

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université A. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés

Mémoire EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie des Procédés des Matériaux

Présenté par

AIT AMRANE Toufik

BARICHE Arris

Thème

*Caractérisations physico-chimiques des matières premières et
paramètres technologiques de fabrication des céramiques de
l'usine SCS de Bejaïa*

Soutenue le 03/07/2022

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mme MHTOUT Leila	Professeur	Université de Bejaia	Président
Mme ATTIL Souad	MCA	Université de Bejaia	Examinatrice
Mme BOUZIDI Nedjma	Professeur	Université de Bejaia	Encadrant

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Gloire soit rendu au Dieu tout puissant créateur de toutes choses, le très miséricordieux pour tous ses bienfaits dont il nous comblé et de nous avoir donné la force le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadrant Mme BOUZIDI Nedjma, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port. Qu'elle trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nos vifs remerciements vont au Mme MAHTOU d'avoir accepté la présidence du jury, nous tenons à exprimer toute notre gratitude merci au Mme ATTIL qui nous a donné le privilège d'examiner notre travail, Leur regard critique ne fait qu'améliorer nos compétences.

Nous souhaitons exprimer nos profondes reconnaissances à l'ensemble de personnel du département de génie des procédés et du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimique de Bejaia, particulièrement l'ensemble du personnel de l'usine SCS de Bejaia.

Enfin, au seuil de ce travail, qu'il nous soit permis de témoigner de notre profonde et sincère gratitude envers tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à notre recherche.

Merci ...

Dédicace

Aux meilleurs Parents du Monde

Je voudrais vous remercier pour votre amour, votre générosité, votre compréhension... votre soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que vous avez déployés pour mon éducation et ma formation. J'implore le tout-puissant pour qu'il vous accorde une bonne santé et une vie longue

A Mes Sœur

Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de vous avoir comme sœur. Vous êtes les sœurs qui assure leur rôle comme il faut, je n'oublierais jamais vos encouragements et votre soutien le long de mes études, je vous estime beaucoup et je vous aime beaucoup

A mon Cousin Bahaq

Que ce travail soit l'expression de ma profonde affection. je te remercie pour ton soutien, ta patience de m'avoir supporté durant toute cette période et tous que tu m'avais accordé.

A mon binôme Arris

Si j'avais su qu'un jour, j'aurais un tel ami, je ne l'aurais pas cru. Tu n'es pas seulement un binôme ou un ami, tu es une force, un lien qui ne se perd jamais .je remercie le bon dieu qui a croisé nos chemins.

A mes très chers amis en particulier Sabrina et Sonia.

Je ne peux pas trouver les mots pour vous exprimer mon affection, vous êtes pour moi des sœurs et des frères. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Toufik

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Les deux personnes les plus importantes de ma vie : Mes Parents

Il temps est maintenant de vous remercier tous les deux de me donner l'amour, de prendre toujours soin de moi et de me faire confiance. Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de vous avoir, merci maman de m'avoir appris que l'amour est la plus grande force qui existe au monde. Merci mon père pour m'avoir montré comment résoudre les problèmes et se tenir prêt à toutes éventualités. Je vous suis et je vous resterai toujours reconnaissante, pour votre soutien et votre idée qui m'ont permis d'arriver là aujourd'hui.

A mon frère Massyl et ma fiancée Lydia

Je ne trouve pas les mots d'exprimer l'Amour que je dois pour vous ni la chance que j'ai de vous avoir dans ma vie, merci pour votre encouragement continu et votre soutien, vous êtes ma source d'inspiration, je vous aime du fond du cœur.

