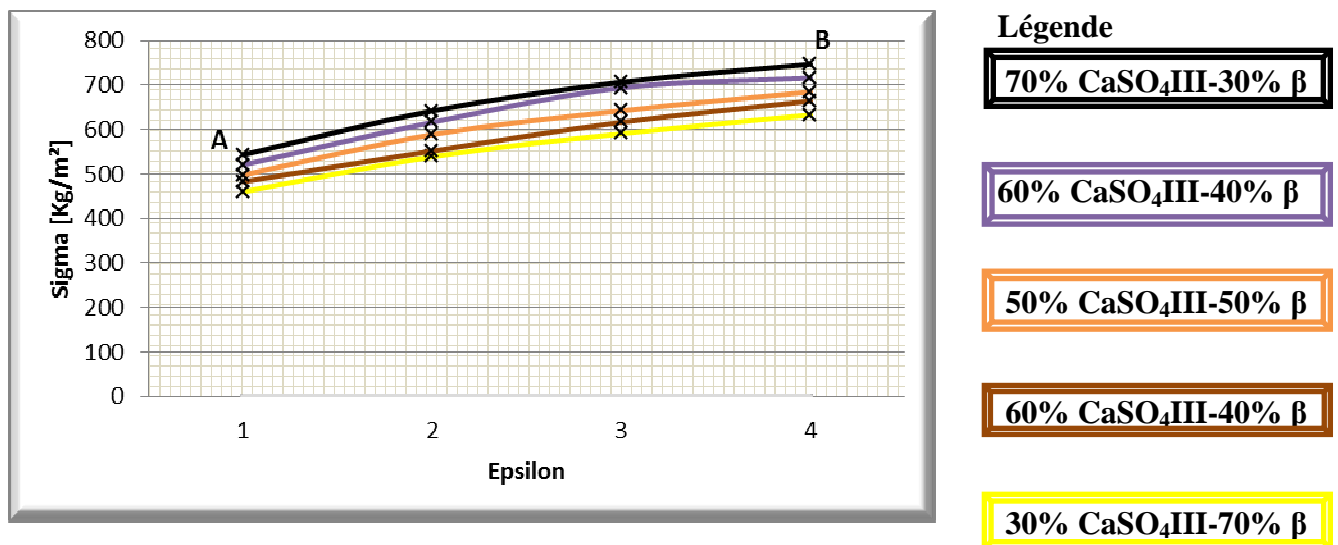


Figure 34: Diagramme rationnel des plaques de plâtre par homogénéisation de deux types de plâtre.

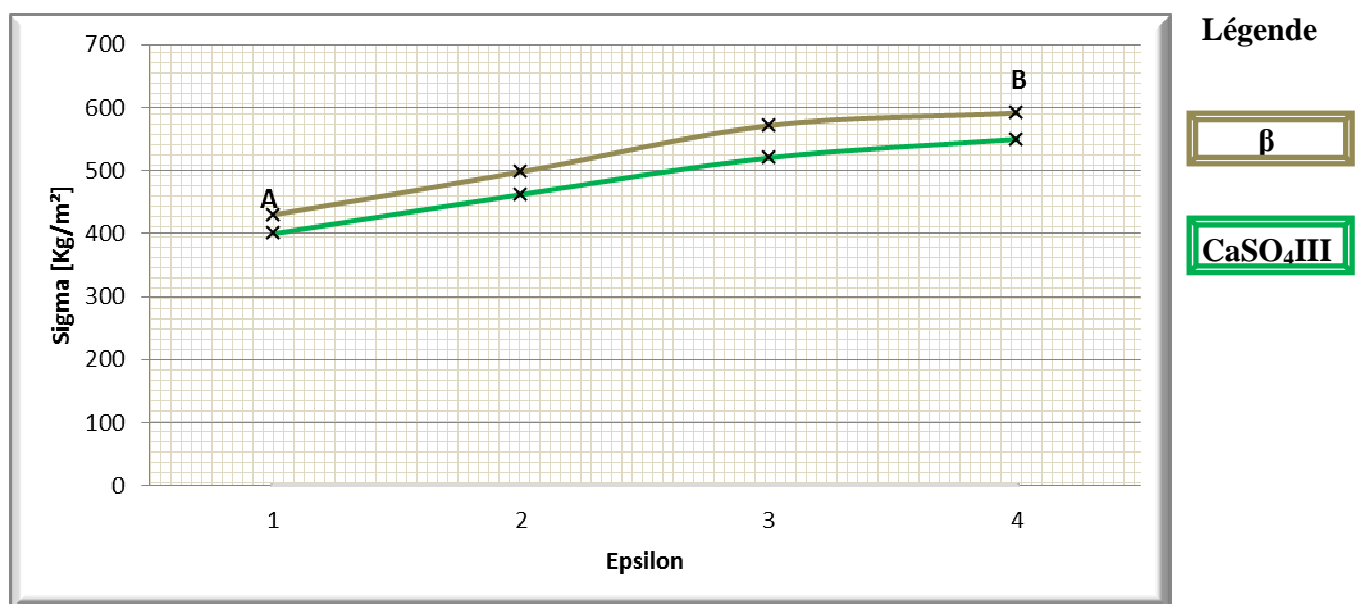


Figure 35: Diagramme rationnel des plaques de plâtre cuit après sa mise en forme.

On peut définir de ces courbes que la résistance maximale à la traction est comprise entre 549,83 et 840,30 [Kg/m²]. On peut vérifier ces valeurs dans l'ANNEXE E Page A8 – A-10.

III.2.2.4. Mécanisme de rupture.

Lors de l'essai de traction, on observe trois phases distinctes pour le mécanisme de rupture.

- Une phase d'amorce de fissure dans le plâtre perpendiculairement à la direction de sollicitation. Ces fissures sont localisées au milieu de l'éprouvette ;
- la phase d'apparition d'autres fissures et leur distribution sur presque toute la plaque ;
- la phase de délaminage entre carton et plâtre, suivi de la rupture des cartons et conduisant à la rupture finale de la plaque.

Conclusion.

Après les essais effectués, on peut dire que le rendement obtenu après purification de gypse est importante, et pendant la détermination de la résistance de la plaque de plâtre, on a pu appréhender lors de la manipulation de toutes les informations qu'un essai mécanique d'une plaque de plâtre peut-nous apporter par la méthode statique.

On a aperçu que cette méthode statique est moins précise pour la détermination des propriétés élastiques d'une plaque de plâtre, car elle représente un faible tenu mécanique du plâtre qui peut entraîner un endommagement de l'éprouvette lors d'un essai mécanique. Les contraintes sont construites en fonction de contrainte généralisées (effort et moment de flexion). Les plâtres gâchés correctement (pour la plaque de plâtre), conservés à sec et complètement desséchés peuvent atteindre une résistance maximale à la flexion comprise entre 384 000 et 465 231 [Kg/m²] et une résistance maximale à la traction comprise entre 549,83 et 840,30 [Kg/m²]. Ces valeurs ne sont que des chiffres relatifs qui peuvent varier avec la qualité, les conditions de séchage et l'importance de la masse gâchée.

Dans notre cas, la plaque de plâtre est donc un matériau fragile c'est-à-dire la surface de rupture est globalement perpendiculaire à l'axe de traction. L'allongement à la rupture est nul ou très faible.

On ne peut déduire de la courbe que le module d'Young " E ", et la résistance à la traction " Rm ".

Cette approche est adaptée quand les informations expérimentales concernent le comportement global de la plaque composite et non le comportement de chacun de ses composants avec lequel notre essai sur des éprouvettes de plaques entières a été réalisé.

Cependant, il est nécessaire de prendre un certain nombre de précautions qui influent sur la qualité des essais mesurés. Telles que :

- Qualité de découpe de la plaque de plâtre ;
- vitesse de mise en charge (déplacement de la traverse de la machine de traction) ;
- alignement des mores de la machine de traction. (afin de tirer dans l'axe de la plaque de plâtre) ;
- etc.

Troisième partie :

**« ÉTUDES D'IMPACT
ENVIRONNEMENTAL
ET
SOCIO-ÉCONOMIQUE. »**

La plaque de plâtre et les quatre éléments : Issu d'une ressource naturelle, le plâtre vit en harmonie avec la Terre (dont il est issu), l'eau (qui le compose), le feu (duquel il protège) et l'air (que nous respirons). Soucieux de respecter cet équilibre que nous allons élaborer cette partie qui s'impose sur l'étude d'impact environnemental de la plaque de plâtre pour mieux protéger la nature tout au long de son cycle de vie.

Chapitre I L'étude d'impact sur l'environnement.

Instaurée en 1988 et mise en application en 1991, l'étude d'impact sur l'environnement (E.I.E) a été constamment renforcée depuis, pour devenir actuellement une étape indispensable dans le cycle de vie des projets :

- Elle aide le maître de l'ouvrage (M.O) à concevoir son projet et à en mesurer les conséquences sur l'environnement ;
- Elle fait nécessairement partie du dossier que le maître de l'ouvrage doit présenter à l'administration pour recevoir l'autorisation d'engager les travaux.

Donc c'est un instrument d'aide à la décision dans les différentes étapes de réalisation d'un projet. Elle intègre les aspects économiques, sociaux et environnementaux pour tendre vers la solution de moindre impact et fournit à l'autorité administrative les éléments nécessaires pour :

- S'assurer que le projet ne porte pas atteinte à l'environnement ;
- se prononcer sur la nature et le contenu de la décision à prendre.

A Madagascar, conformément à l'article 10 de la loi N°90-033 du 21 décembre 1990 portant Charte de l'Environnement Malagasy et ses modificatifs, les projets d'investissement publics ou privés susceptibles de porter atteinte à l'environnement doivent faire l'objet d'une E.I.E.

