



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE CHIMIQUE



*Polytechnique,
Premier Partenaire
des Professionnels*

Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'
INGENIEUR EN GENIE CHIMIQUE



**ETUDE SUR LA FABRICATION D'UN
MATERIAU CERAMIQUE POUR ISOLATION
ELECTRIQUE: CAS D'UN DOMINO**

Présenté par : HERIMANITRA Myriame



Soutenu le 08 Juin 2011

Promotion 2010



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT GENIE CHIMIQUE



*Polytechnique,
Premier Partenaire
des Professionnels*

Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme d'
INGENIEUR EN GENIE CHIMIQUE



**ETUDE SUR LA FABRICATION D'UN
MATERIAU CERAMIQUE POUR ISOLATION
ELECTRIQUE: CAS D'UN DOMINO**

Présenté par : HERIMANITRA Myriame

Soutenu le 08 Juin 2011

Membres du Jury :

Président : Monsieur ANDRIANARY Philippe, Professeur et Directeur de l'E.S.P.A

Rapporteur : Monsieur RABIBISOA Daniel, Maître de conférences à l'E.S.P.A.

Examineurs : Monsieur RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Maître de conférences et Chef
de Département Génie Chimique à l'E.S.P.A.

Monsieur RAKOTOMAMONJY Pierre, Maître de conférences à l'E.S.P.A.

Monsieur RAKOTONDRAMANANA Samuel, Maître de conférences à l'E.S.P.A.

Promotion 2010

SOMMAIRE

Introduction

PREMIERE PARTIE : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I : Généralités sur les céramiques

Chapitre II : Les procédés de fabrication céramique

Chapitre III : Les matériaux céramiques utilisés en isolation électrique

DEUXIEME PARTIE : ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre IV : Caractérisations des matières premières

Chapitre V : Etudes de fabrication de matériau isolant électrique en céramique

Chapitre VI : Travaux de réalisation

TROISIEME PARTIE : ETUDE ECONOMIQUE DE L'UNITE DE PRODUCTION

Chapitre VII : Raison du choix du projet et caractéristiques de l'unité

Chapitre VIII : Etude financière de l'unité

Conclusion générale

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

*Recommande ton sort à l'Eternel, Mets en
lui ta confiance, et il agira.*

Psaume.37 :5

Remerciements

Tout d'abord, les grands travaux qui font l'objet du présent mémoire n'ont pu être menés à bien primordialement sans la présence de l'amour de Dieu, de sa bonté et de sa résolution irréprochable.

Ensuite, c'est avec reconnaissance et avec très grand plaisir que j'adresse mes vifs remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire, en particulier :

- ✿ Monsieur ANDRIANARY Philippe, Directeur de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo qui n'a pas ménagé son temps pour promouvoir l'image de cette prestigieuse Ecole d'Ingénieur ;

- ✿ Monsieur RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, Chef du Département Génie Chimique, qui, malgré ses lourdes responsabilités, n'a pas cessé de nous prodiguer des conseils visant à nous garantir une carrière professionnelle honorable ;

- ✿ Monsieur RAKOTOMAMONJY Pierre, Maître de conférences à l'E.S.P.A., qui a accepté avec amabilité comme membre du Jury et de vouloir juger avec efficacité mon travail.

- ✿ Monsieur RAKOTONDRAMANANA Samuel, Maître de conférences à l'E.S.P.A., qui malgré ses lourdes tâches a bien voulu accepter de juger ce travail.

- ✿ Monsieur RABIBISOA Daniel, Maître de conférences à l'E.S.P.A., encadreur et rapporteur de ce travail pour son aimable soutien et ses multiples conseils durant la réalisation de ce mémoire ;

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants et les équipes du Laboratoire du Département Génie Chimique en nous transférant leur connaissance pour compléter notre formation.

Enfin, Je n'oublie pas de remercier ici, tous ceux qui ont apporté leur aide précieuse pour la réalisation de cet ouvrage à savoir mes parents, ma famille et mes amis.

Merci à vous tous. Que DIEU vous bénisse !

LISTE DES ACRONYMES

CA :	Chiffre d’Affaire
CF :	Charge fixe
CO :	Cout Opératoire
CV :	Charge variable
EBE :	Excédent brut d’exploitation
E.S.P.A. :	Ecole Supérieure Polytechnique d’Antananarivo
FRI :	Fond de roulement interne
PK :	Point Kilométrique
PROCHIMAD :	Société des Produits Chimiques de Madagascar
RN :	Route Nationale

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Composition chimique de la cendre de la balle de riz.....	12
Tableau 2 : Les différents types de feldspath.....	14
Tableau 3 : Les compositions rationnelles des diverses pâtes	17
Tableau 4 : Les caractéristiques générales des différentes pâtes céramiques	18
Tableau 5 : Indice de résistance au cheminement sous basse tension.....	34
Tableau 6 : Analyse chimique du kaolin d'Ambatomirahavavy	38
Tableau 7 : Analyse chimique de la cendre de la balle de riz.....	39
Tableau 8 : Analyse chimique du feldspath.....	40
Tableau 9 : Analyse granulométrique du kaolin d'Ambatomirahavavy	41
Tableau 10 : Analyse granulométrique de la cendre de la balle de riz.....	42
Tableau 11 : Analyse granulométrique du feldspath	43
Tableau 12 : Composition des échantillons.....	49
Tableau 13 : Valeurs de masse et de dimensions des produits avant cuisson.	50
Tableau 14 : Valeurs des masses et des dimensions des produits après cuisson 600 °C.....	51
Tableau 15 : Valeurs des masses et des dimensions des produits après cuisson 900°C.....	52
Tableau 16 : Valeurs des masses et des dimensions des produits après cuisson 1150 °C.....	53
Tableau 17 : Détail technologique de la presse	59
Tableau 18 : Coût de construction	66
Tableau 19 : Les coûts des matériels de production.....	66
Tableau 20 : Divers matériels	67
Tableau 21 : Qualification et charge du personnel.....	68
Tableau 22 : Le coût des matières premières	68
Tableau 23 : Le coût des pièces à l'intérieur des dominos.....	69
Tableau 24 : Montant des charges fixes	70

Tableau 25 : Chiffre d'affaire annuel.....	71
Tableau 26 : Marge sur coût variable	71
Tableau 27 : Investissement global	73
Tableau 28 : Résultat prévisionnel de la première année du fonctionnement	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme des processus de fabrication céramique	15
Figure 2 : La courbe représentative de la cuisson	25
Figure 3 : Diagramme de GILCHREST et KILINEFELTER.....	29
Figure 4 : Kaolin (échantillon dans le gisement d'Ambatomirahavavy).....	37
Figure 5 : Courbe d'analyse granulométrique du kaolin.	41
Figure 6 : Courbe d'analyse granulométrique de la balle de riz.....	43
Figure 7 : Courbe d'analyse granulométrique du feldspath.	44
Figure 8 : Le moule utilisé.....	46
Figure 9 : Courbe de cuisson 600°C.....	47
Figure 10 : Courbe de cuisson 900°C.....	48
Figure 12 : Cliché des briquettes après cuisson 1150°C.....	54
Figure 13 : Echantillon avec du plomb fondu en dessus	54
Figure 14 : Echantillon après test au plomb fondu.....	55
Figure 15 : Schémas des différentes pièces du moule utilisé pour la fabrication des dominos..	57
Figure 16 : Schémas de la presse	60
Figure 17 : Presse à volant.....	61
Figure 18 : Courbe de cuisson des produits	61
Figure 19 : Cliché des produits.....	62

NOTATIONS ET UNITES

Ar	: Ariary
Å	: Angstrom
µm	: Micromètre
°C	: Degré Celsius
kg	: Kilogramme
cm²	: Centimètre carrée
h	: Heure
kcal/kg°C	: Kilocalorie par Kilogramme par Degré Celsius (Unité de la chaleur massique)
Mpa	: Méga Pascal
Ω.cm.	: Ohm centimètre (Résistivité)
F	: Farad (Capacité)
F/m	: Farad par mètre (Permittivité)
Hz	: Hertz (Fréquence)
W/m°C	: Watt par mètre par Degré Celsius (Unité de la conductivité thermique)
J/kg°C	: Joule par Kilogramme par Degré Celsius (Unité de la chaleur spécifique)

Introduction

L'industrie électrique a commencé à utiliser les céramiques il y a un siècle environ, dès que s'est manifesté le besoin de matières isolantes denses, imperméables et à bonne résistance mécanique. Puis, les diverses branches de l'industrie électrique évoluant avec les progrès de la science et de la technique, différentes classes de céramiques électrotechniques ont été mises au point, chacune de ces classes présentant des caractéristiques propres répondant à un type d'application.

La céramique, composée de matières premières essentiellement minérales, est l'art de façonner l'argile et d'en fixer les formes par la cuisson. Elle trouve des applications intéressantes dans notre vie courante : sanitaires (lavabos, éviers,...), briques, tuiles, vaisselle d'usage ou de luxe, objets d'ornementation et électronique. Concernant plus particulièrement les céramiques utilisées pour isolation électrique, nous avons remarqué actuellement la rareté de ces matériaux sur les marchés alors que leur utilisation est irremplaçable.

En plus, elle possède un avantage très remarquable par rapport à d'autres matériaux concurrents : elle résiste à des températures très élevées, là où la plupart des isolants perdent leur résistance. On a constaté ce cas lors de l'utilisation des dominos en plastique pour la jonction des fils électriques avec la résistance des fours ou celle des réchauds électriques du fait de son défaut à se fondre très facilement. Conscient de ce problème, et d'autre part soucieux de valoriser les matières premières pour céramique existant à Madagascar, nous nous sommes proposé d'étudier la fabrication d'un matériau isolant électrique à base de kaolin, de silice de balle de riz et du feldspath.

C'est ainsi que nous avons donc choisi le présent mémoire de fin d'études pour l'obtention d'un diplôme d'Ingénieur le thème intitulé : « ETUDE SUR LA FABRICATION D'UN MATERIAU CERAMIQUE POUR ISOLATION ELECTRIQUE : CAS D'UN DOMINO ».

Notre travail se divise en trois grandes parties :

Dans la première partie, nous évoquerons les rappels bibliographiques sur les céramiques, leurs procédés de fabrication et leurs propriétés en tant qu'isolant électrique.

La deuxième partie concerne l'étude expérimentale, où nous traiterons la caractérisation des matières premières, l'essai de fabrication, ainsi que les travaux de réalisation.

Enfin, la troisième partie est consacrée à l'étude économique d'une unité de production.



PREMIERE PARTIE :

ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES

Chapitre I : Généralités sur les céramiques

I. DEFINITION DE LA CERAMIQUE [6]

La céramique est l'art de fabriquer les poteries et autres objets de terre cuite, de faïence et de porcelaine fondé sur la propriété des argiles de donner avec l'eau une pâte plastique, facile à façonner, devenant dure, solide et inaltérable après cuisson.

De manière beaucoup plus détaillée, on peut diviser la céramique en deux (2) catégories :

- Les produits céramiques à pâtes poreuses, ils sont perméables aux gaz, aux liquides, aux graisses. Ils comprennent : les produits en terre cuite comme les briques, les tuiles, les poteries, les produits réfractaires.
- Les produits céramiques à pâtes semi imperméables et à pâtes imperméables, obtenus par vitrification à haute température. Ils comprennent : les grés ordinaires ou naturels, grés fins ou composés, les vitreux dont les pâtes de textures vitrifiées, blanches ou colorées, opaques, pratiquement imperméables, recouvertes ou non par un vernis ; les porcelaines divisées en porcelaines techniques spéciales, porcelaines tendres et porcelaines dures, dont les pâtes de texture fortement vitrifiée, très généralement blanches, translucides sous faibles épaisseurs.

II. PROPRIETES GENERALES DES CERAMIQUES [10]

II.1. ASPECT

Les céramiques présentent des formes cristallines opaques et des formes vitreuses amorphes plus ou moins translucides.

II.2. PROPRIETES MECANIQUES

Les objets en céramique sont habituellement assez peu denses, très durs et dotés d'une bonne résistance mécanique, même à des températures très élevées.

II.3. PROPRIETES THERMIQUES

Les céramiques gardent leur solidité même à des températures très élevées, résistent aux chocs thermiques. L'une des raisons de cette résistance réside dans leur faible coefficient de dilatation, très inférieur à celui de la plupart des métaux et alliages. La conductivité thermique est généralement faible, d'où leur utilisation comme isolants thermiques.

II.4. PROPRIETES ELECTRIQUES

Les céramiques sont d'excellents isolants électriques et peuvent servir de support à des éléments de circuits électriques. Ce sont elles, en particulier, qui constituent les isolateurs des lignes à haute tension. Dans certaines conditions, comme des températures extrêmement basses, certaines céramiques deviennent des supraconducteurs.

II.5. PROPRIETES CHIMIQUES

Les céramiques présentent généralement une très grande inertie chimique et résistent bien aux attaques de substances agressives, à l'oxydation et aux agressions climatiques. Ce caractère de matériaux neutres et inertes fait qu'elle ne présente pas de danger pour l'homme et pour la nature. On les utilise d'ailleurs largement pour les équipements sanitaires, médicaux ou alimentaires.

III. LES PRINCIPALES MATIERES PREMIERES COMPOSANT LES PRODUITS CERAMIQUES [2]-[4]-[11]

Les matières premières utilisées en quantité importante dans la fabrication des céramiques peuvent être classées en trois grandes familles.

III.1. LES PLASTIFIANTS

Ils sont représentés par les deux grandes familles des argiles et des kaolins.

1. Les argiles

Les argiles sont des matières premières possédant la propriété de plasticité. Elles proviennent de la décomposition chimique de roches telles que des granites. Elles sont constituées de très fines particules d'aluminosilicates hydratés qui deviennent plastiques une fois mélangés avec de l'eau.

a- La formation des argiles

Soumises aux intempéries et notamment à l'action de l'eau et du gaz carbonique, les roches silicatées s'altèrent et se désintègrent. Les différents éléments sont ensuite pris en charge (sous forme de vases et de limons), et transportés par les cours d'eau jusqu'aux zones de sédimentation. La transformation effective des vases en argiles se fait par compaction, déperdition de l'eau de constitution et augmentation de la densité : c'est la diagenèse. Avec l'augmentation de la pression et de la température, les argiles peuvent être transformées en schistes argileux. Enfin, l'enfouissement vers les grandes profondeurs amène la disparition des argiles en feldspaths et en silicates.

b- Propriétés des argiles

Les argiles ont les mêmes propriétés fondamentales que le kaolin, c'est-à-dire la plasticité, le retrait, la transformation et durcissement par la cuisson.

En général, les argiles sont nettement plus plastiques que les kaolins. Ceci provient surtout du broyage très poussé que l'entraînement par les eaux a pu faire subir au kaolin. La plasticité des argiles a pu être augmentée également par la présence de matières organiques et surtout très plastiques, telles que des halloysites, par exemple.

c- Rôle des argiles

Les argiles ont un double rôle :

- Elles apportent à la composition céramique les éléments Al, Si, et O (et accessoirement K, Fe, Ca, Ti, etc.).
- Elles constituent, par association avec l'eau, une pâte plastique, facile à mettre en forme, présentant une cohésion appréciable à l'état humide et après séchage.

Il existe des matières plastiques minérales, de nature et aspect très voisins de ceux des argiles avec lesquelles elles sont souvent mélangées et confondues.

Nous citons le plus souvent parmi ces matières :

Talc

Dans ce groupe, chaque feuillet est constitué par deux couches tétraédriques et une couche octaédrique ; la distance interfeuillet est de 9,68 Å°.

Le minéral magnésien type est le talc, de formule $Mg_3(SiO_{10})(OH)_2$; il est d'origine hydrothermale, et se présente en masse lamellaire hexagonale feuilletée non élastique, fibreuse ou compacte, d'un blanc plus ou moins jaunâtre.

En céramique, le talc est utilisé dans la composition des pâtes pour porcelaines électriques et porcelaines à feu.

Illites

Dans ce groupe, chaque feuillet est constitué par deux couches tétraédriques et une couche octaédrique ; et les feuillets sont liés les uns aux autres par des atomes de potassium, l'espacement interfeuillet est de 10 Å°. On distingue un grand nombre d'espèces dans ce groupe, mais celles les plus employées en céramique sont :

- Les illites alumineuses de formule chimique $[Al_2][Si(4-x)Al_x]O_{10}(OH)_2Kx$
- Les illites magnésiennes de formule chimique $[Fe^{++}Mg]_3[Si(4x)Al_x](O_{10}(OH)_2Kx$

Les illites sont extrêmement abondantes dans la nature, on les trouve dans les argiles d'origine lacustre, glaciaire ou marine et dans les argiles des loess. Elles forment la majeure partie des terres à briques, des argiles à poterie commune et des argiles à grès.

Montmorillonites ou smectites

Les montmorillonites ont comme formule générale :

$[Al(2-x)Mgx][Si(4-y)Al_y](O_{10}(OH)_2(CE)^{x+y+}nH_2O$ où CE symbolise les cations échangeables : $Na^+, K^+, Ca^{++}, Mg^{++}$.

Les montmorillonites se présentent en masses compactes, blanches, jaunâtres ou rosâtres, d'aspect corné, à lustre gras. On en trouve de petits pourcentages dans de nombreuses argiles. Elles proviennent de l'altération en milieu alcalin de minéraux ferromagnésiens, feldspaths calciques, verres volcaniques. Elles sont utilisées en céramique par leur pouvoir liant et plastifiant.