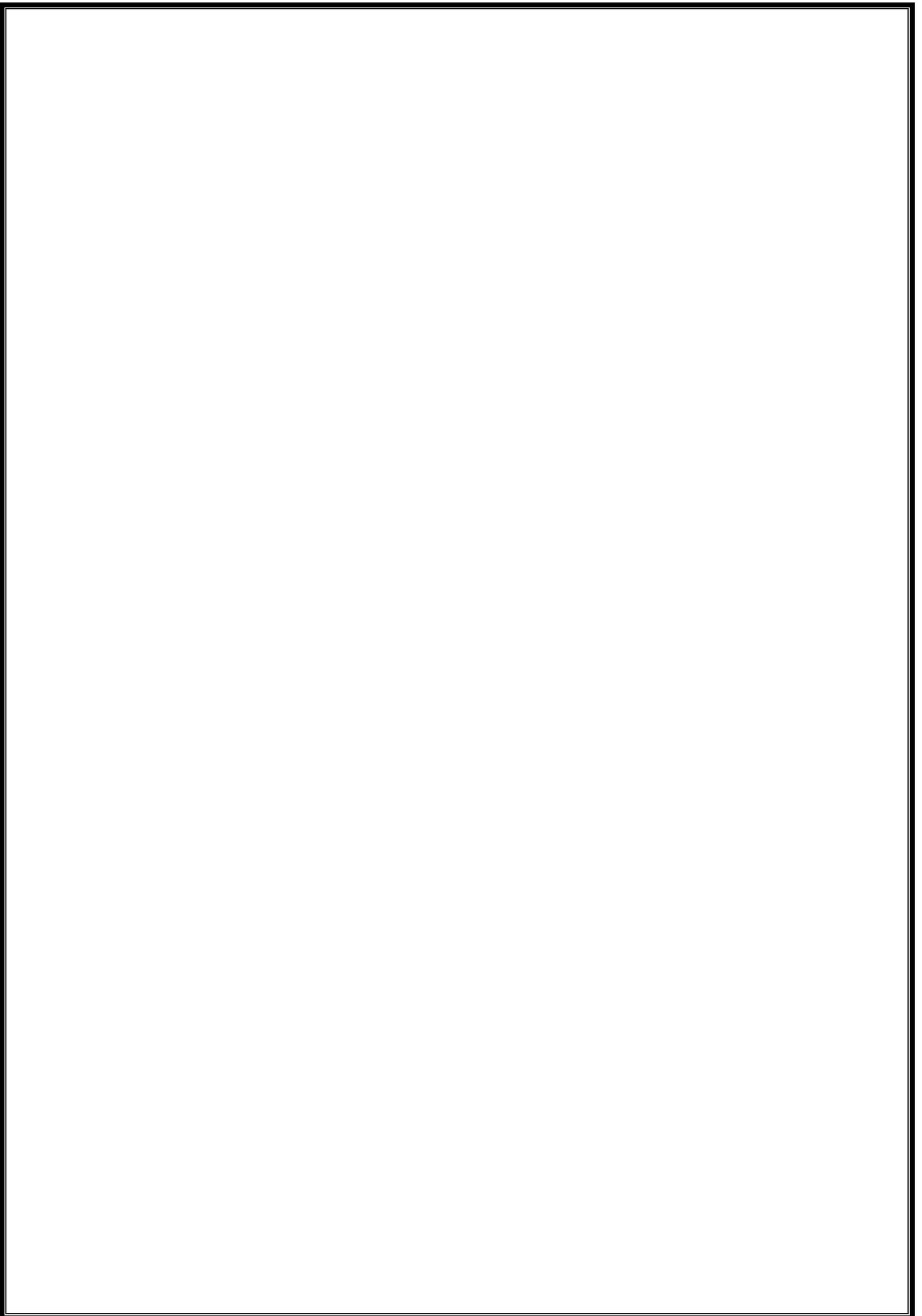
A mon binôme Toufik

Si j'avais su qu'un jour, j'aurais un tel ami aussi que toi, je ne l'aurais pas cru. Tu n'es pas seulement un binôme ou un ami, tu es une source d'énergie, un lien qui ne se perd jamais .je remercie le bon dieu qui a croisé nos chemins.

A mes chers amis

Aucun mot n'est assez puissant mais, je tiens à vous remercier pour tout, merci pour votre soutien moral, merci d'être toujours présents pour moi pendant mes moments difficiles. Vous êtes les meilleurs je vous ai vraiment reconnaissant et fière de vous avoir dans ma vie je vous aime.