En application de cet article 10 de Charte, le décret MECIE N°99-954 du 15 décembre 1999, modifié par le décret N°2004-167 du 03 février 2004, fixe les règles et les procédures à suivre par les promoteurs pour la mise en œuvre d'une E.I.E.

Ce décret définit entre autre le champ d'application des études d'impact, les projets devant être évalués, le processus à suivre, le contenu de l'étude, la procédure d'évaluation et

la participation du publique à l'évaluation. L'étude d'impact du promoteur doit satisfaire les exigences du décret et le projet sera évalué selon les règles qui y sont préétablies.

I.1. Problèmes de l'environnement.

Les problèmes environnementaux sont de deux ordres :

- L'épuisement des ressources naturelles ;
- la pollution.

I.1.1. L'épuisement des ressources naturelles.

La fonction de la plaque de plâtre dépende de son contexte d'utilisation. Par conséquent, il n'est pas possible d'appliquer une unité fonctionnelle de ce produit. Ainsi les résultats mentionnés par la suite seront relatifs à 1000 [m²] de plaque de plâtre. Les 1000 [m²] de plaque sont appelés flux de référence.

Produit (1000 [m²]) :

Plaque de plâtre d'épaisseur	12,5 [mm] ;
Gypse, dihydrate de sulfate de calcium (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	8,7 [T] ;
Carton	333[Kg].

I.1.1.1. Consommation des ressources naturelles.

Toutes les données fournies dans cette partie sont évaluées conformément par la norme XP P01 010 [9].

N°	Impact environnemental.	Pour les flux de référence.	Unité par [m ²] de produit.
1	Consommation de ressources énergétiques.	40107 MJ.	40 MJ.
2	Consommation de ressources non énergétiques.	8287 Kg.	8Kg.
3	Consommation d'eau.	15408 L.	15L.

Tableau 13: Consommation des ressources naturelles.

1.1.1.2. Les espaces naturels transformés.

Avant l'exploitation, les terrains des carrières sont principalement recouverts de boisements et de terre végétale. Après l'exploitation, les carrières sont réaménagées principalement en espaces verts naturels et en terre végétale.

Concernant les usines de fabrication, avant ses constructions, les terrains sont principalement des terres agricoles. L'avenir du terrain est actuellement ignoré. En effet, l'activité est pérenne. Sa cessation n'est pas envisagée.

La surface nécessaire d'une décharge pour enfouir 1000 [m²] de plaque de plâtre est égale à 114 [m².an]. [19]

1.1.2. La pollution.

N°	Pollution environnementale.	Pour les flux de référence.	Unité par [m ²] de produit.
1	Pollution de l'air	179225 m ³	179 m ³
2	Pollution de l'eau	741 m ³	0,7 m ³
3	Pollution des sols	Sans objet	

Tableau 14: Pollution environnementale. [9].

1.1.2.1. Emission des éléments néfastes dans l'environnement.

Les émissions des éléments néfastes directement associées aux sites de production sont le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, l'oxyde de soufre, l'oxyde d'azote et les poussières.

D'une façon générale les émissions atmosphériques associées aux étapes de transport et de fin de vie sont uniquement dues à la production et à la combustion du gasoil consommé pour le transport.

➤ Le dioxyde de carbone fossile CO₂ :

Les émissions de dioxyde de carbone fossile sont égales à 2017 [Kg]. La façon qu'elles se répartissent est la suivante :

- 91 [%] dus à l'étape de production ;
- 7 [%] dus à l'étape de transport ;
- 2 [%] dus à l'étape de fin de vie.

➤ Les poussières :

Les émissions de poussières sont égales à 873 [g]. Elles sont pratiquement et sûrement dues à l'étape de production.

➤ Les oxydes d'azote NO_x :

Les émissions d'oxyde d'azote sont égales à 4037 [g]. La façon qu'elles se répartissent est la suivante :

47 [%] dues à l'étape de production ;

- 46[%] dues à l'étape de transport ;
- 7 [%] dus à l'étape de fin de vie.

➤ Les oxydes de soufre SO_x :

Les émissions d'oxydes de soufre sont à 2441 [g] La façon qu'elles se répartissent est la suivante :

97 [%] dus à l'étape de production ;

- 3 [%] dus à l'étape de transport.

Les sites de production de plaques, la production de l'énergie, le transport en amont et la production de carton émettent respectivement à hauteur de 37 [%], 31 [%], 14 [%] et 12 [%] des émissions de l'étape de production.

➤ Métaux et hydrocarbures :

Les émissions de métaux et les hydrocarbures sont uniquement dus à la production d'énergie consommée pour la fabrication de la plaque de plâtre et des matières premières.

Selon la norme ISO 14040 (1997), l'analyse de cycle de vie (ACV) est une technique d'évaluation des aspects environnementaux et des impacts environnementaux potentiellement associés à un système de produit.

Pour cela, il est très utile d'étudier l'ACV de la plaque de plâtre

1.1.3. Description des principales étapes de cycle de vie d'une plaque de plâtre.

Le cycle de vie d'une plaque de plâtre prend en compte toutes les activités qui entrent en jeu dans la fabrication, l'utilisation, le transport et l'élimination de ce produit. Il est généralement illustré comme une série d'étapes, depuis l'acquisition des matières premières

jusqu'à l'évaluation finale (élimination ou valorisation), en passant par la fabrication, l'emballage, le transport, la consommation par les ménages et/ou les industries, le recyclage et l'élimination.

La mise en œuvre dépend de l'utilisation de la plaque, donc il n'y a pas de mise en œuvre propre à la plaque de plâtre. Par conséquent, dans le cadre de l'étude de la plaque de plâtre seulement, cette étape n'est pas prise en compte.

I.1.3.1. Procédé de fabrication.

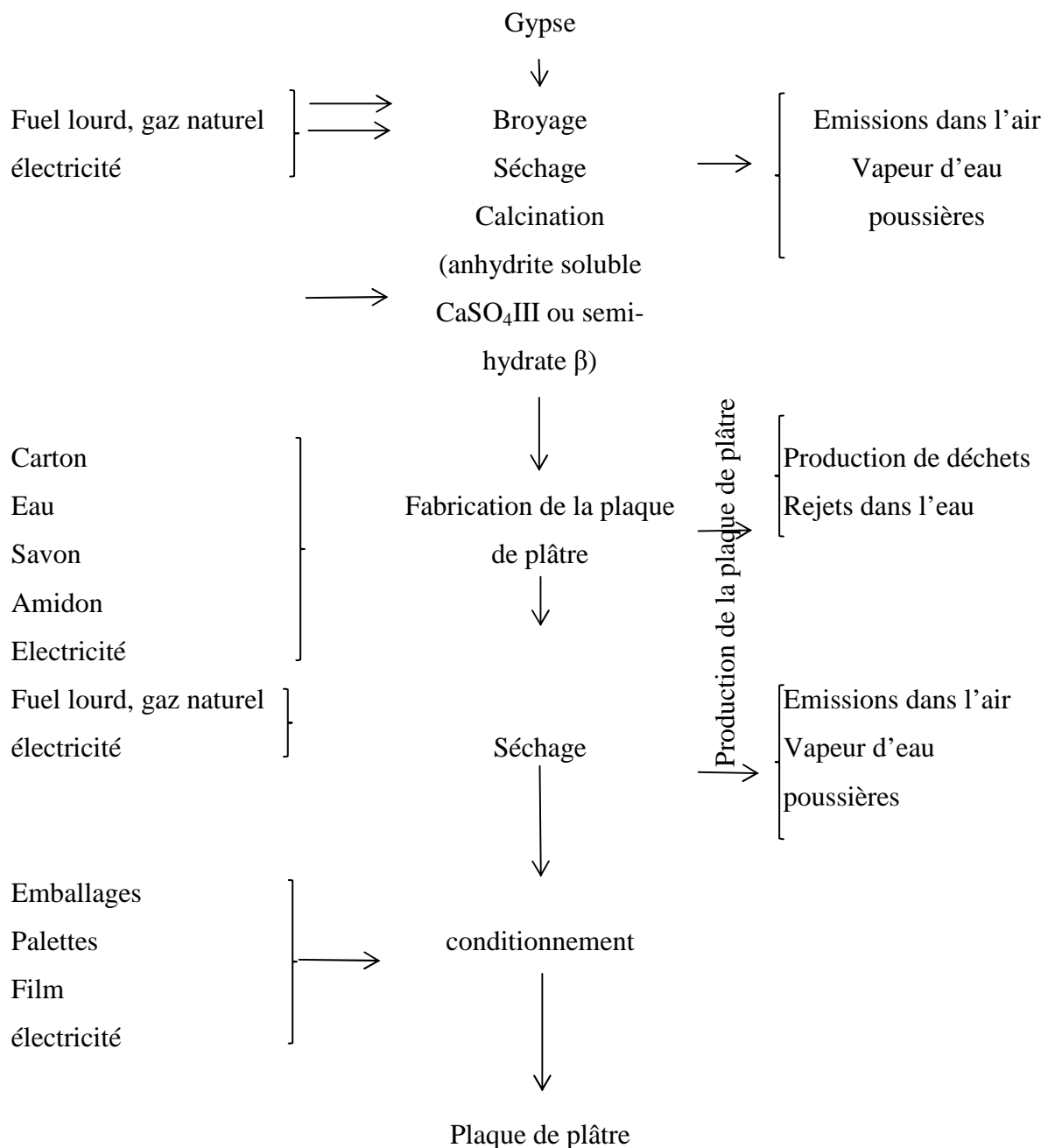


Figure 36: Schéma de procédé de fabrication.