2. Les Kaolins

Les kaolins sont chimiquement plus purs. Ils sont essentiellement composés de la minérale kaolinite de composition chimique $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, qui est l'élément fondamental de la plupart des argiles utilisées en céramique.

a- Formation du kaolin

Les kaolins ont été formés par la décomposition et la transformation très lente de feldspaths, ou de roches contenant des feldspaths telles que, par exemples, les granites. On les trouve, sur le lieu même de leur formation, mélangés à des débris des roches qui leur ont donné naissance.

b- Propriétés du kaolin

➤ **Propriétés physiques :**

- Clivage parfait, lamelles de clivage flexibles mais non plastique ;
- Onctueux et plastique en masse, happe la langue ;
- Transparent en lamelles, opaque en masses ;
- Couleur : blanche, pourtant il peut être jaunâtre, rougeâtre, grisâtre selon la teneur des impuretés souvent constituées par des micas, quartz et des hydroxydes de fer.
- Poussière : blanche, parfois teinté.
- Densité : 2,4 à 2,63.
- Indice de réfraction : 1,557 à 1,566.

Le kaolin résiste à haute température (au environ de 1750°C) sans se ramollir ni se déformer, donc il est classé dans le groupe des matériaux réfractaires.

➤ **Les propriétés mécaniques :**

Les feuillets constituant le minéral tendent à s'orienter en couches parallèles pour obtenir un plus grand nombre d'atome en position rapprochée. Ces feuillets peuvent glisser les uns sur les autres, ce qui confère au minéral sa propriété plastique. En effet :

EAU + KAOLIN → Pâte plastique.

En séchant, il se perd sa plasticité et devient une masse compacte, en outre

Kaolin sec + eau → pâte plastique.

➤ **Propriétés chimiques :**

- ✓ L'eau dans le kaolin s'évapore à la température 350°C
- ✓ Il est infusible au chalumeau
- ✓ A 500°C, il y a destruction du réseau cristallin en donnant un mélange d' Al_2O_3 et de SiO_2 amorphe. Ces deux éléments se combinent et se recristallisent à 900°C, d'abord en alumine gamma et en tridymite, puis à haute température en sillimanite et mullite.

➤ **Propriétés colloïdales.**

Le kaolin (kaolinite) appartient à la famille d'argile. Il offre une structure finement cristalline et présente des propriétés particulières dues à des charges électriques négatives libres sur la bordure des feuillets souvent appelées : « propriétés colloïdales ».

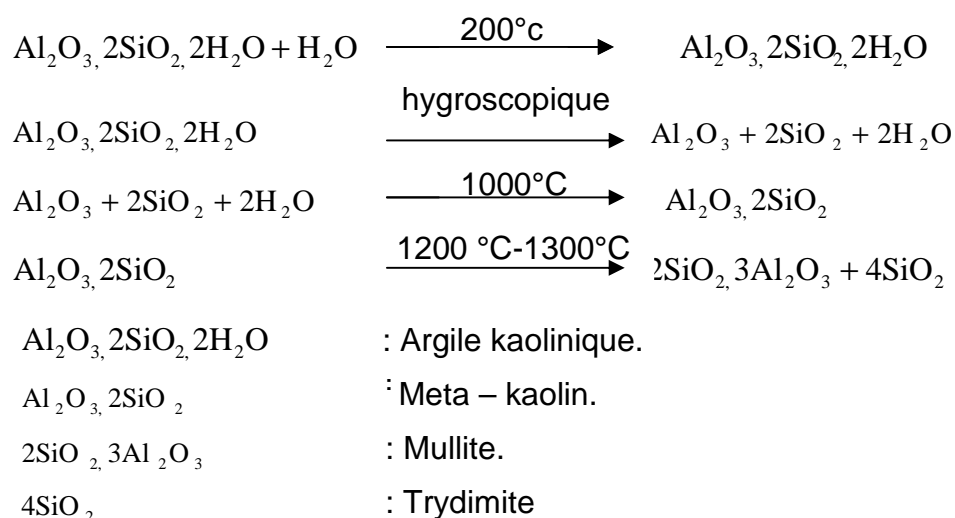
c- Action de la chaleur sur la kaolinite

L'étude de l'action de la chaleur sur la variété d'argile est très importante dans le sens de modification de la constitution de la kaolinite en fonction de la température. Il s'agit de transformations cristallines successives agissant sur le volume de la matière. Il est alors nécessaire d'étudier tous ces phénomènes qui sont à la base de la fabrication des produits réfractaires.

Les transformations du kaolin avec la température :

- **110°C** : Départ de l'eau hygroscopique amenant un resserrement des particules et provoquant un retrait appelé retrait de séchage (notons que le kaolin bien séché n'admet pas beaucoup de retraits).
- **450°C – 600°C** : Départ de l'eau de constitution de la kaolinite. Ce départ est brusque et provoque un retrait rapide. La distillation et la combustion existent pour le kaolin contenant des matières organiques vers 300°C.
- **600°C** : Légère inflexion dans la courbe de retrait. Ce dernier est très lent et permet la décomposition du calcaire au cas où il est présent.
- **600°C – 900°C** : Décomposition en silice et en alumine Gama. Tel est le cas de la transformation en leverrierite : $2 \text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$. On admet généralement qu'il y ait une dissociation en SiO_2 et Al_2O_3 ainsi que la formation d'un silicate anhydre : $\text{SiO}_2 \text{Al}_2\text{O}_3$. C'est le méta – kaolin.
- **800°C** : Retrait important avec un point d'inflexion vers 930°C, mais entre 950°C et 1000°C, le retrait est faible.
- **A partir de 900°C, 1000°C, 1200°C** : Formation d'un nouveau silicate : $2\text{SiO}_2, 3 \text{Al}_2\text{O}_3$. C'est la mullite.

Transformation de la mullite suivant la réaction :



III.2. LES DEGRAISSANTS

Les dégraissants servent à diminuer les retraits des pâtes, en effet ils diminuent aussi la plasticité.

Comme dégraissants, on distingue : les matières siliceuses et la chamotte (argile cuite).

Dans la pratique, on utilise le plus souvent les matières siliceuses qui ont pour composant de base la silice SiO_2 .

1. Les silices

La silice est le constituant principal du sable. Sous forme de quartz, elle est formée par la combinaison de l'atome de silicium (numéros atomique 14, masse atomique 28) et l'atome d'oxygène (numéros atomique 8, masse atomique 16), sa formule chimique est SiO_2 (dioxyde de silicium).

a- Source de la silice

Il existe plusieurs sources de la silice, ce sont : les roches, le sable et la balle de riz. Notre étude s'est plutôt basée sur cette dernière.

Balle de riz.

En générale la balle de riz ou la balle de paddy provient du paddy. C'est l'enveloppe extérieure du grain (de riz).

Le paddy est constitué généralement de 70 % de riz, 10 % de son de riz et 20 % de la balle de riz.

Silice de la balle de riz.

La silice de la balle de riz provient de la cendre de la balle de riz ou l'écorce du paddy. On dispose deux possibilités pour avoir la silice :

- Premièrement à partir de la cendre de la balle de riz cuisant les briques ordinaires.
- Deuxièmement par la calcination directe de la balle de riz à température 1000°C .

b- Propriétés de silice de la balle de riz**➤ Propriétés physiques.**

- Happe la langue ;
- Couleur blanche ;
- Poudre : blanche ;
- Densité : 0,55 à 1,55 ;
- La silice, pouvant résister à une température d'environ 1700 ° C sans se ramollir ni se déformer ; ainsi, elle est classée dans les groupes des matériaux réfractaires.
- Infusible au chalumeau ;
- Bonne résistance aux scories acides.

➤ Compositions chimiques.

Le tableau suivant donne la composition chimique de la cendre de la balle de riz

Tableau 1 : Composition chimique de la cendre de la balle de riz. [10]

Constituants	(%)
SiO ₂	96,5
P ₂ O ₅	0,2
CaO	2,2
MgO	0,5
Na ₂ O + K ₂ O	0,6
Total :	100

➤ Propriétés colloïdales.

La silice de la balle de riz appartient à la famille de silex. Il offre une structure finement cristalline et présentant des propriétés en présence d'eau pouvant se passer à l'état colloïdale.

c- Structure de minéraux siliceux

Il y a trois variétés cristallines de la silice : le quartz, la tridymite et la cristobalite. La forme non cristallisée est le verre de silice.

La silice SiO_2 est le constituant principal de sables ou de roches. Sous forme de quartz, elle compose notamment les roches magmatiques (le granite, la rhyolite et la pegmatite), les roches métamorphiques (gneiss et schiste) et très abondant dans certaines roches sédimentaires, comme le grès.

d- Rôle de la silice

La silice a pour rôle :

- ✓ d'ajuster la composition chimique du mélange ;
- ✓ de diminuer la plasticité (dégraissant) de certaines argiles ;
- ✓ de faire le lien entre les substances argileuses et les fondants, pour former la phase vitreuse, lors de la cuisson prolongée à haute température.

2. Les chamottes

Nous appelons chamottes des argiles calcinées. Les chamottes n'ont pas l'inconvénient des fortes dilatations données par les sables.

L'emploi des chamottes comme dégraissant ne modifie sensiblement pas les qualités (composition chimique) des argiles liantes utilisées dans les pâtes. Les chamottes entrent souvent dans des compositions de grès.

Ce sont les dégraissants par excellence des produits réfractaires, dans lesquels les pourcentages de chamottes sont généralement nettement majoritaires.

III.3. LES FONDANTS

Les fondants ont pour rôles de provoquer la formation de la phase vitreuse dans la pâte céramique.

On utilise surtout les feldspaths alcalins sodiques (albite), potassique (orthose) ou mixte (néphéline).

Les matières premières fondantes couramment utilisées en céramique sont les suivantes.

1. Les feldspaths

Ce sont des roches dures se vitrifiant et fondant à des températures diverses généralement supérieures à 1100°C ou 1200°C approximativement. Ils ont une dureté de 6 à 6,5 et une densité allant de 2,5 à 2,8.

L'orthose, un feldspath monoclinique dont la formule chimique est KAlSi_3O_8 , est l'un des minéraux les plus communs. Il est souvent de couleur blanche, grise ou rouge vif, et apparaît parfois en cristaux incolores. Il est utilisé en grande quantité pour la fabrication de la porcelaine et du verre.

Broyés finement et introduit ainsi dans la composition des pâtes, ils communiquent leur fusibilité à celles-ci lorsque les températures de cuisson sont suffisamment élevées.

Les principaux types de feldspath sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 2 : Les différents types de feldspath [9]

Nom	Constituants
Feldspath Orthose ou feldspath potassique	6 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O
Feldspath Anorthite ou feldspath calcique	6 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO
Feldspath Albite ou feldspath sodique	6 SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O
Feldspath Lithique	6 SiO_2 , Al_2O_3 , Li_2O
La Celsiane ou feldspath barytique	2 SiO_2 , Al_2O_3 , BaO
Les Plagioclases ou feldspaths sodo-calciques	Cristaux mixtes d'albite et d'anorthite

2. Les pegmatites

Les pegmatites sont des mélanges naturels de feldspath et de quartz et dont la teneur moyenne en feldspath doit être de l'ordre de 70 à 75 % pour être industriellement utilisables avec profit. Les pegmatites sont plus fusibles que le mélange correspondant de feldspath et de quartz libres et leur comportement dans les pâtes est assez différent de celui du mélange.

Chapitre II : Les procédés de fabrication céramique

I. FLOW-SHEET DE FABRICATION

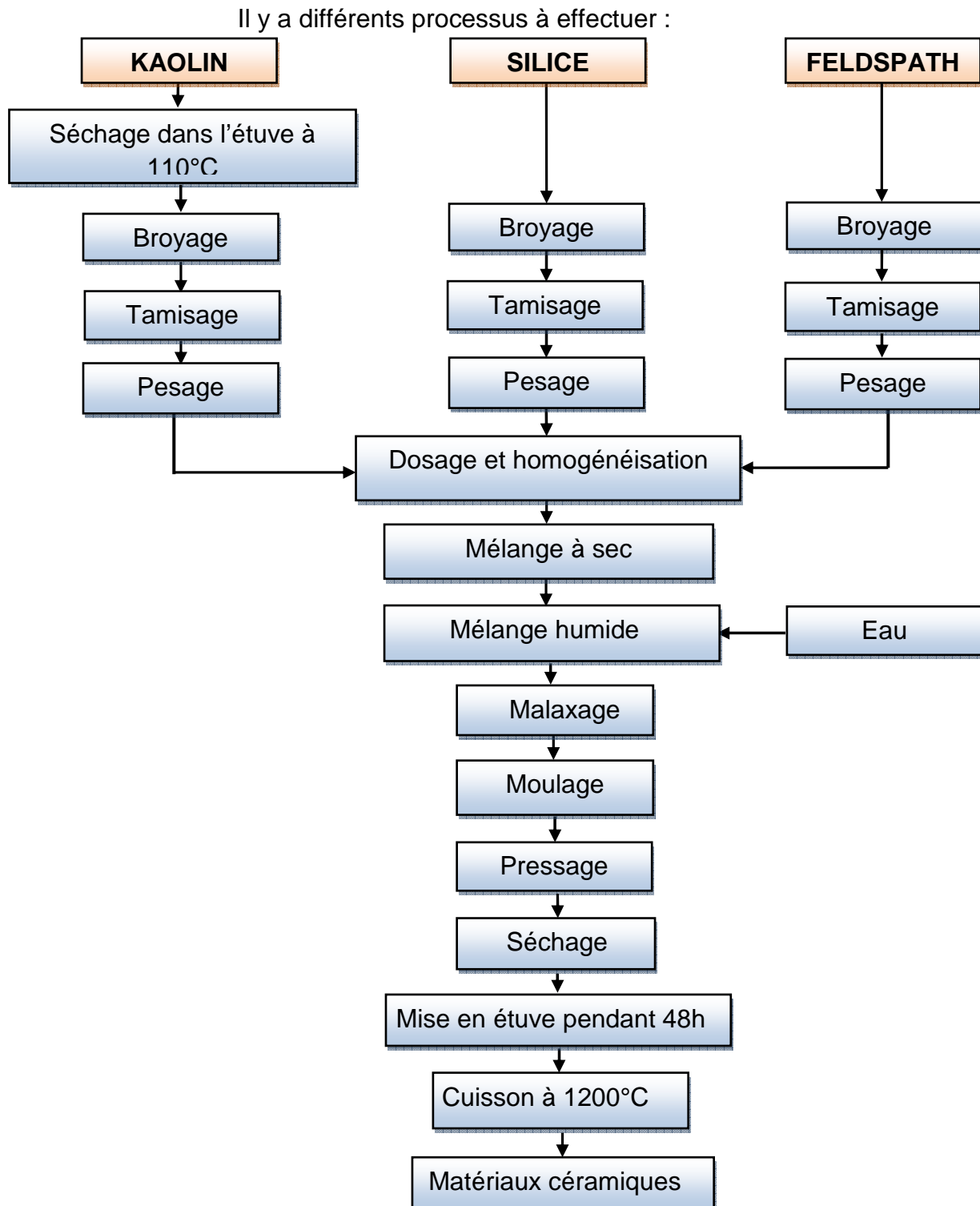


Figure 1 : Organigramme des processus de fabrication céramique

II. PREPARATION DES PATES CERAMIQUES [4]

II.1. SECHAGE DES MATIERES PREMIERES

Le séchage des matières premières permet pour la composition de pâtes relativement précises, telles notamment que les compositions pour faïences ou porcelaines, d'effectuer les dosages sans être gêné par les teneurs variables en humidité des matières premières brutes.

Le séchage préalable des matières argileuses est nécessaire lorsque l'on veut broyer finement celles-ci à sec. Le séchage doit être plus complet que l'on veut obtenir une plus grande finesse.

Nous pourrions sécher les matières premières dans l'étuve à 110° C pendant 48h.

II.2. DIVISIONS DES MATIERES PREMIERES

La division des matières premières préalablement à la composition et à la préparation des pâtes céramiques, a pour but de faciliter:

- ✓ l'homogénéité des constituants,
- ✓ la constance de composition,
- ✓ le choix de granulométrie convenable,
- ✓ le délayage des argiles.

Pour réaliser cette opération, nous pourrions utiliser des broyeurs ou des concasseurs si on a des matières premières en forme de bloc.

II.3. TAMISAGE DES MATIERES PREMIERES ET DES PATES

Pour cette opération pour des matières premières à l'état sec, nous pourrions utiliser par exemple soit des cribles pour les tamisages grossiers, soit des tamis pour des fines tailles.

Le tamisage des éléments constitutifs des pâtes céramiques peut permettre :

- ✓ la séparation et le classement de grains broyés entre des limites de tailles données ;

- ✓ le contrôle de la finesse de broyage et élimination des parcelles insuffisamment fines ;
- ✓ la purification des matières premières et des pâtes ;
- ✓ le mélange de matières premières sèches, réalisé dans des cas très particuliers par des tamisages successifs d'une masse pulvérisée.

II.4. DOSAGE DE LA PATE

La composition de pâtes est généralement donnée en poids de matières premières sèches, pour 100% de composition.

Ces formules n'ont de sens que lorsque la qualité de chaque constituant y est bien spécifiée. En général, les composants sont à l'état sec, ou sensiblement sec.

Les compositions des pâtes céramiques sont très variables, ainsi, prenons à titre d'exemple, celles données dans le tableau ci après :

Tableau 3 : Les compositions rationnelles des diverses pâtes [6]

Constituants	Faïences calcaires	Faïences feldspathiques	Grès	Porcelaines
<i>Kaolinite</i>	40 à 55%	40 à 70%	40 à 50%	45 à 55%
<i>Quartz</i>	35 à 40%	30 à 58%	25 à 35%	45 à 55%
<i>Feldspath</i>	-	3 à 14%	20 à 30%	20 à 30%
<i>Craie</i>	10 à 20%	-	<2%	-

II.5. HUMIDIFICATION ET HOMOGENEISATION DES PATES

Lorsque les compositions sont réalisées à partir de constituants secs, il est nécessaire, pour les transformer en pâtes plus ou moins plastiques et utilisables, que ces constituants soient efficacement mélangés et humidifiés jusqu'à la teneur en eau voulue.