ARRIS



Liste des figures

Figure I.1 Les différents minéraux argileux.....	05
Figure I.2 Structure tétraédrique et octaédrique des argiles.....	05
Figure I.3 Structure d'une kaolinite	06
Figure I.4 Structure de l'illite.....	06
Figure I.5 Structure de Smectites	07
Figure I.6 Structure d'une Chlorite	07
Figure I.7 Structure cristalline de la céramique	08
Figure I.8 Venus de Dolní Věstonice La Escultura de Cerámica más Antigua	09
Figure I.9 Usage des terres cuites.....	10
Figure I.10 Domaines d'usage des faïences	11
Figure I.11 Usage des Grés cérames	12
Figure I.12 Diagramme effort/déformation pour des matériaux différents.....	14
Figure I.13 a) déformation élastique - b) déformation plastique.....	15
Figure I.14 Relation entre module élasticité et point de fusion pour différentes matériaux (d'après Kingery)	17
Figure I.15 Distribution des températures et des efforts -a) cas de refroidissement de la surface -b) cas de chauffage de la surface (de W. Kingery)	19
Figure I.16 Type de courbe de fluage (d'après W. Kingery).....	20
Figure I.17 Chaleurs spécifiques de quelques matériaux réfractaires	21
Figure I.18 Capacité thermique de quelques matériaux céramiques à différentes températures (d'après Kingery)	23
Figure I.19 Variations de chaleur spécifique et de dilatation thermique en fonction de la température (d'après Kingery).....	24
Figure I.20 Relations entre la conductibilité thermique et la température	25

Figure II.1 Analyseur fluorescence X (S4 Pioneer).....	31
Figure II.2 Schéma représentatif du phénomène de diffraction des rayons X.....	32
Figure II.3 Diffractomètre aux Rayons X de système XPERT-PRO.....	33
Figure III.1 Courbe cumulative de la granulométrie	36
Figure III.2 Histogramme du taux de SiO ₂ dans les matières premières	37
Figure III.3 Histogramme du taux de Al ₂ O ₃ dans les matières premières	38
Figure III.4 Histogramme du taux de Fe ₂ O ₃ dans les matières premières	38
Figure III.5 Histogramme du taux de CaO dans les matières premières	39
Figure III.6 Histogramme du taux de MgO dans les matières premières.....	39
Figure III.7 Histogramme du taux de Na ₂ O et K ₂ O dans les matières premières	40
Figure III.8 Histogramme du taux de PAF dans les matières premières	41
Figure III.9 Histogramme des taux de composants chimiques dans les matières premières	41
Figure III.10 Le diffractogramme des rayons X de l'argile noir	42
Figure III.11 Le diffractogramme des rayons X de l'argile rouge.....	43
Figure III.12 Le diffractogramme des rayons X de kaolin	43
Figure IV.1 Moulins à broyer.....	46
Figure IV.2 Schéma technologique d'un atomiseur.....	47
Figure IV.3 Photo de la presse à carreau.....	48
Figure IV.4 Cloche d'engobe.....	49
Figure IV.5 Emballage des carreaux	50
Figure IV.6 Tamiseuse Vibrante	54
Figure IV.7 Densimètre.....	54
Figure IV.8 Viscosimètre	55

Figure IV.9 Étapes de mesure de refus : tamis (a) ; lavage de barbotine avec l'eau (b); lecture de valeur du refus sur une burette graduée (c)	56
Figure IV.10 Contrôle de taux d'humidité de la barbotine	57
Figure IV.11 Mesure de la densité apparente : Appareil DDA/2 (a) ; Carreaux après pressage (b) ; Carreau découpé en petits morceaux et numéroté de 1 à 9 (c).....	58
Figure IV.12 Charge totale d'éprouvette.....	60
Figure IV.13 Dispositif d'Abrasion	61
Figure IV.14 Photo d'un autoclave	62
Figure IV.15 Exemple de Tressailures.....	63
Figure IV.16 Mesure de la dimension des carreaux.....	64
Figure IV.17 Fiche technique rassemblant les différents résultats d'un contrôle de qualité du carreau céramique.....	65
Figure IV.18 Dispositif de Flexion	66
Figure V.1 Diagramme des défauts des carreaux céramiques	69
Figure V.2 Photo de présence d'un corps étranger dans un carreau	70
Figure V.3 Boulets de broyage.....	72
Figure V.4 Poudre céramique en sortie de l'atomiseur	73
Figure V.5 Photos d'une bulle sur l'émail du carreau.....	75
Figure V.6 Photo du défaut de trous sur l'email	76
Figure V.7 Traissailage d'un carreau céramique.....	77
Figure V.8 Diagramme de Pareto des défauts à la sortie du four de cuisson	78
Figure V.9 Photo d'un cœur noir.....	79
Figure V.10 Schéma représentatif des défauts de planéité.....	79