I.1.3.2. Description du système de l'analyse de cycle de vie.

Les principales étapes incluses et exclues dans les grandes phases du cycle de vie d'une plaque de plâtre sont :

a. Les principales étapes incluses.**➤ Production.**

- Quantité de matières et d'énergies consommées ;
- quantité de gasoil consommée par les engins de chantiers ;
- mise à disposition de gasoil et combustion par les camions ou les péniches pour le transport en amont ;
- mise à disposition du gasoil et combustion par engin de chantiers ;
- mise à disposition du carburant et combustion pour le transport en amont par les péniches ;
- production et transport de l'électricité ;
- production de carton pour plaques ;
- production d'huile et de graisse de maintenance ;
- production des consommables : quantité consommée, production du savon, production d'amidon.

➤ Distribution.

- Mise à disposition du gasoil et contribution dans les camions pour le transport des plaques.

➤ Fin de vie.

- Mise à disposition du gasoil et combustion dans les camions pour le transport des plaques en fin de vie ;
- mise en décharge.

b. Les principales étapes exclues.

En particulier, les points exclus sont les suivants :

- L'éclairage et le chauffage des bâtiments ;
- le nettoyage des locaux ;
- le département administratif des sites industriels ;
- les transports des employés.

*I.1.3.3. Principales hypothèses.***a. Production.**

Il est à préciser que l'hypothèse relative de production, notamment les distances et les modes de transport des produits sont plus importants en masse.

b. Mise en œuvre.

La mise en œuvre d'une plaque de plâtre dépend de son contexte d'utilisation. Dans l'ACV d'une plaque de plâtre, cette étape n'est pas prise en compte.

c. Distribution.

Comme à Madagascar, le mode principal de distribution est la route donc il faut préciser le scénario de distribution, c'est-à-dire le mode et la distance de transport.

Exemple :

La consommation de carburant pour le transport du produit est estimée à partir de la formule suivante [20] :

- Consommation de gasoil pour un camion plein : 38 [L] pour 100 [Km] ;
- Consommation de gasoil pour un camion vide : $\frac{2}{3} \times 38$ [L] pour 100 [Km].
- Charge utile du camion : 24 [T]
- Retour à vide des camions : 30 [%]

d. Utilisation.

L'utilisation de la plaque de plâtre ne nécessite aucun entretien. Par conséquent, l'impact de cette étape est nul.

e. Fin de vie. [19]

100 [%] de plaque sont mises en décharges.

Les rejets dans l'eau des plaques de plâtre en fin de vie sont égaux aux émissions maximales autorisées pour les déchets de plâtre dans une décharge de classe III de type F.

Le recyclage du produit en fin de vie est pris en compte via un stock (si pertinent) :

Pour la valorisation des matériaux face aux enjeux environnementaux, les industries mènent une politique active en matière de gestion de déchets de fin de vie de leurs produits. Le plâtre comme le papier sont recyclables.

Aussi, dès lors que l'organisation des chantiers le permet, les chutes de plaques de plâtre sont stockées à l'abri, triées puis expédiées vers des ateliers de recyclage. Séparés des produits de finition, carton et plâtre sont ensuite valorisés comme matière première sur les sites de production.

Conclusion.

On doit respecter un engagement du cadre de vie dès la découverte du gisement pour le réaménagement des sites.

On peut toujours dire que le plâtre est issu d'une ressource naturelle, « le gypse » dont les différentes étapes de production (concassage, criblage, homogénéisation, cuisson à basse température (max : 205°C)...) sont peu consommatrices d'énergie et ne génèrent aucun déchet. A la fin de vie de notre produit, ce plâtre comme le papier sont recyclables. D'après notre étude pour préserver cette ressource, on doit utiliser au maximum ces matériaux recyclés pour tendre vers le zéro le déchet de production.

Chapitre II Etude socio-économique.

II.1. Devis descriptif.

II.1.1. Extraction de la matière première.

II.1.1.1. *Exploitation de la ressource.*

L'extraction du gypse est exécutée soit au système HIMO et/ou soit aux engins selon la possibilité de l'Entreprise.

Evaluation de prix : Payé par Kilogramme.

II.1.1.2. *Remblaiement.*

Un engagement du respect du cadre de vie dès la découverte du gisement.

Il consiste le réaménagement des sites où dans le cadre des projets de réhabilitation, les industries assurent la mise en sécurité des sites et le réaménagement des carrières en créant des parcs naturels, des espaces verts, agricoles...La mise en remblai sur place est exécutée soit au système HIMO et/ou soit par l'engin selon la disponibilité et/ou l'exigence des travaux à réaliser.

Evaluation de prix : Forfaitaire.

II.1.2. Fabrication du plâtre.

Lavage + séchage, concassage, criblage, homogénéisation, cuisson à basse température...

Evaluation de prix : Payé par Kilogramme.

II.1.3. Fabrication de la plaque de plâtre.

La fabrication de la plaque de plâtre comprend six étapes :

- La préparation du plâtre ;
- le déroulage du carton ;
- le coulage du plâtre ;
- le découpage ;
- le séchage ;
- l'emballage et le stockage.

Evaluation de prix : Payé par unité.

II.1.4. Le transport.

Afin d'économiser l'énergie et de limiter les pollutions, les industries s'attachent à :

- Répartir les unités de production de la plaque de plâtre sur l'ensemble du territoire ;
- implanter les unités de stockage à proximité des grands centres d'exploitation ;
- maximiser les quantités de plaques à chaque transport.

Evaluation de prix : Forfaitaire.

II.1.5. Mise en œuvre.

Une mise en œuvre facile, sans risque et optimisée.

La plaque de plâtre, posée à sec, n'a plus besoin de temps de séchage, optimise la productivité et réduit les nuisances des chantiers.

La mise en œuvre requiert un matériel adapté mais ne nécessite pas d'équipement de protection spécifique.

Les plaques dont les dimensions disponibles sont très variées, permettent une utilisation optimale afin de réduire les déchets sur chantier.

Evaluation de prix : Payé par mètre carré.

II.2. Calcul de coefficient de majoration de déboursés « K ».

Le coefficient de majoration de déboursés « K » est donné par la relation :

$$K = \frac{\left(1 + \frac{A_1}{100}\right) \times \left(1 + \frac{A_2}{100}\right)}{1 - \left[\left(\frac{A_3}{100}\right) \times \left(1 + \frac{TVA}{100}\right)\right]}$$

Où : A_1 : Frais généraux proportionnels aux déboursés :

$$A_1 = a_1 + a_2 + a_3 + a_4$$

A_2 : Bénéfice brute et frais financier proportionnels au prix de revient de l'Entreprise :

$$A_2 = a_5 + a_6 + a_7 + a_8$$

La signification des « a » et les valeurs des « A » sont données dans le tableau suivant :

Origine des frais	Décomposition à l'intérieur de chaque catégorie de frais	Indice de composition
Frais généraux proportionnels aux déboursés	Frais d'agence et patente	$a_1 = 3,5$
	Frais de chantier	$a_2 = 8$
	Frais d'études et de laboratoire	$a_3 = 2,5$
	Assurances	$a_4 = 0,5$
		$A_1 = 14,5$
Bénéfice brute et frais financier proportionnels aux prix de revient	Bénéfice nette et impôt sur le bénéfice	$a_5 = 18$
	Aléas techniques	$a_6 = 3$
	Aléas de révision des prix	$a_7 = 4$
	Frais financiers	$a_8 = 12$
		$A_2 = 37$
Frais proportionnel au prix de règlement avec le TVA	Frais de siège	$a_9 = 0$
		$A_3 = 0$

Tableau 15: Valeur des « a_i ». [21].

On trouve une valeur du coefficient de majoration de déboursés $K = 1,57$.

II.3. Types de sous détail de prix.**II.3.1. Sous détail des prix d'extraction de gypse.**

TACHE	Matière Première (Extraction du gypse)								
Rendement journalier	80 T/j								
Prix									
Composant des prix			Coût directs			Montant (AR)			TOTAL (Ar)
Désignations	U	Qté	U	Qté	PU (Ar)	Matériel	Main d'œuvre	Matériaux	
MATERIEL									
Outillage	Fft	Fft	Fft	Fft	15 000 000,00	15 000 000,00			15 000 000,00
MAIN D'ŒUVRE									
Chef de chantier	Hj	1	h	1	1 450,00		1 450,00		50 250,00
Chef d'équipe	Hj	1	h	2	1 200,00		2 400,00		
Ouvrier spécialisé	Hj	3	h	8	1 000,00		24 000,00		
manœuvre	Hj	4	h	8	700,00		22 400,00		
TOTAL DEBOURSES							D =		15 050 250,00
							PU =		295,36
							Arrondi à		300,00

Tableau 16: Sous détail des prix de l'extraction du gypse.

II.3.2. Sous détail des prix de la fabrication du plâtre.

TACHE	Fabrication du plâtre								
Rendement journalier	40 T/j								
Prix									
composant des prix			Coût directs			Montant (AR)			TOTAL (Ar)
Désignations	U	Qté	U	Qté	PU (Ar)	Matériel	Main d'œuvre	Matériaux	
MATERIEL									
Outillage	Fft	Fft	Fft	Fft	11 000 000,00	11 000 000,00			11 000 000,00
MAIN D'ŒUVRE									
Chef de chantier	Hj	1	h	1	1 450,00		1 450,00		50250
Chef d'équipe	Hj	1	h	2	1 200,00		2 400,00		
Ouvrier spécialisé	Hj	3	h	8	1 000,00		24 000,00		
manouvre	Hj	4	h	8	700,00		22 400,00		
MATERIAUX									
Eau distillé	m3	1	m3	3	700,00			2 100,00	2 100,00
						TOTAL DEBOURSES		D =	11 053 250,00
								PU =	433,80
								Arrondi à	400,00

Tableau 17: Sous détail des prix de la fabrication du plâtre.