La quantité de l'eau ajoutée au mélange joue un très grand rôle pour avoir une bonne pâte à mouler ou à tourner. La teneur en eau optimum est d'environ 30% en masse pour la pâte à mouler et 37% en masse pour la pâte à tourner.

1. Malaxage des pâtes

Pour obtenir des bons produits, il faut avoir une répartition homogène de l'eau. Ceci s'obtient uniquement par malaxage.

Le travail de malaxage des pâtes plastiques achève le mélange des composants, il écrase les particules de kaolin ou d'argile et les fait enrober et adhérer aux dégraissants, il améliore considérablement aussi l'homogénéisation de l'humidité des pâtes et chasse ainsi en partie l'air incorporé à la pâte. Le malaxage développe la plasticité de la pâte et en facilite le façonnage et tend à diminuer les accidents de séchage.

III. LES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES PATES CERAMIQUES

Nous avons les différentes caractéristiques des pâtes céramiques résumées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Les caractéristiques générales des différentes pâtes céramiques [6]

Caractéristiques	Faïence	Grès	Porcelaine
<i>Porosité en %</i>	10 à 15	0 à 1	0 à 0,50
<i>Densité apparente</i>	1,90 à 2,15	2,20 à 2,40	2,30 à 2,60
<i>Masse d'eau absorbable en %</i>	5 à 20	0 à 1	0
<i>Résistance à la compression en Mpa</i>	98,1	490,5	392,4 à 588,6
<i>Résistance à la traction en Mpa</i>	4,9 à 9,81	36,8	24,5 à 49
<i>Résistance à la flexion en Mpa</i>	29,4	68,7	78,5
<i>Résistance au choc en Mpa</i>	0,15	0,17	0,18
<i>Module d'élasticité en Mpa</i>	137,3 à 196,2	392,4	490 ,5
<i>Coefficient moyen de dilatation</i>	60 à 100.10 ⁻⁷	45 à 55.10 ⁻⁷	35 à 50.10 ⁻⁷

IV. FAÇONNAGE DES MATERIAUX CERAMIQUES [4]

Le façonnage de la pâte pour obtenir la forme désirée est réalisé de différentes façons.

Selon la propriété (plastique, suspension, poudre) de la pâte utilisée, on trouve ainsi trois catégories de façonnages.

IV.1. FAÇONNAGES UTILISANT LA PROPRIETE PLASTIQUE DE LA PATE

1. Le modelage

C'est un procédé purement manuel, il est utilisé dans le domaine artistique.

Les difficultés techniques de ce procédé, pour les pièces destinées à la cuisson, proviennent généralement du séchage des pâtes céramiques, source très générale d'accidents.

2. Le moulage

La pâte est appliquée et serrée contre un moule, permettant de donner à celle-ci la forme et les reliefs de la pièce à exécuter.

Le moulage présente trois procédés différents relatifs à la proportion d'addition d'eau.

- moulage en pâte plastique
- moulage à sec (pâte sèche).
- moulage en surcomprimé.

❖ Moulage en pâte plastique.

Dans ce mode de moulage, la quantité d'eau est de 18 à 20 % pour le produit moulé et pour le produit pressé, elle sera de 10 à 15 %.

❖ Moulage à sec.

Ce moulage consiste à ajouter une proportion d'eau beaucoup moindre (3 à 9 %). Dans ce mode de moulage, les produits obtenus sèchent plus vite. Le retrait au séchage ou à la cuisson sera moindre. Le démoulage est facile. La texture sera homogène et les défauts internes sont rares.

❖ Moulage en surcomprimé.

Ce mode de moulage consiste à agglomérer le produit par une très faible quantité d'argile (5 à 10 %), juste suffisante pour lier les différents éléments granulométriques du produit entre eux.

On peut ajouter une colle (mélasse ou sulfate de cellulose) permettant aux manutentions lors du démoulage, la proportion est environ 0.5 à 1 %.

3. Le filage et l'extrusion

Cette technique reste la plus courante dans la fabrication des produits de terre cuite et des tuyaux de grès ; elle intervient dans certaines fabrications de produits réfractaires et sert à la préparation d'ébauches en faïencerie et porcelainerie.

4. Le tournage

Il correspond à l'image classique du potier ; il garde, dans le domaine artistique, un prestige justifié, mais n'est plus guère utilisé, dans le domaine industriel, qu'à la réalisation de certains accessoires de couvertures et de canalisations d'assainissement, parfois encore à la préparation d'ébauches en porcelaine technique.

5. Le calibrage

C'est une combinaison du moulage et du tournage, substitue aux mains du potier un moule de plâtre maintenant la pâte, tandis qu'un outil de profil déterminé, le calibre, la repousse contre le moule et en arrache l'excédent, sous l'effet de la rotation de la tête de tour. Le calibrage est très employé en faïencerie et porcelainerie. Il se prête à une mécanisation extrêmement poussée.

6. Le pressage

Le pressage se fait habituellement en comprimant la pâte céramique dans un moule, sous une pression généralement de l'ordre de 100 à 250kg/cm² donnant la forme de l'objet à exécuter. La pression est souvent donnée en deux fois : une première pression de 10 à 15kg/cm² comprime la pâte et chasse l'air presque en totalité. Une seconde pression beaucoup plus forte donne la compacité voulue.

Ainsi, pour la mise au point du procédé, on peut distinguer principalement :

- Le pressage en pâtes plastiques : pâte molle, pâte demi ferme, pâte ferme,
- Et le pressage en pâte dite « sèche ».

❖ **Pressage en pâte plastique molle :**

Une pâte plastique est dite molle lorsqu'elle se déforme très facilement sous la pression de la main sans cependant adhérer et coller à la peau.

- Ce travail de pressage est très expéditif généralement.
- La faible rigidité de la pâte molle au cours du façonnage facilite la déformation des pièces lors des manipulations précédant le séchage.
- Le retrait important des pâtes molles, de même que leurs teneurs en eau élevées, peuvent être parfois gênants.

Très généralement, le pressage des pâtes molles s'effectue dans des moules en plâtre.

- Ceux-ci par leur porosité, permettent le démoulage plus facile.
- Leur résistance est relativement faible, et l'effort nécessaire au pressage d'une pâte molle est également peu important.

❖ **Pressage en pâtes plastiques demi fermes et en pâtes fermes :**

- Les pâtes fermes sont des pâtes plastiques contenant beaucoup moins d'eau que les pâtes molles. Elles sont de ce fait très compactes et dures. Leur plasticité est très faible. De très fortes pressions, seules, permettent à ces pâtes de fluer dans des moules métalliques très résistants, et d'en emplir complètement et correctement la capacité. Il est en outre très généralement nécessaire, pour un façonnage correct, que les ébauches aient une forme très voisine de la forme finale à obtenir, par suite de leur insuffisance de plasticité. Le pressage en pâtes fermes permet l'obtention de pièces très compactes et solides dès le démoulage, aux formes très nettes si la fabrication est correcte, et ne subissent qu'un assez faible retrait. Les côtes sont de ce fait plus exactes et déformations moins sensibles.

- La pâte demi-ferme est de consistance intermédiaire entre la pâte molle et la pâte ferme. Ses propriétés sont également intermédiaires.

❖ **Pressage en pâtes dites sèches :**

Le pressage en pâte granulée, dite sèche, est opéré généralement sous des pressions supérieures à 100 kilogrammes par centimètre carré. Afin de limiter le défaut de feuilletage que les pressions élevées favorisent, nous appliquons souvent la pression par étapes successives. Nous pouvons aussi appliquer la pression en même temps que nous faisons vibrer la moule. Le tassement de la pâte sèche, avant agglomération, permet ainsi de chasser une partie de l'air de la pâte.

7. Le tournassage

Enlèvement de matière à l'aide d'un outil de coupe sur des ébauches préalablement raffermies ou séchées (faïencerie, porcelainerie).

On désigne souvent par les termes, ébauchage ou ébauche le façonnage, à la main, sur un tour dit à ébaucher de la pâte plastique, et par le terme de tournassage ou tournassage le travail consistant à tailler au tour, dans la pièce ébauchée et raffermie, avec un instrument tranchant tournasin, les épaisseurs de pâte en excédent.

Le terme de tournage désigne d'une manière plus générale l'ensemble des deux opérations d'ébauche et de tournassage.

8. Le colombinage

C'est un procédé très ancien de façonnage. On l'utilise de manière exceptionnelle, pour exécuter directement sans moule une pièce.

La pâte est roulée à la main en boudins ou colombins.

La pièce est modelée en superposant des colombins que l'on colle les uns aux autres par serrage. La réalisation du colombinage nécessite de l'expérience pour pouvoir conduire la pièce sans fente, jusqu'au-delà de la cuisson.

IV.2. FAÇONNAGE BASES SUR LA SUSPENSION AQUEUSE DES MATIERES ARGILEUSES (LE COULAGE)

Il utilise la succion d'un moule poreux pour obtenir un dépôt épousant la forme intérieure de ce moule à partir d'une barbotine, suspension fluide versée dans le dit moule. Le retrait du dépôt lors du séchage permet le démoulage des pièces.

La barbotine est une suspension aqueuse de matières argileuses ; elle est obtenue en ajoutant à la pâte sèche la moindre quantité d'eau (35 à 50 %) et un défloculant (carbonate ou silicate de soude 1/3 à 1/2 %) du poids sec de la pâte. D'après Antoine d'Albis, le silicate de soude ou le carbonate de soude apportent leur charge positive (ions Na⁺) aux micelles de kaolin, les éloignent les unes des autres.

Cette technique est très utilisée en faïencerie et en porcelainerie, elle constitue le mode essentiel de fabrication des produits céramiques sanitaires en « chaînes » souvent mécanisées.

IV.3. FAÇONNAGES UTILISANT LA MATIERE PREMIERE EN POUDRE (PRESSAGE EN POUDRE)

Il consiste à comprimer dans un moule une poudre de composition céramique, additionnée de liants en cru, de lubrifiants et souvent d'une faible proportion d'eau, constitue le principal mode d'obtention des carreaux de grès et de faïence, de nombreux produits réfractaires et de porcelaine technique. Il se prête à une mécanisation et à une automatisation poussée.

V. SECHAGE [11]

L'eau, généralement indispensable au façonnage, doit être éliminée par le séchage, phase délicate pour les produits riches en argile (risques de fissures et de fentes).

Cette eau a permis le façonnage, en développant la plasticité des pâtes. Elle peut être chassée en maintenant les pièces crues entre 105° et 110°C approximativement, jusqu'à ce que leur poids reste constant.

Le séchage doit être lent, car l'évaporation de l'eau risque de provoquer des cassures ou fissures due à la différence de retrait entre la partie plus sèches et la partie moins sèches ; on risque même d'avoir des éclatements dus à la forte pression de vapeur d'eau retenue à l'intérieur de la masse.

Des pièces contenant encore de 1% à 3% d'humidité sont considérés comme pratiquement sèches.

V.1. EFFETS DE SECHAGE

1. Durcissement

Au fur et à mesure que les pâtes perdent leur eau d'imbition, leur plasticité diminue jusqu'à disparaître en même temps qu'elles prennent une solidité et une dureté relative.

2. Retrait

C'est le départ de l'eau contenue dans une pâte qui provoque la contraction, le retrait de celle-ci. Le retrait ne suit pas d'une manière constante le départ de l'eau, de telle sorte que le séchage peut être, quant à ses effets sur le retrait, divisé en deux phases bien distinctes :

Première phase, le retrait est à peu près proportionnel au poids d'eau éliminé. L'eau éliminée pendant cette première phase est dite eau colloïdale.

Deuxième phase, le départ d'eau continuant, la pâte ne se contracte plus, ne prend plus de retrait, mais devient poreuse : le volume des vides formé est à peu près correspondant au poids de l'eau éliminée. L'eau éliminée à ce moment est dite eau d'interposition.

Le retrait est donc la perte de longueur subie par la pâte entre sa dimension initiale et sa dimension finale.

VI. LES CUISSONS [6]

La cuisson, phase fondamentale du processus céramique, provoque les transformations structurales qui conditionnent la cohésion et les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des produits auxquels elle confère leur aspect et leur stabilité définitifs

La cuisson dépend donc de la température, de la durée totale de cuisson, de la nature du produit à cuire, de sa dimension, de la capacité ou de la section du four.

VI.1. BUT ET NATURE DES CUISSONS CERAMIQUES

Le but de la cuisson des produits céramiques est de provoquer par la chaleur certaines réactions et transformations chimiques et physiques des matières premières des pâtes, pour obtenir finalement une matière nouvelle constituant le produit céramique.

On constate les phénomènes suivants lors de la cuisson :

- L'eau hygroscopique, non - évaporée totalement au séchage s'élimine.
- A partir de 200 °C et de plus en plus vite à mesure que la température s'élève (de 500 à 600 °C), l'argile perd son eau de combinaison en même temps qu'elle se dissocie en silice et en alumine. Ce phénomène est dit modification de l'édifice cristallin.
- De 800 à 1000 °C un retrait important qui augmente quand la température s'élève et qui atteint 10 à 15 % en 1200 °C, nous aurons la cristallisation de la mullite.

VI.2. CONTROLE DES CUISSONS

Nous pouvons schématiser l'allure générale de la montée en température au cours de la cuisson. La rapidité d'allure permet une amélioration de la qualité des pièces. Mais une allure trop rapide peut causer par contre la rupture des pièces ou du matériel d'enfournement, et une cuisson peu homogène.

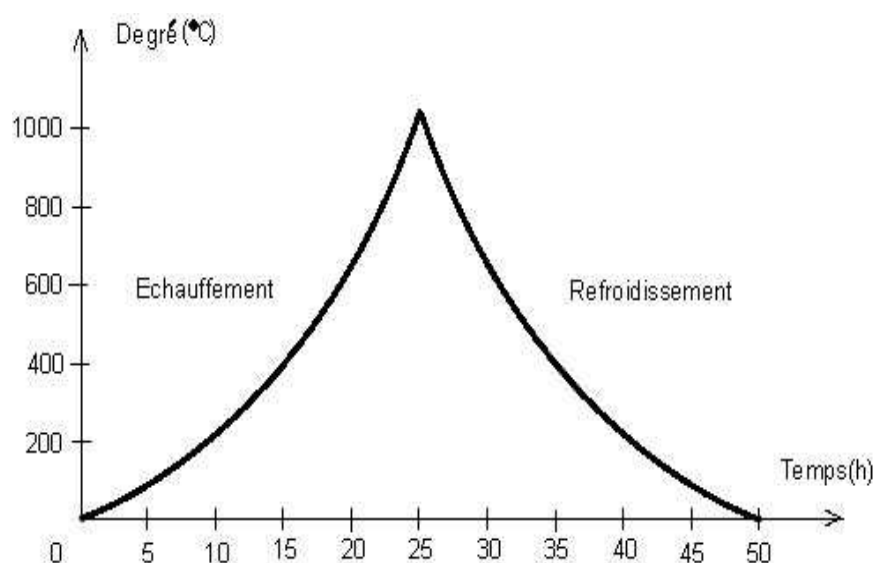


Figure 2 : La courbe représentative de la cuisson [6]

VII. EMAILLAGE [6]

Les isolateurs céramiques en porcelaine sont toujours recouverts d'un émail déposé soit par trempage dans une barbotine, soit par pulvérisation à l'aide d'un pistolet à peinture. L'émail est composé de silice, d'alumine, de fondants alcalins ou alcalino-terreux (feldspaths et carbonates essentiellement), d'opacifiants (Zircon, Oxyde de titane, d'étain, etc.) et de colorants. Il est le plus souvent déposé avant cuisson et doit former, lors du traitement thermique, un verre régulier et lisse dont le rôle est double :

- amélioration de l'état de surface de l'isolateur pour empêcher la fixation de poussières atmosphériques et autres polluants ;
- amélioration de la résistance mécanique de l'isolateur si le verre formé possède un coefficient de dilatation linéique inférieur à celui de la céramique, mettant ainsi la surface en compression.

Chapitre III : Les matériaux céramiques utilisés en isolation électrique

I. DEFINITION DE MATERIAUX ISOLANTS [12]

Un isolant est un matériau qui limite les échanges d'énergie entre deux systèmes. On distingue : les isolants électriques, les isolants thermiques, les isolants phoniques et les isolants mécaniques.

En électricité comme en électronique, un isolant, aussi appelé matériau diélectrique, est une partie d'un composant ou un organe ayant pour fonction d'interdire le passage de tout courant électrique entre deux parties conductrices. Il possède peu de charges libres, elles y sont piégées, contrairement à un matériau conducteur où les charges sont nombreuses et libres de se déplacer sous l'action d'un champ électromagnétique.

En thermique, un isolant est un matériau ayant une faible conductivité thermique. Il s'oppose aux transferts de chaleur. Il permet notamment d'éviter les fuites de chaleur : pertes de chaleur (dans une pièce chauffée, un four) ou gain de chaleur (un réfrigérateur, une chambre froide).

II. THEORIE SUR LES CERAMIQUES UTILISEES EN ISOLATION ELECTRIQUE [10]

Nous allons étudier les matériaux céramiques comme les porcelaines que nous pouvons utiliser comme isolants électriques du fait de leur résistance au choc thermique élevée.

I.1. GENERALITES

La silice présente l'élément caractéristique de notre isolant. Elle forme le squelette du produit tandis que le kaolin et le feldspath qui au cours de la cuisson forment une sorte de ciment.

Les propriétés qui caractérisent la silice sont les suivantes :

1. Propriétés thermiques :

La silice a le plus faible coefficient de dilatation de tous les corps connus ; elle a un allongement de 0,55mm/m pour une variation de température de 20 à 1000°C. Elle résiste bien aux chocs thermiques. Par exemple, à 400°C, la chaleur massique de la silice est de 0,2229kcal/kg°C tandis qu'à 1200°C elle est de 0,2621kcal/kg°C ; sa conductivité thermique est de 0,00835cal/cm°C à 488°C.