Liste des tableaux

Tableau I.1 Quelques propriétés des céramiques techniques.....	13
Tableau I.2 Propriétés mécaniques (élasticité) de quelques céramiques (Kingery)	16
Tableau I.3 Chaleurs spécifiques moyennes des matériaux réfractaires et des briques (entre 20 °C et T = °C) en Kcal/Kg °C	22
Tableau III.1 Granulométrie des poudres céramiques.....	35
Tableaux III.2 Composition chimique (% massique) des matières premières	36
Tableau IV1 Taux d'humidité des matières premières	51
Tableau IV 2 Les nouvelles masses des matières premières	52
Tableau IV.3 Taux d'humidité de la barbotine	57
Tableau IV.4 Densité apparente du carreau crû.....	58
Tableau IV.5 Résultats des résistances à la flexion des différents carreaux.....	67

Acronyme

DRX	Diffraction de Rayons X
FRX	Fluorescence de Rayons X
ATG	Analyse Thermogravimétrie
ATD	Analyse Thermodifférentielle
SCS	Société Céramique Soummam
Sn	Etain
WDXRF	Wavelength Dispersive X-Ray Fluorescence
EDXRF	Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence
STPP	Sodium Tripolyphosphate
PCE-MB	Process Control Equipment-moisture balance
ASTM	American Society for Testing and Materials
DDA	Apparent Density Densimeter
PEI	Porcelain Enamel Institute
NF EN	Norme Française European Norm
CRAPC	Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-chimique

Table de matières

INTRODUCTION GENERALE	01
------------------------------------	-----------

Chapitre I : Généralités sur les céramiques

Introduction	04
I.1 Généralités sur les argiles	04
I.1.1 Définition	04
I.1.2 Types d'argiles.....	04
I.1.3 Structure des minéraux argileux	05
I.2 Généralité sur les céramiques	08
I.2.1 Définition	08
I.2.2 Types de céramiques.....	09
I.2.2.1 Céramiques traditionnelles.....	09
I.2.2.2 Les céramiques techniques.....	12
I.3 Propriétés mécaniques.....	14
I.3.1 Introduction.....	14
I.3.2 Propriétés Plastiques	15
I.3.3 Propriétés Élastiques.....	16
I.3.4 Fracture fragile	18
I.3.4.1 Théories sur la fracture	18
I.3.5 Propriétés mécaniques à températures élevées	18
I.3.5.1 Tensions thermiques	18

I.3.5.2 Tension Thermomécanique	19
I.4 Propriétés thermiques	20
I.4.1 La chaleur spécifique	21
I.4.2 Coefficient de dilatation thermique	23
I.4.3 Conductibilité thermique dans les matériaux céramiques	24
I.4.4 Pouvoir de diffusion thermique (thermo-diffusion)	25
I.4.4.1 Pouvoir émissif	26
I.5 Propriétés chimiques et environnementales	26
Conclusion	27
Références Bibliographique	28

Chapitre II : Méthodes Physico-Chimiques de Caractérisations

Introduction	29
II.1 Caractérisation physique.....	29
II.1.1 Analyse granulométrique	29
II.1.2 Mesure de la teneur en eau	30
II.2 Caractérisation chimique et minéralogique	30
II.2.1 Analyse chimique	30
II.2.2 Analyse minéralogique	32
Conclusion.....	33
Références Bibliographique	34

Chapitre III : Analyses physico-chimiques des matières premières

Introduction	35
III.1 Analyse granulométrie	35
III.2 Analyses chimiques des matières premières	36
III.3 Analyses minéralogiques des différentes matières premières	42
III.3.1 Analyse minéralogique de l'argile noire	42
III.3.2 Analyse minéralogique de l'argile rouge	42
III.3.3 Analyse minéralogique du kaolin.....	43
Conclusion.....	44
Références Bibliographique	45