II.4. Bordereau détail quantitatif et estimatif (B.D.Q.E).**II.4.1. Evaluation des pertes :**

- Au lavage : 35 [%] (en poids) ;
- à la cuisson : 25 [%] ;
- au broyage 13 [%].

D'où, on a la relation suivante :

$$\frac{1}{1 - 0,35} \times \frac{1}{1 - 0,25} \times \frac{1}{1 - 0,13} = 2,3578.$$

Compte tenu de ces pertes 1,00 [Kg] de plâtre nécessite 2,36 [Kg] de gypse.

Par exemple, pour la fabrication d'une plaque de plâtre BA 13 (e = 12,5 [mm] ; l = 1 200 [mm] et L = 2 400 [mm] de dimensionnement) nécessite :

- Matière première : 94 [Kg];
- plâtre : 40[Kg] ;
- savon : 2 [Kg] ;
- amidon : 0,40 [Kg] ;
- carton : 5,76 [m²] ;
- eau : 30 [L] ;
- moule : 1 [U]

II.4.2. B.D.Q.E de ce type de plaque de plâtre.

N°Prix.	Désignations	U	Qté	P.U [Ar]	Montant [Ar]
I	Fabrication du plâtre	Kg	40,00	400,00	16 000,00
II	Ajout de l'amidon	Kg	0,40	1 000,00	400,00
III	Ajout du savon	Kg	2,00	2 000,00	4 000,00
IV	Le déroulage du carton.	m ²	5,76	200,00	1 152,00
V	Le coulage du plâtre.	U	1,00	120,00	120,00
VI	Le découpage.	U	1,00	60,00	60,00
VII	Le séchage.	U	1,00	200,00	200,00
VIII	L'emballage et le stockage.	U	1,00	150,00	150,00
TOTAL HORS TVA.					22 082,00
TVA 20 [%]					4 416,40
TOTAL GENERAL					26 498,40

Tableau 18: B.D.Q.E pour la fabrication d'une plaque de plâtre BA 13 (e = 12,5 [mm] ; l = 1 200 [mm] et L = 2 400 [mm] de dimensionnement).

Arrêté le présent devis à la somme de « vingt-six mille quatre cent quatre-vingt-dix-huit Ariary quarante (Ar26 498,40) ».

Conclusion.

Après désignation de chaque prix, ce dernier remonte à « vingt-six mille quatre cent quatre-vingt-dix-huit Ariary quarante (Ar26 498,40) » pour une plaque de plâtre BA 13 (e = 12,5 [mm] ; l = 1 200 [mm] et L = 2 400 [mm] de dimensionnement).

ANALYSE ET SUGGESTION

Notre travail consiste à l'étude d'un nouveau procédé de fabrication d'une plaque de plâtre à des applications nombreuses et très variées dans le cadre de tout projet de construction du plus simple au plus complexe...

De plus, nous sommes orientés plutôt sur l'étude expérimentale que sur l'exécution directe des travaux. On a pu tirer que :

- Dans l'étude expérimentale d'une plaque de plâtre, il faut considérer la disponibilité des matériaux. En effet les calculs se basent sur les matériaux et/ou matériels existants. La raison pour laquelle, on a réalisé dans notre cas un échantillon de plaque de plâtre de chaque composition recommandée.

Avoir un esprit de méthode :

Plusieurs méthodes manuelles peuvent exister pour un seul calcul. Comme la détermination des éléments majeurs du plâtre, il y a la méthode d'attaque par acide et la méthode de fusion alcaline. Dans notre cas, on a exposé la méthode d'attaque par acide, car c'est la plus simple, la plus pratique et la plus précise de ces deux méthodes.

Cependant, même si ces analyses sont faites, le projet ne pourrait pas être bien mené si on ne maîtrise pas les 3 volets ci-dessous à savoir :

- La difficulté de réalisation.

Par-là, on a pu constater les problèmes y afférents que nous pouvons rencontrer. Ainsi, on devrait pouvoir évoluer a priori le coût financier, matériel temporel, etc. relatif à la fabrication.

- Le rythme de travail.

Bien organiser les tâches pour éviter le gaspillage du temps.

- Amélioration de travail.

Dès fois, les travaux jugés comme négligeables sont les plus importants, à titre d'exemple : Avant toute commande des matériaux, on doit fournir obligatoirement tous les renseignements nécessaires. Il est expérimenté que l'acceptation d'un échantillon ne signifie pas l'acceptation de l'ensemble des matériaux provenant de la même source. Si au cours des

opérations, la qualité des matériaux devient incertaine et ne paraît pas correspondre à celle de l'échantillon qui a été accepté, on peut épingler l'emploi de ces matériaux et faire l'analyse du nouvel échantillon.

CONCLUSION GENERALE

En résumé, la fabrication de plaque de plâtre à partir du gypse d'Antsakoamaro/Ambondromamy nécessite plusieurs facteurs qu'on doit considérer pour atteindre l'objectif de ces applications.

Dans la première partie, nous avons survolé sur l'aperçu général de la pierre à plâtre que l'on appelle « le gypse ou la plâtre ». Il est vrai que ses gisements sont nombreux à Madagascar où l'effet conjugué du feu et de l'eau sur cette pierre nous conduit à une étude sur un produit à base de plâtre. Avec la connaissance de ce produit c'est-à-dire la plaque de plâtre, elle nous a canalisé à confirmer la nécessité d'une nouvelle mode de mise en forme de ce produit à base de plâtre que tout le monde peut utiliser même si sa résistance est moindre par rapport aux autres du fait de son gain de masse ainsi qu'une bonne économie.

Lors d'une étude expérimentale, nous avons pu analyser les différents éléments majeurs de notre pierre à savoir si l'on peut l'utiliser comme un matériau de construction ; sur l'exigence du réalisme, on a effectué des différents tests statiques sur la fiabilité de différents procédés de chaque type de nos produits. On a constaté que soit une plaque produit à base d'anhydrite soluble et du semi-hydrate ou par son homogénéisation et/ou encore soient la mise en forme avant cuisson ou la mise en forme après cuisson, elles sont toutes aptes à ses applications, à ses finitions et sur tout à sa mise en œuvre car on peut négliger la différence entre ces valeurs de contrainte statiques.

Durons l'étude d'impact environnemental et socio-économique, nous avons pu permettre d'examiner point par point les différents détails de l'ACV d'une plaque de plâtre ainsi d'évaluer son prix. Où, finalement, nous avons tiré que le coût d'une plaque de plâtre BA 13 à une dimension $e = 12,5$ [mm] ; $l = 1\ 200$ [mm] et $L = 2\ 400$ [mm] par exemple s'élève à la somme « vingt-six mille quatre cent quatre-vingt-dix-huit Ariary quarante (Ar26 498,40) » et cette innovation rapporte beaucoup aux différentes catégories de personnes dans la création d'emploi.

En tenant compte de tous ses avantages, on peut envisager de les appliquer à une échelle industrielle et de les améliorer suivant les demandes de la technologie et de la technique moderne pour la fabrication de plaque de plâtre. En bref, le plus important dans cette étude, c'est la fabrication proprement dit pour qu'il soit fiable à des différentes applications dans l'exigence du réalisme.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

[1]. Mémoire de fin d'études E.S.P.A :

« Etude de valorisation de gisement de gypse de Toliary »

Par M.RAMANANTSOA Doda.

Département Mine. Promotion – 1993.

[2]. Eyrolles Paris :

« Le plâtre et ses applications traditionnelles et modernes »

Par M.Jean F.

[3]. Mémoire de fin d'études E.S.P.A :

« Essai de fabrication du plâtre à haute résistance. »

Par : Mme.RATSARAHASINA Mavoniaina Dimbimalala.

Département Génie Chimique. Promotion – 2002.

[4]. Ministère des mines à Ampandrianomby :

« Gîte minéraux de Madagascar »

Antananarivo – 1966.

[5]. BRGM :

« Plan directeur d'action pour la mise en valeur des ressources du sol et du sous-sol de Madagascar. »

Novembre – 1985.

[6]. Dossier Technique Unifier.81

[7]. Science des Matériaux de construction.pdf :

Chapitre « Plâtre »

Par Dr. GHOMARI Fouad.

[8]. [http:// www.gypsys.nl](http://www.gypsys.nl)

[9]. [http:// www.placo.fr](http://www.placo.fr)

[10]. Mémoire de fin d'études E.S.P.A :

« Contribution à une caractérisation physico-chimique de craie à Madagascar. »

Département Génie Chimique. Promotion – 2007.

[11]. Se – Paris :

« Processus et installation de cuisson. »

Technologie du ciment, chaux et plâtre.

[12]. Cours 3^{ème} Année :

« Plâtre »

Par: M.RATSIMBAZAFY Hery Mikaela.

Département S.M.M. E.S.P.A – 2010.

[13]. Se – Paris :

« Plâtre »

Technique de l'Ingénieur Matériaux Industriels.

[14]. [http:// www.Wikipédia.org](http://www.Wikipédia.org)

« Conductivité thermique »

[15]. [http:// www.Spdc.Ercc.com](http://www.Spdc.Ercc.com)

« Plâtre »

[16]. <http://www.Google.com>

« Usine de Vajours. »

[17]. Eyrolles Paris :

« Construire un business plan pour la première fois »

Par M.Jean Batiste

Paris – 2007.