2. Propriétés électriques :

La silice est un bon isolant électrique, même à température élevée et en atmosphère humide. Elle peut résister jusqu' à une température de 1700 ° C sans se ramollir ni se déformer.

3. Propriétés mécaniques :

La silice a une dureté de 7 pour la silice transparente et de 4,9 à 6 pour la silice opaque. Sa densité est variable selon les différents états de la silice. La résistance à la compression est environ de 2500bars.

4. Propriétés chimiques :

En général, la silice n'est pas attaquée par les acides sauf par l'acide fluorhydrique et l'acide phosphorique au dessus de 400°C.

Le cuivre pur et l'argent pur n'attaquent pas la silice, mais le nickel le réduit à 1200°C. La silice est en général attaquée par les oxydes métalliques.

I.2. PROPRIETES COURANTES

Les porcelaines possèdent des propriétés thermiques, électriques et mécaniques beaucoup plus marquées. En ramenant la composition de la porcelaine à ses constituants principaux, le diagramme de GILCHREST et KILINEFELTER (figure 3) donne un schéma des propriétés courantes principales.

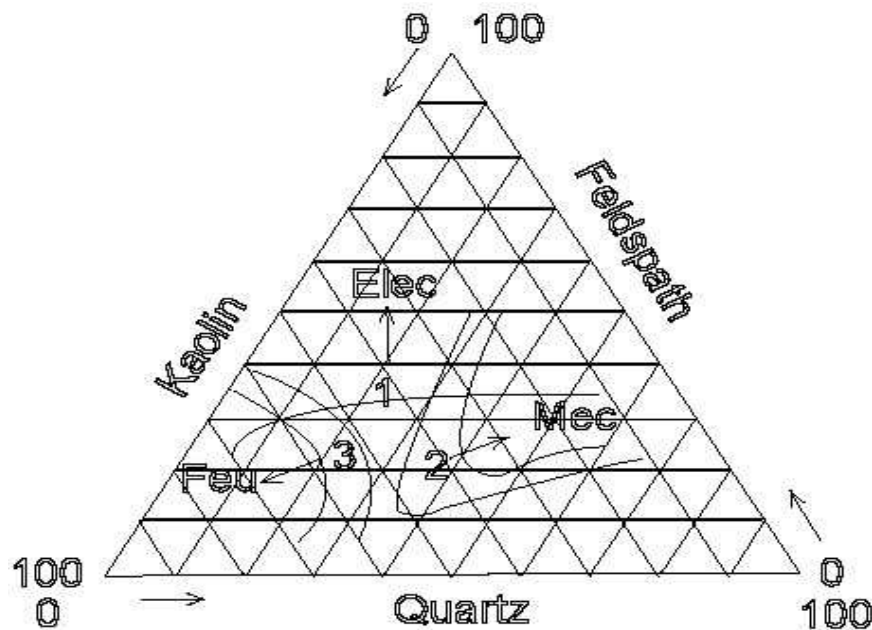


Figure 3 : Diagramme de GILCHREST et KILINEFELTER [3]

La zone 1 est celle d'une bonne résistance électrique, la zone 2 correspond à celle des propriétés mécaniques élevées et la zone 3 à celles résistant au choc thermiques.

III. PROPRIETES DIELECTRIQUES DES MATERIAUX CERAMIQUES [1]- [2]-[8]

Les qualités électriques des matériaux céramiques correspondent aux caractéristiques suivantes :

- La résistance à la perforation (rigidité diélectrique) ;
- La résistivité ;
- La permittivité et facteur des pertes ;
- Les caractéristiques plus directement liées à l'emploi de l'isolant au cours de son service.

III.1. RIGIDITE DIELECTRIQUE [2]

1. Définition

La rigidité diélectrique d'un matériau isolant est la valeur du champ électrique auquel il faut le soumettre pour qu'il en résulte une perforation qui le rende inapte à remplir ultérieurement sa fonction.

De façon pratique, la rigidité diélectrique est définie comme étant le rapport entre la tension à laquelle se produit une perforation dans les conditions d'essai spécifiées et la distance entre les deux électrodes auxquelles est appliquée la tension.

On admet que séparément ou simultanément, deux modes de perforation sont possibles : la perforation disruptive et la perforation thermique.

- La perforation disruptive résulte d'une destruction localisée de la structure sans qu'il se produise d'échauffement appréciable. De telles perforations sont assez exceptionnelles : elles peuvent se produire sur des échantillons de faible épaisseur et, plus spécialement, par application de tension au choc.
- La perforation thermique est due à un abaissement des caractéristiques isolantes, du fait de l'échauffement provoqué, soit par une application prolongée de la tension, soit par une évacuation insuffisante de la chaleur dégagée par l'ionisation du diélectrique.

2. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique

En fait, le plus souvent, les deux modes de perforation interviennent simultanément ; du fait de ce double mécanisme, la tension de perforation dépend de multiples facteurs :

- Epaisseur du matériau ;
- Caractéristiques électriques et thermiques du milieu ambiant : les déterminations de la rigidité diélectrique sont le plus couramment effectuées soit dans l'air soit dans l'huile, mais il est toujours plus prudent d'effectuer les déterminations sur un solide dans le milieu même où il se trouve employé en service réel.
- Température : lorsque la température croît, la rigidité diélectrique intrinsèque est d'abord soit constante, soit légèrement décroissante. Puis à partir d'une température de transition, une décroissance très rapide est amorcée. La température de transition délimite en fait deux zones dans lesquelles les mécanismes de perforation sont différents. Au dessous de cette température, la diminution brusque est attribuée à l'augmentation rapide de la conduction par suite des collisions des électrons.

- Conditions d'application de la tension : ceci concerne à la fois la forme de la tension (continue, alternative, ou impulsionnelle), la durée d'application, et, dans le cas du champ alternatif, la fréquence.

III.2. RESISTIVITE SUPERFICIELLE, TRANSVERSALE ET RESISTANCE D'ISOLEMENT [1]

Dans le cas des matériaux isolants, on est amené à considérer plusieurs types de résistances ; l'une est relative au volume du matériau, c'est la résistance volumique ou transversale, car elle est déterminée en appliquant un champ perpendiculaire à la surface d'une éprouvette et en mesurant le courant transversal qui résulte de l'application de ce champ. Elle est relative aux propriétés internes du matériau.

La résistance superficielle est celle qui intervient entre deux conducteurs placés sur une même surface isolante. Elle fait intervenir, outre la qualité du matériau, le dépôt d'une mince couche conductrice (humidité ou autres), à travers laquelle s'effectue en tout ou en partie la conduction. C'est donc une caractéristique plus fonctionnelle que la précédente.

Enfin, la résistance d'isolement fait intervenir à la fois la résistance transversale et la résistance superficielle d'un matériau, d'une façon qui se veut représentative des conditions pratiques d'emploi des matériaux mais demeure néanmoins conventionnelle.

Les facteurs qui influencent le plus sur la résistivité des matériaux isolants sont surtout la température par la relation $\log \rho = \frac{A}{T} + B$ où A et B constantes, et l'humidité qui est sans doute le facteur qui a le plus importante influence sur la résistivité des isolants. Cette influence dépend évidemment de la teneur en eau à saturation du matériau, et de son état présent d'humidification.

Nous avons la valeur de résistivités des céramiques, à une température de 25°C et de 50% d'humidité de l'ordre de 10^{12} à $10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$.

III.3. PERMITTIVITE ET FACTEUR DE DISSIPATION DIELECTRIQUE [8]

L'efficacité d'un diélectrique se traduit par sa capacité à emmagasiner de l'énergie. Elle s'exprime par sa constante diélectrique, ou permittivité relative, déterminée par rapport à celle du vide. Pour les diélectriques d'usage courant, la valeur de cette constante sans unité varie entre 1 et plus d'un millier. Par exemple, celle du verre vaut 3 à 5, celle de la porcelaine de 5 à 7, celle du mica de 5 à 8.

La permittivité relative ϵ_r d'un diélectrique parfait est le quotient de la capacité C_x (F) entre deux électrodes, supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_v (F) de la même configuration d'électrodes mais dans le vide : $\epsilon_r = C_x/C_v$.

La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la constante électrique du vide :

$$\epsilon_o = \frac{10^{-9}}{36 \pi} = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F / m}$$

$$\epsilon = \epsilon_o \times \epsilon_r$$

III.4. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX, LIEES A LEUR TENUE EN SERVICE [1]

Les matériaux isolants se détériorent progressivement en fonction du temps sous l'action de diverses contraintes auxquelles ils sont soumis du fait de leur utilisation.

1. Tenue des matériaux isolants aux contraintes thermiques

L'effet de contrainte thermique revêt deux aspects : le premier concerne le comportement instantané des isolants aux températures élevées, le second est relatif à la dégradation qui s'opère progressivement au cours du temps et affecte leur comportement à long terme.

a- Echauffements de courte durée

Dans ce cadre d'échauffements de courte durée, nous nous intéressons aux grandeurs physiques de base, à savoir, le coefficient de dilatation thermique linéaire, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

Les valeurs du coefficient de dilatation thermique sont à prendre en considération pour tous les assemblages de matériaux car, de dilatations ou de contractions différentes, peut résulter la formation de fissures. Pour les isolants minéraux tels que la silice, les verres, et les céramiques, le coefficient de dilatation est de l'ordre de $1 \text{ à } 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

La valeur de la conductivité thermique des isolants dépend de l'évacuation de l'énergie dissipée dans les conducteurs et, par voie de conséquence, la température maximale atteinte par l'isolation. C'est donc une caractéristique très importante puisqu'elle peut finalement affecter les performances électriques et mécaniques de toute isolation. Les valeurs les plus élevées de la conductivité thermique sont obtenues pour les isolants minéraux comme les céramiques $2 \text{ à } 4 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

Les chaleurs spécifiques ne diffèrent que relativement peu d'un isolant à l'autre : elles sont généralement de l'ordre de $1,25 \text{ à } 1,7 \times 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

b- Echauffement de longue durée

Sous l'action prolongée de la chaleur, les matériaux isolants sont soumis à des réactions qui les dégradent progressivement, de sorte qu'ils peuvent devenir inaptes à supporter les diverses contraintes électriques et mécaniques auxquelles ils sont soumis en service.

c- Vieillessement des matériaux isolants

Les premières considérations précises au sujet de l'endurance thermique des matériaux sont relatives à la relation qui lie la vitesse de vieillissement et la température. C'est en effet vers 1930 que deux électroniciens, Montsinger aux Etats-Unis, Büssing en Allemagne, ont simultanément indiqué de quelle façon l'élévation de température d'un matériau réduisait sa durée de vie. Ils ont trouvé de façon empirique, l'expression suivante :

$$\log K = -\frac{A}{T} + B$$

Une loi conforme à la relation d'Arrhenius, liant la vitesse d'évolution K d'une propriété quelconque à la température absolue T (°C). Et de là, il découle que le temps t (h) nécessaire pour obtenir un état donné de dégradation est relié à la température de la façon suivante :

$$\log t = \frac{A}{T} + B$$

De ces expressions, ils ont énoncé la théorie suivante : toute augmentation de n°C de la température d'une isolation conduit à doublé sa vitesse de vieillissement.

2. Tenue des matériaux isolants en présence d'un champ électrique

Deux types principaux de dégradations sont susceptibles d'affecter les isolants soumis à un champ électrique. Il s'agit d'abord des effets de cheminement et d'érosion et le second type d'altération consiste en un affaiblissement progressif de la tenue diélectrique sous l'effet des décharges partielles. Ces deux types de dégradations sont susceptibles d'intervenir simultanément en pratique.

a- Résistance au cheminement et à l'érosion

Le cheminement est le résultat d'une détérioration progressive survenant à la surface d'un isolant solide sous l'action simultanée d'un champ électrique superficiel, et d'une cause extérieure ayant pour effet de faire circuler momentanément un courant anormalement élevé à la surface du matériau, qui peut suivant les cas, un arc, une étincelle, le dépôt d'une pollution, ou un simple échauffement.

Le résultat du cheminement se manifeste sous la forme d'une carbonisation partielle ou complète de la surface de l'isolant soumise au champ.

Tableau 5 : Indice de résistance au cheminement sous basse tension [1]

Indice de résistance au cheminement V (volt)	Matériaux
> 500	Isolants minéraux comme les céramiques

b- Résistance à l'action des décharges partielles

L'origine la plus importante des dégradations subies par les matériaux isolants est sans doute celle due à l'action des décharges partielles. Périodiquement dans le cas d'un champ continu, ou à chaque alternance dans le cas d'un champ alternatif, il y a amorçage, puis extinction, de la plus petite capacité correspondante. La répétition de ces décharges provoque une usure progressive de l'isolant solide en contact avec la zone où se produit l'amorçage.



DEUXIEME PARTIE :

ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre IV : Caractérisations des matières premières

I. PROVENANCES DES MATIERES PREMIERES

Ce paragraphe nous renseigne sur la provenance des différentes matières premières utilisées :

- **Kaolin** : Le kaolin est parmi les matières premières très utilisées à la fabrication de nos produits. Dans la suite, nous utilisons le kaolin d'Ambatomirahavavy qui correspond aux coordonnées Géographiques suivantes : X : 795.6 m et Y : 500,4 m de position S : 18° 56' 265", E : 47° 23' 147" et d'altitude 1048 m, de direction N130 et de pendage 50° SW. Il se situe au Pk 18 – 19 sur la R.N 1, District d'Arivonimamo.



Figure 4 : Kaolin (échantillon dans le gisement d'Ambatomirahavavy)

- **Silice** : elle est obtenue à partir de la cendre de la balle de riz cuisant les briques ordinaires.
- **Feldspath** : il est fourni par la société PROCHIMAD.

II. ETUDES SUR LES MATIERES PREMIERES

Nous allons décrire brièvement ces matières premières qui entrent dans la composition de notre matériau isolant.

II.1. ANALYSE CHIMIQUE

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur des principaux éléments présents dans nos matières premières.

Lors de l'expérience, on utilise les échantillons bien secs et broyés finement.

1. Analyse chimique du kaolin d'Ambatomirahavavy :

Le tableau suivant résume les résultats de l'analyse chimique du kaolin d'Ambatomirahavavy déjà effectué par RAKOTOARIVELO Jaotiana [10]

Tableau 6 : Analyse chimique du kaolin d'Ambatomirahavavy [10]

Type d'analyse	Kaolin d'Ambatomirahavavy débarassé de la silice libre %	Kaolin pur %
Humidité	0,70	0,70
Perte au feu	13,32	13,30
SiO ₂	44,20	46,50
Al ₂ O ₃	37,60	39,50
Fe ₂ O ₃	2,80	-
CaO	0,22	-
MgO	0,40	-
TiO ₂	0,70	-
Na ₂ O + K ₂ O + P ₂ O ₅	-	-
Total :	99,94	100

Ces résultats nous montrent que la composition chimique du minerai d'Ambatomirahavavy présente une forte teneur en SiO₂ qui est proche de celle du kaolin pur.

2. Analyse chimique de la cendre de la balle de riz :

Dans notre étude, nous avons utilisé la silice des balles de riz provenant des fabricants de briques de Vontovorona.

Le tableau ci-après donne les résultats d'analyse chimique sur la cendre des balles de riz :

Tableau 7 : Analyse chimique de la cendre de la balle de riz [10].

Type d'analyse	A en (%)
<i>Humidité</i>	0,00
<i>Perte au feu</i>	0,60
<i>SiO₂</i>	95,30
<i>Al₂O₃</i>	Trace
<i>Fe₂O₃</i>	0,50
<i>CaO</i>	2,40
<i>MgO</i>	0,40
<i>TiO₂</i>	-
<i>Na₂O + K₂O + P₂O₅</i>	0,60
<i>Total :</i>	99,80

A : Echantillon de la cendre de la balle de riz.

Les résultats de ces analyses chimiques nous confirment que la cendre de balle de riz renferme une teneur en silice de l'ordre de 95,3%.

3. Analyse chimique du feldspath :

Nous résumons dans le tableau ci-après, les résultats d'analyses chimiques données par la société PROCHIMAD.

Tableau 8 : Analyse chimique du feldspath

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Perte au feu	Total
Feldspath (%)	62,90	17,50	0,26	-	2,23	15,0	-	1,30	99,19

D'après ces résultats, nous constatons que le feldspath que nous avons utilisé est un feldspath potassique du fait de la teneur relativement élevée en K₂O.

II.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE

L'analyse granulométrique consiste à tamiser la matière à étudier à travers une série de tamis pour déterminer les dimensions des grains qui constituent la matière.

La granulométrie a une importance capitale en céramique car elle contribue à conditionner :

- La plasticité des matières premières et des pâtes argileuses ;
- L'élaboration de compositions de compacité déterminée ;
- Le frittage des matériaux ; la texture finale des produits.

Les résultats ci-après ont été obtenus après 30mn de tamisage de 200g de chaque matière première.