Chapitre IV : Suivi des paramètres technologiques des carreaux céramiques

Introduction	46
IV.1 Broyage des matières premières.....	46
Atomisation de la barbotine	47
IV.3 Le pressage de la poudre atomisée.....	48
IV.4 Le séchage des carreaux crus	48
IV.5 La décoration et l'émaillage des carreaux.....	49
IV.6 La cuisson des carreaux	50
IV.7 Le triage et emballages des produits finaux.....	50
IV.8 Contrôle de qualité des carreaux céramiques.....	50
IV.8.1 La masse des matières premières utilisées	50

IV.8.2 La quantité d'eau à rajouter.....	52
IV.8.3 Le contrôle de qualité de la poudre atomisée.....	53
IV.8.3.1 La granulométrie	53
IV.8.4 Contrôle de qualité de la barbotine	54
IV.8.4.1 Densité de la barbotine.....	54
IV.8.4.2 Viscosité de la barbotine	54
IV.8.4.3 Refus sur le tamisât < 63µm.....	56
IV.8.4.4 Mesure du taux d'humidité	56
IV.9 Contrôle des carreaux.....	57
IV.9.1 Contrôle du carreau crû à la sortie de la presse.....	57
IV.9.2 Remplissage des carreaux	58
IV.10 Contrôle du carreau crû à la sortie du séchoir.....	59
IV.10.1 Humidité Résiduelle.....	59
IV.11 Contrôle du carreau cuit à la Sortie du four	59
Conclusion.....	67
Références Bibliographique	68

Chapitre V : Défauts de Fabrication des carreaux céramiques

Introduction	69
V.1 Les défauts de fabrication des carreaux céramiques	69
V.1.1 Défauts liés aux matières premières	69
V.1.2 Défauts liés au broyage	69
V.1.3 Défauts liés à l'atomisation	71
V.1.3 Défauts liés à la presse des carreaux céramiques	73
V.1.4 Défauts liés au séchoir	74
V.1.5 Les défauts liés à l'émaillage	74
V.1.6 Défauts liées à la sérigraphie	77
V.1.7 Défauts liées à la cuisson	78
Conclusion	80
Références Bibliographiques	81
CONCLUSION GENERALE.....	82

Introduction générale

Dans l'ordre chronologique le développement industriel de la céramique est un domaine très vaste qui ne cesse de s'accroître depuis des années, on l'a fait remonter à l'époque du paléolithique supérieur. La céramique engendre des conséquences favorables au confort et au besoin de l'homme, et c'est pour cela qu'elle couvre une large gamme d'application notamment l'industrie des bâtiments, la métallurgie, les domaines électroniques ou électrotechniques, les tuiles des navettes spatiales, et les implants chirurgicaux [1].

Le terme « céramique » nous vient du mot grec *keramikos* qui signifie « substance brûlée » révélant ainsi que les caractéristiques recherchées pour ces matériaux sont habituellement obtenues au moyen d'un traitement thermique à température élevée portant le nom de « cuisson ».

La céramique est un produit composé essentiellement de matériau non métallique et non organique qui possède un très bon aspect écologique car son usage repose sur la constance de ses propriétés qui représente une bonne corrélation vis-à-vis l'environnement dont ces avantages non polluants et moins dégradables mais surtout une durée de vie bien étendue. Contrairement à des produits fabriqués avec des dérivés pétroliers (stratifié, vinyle, tapis), la céramique n'émet que peu ou pas de composés organiques volatils (COV). Ces composés, qui se libèrent dans l'air que l'on respire tous les jours, irritent les voies respiratoires et sont associés à certains cancers. Ils contribuent également à la formation de l'ozone composant le smog urbain. Malgré des inconvénients environnementaux réels, Par conséquent, la céramique a plusieurs avantages pour attirer les consommateurs.

D'autre part, le développement de la céramique est encore un concept étonnant aux yeux des gens en vue de ses comportements physiques et chimiques ou même technologiques, pour certain elle considérée comme étant un art et une patience de maîtrise plus qu'un travail, bien qu'en générale les étapes fondamentales pour obtenir des carreaux céramiques pour un revêtement du sol ou du mur sont presque les mêmes : l'entreposage et la préparation des matières premières, le façonnage (pressage), le séchage et cuisson des carreaux crus, le traitement des surfaces (par l'émaillage), la cuisson des biscuits émaillés, le triage et l'emballage, mais la qualité se diffèrent d'une usine à une autre selon la technologie de travail [2].