[18]. [http:// www.Wikipédia.org](http://www.Wikipédia.org)

« Carton Matériau. »

[19]. **« Guide technique relatif aux installations de stockage des déchets inerte. »**

[20]. Communication personnelle :

« Inertes »

Par M.Desley

Janvier – 2008.

[21]. Cours 4^{ème} Année :

« Marché public »

Par M.RAJOMA Bernard.

Département S.M.M. E.S.P.A – 2011.



ANNEXES.

ANNEXE A.

	Combustibilité	Inflammabilité	Exemples
M0	incombustible		Pierre, brique, ciment, tuiles, plomb, acier, ardoise, céramique, plâtre, béton, verre, laine de roche.
M1	combustible	Non inflammable	Ignifugé
M2	combustible	Difficilement inflammable	Moquette murale, panneau de particules.
M3	combustible	Moyennement inflammable	Bois (y compris lamellé-collé), revêtement sol caoutchouc, moquette polyamide, laine.
M4	combustible	Facilement inflammable	Papier, polypropylène, tapis fibres mélangées.
NC	Non classé	Non classé	

Tableau 19: Classement de la réaction au feu des matériaux selon la norme NF P. 92.507.

ANNEXE B.

Détermination des éléments majeurs du plâtre : Attaque par acide.

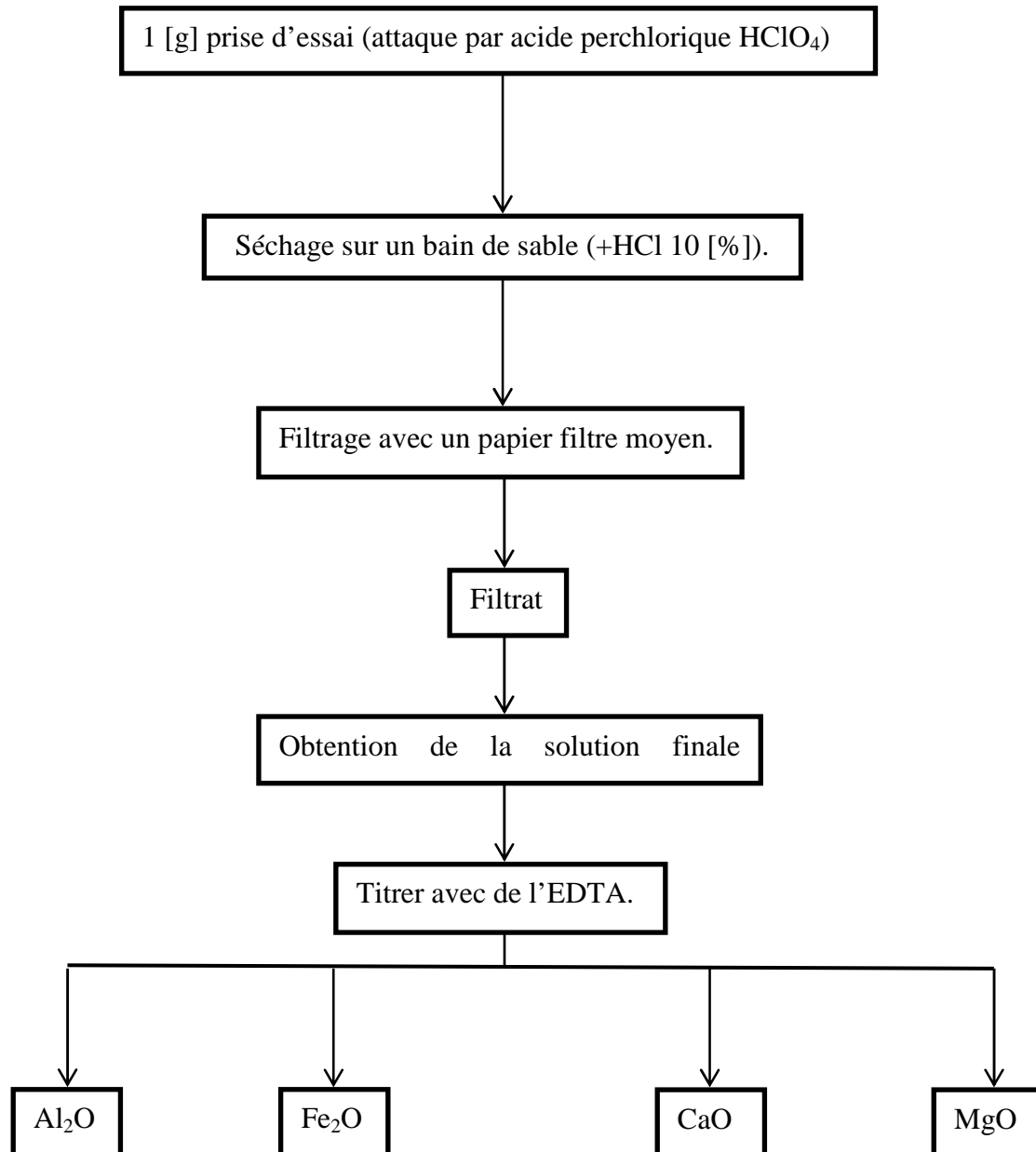


Figure 37: Détermination des éléments majeurs du plâtre.

ANNEXE C.

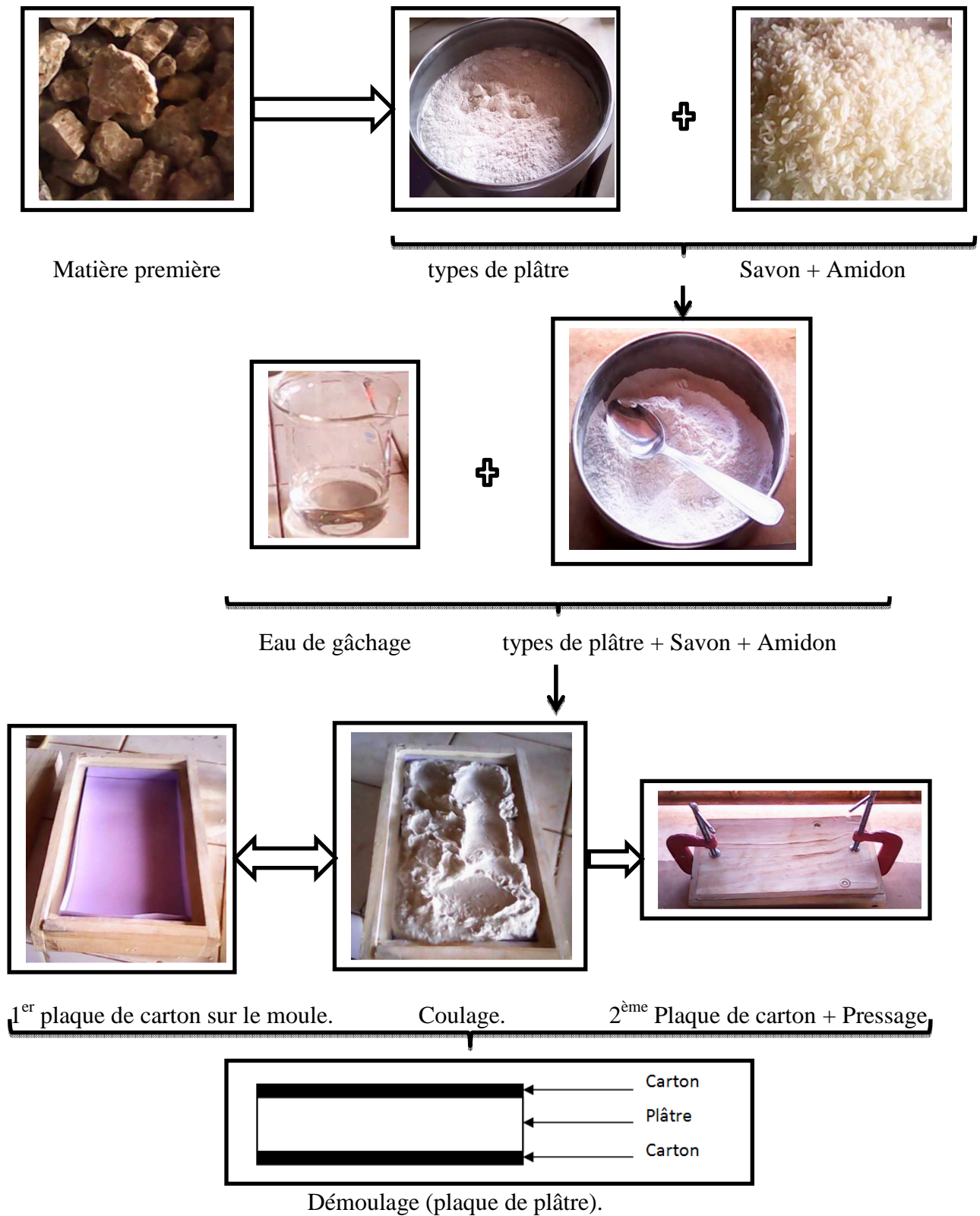


Figure 38: Processus de production d'une plaque de plâtre.

ANNEXE D.

Fabrication d'une plaque de plâtre à l'échelle industrielle.

Ici nous avons réalisé la fabrication et/ou le procédé de la mise en forme d'une plaque de plâtre en trois dimensions (3D). Où sa cuisson est avant sa mise en forme.