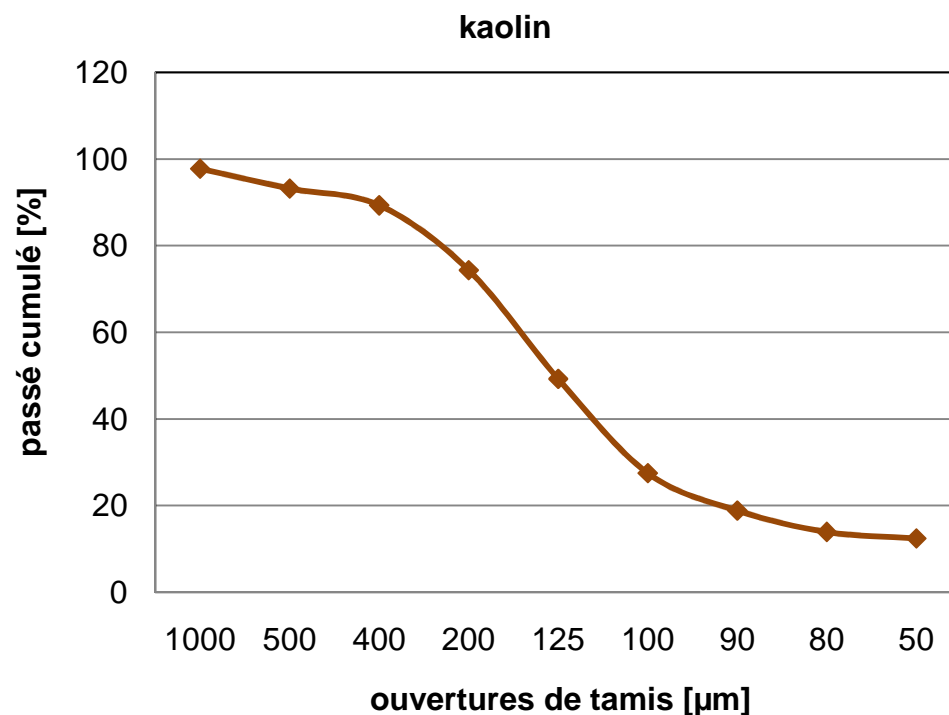
1. Analyse granulométrique du kaolin d'Ambatomirahavavy :

Voici le tableau donnant les résultats de l'analyse granulométrique du kaolin d'Ambatomirahavavy, que nous avons faits au laboratoire de chimie minérale :

Tableau 9 : Analyse granulométrique du kaolin d'Ambatomirahavavy.

Rang tamis	Tamis (μm)	Refus partiel (en g)	Passé cumulé (en %)
1	1000	4,48	97,76
2	500	9,16	93,18
3	400	13,72	86,32
4	200	23,92	74,36
5	125	50,20	49,26
6	100	43,50	27,51
7	90	17,28	18,87
8	80	9,88	13,93
9	50	2,98	12,44
10	PAN	24,88	-

La courbe d'analyse granulométrique est donnée par la figure ci-dessous. Cette courbe est caractérisée par le passé cumulé (%) en ordonnée et le rang des tamis (μm) en abscisse.

**Figure 5 : Courbe d'analyse granulométrique du kaolin.**

2. Analyse granulométrique de la silice de la balle de riz:

Nous représentons dans le tableau ci-dessous les résultats d'analyse granulométrique de la silice de balle de riz que nous avons effectuée au laboratoire.

Tableau 10 : Analyse granulométrique de la cendre de la balle de riz.

Rang tamis	Tamis (μm)	Refus partiel (en g)	Passé cumulé (en %)
1	1000	0,00	100
2	500	2,50	98,75
3	400	6,78	95,36
4	200	19,58	85,57
5	125	47,14	62
6	100	35,34	44,33
7	90	22,54	33,06
8	80	9,58	28,27
9	50	3,20	26,67
10	PAN	53,34	-

- Courbe d'analyse granulométrique de la silice : passé cumulé (%) en ordonnée et le rang des tamis (μm) en abscisse.

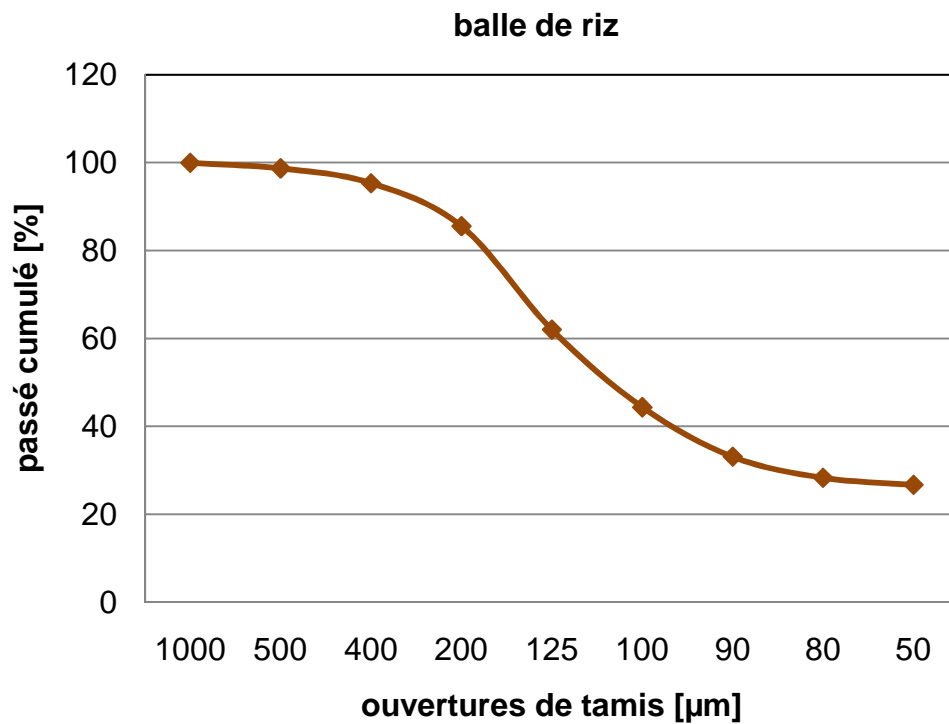


Figure 6 : Courbe d'analyse granulométrique de la balle de riz.

3. Analyse granulométrique du feldspath :

Tableau 11 : Analyse granulométrique du feldspath

Rang tamis	Tamis (µm)	Refus partiel (en g)	Passé cumulé (en %)
1	100	0,00	100
2	90	67,10	75,65
3	80	56,66	38,12
4	50	28,93	9,19
5	40	18,14	0,42
6	PAN	29,17	-

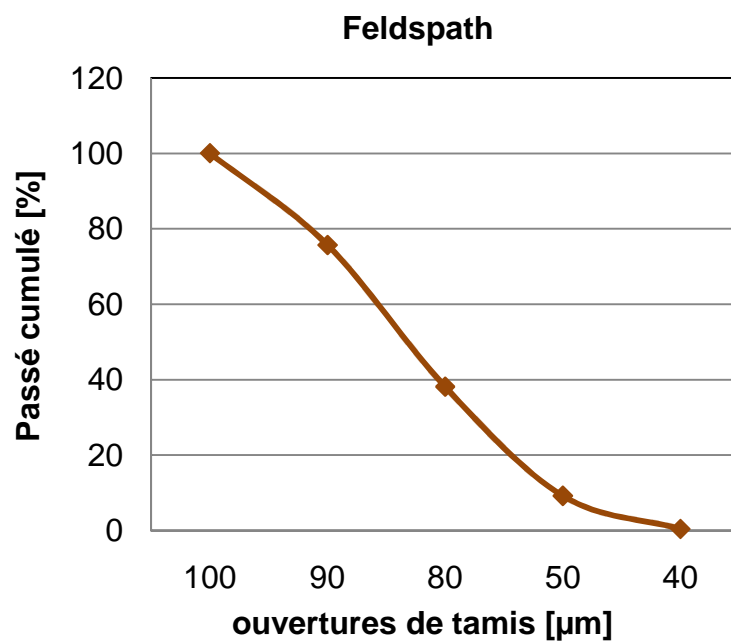


Figure 7 : Courbe d'analyse granulométrique du feldspath.

Chapitre V : Essai de fabrication de matériau isolant électrique en céramique

I. PRETRAITEMENTS DES MATIERES PREMIERES

I.1. LE KAOLIN

Après l'extraction du kaolin, plusieurs opérations ont été faites davantage :

Etuvage.

Avant la manipulation totale pour la fabrication, il faut mettre les échantillons dans une étuve à 110 °C pendant 48h. Ceci est dans le but d'éliminer l'humidité de la matière car l'humidité élevée entraîne un grand retrait au produit au cours de la cuisson.

Broyage.

Après étuvage, le produit doit être broyé soit à l'aide d'un broyeur mécanique, pour les matières dures, soit par un rouleau à bois ou mortier pour les matières argileuses et la cendre de la balle de riz.

L'objectif de cette opération est de réduire en poudre ($\leq 100 \mu\text{m}$) les matières premières pour obtenir une bonne homogénéisation lors du mélange, et d'autre part pour obtenir un matériau assez compact après cuisson.

Tamisage.

Après le broyage, il faut déterminer la granulométrie, ceci permet de caractériser le module de finesse des matières premières à utiliser.

Dans cette étude, nous avons utilisé pour chaque matière première, des poudres dont la granulométrie est inférieure ou égale à 100 μm .

I.2. LA SILICE

Dans notre cas, nous avons utilisé de la cendre des balles de riz provenant de fabricant des briques de Vontovorona.

Nous l'avons broyé jusqu' à obtenir une granulométrie $\leq 100 \mu\text{m}$.

I.3. FELDSPATH

Le feldspath que nous avons utilisé a été fourni par la société PROCHIMAD. Il est sous forme de poudre fine (granulométrie 100 μ m), de couleur grise claire. Dans notre expérience, nous l'avons utilisé directement après pesage.

II. PREPARATION DE LA PATE

La préparation de la pâte est conditionnée par la teneur en eau.

Dosage.

Le dosage se fait en poids. Nous avons utilisé une balance numérique.

Mélange.

❖ Mélange à sec

Pour avoir une pâte bien homogène, il faut bien mélanger les trois matières premières avant d'ajouter l'eau.

❖ Mélange humide

La quantité de l'eau ajoutée au mélange joue un très grand rôle pour avoir une bonne pâte à mouler ou à tourner. Après utilisation d'une teneur en eau de 33% en masse, nous avons malaxé la pâte pendant un certain temps jusqu'à la répartition totale de l'eau dans le produit.

L'opération a été faite manuellement et l'estimation de la qualité de la pâte visuellement.

Moulage.

La figure suivante montre le moule que nous utilisons dans tous les essais effectués dans ce travail de mémoire :



Figure 8 : Le moule utilisé

La dimension intérieure de notre moule est :

$$L \times l \times E = 3,3\text{cm} \times 2,5\text{cm} \times 2\text{cm}$$

Séchage.

Pour éviter les cassures dues au retrait brusque, nous avons séché d'abord les échantillons à l'air libre pendant 7 jours ; ensuite nous avons terminé le séchage dans une étuve à 105°C pendant 48h.

Cuisson.

La cuisson des produits céramiques s'effectue à des températures allant de 1400°C à 1600°C, mais pour notre cas, nous avons effectué la cuisson à 1150°C ceci pour faute de matériel.

Pour éviter les cassures dues à une augmentation et une diminution brusque de température lors de la cuisson, nous avons choisi une variation de température de l'ordre de 5°C/mn. On a les courbes de cuisson suivantes :

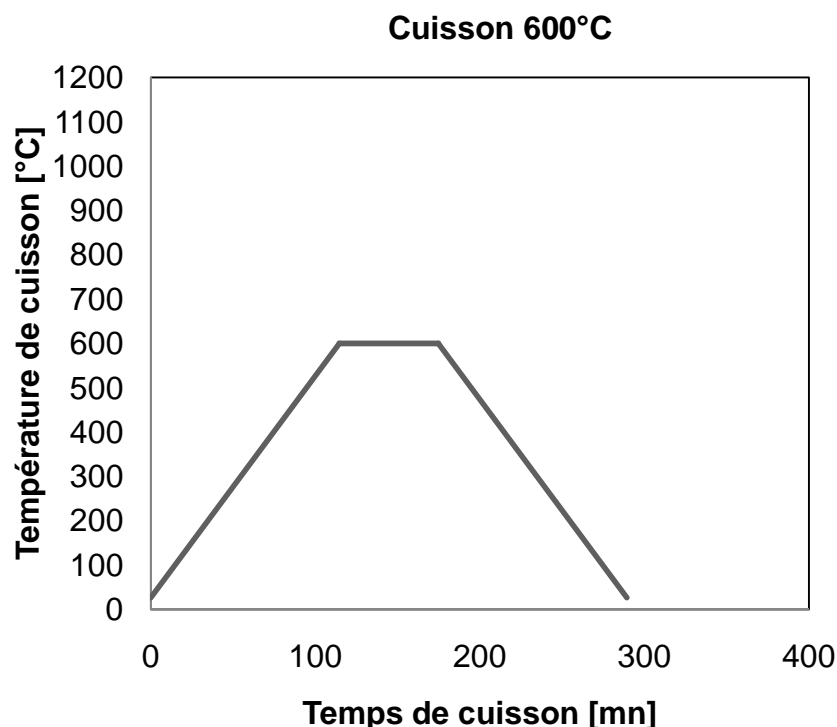


Figure 9 : Courbe de cuisson 600°C

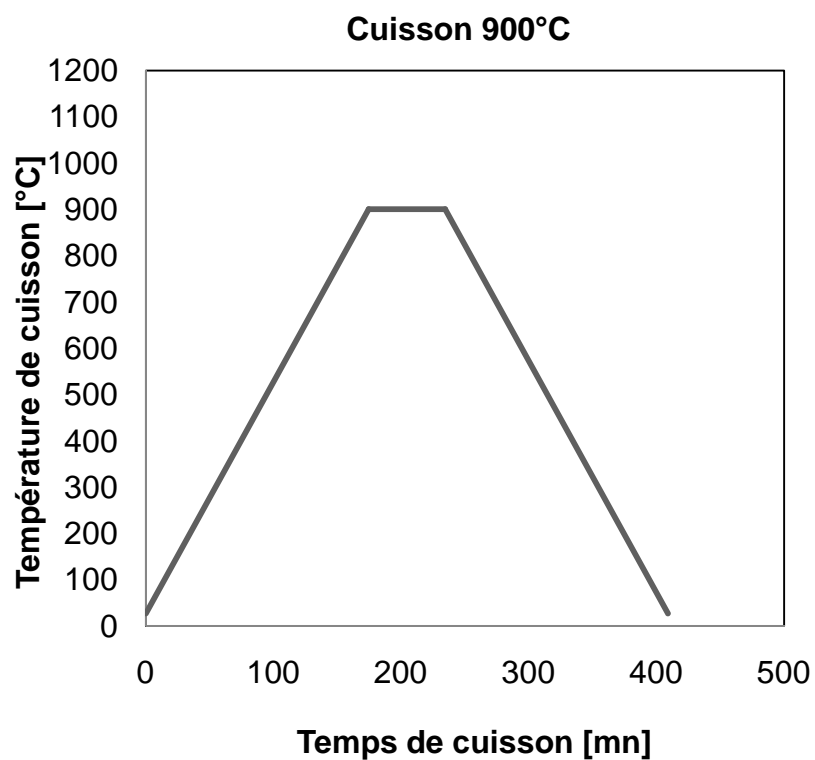


Figure 10 : Courbe de cuisson 900°C

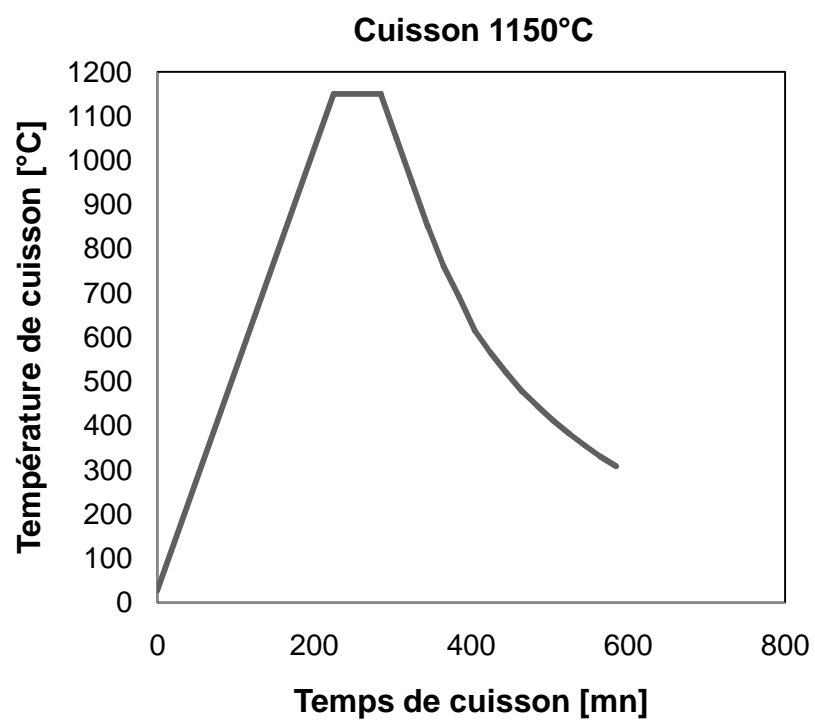


Figure 11 : Courbe de cuisson 1150°C

III. COMPOSITIONS ET CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS AVANT ET APRES CUISSON

III.1. IDENTIFICATION DES ECHANTILLONS.

Selon la bibliographie, la composition des pâtes céramiques pour les isolants électriques est donnée dans le tableau 3 .Pour trouver la composition optimum de notre matériau isolant, nous avons pris 12 échantillons de composition différente.

Voici le tableau récapitulant les rapports que nous avons pris pour nos essais.

Tableau 12 : Composition des échantillons.

N°	Kaolin [%]	Silice [%]	Feldspath [%]
1	55	25	20
2	50	25	25
3	45	25	30
4	40	25	35
5	50	30	20
6	45	30	25
7	40	30	30
8	35	30	35
9	45	35	20
10	40	35	25
11	35	35	30
12	30	35	35

III.2. RESULTATS DE MASSE ET DE DIMENSIONS DES PRODUITS AVANT CUISSON

En vu de déterminer le retrait, nous avons mesuré les masses et les dimensions de chaque échantillon avant et après séchage.

Voici le tableau récapitulatif de ces mesures :

Tableau 13 : Valeurs de masse et de dimensions des produits avant cuisson.