Figures

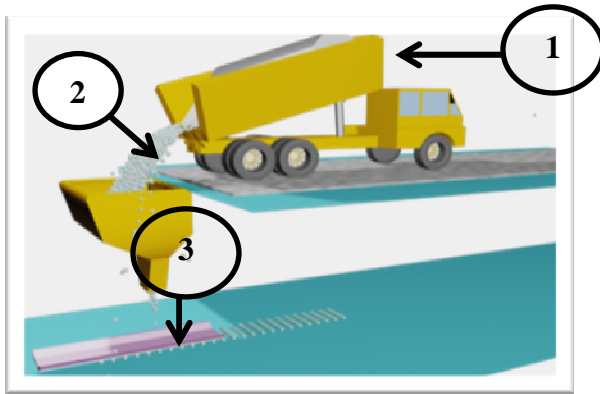


Figure 39: Acheminement du gypse depuis la carrière.

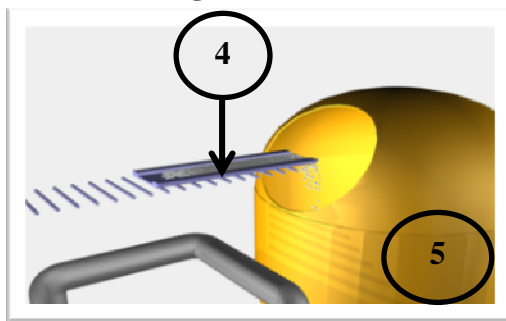


Figure 40: Broyage.

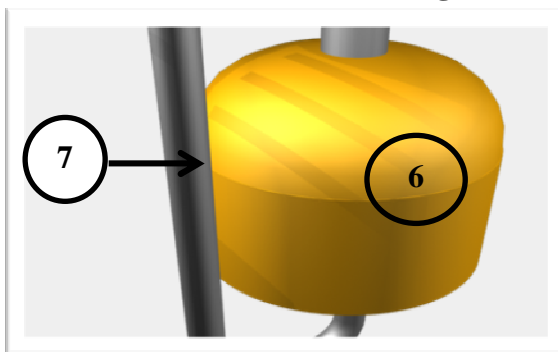
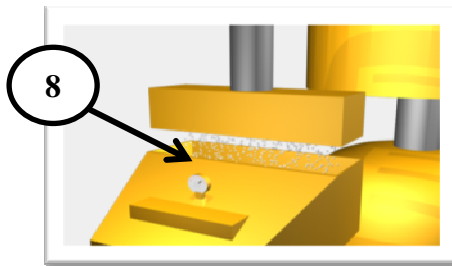


Figure 41: Cuisson.

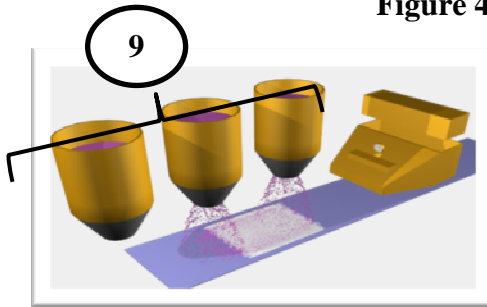
Légendes

1. Acheminement du gypse depuis la carrière à l'aide d'un camion avec un grain de diamètre inférieure à 40 [mm].
2. Etat de la pierre à plâtre après concassage, lavage et séchage.
3. Tapis de transport.
4. Le grain de la pierre est de diamètre inférieure à 40 [mm].
5. Broyeur. [Le placé dans un moulin, où à l'aide d'une vis sans fin, il est broyé et écrasé (comme dans un moulin à café.)]
6. Four. Cuisson à basse température. [Le gypse est transporté à l'aide d'un tapis dans le four.]
7. Tuyau pour le transport du plâtre avec une granulométrie ≤ 100 [μm].

Figures**Légendes**

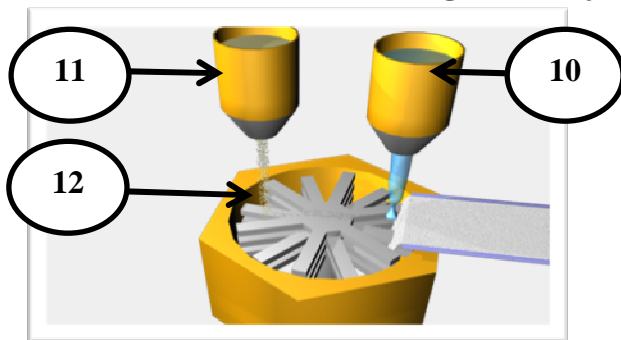
8. Pesée du plâtre.

Figure 42: Dosage du plâtre.



9. Dosage de l'amidon.

Figure 43: Ajout de l'amidon.

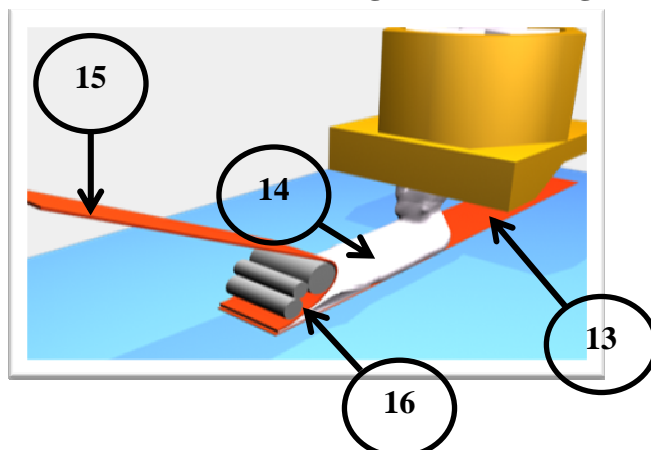


10. Dosage de l'eau.

11. Dosage de la mousse.

12. Malaxer à $T = 70 [^{\circ}\text{C}]$.

Figure 44: Gâchage du plâtre



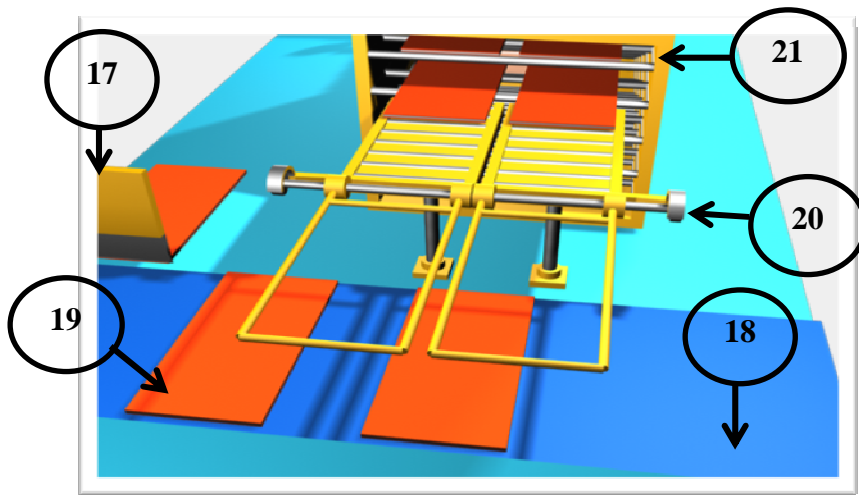
13. Déroulage du premier carton.

14. Plâtre à l'état pâteux.

15. Déroulage du deuxième carton.

16. Système d'étirage pour la mise en forme de la plaque.

Figures**Légendes**



17. Cisailé dans le sens de la largeur.

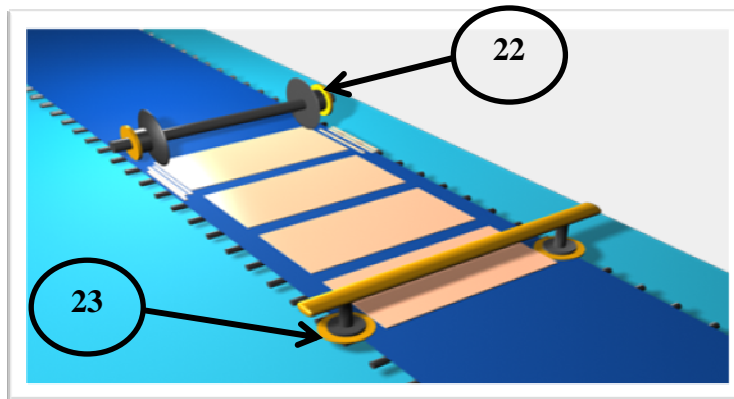
18. Tapis roulant.

19. Plaque à l'état humide.

20. Flippeur [Le flipper dans l'étuve]

21. Séchage de la plaque à 30 [°C].

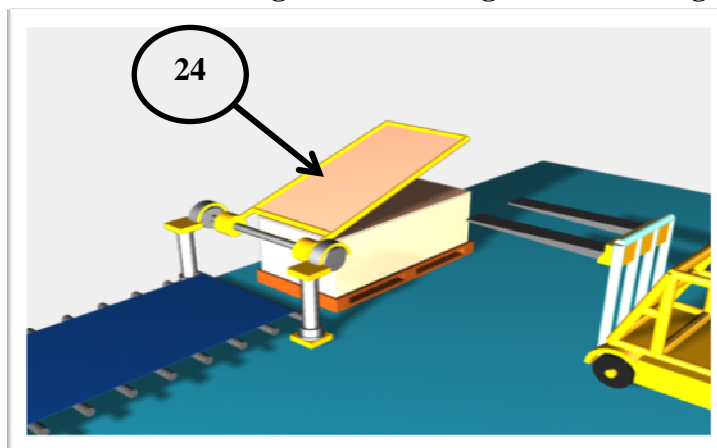
Figure 46: dimensionnement et séchage de la plaque.



22. Resciage des bords, toujours dans le sens de la largeur.

23. Banderolage de ces bords [dans le sens de la largeur].

Figure 47: Resciage et banderolage des bords.



24. Flipper la plaque à l'état sec pour le stockage.

Figure 48: Stockage avec le conditionnement en lots.

ANNEXE E.

Figure 49: Presse de type TESTWELL (Appareil utilisé pour l'essai mécanique.)

ANNEXE F.

Relevé des mesures lors de l'essai de traction pour les diagrammes rationnels entre la zone de plasticité du point A et B.

I- Mise en forme avant cuisson.

Pour l'anhydrite soluble CaSO₄III.

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,5680	0,0013	603,86	0,0013
1,7499	0,0015	674,05	0,0015
2,0000	0,0020	770,77	0,0020
2,1520	0,0027	829,93	0,0027

Tableau 20: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de l'anhydrite soluble CaSO₄III.

Pour le semi-hydraté de variété β .

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,0388	0,0006	399,78	0,0006
1,2000	0,0012	462,09	0,0012
1,3500	0,0019	520,22	0,0019
1,4257	0,0027	549,83	0,0027

Tableau 21: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la variété " β ".

Homogénéisation de l'anhydrite soluble CaSO₄III avec le semi-hydrate de variété β .

Pour la classe " 30[%] CaSO₄III avec 70 [%] du semi-hydrate de variété β ".

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,1956	0,0007	460,17	0,0007
1,4000	0,0012	539,11	0,0012
1,5333	0,0017	590,73	0,0017
1,6409	0,0027	632,82	0,0027

Tableau 22: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "30[%] CaSO₄III -70 [%] β ".

Pour la classe " 40[%] CaSO₄III avec 60 [%] du semi-hydrate de variété β ".

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,2544	0,0009	482,85	0,0008
1,4333	0,0011	551,88	0,0011
1,6000	0,0017	616,43	0,0017
1,7216	0,0027	663,94	0,0027

Tableau 23: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "40[%] CaSO₄III -60 [%]β ".

Pour la classe " 50[%] CaSO₄III avec 50 [%] du semi-hydrate de variété β ".

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,2936	0,0009	497,99	0,0010
1,4767	0,0013	588,70	0,0013
1,6670	0,0018	642,31	0,0018
1,7754	0,0027	684,69	0,0027

Tableau 24: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "50[%] CaSO₄III -50 [%]β ".

Pour la classe " 60[%] CaSO₄III avec 40 [%] du semi-hydrate de variété β ".

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,3524	0,0009	520,62	0,0010
1,6000	0,0015	616,31	0,0015
1,8000	0,0021	693,76	0,0019
1,8561	0,0027	715,81	0,0027

Tableau 25: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "60[%] CaSO₄III -40 [%]β ".

Pour la classe " 70[%] CaSO₄III avec 30 [%] du semi-hydrate de variété β ".

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,4112	0,0010	543,31	0,0010
1,6670	0,0015	642,12	0,0015
1,8332	0,0019	706,42	0,0019
1,9368	0,0027	746,93	0,0027

Tableau 26: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de la classe "70[%] CaSO₄III -30 [%]β ".

II- Mise en forme après cuisson.

Pour l'anhydrite soluble CaSO₄III.

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,5876	0,0013	611,41	0,0013
1,8433	0,0015	710,02	0,0015
2,0833	0,0021	802,95	0,0021
2,1789	0,0027	840,30	0,0027

Tableau 27: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel de l'anhydrite soluble CaSO₄III.

Pour le semi-hydrate de variété " β ".

Force F [Kg]	$\frac{\Delta L}{L_0}$	$\sigma [Kg/m^2]$	ε
1,1172	0,0006	429,95	0,0006
1,2933	0,0010	498,07	0,0010
1,4833	0,0016	571,41	0,0016
1,5333	0,0027	591,32	0,0027

Tableau 28: Relevé des mesures pour le diagramme rationnel du semi-hydrate de variété "β".

TABLE DES MATIÈRES.

Titre	Page
REMERCIEMENT	I – II
SOMMAIRE	III – IV
LISTE DES ABREVIATIONS	V
UNITÉS.....	VI
SYMBOLES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII - IX
LISTE DES FIGURES.....	X-XI
AVANT – PROPOS.....	XII
GLOSSAIRE.....	XIII
INTRODUCTION.....	Page 1 – 2

Première partie : « ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE. »

Chapitre I Généralité sur les gypses.....	3
I.1. Origine.....	3
I.2. Définition.	3
I.3. Types. [1].	3
I.3.1. Le gypse naturel.	3
I.3.1.1. Albâtre.....	3
I.3.1.2. Gypse fibreux.....	3
I.3.1.3. Gypse saccharoïde.	3
I.3.1.4. Ordite.	4
I.3.1.5. Gypse macle fer de lance.	4
I.3.1.6. Gypse terreux.	4
I.3.2. Le gypse de synthèse.....	4
I.4. Caractéristiques.	5

I.4.1.	Caractéristiques physiques. [2].	5
I.4.1.1.	Forme.	5
I.4.1.2.	Couleur.	5
I.4.1.3.	Densité.	5
I.4.1.4.	Dureté.	5
I.4.1.5.	Clivage.	5
I.4.1.6.	Eclat.	5
I.4.1.7.	Minéraux semblable.	5
I.4.1.8.	Magnétisme.	5
I.4.1.9.	Effervescence.	6
I.4.2.	Composition chimique. [3].	6
I.4.3.	Composition minéralogique. [3].	6
I.5.	Utilisation. [4] [5] [6].	6
Chapitre II Présentation des gisements de gypse.		8
II.1.	Formation géologique de gisement de gypse d'Antsakoamaro.	8
II.1.1.	Bassin sédimentaire.	8
II.1.2.	Formation géologique.	8
II.1.2.1.	Bélemnite.	8
II.1.2.2.	Septaria.	8
II.2.	Descriptions.	8
II.2.1.	Réserve. [5].	8
II.2.2.	Variétés de gisement de gypse existant.	10
II.2.3.	Gisement de gypse à Antsakoamaro.	10
II.2.3.1.	Situation géographique.	10
II.2.3.2.	Exploitation. [5].	11
a.	Travaux de découverte.	11
b.	Travaux d'extraction.	11

c. Remblayage.....	11
Chapitre III Fabrication du plâtre.....	12
III.1. Définition.	12
III.2. Processus d'obtention des plâtres.....	12
III.2.1. Extraction de la matière première. [3] [7] [8] [9] [10] [11].	13
III.2.1.1. Extraction du gypse à ciel ouvert.	13
III.2.1.2. Extraction souterraine.....	13
III.2.2. Concassage.	13
III.2.3. Lavage.	13
III.2.4. Séchage.....	13
III.2.5. Cuisson.	13
III.2.5.1. Méthode de cuisson.	13
a. Méthode artisanale.	13
b. Méthode industrielle.....	14
III.2.5.2. Types de fours suivant les méthodes de cuisson.	14
a. Méthode artisanale.	14
➤ Fours culés :	14
➤ Fours verticaux (analogues aux fours à chaux).....	15
➤ Fours boulanger.	15
b. Méthode industrielle.....	15
➤ Pour le chauffage direct.	16
➤ Pour le chauffage indirect.	16
○ Four cyclone.....	16
○ L'autoclave.....	17
III.2.5.3. Type de plâtre suivant la température de cuisson. [7]	18
a. A une température supérieure à 100 [°C].....	18
b. A des températures variées entre 110 et 180 [°C].....	18

c.	A partir de 180 [°C] ou $180 < T < 250$ [°C].....	19
d.	A des températures variées entre 400 et 600 [°C].....	19
e.	Entre 600 et 900 [°C].	19
f.	Au-delà de 1 100 [°C].	19
g.	Au-delà de 1 350 [°C].	19
III.2.5.4.	Type de plâtre suivant leurs variétés et mélanges.	21
a.	Les plâtres ordinaires ou plâtres de construction.	21
➤	Les plâtres fins :	21
➤	Les plâtres gros :	21
➤	Les plâtres à carreau :	21
b.	Les plâtres spéciaux.	21
➤	Le plâtre à mouler :	21
➤	Le plâtre aluné :	21
➤	Les stucs :	21
➤	Le staff :	22
c.	Plâtres composites divers. [12].....	22
➤	Le plâtre hydraulique :	22
➤	Le plâtre à la chaux éteinte non éventée, c'est-à-dire fraîchement éteinte :	22
III.2.6.	Broyage.	22
III.2.7.	Elaboration des produits finis. [13].....	22
III.2.7.1.	Stockage des produits de base de silo.....	22
III.2.7.2.	Blutage.....	22
III.2.7.3.	Ensachage.	22
III.2.7.4.	Stockage en usine.	23
III.3.	Propriétés. [7] [8] [10] [11] [14] [15] [16] [17].	23
III.3.1.	Propriétés principales.	23
III.3.3.1.	Plâtre gros.	23

III.3.3.2. Plâtre fin.	23
III.3.2. Résistance au feu (Ignifuge).....	23
III.3.3. Conductivité thermique.	24
III.3.4. Isolation du bâti (la résistance thermique).	26
III.3.5. Performance acoustique.	26
III.3.6. Propriétés physiques et chimiques.	26
III.3.7. Propriété d'expansion.....	27
III.3.8. Prise et durcissement.	27
III.3.8.1. Phénomène de la prise.	27
III.3.8.2. Durcissement.	28
III.3.9. L'eau de gâchage. [7] [12].	28
III.3.9.1. Convenance.	28
III.3.9.2. Influence.	29
III.4. Utilisations. [9].....	30
Chapitre IV Fabrication des plaques de plâtre.	32
IV.1. Définitions.....	32
IV.1.1. Plaque de plâtre.	32
IV.1.2. Les cartons.[18].....	32
IV.1.2.1. Intérêt sur les cartons.....	33
a. Avantage :	33
b. Inconvénients :	33
IV.2. Procédé de fabrication.....	33
IV.2.1. Chaîne de production.	33
IV.2.2. Dans l'usine.....	34
IV.2.2.1. Fabrication de la plaque.	34
IV.2.2.2. Dimensionnements standard d'une plaque de plâtre.....	35
IV.3. Finitions.....	37