N°	M ₀ (g)	L (cm)	I (cm)	E (cm)	M ₁ (g)	L (cm)	I (cm)	E (cm)
1	29,070	3,3	2,5	2	20,203	3,2	2,4	2
2	29,114	3,3	2,5	2	19,999	3,2	2,4	2
3	29,154	3,3	2,5	2	20,931	3,2	2,4	2
4	30,457	3,3	2,5	2	22,140	3,2	2,4	2
5	29,775	3,3	2,5	2	19,913	3,2	2,4	2
6	29,444	3,3	2,5	2	20,419	3,2	2,4	2
7	29,055	3,3	2,5	2	19,330	3,2	2,4	2
8	29,419	3,3	2,5	2	19,559	3,2	2,4	2
9	29,145	3,3	2,5	2	19,511	3,2	2,4	2
10	27,392	3,3	2,5	2	18,530	3,2	2,4	2
11	27,945	3,3	2,5	2	18,590	3,2	2,4	2
12	27,357	3,3	2,5	2	17,999	3,2	2,4	2

Avec N° : Numéros de l'échantillon,

L : longueur de l'échantillon en cm ;

I : largeur de l'échantillon en cm;

E : épaisseur de l'échantillon en cm;

P₀ : Porosité totale en %.

R_i : le retrait linéaire en % ;

Di : densité apparente ;

i variant de 1 à 3 et correspond à 1= 600°C, 2= 900°C, 3= 1150°C.

M₀ : Masse de l'échantillon avant séchage

M₁ : Masse de l'échantillon après séchage

M_2 : Masse de l'échantillon après cuisson 600°C

M_3 : Masse de l'échantillon après cuisson 900°C

M_4 : Masse de l'échantillon après cuisson 1150°C

1. Caractéristiques des produits après cuisson 600 °C

Tableau 14 : Valeurs des masses et des dimensions des produits après cuisson 600 °C.

N°	M_2 (g)	L (cm)	I (cm)	E (cm)	R_1 (%)	D_1
1	19,559	3,2	2,4	1,9	3,03	1,34
2	19,437	3,2	2,4	1,9	3,03	1,33
3	20,114	3,2	2,4	1,9	3,03	1,37
4	21,443	3,2	2,4	1,9	3,03	1,46
5	19,305	3,2	2,4	1,9	3,03	1,32
6	19,775	3,2	2,4	1,9	3,03	1,35
7	18,752	3,2	2,4	1,9	3,03	1,28
8	19,051	3,2	2,4	1,9	3,03	1,30
9	18,110	3,2	2,4	1,9	3,03	1,24
10	17,950	3,2	2,4	1,9	3,03	1,23
11	18,153	3,2	2,4	1,9	3,03	1,24
12	17,474	3,2	2,4	1,9	3,03	1,19

2. Caractéristiques des produits après cuisson 900 °C.

Tableau 15 : Valeurs des masses et des dimensions des produits après cuisson 900°C.

N°	M ₃ (g)	L (cm)	I (cm)	E (cm)	R ₂ (%)	D ₂
1	18,597	3,1	2,4	1,9	4,54	1,29
2	18,459	3,1	2,4	1,9	4,54	1,28
3	18,905	3,1	2,4	1,9	4,54	1,31
4	20,092	3,1	2,4	1,9	4,54	1,39
5	18,090	3,1	2,4	1,9	4,54	1,25
6	18,594	3,1	2,4	1,9	4,54	1,29
7	17,532	3,1	2,4	1,9	4,54	1,22
8	18,890	3,1	2,4	1,9	4,54	1,31
9	17,007	3,1	2,4	1,9	4,54	1,18
10	16,953	3,1	2,4	1,9	4,54	1,18
11	17,151	3,1	2,4	1,9	4,54	1,19
12	16,453	3,1	2,4	1,9	4,54	1,14

3. Caractéristiques des produits après cuisson 1150 °C

Tableau 16 : Valeurs des masses et des dimensions des produits après cuisson 1150 °C.

N°	M ₄ (g)	L (cm)	I (cm)	E (cm)	R ₃ (%)	D ₃	Po (%)
1	18,532	3,1	2,3	1,9	4,54	1,34	32,23
2	18,397	3,1	2,3	1,9	4,54	1,33	32,50
3	18,835	3,0	2,3	1,9	7,57	1,41	23,97
4	19,415	3,1	2,2	1,9	6,06	1,49	23,17
5	17,035	3,0	2,2	1,7	7,57	1,49	26,22
6	18,571	3,1	2,2	1,8	6,06	1,51	24,89
7	17,515	3,0	2,2	1,8	7,57	1,45	25,16
8	18,591	3,0	2,2	1,9	7,57	1,45	25,14
9	16,937	3,0	2,2	1,8	7,57	1,40	29,83
10	16,797	3,1	2,3	1,9	6,06	1,23	30,33
11	17,090	3,0	2,3	1,8	7,57	1,35	27,74
12	16,359	3,0	2,2	1,8	7,57	1,33	31,39

Observations et interprétations :

Après la cuisson de 1150°C, nous ne trouvons pas de fissuration pour tous les échantillons.

Nous observons que si on fait augmenter la teneur en feldspath, la brique devient plus compacte mais la valeur de retrait linéaire augmente.

Nous constatons que la porosité est liée avec la granulométrie des matières premières. Plus la granulométrie est fine plus le volume des pores diminue.

Nous avons vu aussi que les briquettes prennent du retrait au cours de leur séchage et de leur cuisson. Il y a lieu, en conséquence, de prévoir les dimensions à donner aux pièces que nous façonnons pour que celles-ci aient les cotes définitives voulues après cuisson.

Les essais de rayure successive entre les échantillons 1 à 12 ont montré que c'est l'échantillon 12 qui est la plus dure. Sa valeur de retrait linéaire égal à 7,57%, de cette valeur nous pourrions façonner notre produit de façon à approcher au mieux les dimensions finales désirées. C'est l'échantillon qu'on va utiliser pour notre pièce.



Figure 12 : Cliché des briquettes après cuisson 1150°C

III.3. TEST DE RESISTIVITE AUX CHOCS THERMIQUES

1. Méthode

Nous avons versé du plomb fondu sur le produit et nous observons le comportement du produit après.



Figure 13 : Echantillon avec du plomb fondu en dessus



Figure 14 : Echantillon après test au plomb fondu

Interprétation des résultats :

L'observation sur le comportement des échantillons (figures) après ces différents tests montre que ces échantillons ne présentent aucune fissuration ni ramollissement, ils restent tous intacts. Ceci montre que nos produits résistent bien aux chocs thermiques.

Chapitre VI : Travaux de réalisation

I. CONCEPTION ET ELABORATION D'UN MOULE

Nous pouvons ainsi modéliser et concevoir le moule que nous allons utiliser pour le façonnage de notre pièce à partir des résultats que nous avons obtenu précédemment.

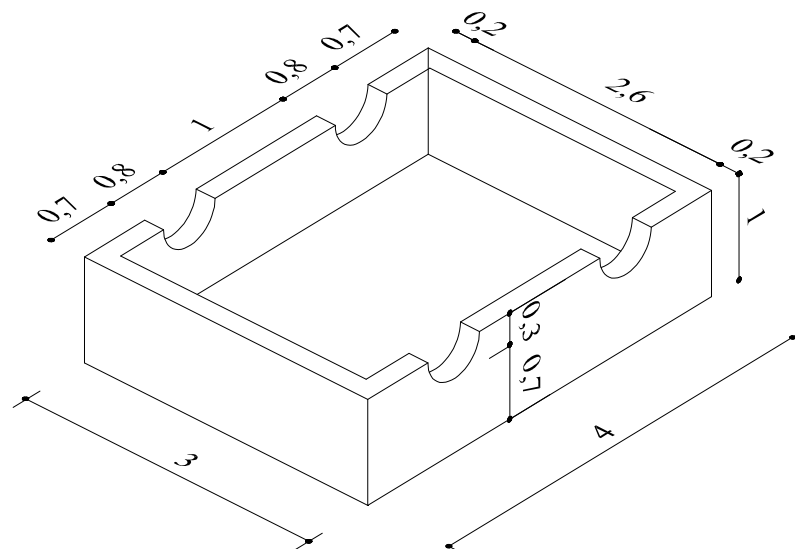
I.1. CHOIX DU MATERIAU

Le matériau utilisé pour le moule est donc choisi de façon à permettre une facilité de mise en œuvre. Dans notre cas, nous avons utilisé la tôle d'épaisseur 10/10 et 20/10.

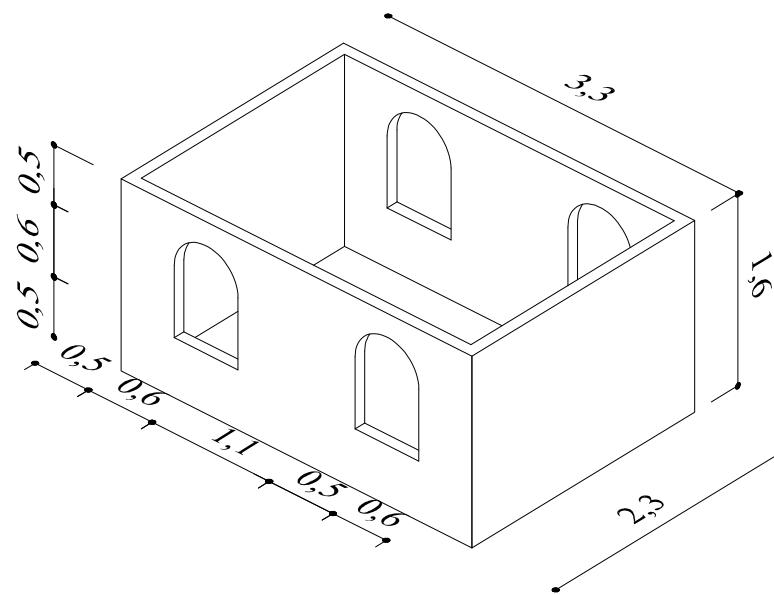
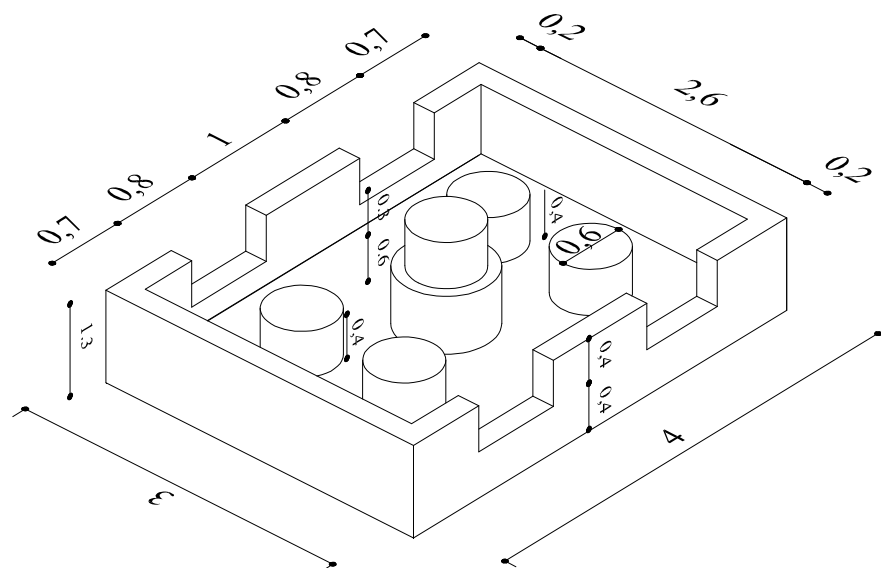
I.2. DIMENSIONNEMENT DE LA MOULE

Le dimensionnement du moule est fonction :

De la forme de pièce à reproduire, ainsi le moule que nous avons construit a une forme rectangulaire.



Couvercle

**Corps du moule****Fond du moule****Figure 15 : Schémas des différentes pièces du moule utilisé pour la fabrication des dominos**

Ainsi, le calcul des dimensions de la pièce se présente comme suit :

Pour les dimensions initiales du moule $L = 3,3\text{cm}$, $l = 2,3\text{cm}$, $E = 1,6\text{cm}$ et un retrait de 7,57%, nous devons avoir le diamètre final de notre produit de l'ordre de :

Nous avons la formule du retrait :

$$\frac{(L_0 - L)}{L_0} \times 100 = 7,57\%$$

$$\text{Soit } L = L_0 \times (1 - 0,0757)$$

$$\text{D'où } L = 3,3 \times (1 - 0,0757) \leftrightarrow L = 3\text{cm}, \text{ longueur de la pièce.}$$

La même méthode de calcul est effectuée pour la détermination de la largeur et l'épaisseur, ainsi nous avons une pièce de largeur 2,1cm et d'épaisseur 1,5cm.

II. PREPARATION DES MATIERES PREMIERES UTILISEES

Les différentes étapes à suivre que nous avons déjà précisées plus haut, sont les suivantes :

- *Etuvage*
- *Broyage*
- *Tamisage*

III. FAÇONNAGE

Comme déjà entamer dans le chapitre précédant, les étapes à suivre sont les suivantes :

1. *Dosage.*
2. *Mélange*
3. *Moulage par pressage :*

L'exécution du pressage est une étape primordiale que nous ne pourrions négliger. Dans notre cas, nous avons opéré, afin d'éviter le défaut de feuillete, en utilisant la presse à vis, appelée aussi presse à volant. La pression est donnée par le serrage d'une vis entraînée par le serrage d'un volant. Elle est actionnée à la main et nécessite un travail musculaire.

a. Réalisation de la presse :

Pour la conception de la presse, nous avons utilisés différents matériaux.

Le tableau suivant nous donne ces matériaux utilisés ainsi que leurs dimensions.

Tableau 17 : Détail technologique de la presse

Parties de la presse	Les matériaux utilisés avec caractéristiques
Corps	Fer U coudé d'épaisseur 30/10
Volant et presseur	tôle formée d'épaisseur 10/10
Vis	boulon (mi pas de vis) de diamètre de 8cm
Pied	Tôle d'épaisseur 30/10

Les figures ci-après illustrent les mesures de la presse que nous avons fabriquée. Ces dernières ont été choisies en fonction de la forme du moule.

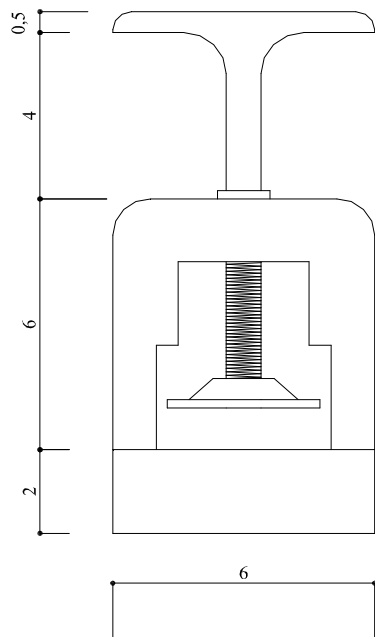
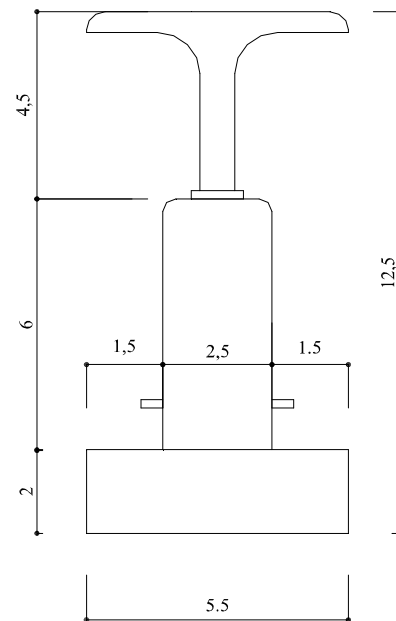
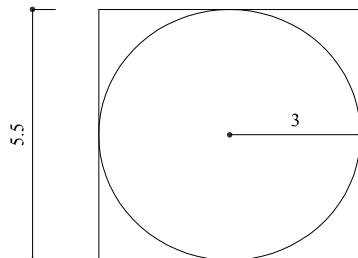
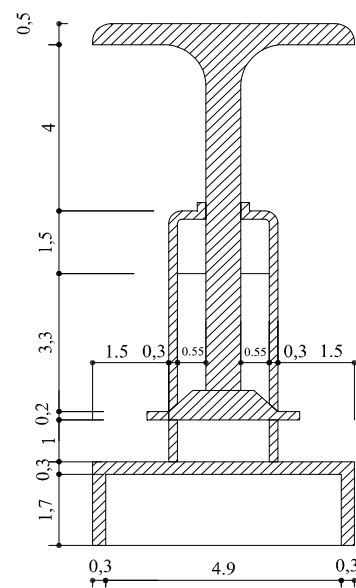
VUE DE FACEPROFILVUE DE DESSUSCOUPE**Figure 16 : Schémas de la presse**



Figure 17 : Presse à volant

4. Séchage :

Pour cette étape, nous avons cherché à ralentir l'évaporation superficielle de l'eau pour réaliser au mieux les séchages délicats et aussi pour éviter aux pièces des fissurations. Ainsi, pour notre cas, nous avons séché les pièces pendant 7 jours à l'air libres puis 48 heures dans l'étuve à 110°C.

5. Cuisson :

Nous avons effectués la cuisson à 1150°C avec une variation de température de l'ordre de 5°C/mn.