IV.4. Utilisations.	37
IV.4.1. Mise en œuvre.	37
<u>Deuxième partie : « ÉTUDES EXPÉRIMENTALES. »</u>	
Chapitre I Méthodes physique et mécanique du gypse.	41
I.1. Caractéristique du gypse.	41
I.1.1. Détermination de l'humidité.	41
I.1.1.1. But de l'essai.	41
I.1.1.2. Mode opératoire.	41
I.1.2. Détermination de la teneur en eau.	41
I.1.2.1. But de l'essai.	41
I.1.2.2. Principe de l'essai.	41
I.1.2.3. Mode opératoire.	42
I.1.3. Déterminations des éléments majeurs.	42
I.1.3.1. Préparation du filtrat.	42
I.1.3.2. Détermination en oxyde de fer.	43
I.1.3.3. Analyse de la teneur en alumine.	43
I.1.3.4. Analyse de la teneur en oxyde de calcium.	44
I.1.3.5. Analyse de teneur en magnésium.	44
I.1.3.6. Détermination de teneur en CaSO_4	45
Chapitre II La fabrication jusqu'à l'obtention.	47
II.1. Processus de fabrication de plaque de plâtre.	47
II.2. Fabrication au laboratoire.	48
II.2.1. Cuisson avant la mise en forme.	48
II.2.1.1. Préparation de la matière première.	48
II.2.1.2. Chaîne de fabrication.	48
a. Plaque de plâtre avec le surcuit ou semi-hydrate.	48
➤ Procédé de la mise en forme :	49

b.	L'homogénéisation des deux variétés.	49
➤	Procédé de la mise en forme.	49
II.2.2.	Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue avant la mise en forme.	49
II.2.2.1.	Plaque de plâtre avec l'anhydrite soluble CaSO_4 III ou avec le semi-hydrate de variété β	49
II.2.2.2.	Pour l'homogénéisation des deux types de plâtre.	50
II.2.3.	Cuisson après la mise en forme.	50
II.2.3.1.	Préparation de la matière première.	50
II.2.3.2.	Chaîne de fabrication.	50
II.2.3.3.	Classification de la plaque de plâtre où la cuisson s'effectue après la mise en forme.	51
II.3.	Caractérisation mécanique de la plaque.	52
II.3.1.	Rappelle sur la théorie des plaques.	52
II.3.2.	Homogénéisation de la plaque.	53
II.3.3.	Objectif de l'étude.	53
II.3.4.	Essai de flexion.	54
II.3.4.1.	Définition.	54
II.3.4.2.	But.	54
II.3.4.3.	Mode opératoire.	54
II.3.4.4.	Théories des calculs.	55
II.3.5.	Essai de traction.	56
II.3.5.1.	But.	56
II.3.5.2.	Mode opératoire.	56
II.3.5.3.	Définition et dimensionnement de l'éprouvette.	56
II.3.5.4.	Détermination du module d'Young.	57
II.3.5.5.	Diagramme rationnel.	57
Chapitre III	Résultats expérimentaux et interprétations.	58

III.1. Caractéristiques du gypse.....	58
III.1.1. Détermination de l'humidité.	58
III.1.2. Détermination de l'eau de constitution.	58
III.1.3. Déterminations des éléments majeurs.	58
III.1.3.1. Détermination en oxyde de fer.	58
III.1.3.2. Analyse de la teneur en alumine.	59
III.1.3.3. Analyse de la teneur en oxyde de calcium.	59
III.1.3.4. Analyse de teneur en magnésium.	59
III.1.3.5. Détermination de la teneur en CaSO_4	60
III.1.4. Récapitulations.	61
III.2. Essais mécaniques sur les plaques de plâtre.....	62
III.2.1. Essais de flexion.....	62
III.2.1.1. Mesures enregistrées lors de l'essai de flexion trois points.....	62
III.2.1.2. Résultats d'après les théories des calculs.	63
III.2.1.3. Courbes de flexion.....	64
III.2.2. Essais de traction.....	65
III.2.2.1. Définition et dimensionnement de l'éprouvette.	65
a. Les courbes tracées lors de l'essai sont de la forme : $\mathbf{FN = fe\%}$	66
b. Identification des caractéristiques mécaniques de la plaque de plâtre :.....	67
III.2.2.2. Détermination du module d'Young.....	69
III.2.2.3. Diagramme rationnel.	69
III.2.2.4. Mécanisme de rupture.	70

Troisième partie :

« ÉTUDES D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIO-ÉCONOMIQUE. »

Chapitre I L'étude d'impact sur l'environnement.....	73
I.1. Problèmes de l'environnement.....	74
I.1.1. L'épuisement des ressources naturelles.	74

I.1.1.1.	Consommation des ressources naturelles.....	74
I.1.1.2.	Les espaces naturels transformés.	75
I.1.2.	La pollution.	75
I.1.2.1.	Emission des éléments néfastes dans l'environnement.....	75
➤	Le dioxyde de carbone fossile CO ₂ :.....	75
➤	Les poussières :	75
➤	Les oxydes d'azote NO _x :	76
➤	Les oxydes de soufre SO _x :	76
➤	Métaux et hydrocarbures :	76
I.1.3.	Description des principales étapes de cycle de vie d'une plaque de plâtre.....	76
I.1.3.1.	Procédé de fabrication.....	77
I.1.3.2.	Description du système de l'analyse de cycle de vie.....	78
a.	Les principales étapes incluses.....	78
➤	Production.	78
➤	Distribution.	78
➤	Fin de vie.....	78
b.	Les principales étapes exclues.....	78
I.1.3.3.	Principales hypothèses.	79
a.	Production.	79
b.	Mise en œuvre.	79
c.	Distribution.....	79
d.	Utilisation.	79
e.	Fin de vie. [19]	79
Chapitre II Etude socio-économique.....		82
II.1.	Devis descriptif.	82
II.1.1.	Extraction de la matière première.	82
II.1.1.1.	Exploitation de la ressource.	82

II.1.1.2. Remblaiement.	82
II.1.2. Fabrication du plâtre.....	82
II.1.3. Fabrication de la plaque de plâtre.	82
II.1.4. Le transport.	83
II.1.5. Mise en œuvre.	83
II.2. Calcul de coefficient de majoration de déboursés « K ».	84
II.3. Types de sous détail de prix.	85
II.3.1. Sous détail des prix d'extraction de gypse.	85
II.3.2. Sous détail des prix de la fabrication du plâtre.	86
II.4. Bordereau détail quantitatif et estimatif (B.D.Q.E).	87
II.4.1. Evaluation des pertes :.....	87
II.4.2. B.D.Q.E de ce type de plaque de plâtre.	88
ANALYSE ET SUGGESTION.	90-91
CONCLUSION GÉNÉRALE	92
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	93-95
ANNEXES	A-1 – A-10
TABLE DES MATIERES.	

Nom : RABEARINTSOA.

Prénoms : Solomamapionona Mamitiana.

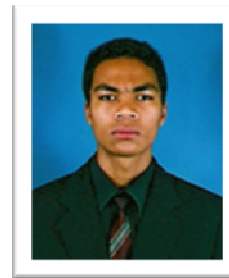
Téléphone : +261 33 07 773 53.

Nombre de page : 96.

Nombre de figure : 38.

Nombre de tableaux : 28.

Nombre de courbe : 09.



Titre : « FABRICATION DE PLAQUE DE PLÂTRE A PARTIR DU GYPSE
D'ANTSAKOAMARO/AMBONDROMAMY »

RESUMÉ :

- Ce mémoire montre l'aperçu général de la pierre à plâtre, conduit à confirmer la nécessité de la fabrication d'un produit à base de plâtre, étant donné que ce produit joue un rôle important dans le développement futur de l'habitat en première partie.
- La deuxième partie est surtout axée sur des expériences physiques et chimiques de la matière et/ou du produit comme un matériau composite formé par l'homogénéisation du carton-plâtre-carton.
- La troisième partie étudie d'une part l'impact environnemental et d'autre part l'évaluation du coût d'une plaque de plâtre, qui a donné pour la fabrication un prix de « vingt-six mille quatre cent quatre-vingt-dix-huit Ariary quarante (Ar26 498,40) » pour une plaque de plâtre BA13 avec une dimension de $12,5 \times 1\,200 \times 2\,400$ [mm³].

Mots clés : Plaque de plâtre, Cloison sèche, Carton, Plâtre, Gypse, Variété de plâtre, ...

Rubrique: Matériaux.

Title: « THE PRODUCTION ON PLASTERBOARD MADE OF GYPSUM FROM
ANTSAKOAMARO/AMBONDROMAMY »

ABSTRACT:

- This memoir is a general overview of plaster confirming the need to manufacture a plaster-based-product, as this product will play an important role in future housing projects.
- The second part highlights the physical and chemical properties of the material and/or those of a composite product made up of homogenised cardboard-plaster-cardboard.
- The third part looks on the one hand at the environmental impact of the product, and on the other at the cost of manufacturing a sheet of BA 13 plasterboard ($12,5 \times 1\,200 \times 2\,400$ [mm³] which is twenty-six thousand four hundred and ninety-eight point four Ariary..

Keywords: Plasterboard, Partition dries, Cardboard, Plaster, Gypsum, Variety of plaster,...

Column: Materials.

Directeur de mémoire : Docteur RANDRIANARIVELO Frédéric.

Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
BP.1 500
Antananarivo 101.