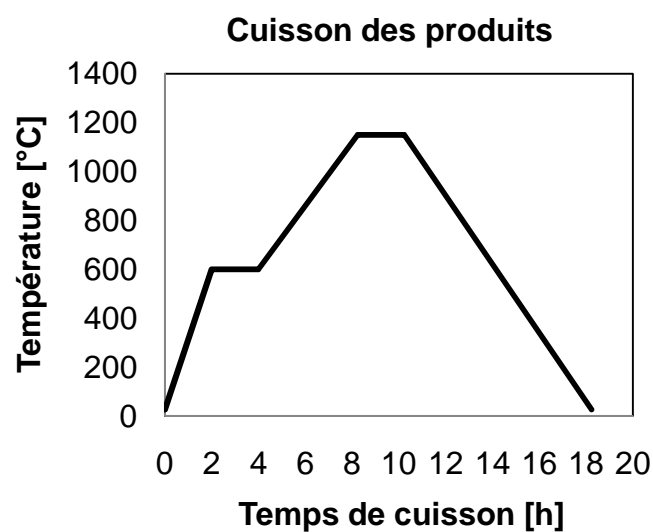


Figure 18 : Courbe de cuisson des produits

Interprétations :

Nous avons pu arriver à la réalisation du domino de bonne qualité et de bonne efficacité en matière d'isolation.

Pour analyser la résistivité de nos échantillons à l'œuvre, nous avons effectué un test consistant à déterminer l'affaissement ou le changement de forme de ces derniers lorsqu'ils sont mis dans les conditions réelles de travail.

Ce test consiste à utiliser nos échantillons pour la jonction des fils électriques avec la résistance du réchaud éclectique (puissance 1500w) pendant une durée de cinq heures.

D'après ce test, nous avons vu que nos échantillons ne présentent aucun changement. Ils peuvent donc supporter une intensité de 7A. Cette valeur est obtenue à partir de la relation $I=P/U$

Où P : puissance électrique [w]

U : tension [v]

I : intensité du courant [A]



Figure 19 : Cliché des produits



TROISIEME PARTIE :

ETUDE ECONOMIQUE DE L'UNITE DE PRODUCTION

Chapitre VII : Raison du choix du projet et caractéristiques de l'unité

I. RAISON DU CHOIX DU PROJET

I.1. PREPONDERANCE DES MATIERES PREMIERES

Madagascar est un pays doté d'une énorme potentialité en matière de ressource minérales. Sur ce, il y a des matières premières existant localement en quantité importante et facile d'accès, et qui méritent d'être de plus en plus exploitées. Le kaolin figure parmi ces matières premières.

Parallèlement à cela, nous pouvons citer le cas des balles de riz dont l'utilisation est fortement réduite à la cuisson des briques artisanales, mais aussi pour certains ne sont que des déchets encombrants. Alors que son exploitation s'avère être bon marché et très utile surtout la silice provenant de la balle de riz.

I.2. POLITIQUE DE DEVELOPPEMENT SOCIO-ECONOMIQUE

Face au développement de notre pays, il nous est indispensable de contribuer à la valorisation de ces matières premières. En plus, après avoir pris avis sur les activités économiques du pays, nous avons remarqué que le projet pourrait engendrer un facteur de travail non négligeable.

II. CARACTERISTIQUES DE L'UNITE

II.1. REGIME DE TRAVAIL ET PRODUCTION

Nous envisageons dans le cadre de cette étude d'implanter à Madagascar une unité de production dont la capacité de traitement est de 5 tonnes de matières premières par an, et de produire ainsi le maximum de produits selon les commandes des clients.

On aura 8 heures de travail par jour et on travaillera 6 jours par semaine, donc, 24 jours par mois. En soustrayant les jours fériés, on aura en total 240 jours de travail par an.

II.2. DIFFERENTES INSTALLATIONS DE SURFACE

Pour l'unité de production, on envisage de construire :

- Une salle de stockage des matières premières
- Une salle de broyage et tamisage
- Une salle de mélange et malaxage
- Une salle de pressage
- Une salle de cuisson
- Une salle de stockage des produits finis

II.3. CONSOMMATION EN INTRANTS

Plusieurs intrants entrent dans le processus de production de nos produits. Pour son fonctionnement, l'unité a besoin d'énergie et de l'eau.

II.4. CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES ET DES PRODUITS

Les matières premières utilisées que nous avons déjà énoncées dans les chapitres précédentes sont la cendre de balles de riz, le feldspath et le kaolin.

Les productions sont caractérisées par :

- Des produits ayant les dimensions et formes requises,
- Ayant la valeur de la conductivité thermique voulue pour une bonne isolation, et aussi subissant un test de conductivité électrique et de résistivité aux chocs thermiques.

Chapitre VIII : Etude financière de l'unité

I. LES COUTS D'INVESTISSEMENT

I.1. COUT DE CONSTRUCTION

Tableau 18 : Coût de construction

Désignation	Unité	Quantité	PU (Ar)	Montant (Ar)
Terrain	m ²	80	90.000	720.000
Construction	-	-	-	8.000.000
TOTAL₁				8.720.000

$$T_1 = 8.720.000 \text{ Ar}$$

I.2. LES COUTS DES MATERIELS DE PRODUCTION

Tableau 19 : Les coûts des matériels de production

Désignation	Nombre	PU (Ar)	Montant (Ar)
Four électrique	1	20.000.000	20.000.000
Broyeur	1	2.000.000	2.000.000
Tamis	3	40.000	120.000
Etuve	1	9.750.000	9.750.000
Balance	1	100.000	100.000
Moule	10	30.000	300.000
Four artisanal	1	40.000	40.000
Presse	1	200.000	200.000
TOTAL₂	20		32.510.000

$$T_2 = 32.510.000 \text{ Ar}$$

I.3. DIVERS MATERIELS

Tableau 20 : Divers matériels

Désignation	Nombre	PU (Ar)	Montant (Ar)
Matériels de bureau :			
Table (pin, vernissé)	2	10.000	20.000
Ordinateur complet	1	700.000	700.000
Chaise	4	10.000	40.000
Matériels de transport :			
Camion	1	10.000.000	10.000.000
Installation : électricité	-	500.000	500.000
Eau	-	1.000.000	1.000.000
TOTAL₃	-	-	12.260.000

$$T_3 = 12.260.000 \text{ Ar}$$

I.4. COUT TOTAL D'INVESTISSEMENT

C'est la somme du coût de construction, du coût des appareillages et divers matériels.

$$I_1 = T_1 + T_2 + T_3$$

$$I_1 = 8.720.000 + 32.510.000 + 12.260.000$$

$$I_1 = 53.490.000 \text{ Ar}$$

I.5. QUALIFICATION ET CHARGE DU PERSONNEL

Tableau 21 : Qualification et charge du personnel

Personnel	Qualification	Effectif	Salaire/mois
Chef d'usine	Ingénieur	1	800.000
Assistant- comptable	Gestionnaire	1	200.000
Ouvrier	Baccalauréat	8	150.000
Gardien	-	1	100.000
TOTAL		7	2.300.000

$$I_2 = \text{salaire annuelle} = \text{salaire /mois} \times 12$$

$$I_2 = 2.300.000 \times 12$$

$$I_2 = 27.600.000 \text{ Ar}$$

II. LES FRAIS OPERATOIRES

II.1. MATIERES PREMIERES

Tableau 22 : Le coût des matières premières

Numéro	Désignation	PU (Ar)	Quantité	Montant (Ar)
1	Kaolin	30.500 Ar/20kg	1.500kg	4.575.000
2	Balles de riz	800 Ar/20kg	1.750 kg	140.000
3	Feldspath	40.000 Ar/50kg	1.750 kg	1.400.000
	TOTAL			6.115.000

$$I_3 = 6.115.000 \text{ Ar}$$

1. Electricité et eau

- Electricité : $20 \text{ kWh/h} \times 8 \text{ h} \times 240 \text{ j} = 38.400 \text{ kWh par an}$

Soit $38.400 \times 205 \text{ Ar} = 7.872.000 \text{ Ar}$

- Eau : $3 \text{ m}^3/\text{h} \times 8 \text{ h} \times 240 \text{ j} = 5760 \text{ m}^3 \text{ par an}$

Soit $5.760 \times 360 \text{ Ar} = 2.073.600 \text{ Ar}$

2. Pièces à l'intérieur des dominos

D'après la mesure du moule que nous avons utilisée dans la partie précédente, on a pu remarquer que nous pouvons produire six(6) dominos à partir de 100g de matières premières ; donc pour la capacité de traitement de 5 tonnes par ans, nous aurons 300.000 produits.

Tableau 23 : Le coût des pièces à l'intérieur des dominos

Désignation	Quantité	Prix unitaire (Ar)	Montant (Ar)
Pièces	300.000	200	60.000.000

$$I_4 = 6.115.000 + 7.872.000 + 2.073.600 + 60.000.000$$

$$I_4 = 76.060.600 \text{ Ar}$$

La somme des charges variables est :

$$\text{CV} = 76.060.600 \text{ Ar}$$

III. FRAIS DE DEMARRAGE

Les frais de démarrage sont composés par les frais dus aux matières premières utilisées pendant les premiers mois de la production, ceux dus aux utilités (eau et électricité) consommés pendant cette période, ainsi que les salaires du personnel de production et de maintenance.

$$I_5 = (\text{Charge variable}/12) + (\text{Main d'œuvre}/12)$$

$$I_5 = 8.638.383 \text{ Ar}$$

IV. AMORTISSEMENT

L'amortissement annuel permet d'évaluer la dépréciation annuelle de l'installation, donc l'investissement entrepris. Il doit se faire en général sur une période inférieure à la durée de vie de l'installation.

Dans notre cas, la base du calcul se fait sur une période de cinq ans, délai après lequel l'unité doit rembourser les investissements. On fera le calcul suivant la méthode de l'amortissement linéaire.

$$A = \frac{CA}{n}$$

Le capital amortissable est la somme de tous les investissements :

- Matériels : 32.510.000 Ar
- Construction : 8.720.000 Ar
- Frais de démarrage : 8.638.383 Ar
- Transport et installation : 12.260.000 Ar

Donc

Le capital amortis (CA) : 62.128.383 Ar

La durée d'amortissement (n) : 5 ans

L'amortissement (A) est donc 12.425.677 Ar

Cette somme de 62.128.383 Ar sera empruntée auprès de la banque avec un taux d'intérêt de 18%. L'intérêt à payer pour la première année d'exercice est 11.183.108 Ar.

V. MONTANT DES CHARGES FIXES

La valeur totale des charges fixes par an est :

Tableau 24 : Montant des charges fixes

Désignation	Montant (Ar)
Rémunération des personnels	27.600.000
Amortissement	12.425.677
TOTAL	40.025.677

VI. COUT OPERATOIRE

Le coût opératoire CO comprend les charges fixes ainsi que l'ensemble des charges variables.

$$CO = CF + CV$$

$$CO = 116.086.277 \text{ Ar}$$

VII. CHIFFRE D'AFFAIRE : CA

D'après le paragraphe précédent, on a décidé de produire 7500 de produits par semaine.

D'où le chiffre d'affaire annuel est :

Tableau 25 : Chiffre d'affaire annuel

Désignation	Quantité	Prix unitaire (Ar)	Montant (Ar)
Notre produit	300.000	500	150.000.000

VIII. SEUIL DE RENTABILITE ET LE DELAI POUR ATTEINDRE CE SEUIL

❖ Calcul de la marge sur coût variable (MCV) et le résultat d'exploitation.

Tableau 26 : Marge sur coût variable

Rubrique	Montant (Ar)
Chiffre d'affaire (CA)	150.000.000
Charge variable (CV)	76.060.600
Marge sur coût variable (MCV) MCV = CA – CV	73.939.400
Charge fixe (CF)	40.025.677
Résultat de l'exploitation (RN) RN = MCV - CF	33.913.723

❖ Seuil de rentabilité (SR) :

$$SR = \frac{CA \times CF}{MCV}$$

$$SR = \frac{150.000.000 \times 40.025.677}{73.939.400}$$

$$SR = 81.199.624 \text{ Ar}$$

❖ Délai pour atteindre le seuil de rentabilité

$\text{Délai pour atteindre le seuil de rentabilité} = \frac{SR \times \text{Temps d'activité}}{\text{Chiffre d'affaire}}$

Temps d'activité = 240 jours

Délai pour atteindre le seuil de rentabilité = 130 jours

IX. INVESTISSEMENT GLOBAL

Il se détermine par la formule :

Investissement globale $I_0 = \text{Immobilisation} + \text{Fond de roulement}$

Le fond de roulement interne est prévu pour assurer les dépenses pendant 2 mois.

$$\text{Donc, FRI} = 2 \times I_5 = 2 \times 8.638.383 \text{ Ar}$$

$$\text{FRI} = 17.276.766 \text{ Ar}$$

Donc l'investissement global est :

Tableau 27 : Investissement global

Désignation	Montant (Ar)
Immobilisation	62.128.383
Fond de roulement	17.276.766
TOTAL	79.405.149

X. RESULTAT PREVISIONNEL DE LA PREMIERE ANNEE DU FONCTIONNEMENT

Tableau 28 : Résultat prévisionnel de la première année du fonctionnement

Désignation	Valeur (Ar)
Chiffre d'affaire (CA)	150.000.000
Total des charges (Rémunération et charges variables)	103.660.600
Excédent brut d'exploitation ou Résultat (EBE) (CA – Total des charges)	46.339.400
Amortissement	12.425.677
Intérêt	11.183.108
Bénéfice fiscal (EBE – Amortissement – Intérêt)	22.730.615
Impôts sur les bénéfices (30%)	6.819.184
Cash flow (Bénéfice fiscal – IBS + Amortissement)	28.337.108

XI. RECAPITULATION GENERALE

❖ Rentabilité commerciale

$$\text{Rentabilité commerciale} = \frac{\text{Résultat}}{\text{Chiffre d'affaire}}$$

$$\text{Rentabilité commerciale} = 46.339.400/150.000.000 = 30,89 \%$$

❖ Rentabilité économique

$$\text{Rentabilité économique} = \frac{\text{Résultat}}{\text{Capital investi (CO)}}$$

$$\text{Rentabilité économique} = 46.339.400/116.086.277 = 40 \%$$

D'après les calculs que nous avons effectués, nous pouvons dire qu'un investissement dans ce domaine serait rentable et bénéfique du point de vue économique.

C'est un projet non seulement réalisable mais aussi pourrait apporter beaucoup d'avantage à notre pays. Il permet d'être moins dépendant des produits étrangers et aussi de créer du travail.

Conclusion générale

Le but de ce présent mémoire est d'étudier la fabrication d'un isolant électrique en céramique : cas d'un domino.

Nous avons fait d'abord les rappels bibliographiques concernant les matériaux céramiques à savoir leurs matières premières, leurs procédés de fabrication et leurs utilisations en tant qu'isolant électrique et thermique.

Les études expérimentales sont particulièrement axées sur la caractérisation des matières premières, l'essai de fabrication d'un matériau céramique et les travaux de réalisation.

Plusieurs échantillons ont été étudiés et nous avons vu que le mélange du kaolin, de la silice du balle de riz et du feldspath (de compositions respectives 30%, 35% et 35%) après cuisson à 1150°C permet d'aboutir à la fabrication d'un bon isolant électrique. Pour chaque échantillon, nous avons systématiquement effectué la détermination du retrait, de la densité apparente, de la porosité, de la résistance aux chocs thermiques et enfin de la conductivité électrique.

Ensuite, pour la conception du moule de la mise en forme du produit, nous avons opté à l'utilisation d'une tôle de façon à permettre une facilité de mise en œuvre.

D'après ces études, nous avons pu arriver à la réalisation du domino de bonne qualité, de bonne efficacité en matière d'isolation, disponible à tous publics, de prix moins onéreux et qui peut concurrencer avec les produits importés.

Enfin, nous avons effectué une étude économique d'une unité de production du matériau isolant, qui s'avère être un projet bien plus rentable, et économiquement avantageux qui pourra apporter beaucoup de développement de notre pays. Bref, tout au long de cette recherche, on a pu remarquer que notre étude n'est pas seulement limitée à la fabrication d'un domino mais aussi elle peut nous être utile à la confection des autres matériaux isolants comme l'interrupteur, la prise, la douille, etc.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. A.ETIENNE, Techniques de l'ingénieur, RIBER- Paris
- [2]. Denis DUMORA, Matériaux conducteurs et isolants. Techniques de l'ingénieur, 1991
- [3]. M .HAUSSONNE, Généralités. Matériaux. Techniques de l'ingénieur ,1991
- [4]. M. HAUSSONNE, Technologie céramique générale, Edition 1969
- [5]. P.BERMOND, Produits céramiques fins. Techniques de l'ingénieur, 1956
- [6]. RABIBISOA Daniel Hari-Manantsimba, « *Conception et réalisation d'un système de gestion de base de données des matières premières utilisés en céramiques de Madagascar* ». [THESE : Pour obtenir le grade de DOCTEUR INGENIEUR]. Génie Chimique, option : chimie minérale, 2005
- [7]. RABIBISOA Daniel Hari-Manantsimba, « *Etude de quelques pâtes céramiques et glaçures préparées à partir des matières premières de Madagascar* ». [Mémoire de D.E.A.]. Génie Chimique, option : Chimie minérale, 1986
- [8]. RAHARISON Fehiniaina. « *Conception et réalisation d'un broyeur à boulets en céramique* ». [Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique]. E.S.P.A., Avril 2009.
- [9]. RAKOTOARIVELO Jaotiana David. « *Contribution à l'étude d'un matériau réfractaire isolant à base de silice de la balle de riz et du kaolin* ». [Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique].E.S.P.A. ,2006.
- [10]. RAKOTONDRAZAFY Hobiniaina. « *Contribution à l'élaboration d'un isolant électrique et thermique en céramique à base de kaolin et de silice de la balle de riz : cas d'un réchaud électrique* ». [Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur en Génie Chimique]. E.S.P.A.,2008.

- [11]. "Réfractaires, matériaux" Encyclopédie Microsoft® Encarta® en ligne 2008
<http://fr.ca.encarta.msn.com> © 1993-2007 Microsoft Corporation.
- [12]. <http://www.fr.wikipedia.org/wiki/céramique>
<http://www.fr.wikipedia.org/wiki/isolant>

ANNEXES

ANNEXES A

ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

1. Détermination du taux d'humidité

Principe : taux d'humidité = teneur en eau

Matériels :

- 1 creuset
- 1 étuve réglée à 110°C
- 1 balance
- 1 dessiccateur
- 0,5 gramme d'échantillon de matière à analyser

Mode opératoire :

- Séchage du creuset dans l'étuve à 110°C pendant 30 minutes et refroidissement dans le dessiccateur pendant 20 minutes.

Pesée : masse du creuset = m_c

- Mettre dans le creuset la masse de 0,5 grammes d'échantillon de la matière à analyser.

Pesée : masse initiale (échantillon + creuset) = m_1 (avant étuvage)

- Séchage de l'ensemble (échantillon + creuset) dans l'étuve à 110°C pendant 4 heures. Refroidir dans le dessiccateur pendant 20 minutes.

Pesée : masse finale (échantillon + creuset) = m_2 (après étuvage)

$$\% \text{ Humidité} = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m_c)} \times 100$$

2. Détermination de la perte au feu

La perte au feu englobe l'eau de constitution des minéraux ; la matière organique, et le gaz carbonique des carbonates alcalino-terreux.

Sa détermination se fait par calcination à 1000°C de l'échantillon, la différence de poids avant et après calcination donne la valeur de la perte au feu.

3. Détermination de la densité apparente des échantillons

La densité est déterminée par le rapport de la masse volumique de l'échantillon (ρ_{ech}) avec celle de l'eau (ρ_{eau}).

$$\text{Où } \rho_{ech} = \frac{m_{ech}}{V_{ech}}$$

Ainsi, la densité s'écrit :

$$D_i = \frac{\rho_{ech}}{\rho_{eau}}$$

4. Détermination de la porosité

Mode opératoire :

- Nous immergeons dans l'eau une éprouvette pendant une durée de 48 heures, soit M_1 son poids.
- Puis, nous séchons cette éprouvette dans une étuve à 110°C pendant une durée de 48 heures, soit M_2 son poids.
- Soit M le poids sec de l'éprouvette.

La porosité, donnée en pourcentage, est le rapport de la différence du poids de l'éprouvette immergée durant 48 heures (M_1) avec le poids de l'éprouvette mise dans une étuve à 110 ° C durant 48 heures (M_2), au poids sec de l'éprouvette (M).

$$P_0 = \frac{M_1 - M_2}{M} \times 100$$

Remarquons que ce sont les briquettes obtenues après cuisson à 1200°C, que nous avons utilisé pour trouver les porosités.

ANNEXES B

ANALYSE CHIMIQUE DES MATIERES PREMIERES

But : Obtenir un filtrat F contenant Fe, Al, Mg, Ti, Ca, Ni et un résidu R contenant de la silice.

Mode opératoire :

- Attaquer dans un bêcher 1g d'échantillon avec 60ml de mélange triacide
- Chauffer progressivement jusqu'à fumé blanc, puis reprendre par HCl 10% (50ml)
- Filtrer, laver à l'HCl 10%, puis à l'eau bouillante et on obtient :
 - Le filtrat F contenant du Fe, Al, Mg, Ti, Ca, Ni
 - Le résidu R contenant de la silice à peser

1. Détermination du pourcentage de SiO_2

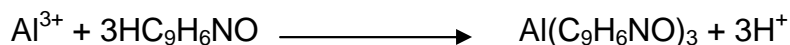
- Prise : résidu R
- Mettre ce résidu dans un creuset de platine déjà taré de poids M_1
- Mettre dans un four à 1000°C pendant au moins 2h 30mn, le creuset contenant le résidu sur papier filtre
- Peser le. Et soit M_2 son poids
- Calcul : $\% \text{SiO}_2 = (M_2 - M_1)100\%$

2. Détermination du pourcentage de Al_2O_3

- Prise : 100ml de filtrat F dans un bêcher
- Ajouter 30ml de précipitant
- Chauffer le mélange jusqu'à l'entrée en ébullition
- Placer ensuite le bêcher contenant le mélange dans un bain marie bouillant
- Pour séparer le précipité de Al $(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$, ajouter goutte à goutte à la solution, une solution de 2N de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$

- Laisser reposer la solution avec le précipité pendant 10 à 15mn dans le bain marie
- Filtrer ensuite à travers un creuset filtrant en verre futé préalablement lavé
- Sécher à 130°C jusqu'à poids constant.

Lors de la précipitation, il se produit la réaction :



- Calcul : Soit m la masse de $\text{Al}(\text{C}_9\text{H}_6\text{NO})_3$ obtenue à partir de 100ml de filtrat

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = 0.11 \cdot m \cdot F\%$$

3. Détermination du pourcentage de Fe_2O_3

- Prendre 100ml de filtrat de solution mère
- Diluer jusqu'à 200ml avec de l'eau distillée
- Faire agiter le mélange
- Prélever 20ml de cette solution diluée, et à l'aide d'une burette contenant de NH_4OH (50%), verser goutte à goutte jusqu'au virage ($\text{pH} = 4$)
- Ajouter rapidement 20ml de HCl 0.1N
- Ajouter 20ml d'eau oxygénée
- Titrer avec du permanganate 0.1N
- Calcul : Soit V en ml le volume versé de permanganate

$$\% \text{Fe}_2\text{O}_3 = 400 \cdot 10^{-3} V$$

4. Détermination du pourcentage de TiO_2

Pour la détermination de $\% \text{TiO}_2$, on utilise le résultat de dosage de Fe_2O_3 et Al_2O_3 , on a :

$$\% \text{Al}_2\text{O}_3 = \%(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) - \%(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$$

5. Détermination du pourcentage de CaO

- Prise : filtrat F
- Chauffer le filtrat F jusqu'au début d'ébullition
- Ajouter 15ml de NH_4Cl 10% plus quelques goutte de bleu de bromothymol, précipiter par l'ammoniaque concentré et puis filtrer
- On obtient le filtrat F' qui contient de Ca^{2+} et Mg^{2+} et un résidu R' qui contient le dépôt de Fe^{3+} , Ti^{4+} , Al^{3+}
- On reprend le résidu R' avec 100ml d'eau + HCl concentré et on ajoute 15ml de NH_4Cl à 10% et quelques gouttes de bleu de bromothymol
- Précipiter avec l'ammoniaque concentré jusqu'au virage de l'indicateur coloré et puis filtrer
- On obtient le filtrat F'' qui contient Mg^{2+} et Ca^{2+} et un résidu R'' qui contient Fe^{3+} , Ti^{4+} et Al^{3+}
- Réunir les filtrats F' et F'' dans un même bêcher et acidifier avec HCl concentré jusqu'à un teinte jaune
- Chauffer jusqu'à 70 à 80°C et ajouter 25ml de solution d'oxalate d'ammonium saturée
- précipiter avec l'ammoniaque concentré et laisser reposer une nuit avant de le filtrer et on R'''
- Le mélange de F' et F'' contient de Mg^{2+} et le résidu R''' contient le dépôt de précipité de Ca^{2+}
- Reprendre le résidu R''' avec H_2SO_4 10% et avec eau distillée et on ajoute 10ml de H_2SO_4 concentré et chauffer à 70 à 80°C
- On a dosé à chaud la solution avec KMnO_4 à 0.1N
- Résultat : V = volume de KMnO_4 trouvé en ml

$$\% \text{ CaO} = 0.56V$$

6. Détermination du pourcentage de MgO

- Prise : Mélange de filtrat F' et F''
- Acidifier le mélange avec HCl concentré jusqu'à une coloration jaune clair et ajouter 25ml de phosphate d'ammonium à 10%
- Précipiter à froid avec l'ammoniaque concentrée et laisser reposer une nuit et puis filtrer
- Prendre le résidu solide précipité de MgO
- Tarer et calciner un creuset porcelaine et soit M le poids trouvé
- Mettre le creuset et le papier filtre dans un four à 1000°C et peser. Et on a M'

$$\% \text{MgO} = 0.07244 (M' - M)$$

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE	I
Remerciements	III
LISTE DES ACRONYMES	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	V
LISTE DES FIGURES	VII
NOTATIONS ET UNITES.....	VIII
Introduction	1
PREMIERE PARTIE : ETUDES BIBLIOGRAPHIQUES	
Chapitre I : Généralités sur les céramiques	4
I. DEFINITION DE LA CERAMIQUE	4
II. PROPRIETES GENERALES DES CERAMIQUES	4
II.1. ASPECT	4
II.2. PROPRIETES MECANIQUES	4
II.3. PROPRIETES THERMIQUES	5
II.4. PROPRIETES ELECTRIQUES.....	5
II.5. PROPRIETES CHIMIQUES.....	5
III. LES PRINCIPALES MATIERES PREMIERES COMPOSANT LES PRODUITS CERAMIQUES.....	5
III.1. LES PLASTIFIANTS	5
1. Les argiles.....	6
a- La formation des argiles.....	6
b- Propriétés des argiles	6
c- Rôle des argiles	6
2. Les Kaolins.....	8
a- Formation du kaolin	8

b- Propriétés du kaolin	8
c- Action de la chaleur sur la kaolinite	9
III.2. LES DEGRAISSANTS	11
1. Les silices.....	11
a- Source de la silice.....	11
b- Propriétés de silice de la balle de riz	12
c- Structure de minéraux siliceux.....	13
d- Rôle de la silice.....	13
2. Les chamottes.....	13
III.3. LES FONDANTS.....	13
1. Les feldspaths	14
2. Les pegmatites.....	14

Chapitre II : Les procédés de fabrication céramique15

I. FLOW-SHEET DE FABRICATION.....	15
II. PREPARATION DES PATES CERAMIQUES	16
II.1. SECHAGE DES MATIERES PREMIERES.....	16
II.2. DIVISIONS DES MATIERES PREMIERES	16
II.3. TAMISAGE DES MATIERES PREMIERES ET DES PATES	16
II.4. DOSAGE DE LA PATE	17
II.5. HUMIDIFICATION ET HOMOGENEISATION DES PATES.....	17
1. Malaxage des pâtes	18
III. LES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES PATES	18
CERAMIQUES	18
IV. FAÇONNAGE DES MATERIAUX CERAMIQUES.....	19
IV.1. FAÇONNAGES UTILISANT LA PROPRIETE PLASTIQUE DE LA PATE....	19
1. Le modelage	19
2. Le moulage	19
3. Le filage et l'extrusion.....	20
4. Le tournage.....	20
5. Le calibrage.....	20
6. Le pressage	20

7. Le tournassage	22
8. Le colombinage.....	22
IV.2. FAÇONNAGE BASES SUR LA SUSPENSION AQUEUSE DES MATIERES ARGILEUSES (COULAGE).....	22
IV.3. FAÇONNAGES UTILISANT LA MATIERE PREMIERE EN POUDRE...	23
V. SECHAGE	23
V.1. EFFETS DE SECHAGE	24
1. Durcissement	24
2. Retrait	24
VI. LES CUISSONS	24
VI.1. BUT ET NATURE DES CUISSONS CERAMIQUES.....	25
VI.2. CONTROLE DES CUISSONS	25
VII. EMAILLAGE	26

Chapitre III : Les matériaux céramiques utilisés en isolation

électrique	27
I. DEFINITION DE MATERIAUX ISOLANTS	27
II. THEORIE SUR LES CERAMIQUES UTILISEES EN ISOLATION ELECTRIQUE ..	27
I.1. GENERALITES	27
1. Propriétés thermiques :	28
2. Propriétés électriques :	28
3. Propriétés mécaniques :	28
4. Propriétés chimiques :	28
I.2. PROPRIETES COURANTES.....	28
III. PROPRIETES DIELECTRIQUES DES MATERIAUX CERAMIQUES	29
III.1. RIGIDITE DIELECTRIQUE	29
1. Définition	29
2. Influence de divers paramètres sur la rigidité diélectrique	30
III.2. RESISTIVITE SUPERFICIELLE, TRANSVERSALE ET RESISTANCE D'ISOLEMENT ..	31
III.3. PERMITTIVITE ET FACTEUR DE DISSIPATION DIELECTRIQUE ...	32
III.4. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX, LIEES A LEUR TENUE EN SERVICE..	32

1. Tenue des matériaux isolants aux contraintes thermiques	32
2. Tenue des matériaux isolants en présence d'un champ électrique.....	34

DEUXIEME PARTIE: ETUDES EXPERIMENTALES

Chapitre IV : Caractérisations des matières premières	37
-------------------------------------------------------------	----

I. PROVENANCES DES MATIERES PREMIERES	37
II. ETUDES SUR LES MATIERES PREMIERES	37
II.1. ANALYSE CHIMIQUE	38
1. Analyse chimique du kaolin d'Ambatomirahavy :	38
2. Analyse chimique de la cendre de la balle de riz :	39
3. Analyse chimique du feldspath :	39
II.2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE	40
1. Analyse granulométrique du kaolin d'Ambatomirahavy :	40
2. Analyse granulométrique de la silice de la balle de riz:	42
3. Analyse granulométrique du feldspath :	43

Chapitre V : Essai de fabrication de matériau isolant électrique en céramique	45
----------------------------------------------------------------------------------------	----

I. PRETRAITEMENTS DES MATIERES PREMIERES	45
I.1. LE KAOLIN	45
I.2. LA SILICE	45
I.3. FELDSPATH	46
II. PREPARATION DE LA PATE	46
III. COMPOSITIONS ET CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS AVANT ET APRES CUISSON	49
III.1. IDENTIFICATION DES ECHANTILLONS	49
III.2. RESULTATS DE MASSE ET DE DIMENSIONS DES PRODUITS AVANT CUISSON	49
1. Caractéristiques des produits après cuisson 600 °C	51
2. Caractéristiques des produits après cuisson 900 °C	52

3. Caractéristiques des produits après cuisson 1150 °C	53
III.3. TEST DE RESISTIVITE AUX CHOCS THERMIQUES	54
1. Méthode	54
Chapitre VI : Travaux de réalisation	56
I. CONCEPTION ET ELABORATION D'UN MOULE	56
I.1. CHOIX DU MATERIAU	56
I.2. DIMENSIONNEMENT DE LA MOULE	56
II. PREPARATION DES MATIERES PREMIERES UTILISEES.....	58
III. FAÇONNAGE.....	58
a. Réalisation de la presse :	59
TROISIEME PARTIE : ETUDE ECONOMIQUE DE L'UNITE DE PRODUCTION	
Chapitre VII : Raison du choix du projet et caractéristiques de l'unité ...	64
I. RAISON DU CHOIX DU PROJET	64
I.1. PREPONDERANCE DES MATIERES PREMIERES	64
I.2. POLITIQUE DE DEVELOPPEMENT SOCIO-ECONOMIQUE	64
II. CARACTERISTIQUES DE L'UNITE	64
II.1.REGIME DE TRAVAIL ET PRODUCTION.....	64
II.2.DIFFERENTES INSTALLATIONS DE SURFACE	65
II.3.CONSUMMATION EN INTRANTS.....	65
II.4.CARACTERISTIQUES DES MATIERES PREMIERES ET DES PRODUITS..	65
Chapitre VIII : Etude financière de l'unité.....	66
I. LES COUTS D'INVESTISSEMENT	66
I.1. COUT DE CONSTRUCTION	66
I.2. LES COUTS DES MATERIELS DE PRODUCTION	66
I.3. DIVERS MATERIELS	67
I.4. COUT TOTAL D'INVESTISSEMENT	67
I.5. QUALIFICATION ET CHARGE DU PERSONNEL.....	68
II. LES FRAIS OPERATOIRES	68

II.1. MATIERES PREMIERES.....	68
1. Electricité et eau.....	69
2. Pièces à l'intérieur des dominos.....	69
III. FRAIS DE DEMARRAGE	69
IV. AMORTISSEMENT	70
V. MONTANT DES CHARGES FIXES.....	70
VI. COUT OPERATOIRE	71
VII. CHIFFRE D'AFFAIRE : CA.....	71
VIII. SEUIL DE RENTABILITE ET LE DELAI POUR ATTEINDRE CE SEUIL .	71
IX. INVESTISSEMENT GLOBAL	72
X. RESULTAT PREVISIONNEL DE LA PREMIERE ANNEE DU FONCTIONNEMENT	73
XI. RECAPITULATION GENERALE	74
Conclusion générale	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	76
ANNEXES A	a
ANNEXES B	c

AUTEUR : HERIMANITRA Myriame

TITRE DU MEMOIRE : ETUDE SUR LA FABRICATION D'UN MATERIAU CERAMIQUE POUR ISOLATION ELECTRIQUE : CAS D'UN DOMINO

NOMBRE DE PAGES : 77

NOMBRE DE TABLEAUX : 28

NOMBRE DE FIGURES : 19

RESUME:

Ce travail de mémoire a pour objectif de contribuer à l'étude de fabrication d'un matériau céramique pour isolation d'un domino électrique à partir des matières premières relativement disponibles et peu onéreuses à Madagascar, dont : le kaolin, la silice de la balle de riz et le feldspath.

Des essais ont été effectués et nous avons vu que le matériau céramique étudié possède des avantages importants par rapports à d'autres matériaux concurrents : il est un bon isolant électrique, il résiste à des températures élevées, ce qui le rend irremplaçables pour l'isolation électrique dans les appareils utilisant la haute température.

ABSTRACT:

This work of memory aims to contribute to the study of manufacture of a ceramic material for insulation of an electric domino using the raw materials relatively available and not very expensive in Madagascar, of which: kaolin, silica from rice husk through and feldspar.

Tests were carried out and we saw that the studied ceramic material has significant advantages by reports with other competitor materials: it is an electrical good insulator; it resists high temperatures, which returns it irreplaceable for the electric insulation in the apparatuses using the high temperature.

MOTS-CLES: kaolin, silice, feldspath, isolant électrique, domino.

ENCADREUR : Monsieur RABIBISOA Daniel, Maître de conférences à l'E.S.P.A.

ADRESSE DE L'AUTEUR : Ambohitrony - Belazao - ANTSIRABE II

Tél : 033.09.450.44

e-mail : myriameherimanitra@yahoo.fr