La société céramiques Soummam (SCS) nous a permis d'effectuer un stage au sein de l'entreprise. Durant notre accompagnement pour ce projet qui est dans l'objectif d'acquérir de nouvelles aptitudes et de distinguer les différentes manipulations réelles pour avoir un minimum d'expérience pratique qui nous est largement utiles dans nos recherches théoriques, nous avons pu profiter de cette occasion pour effectuer des manœuvres nous-mêmes. L'objectif de ce travail est de voir l'influence des matières premières de base (argiles, feldspaths) sur les défauts qu'ils engendrent lors du procédé de fabrication des carreaux céramiques. Dans cette même optique, les paramètres technologiques (densité, viscosité, dimensions, planéité, émaillage, pressage, humidité, séchage, cuisson, etc...) se trouvent contraint par le choix de ces matières premières. Le concret de notre travail consiste à qualifier les caractérisations physico-chimiques des premières matières et de circonscrire les paramètres technologiques de fabrication des céramiques de l'usine SCS de Bejaia.

Ce manuscrit comporte cinq (05) chapitres distincts :

Après une introduction générale,

Le chapitre I est consacré aux résultats d'une recherche bibliographique exclusivement dirigée vers l'étude sur les premières matières ou on retrouve des généralités sur la céramique, plus particulièrement les matières argileuses.

Le chapitre II enchaîne une présentation des méthodes de caractérisations physico-chimiques des matières premières.

Le chapitre III est attribué à la présentation des résultats expérimentaux obtenus des analyses physico-chimiques de matières premières pour la fabrication de la céramique types dalle de sol.

Le chapitre IV porte sur le suivi des paramètres technologiques des carreaux céramiques.

Le chapitre V est dédié aux effets des matières premières sur les défauts des carreaux céramiques.

On achèvera ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives.

Références bibliographiques

[1] N. E. YAKOUBI, Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements deJbel Kharrou et de Benhmed (Meseta marocaine occidentale), thèse de doctorat : Géologie appliquée et ressources naturelles,UNIVERSITE MOHAMMED V-AGDAL FACULTE DES SCIENCES RABAT, 2006.

[2] F. Andreola, C. Siligardi, « Reological behaviour and mechanical properties of porcelain stoneware bodies containing Italian clay added with bentonites ». Ceramic international,35,1159-1164 (2009).

Chapitre I : Généralités sur les céramiques

Introduction

La céramique nous accompagne chez nous depuis toujours, précisément parce que c'est un matériau qui présente de nombreux avantages. Au fil du temps la technologie céramique multiplie ses performances, désormais elle représente un matériau primordial dans le revêtement. Allié à l'homme, elle est utilisée pour remplacer ou simuler d'autres matériaux et cela tout en étant fabriqué dans le respect de la nature [1]. Dans ce chapitre, les argiles et les types d'argiles qu'on retrouve dans la nature sont présentés du moment que c'est à base de ces matières premières constituant presque 60 % du mélange que les céramiques sont fabriquées. Les types de céramiques et le domaine d'usage des céramiques sont aussi développés

I.1 Généralités sur les argiles

I.1.1 Définition

Les argiles sont des matières premières naturelles principalement constituées par des silicates d'alumines hydratés d'où sa structure phylliteuse dont les dimensions et la forme conditionnent la plasticité en présence d'eau [2]. En pétrographie [3], on distingue trois principales catégories de roches pouvant être à l'origine de formations argileuses, à savoir

- ✚ Les roches plutoniques et volcaniques
- ✚ Les roches sédimentaires
- ✚ Les roches métamorphiques

En effet, il en existe des méthodes d'analyses particulières pour ces fines particules de l'ordre (μm) dont l'objectif est de caractériser ses minéraux argileux selon leur forme spécifiques (DRX, FRX, ATD...).

I.1.2 Types d'argiles

Il y'a plusieurs types d'argiles dans la nature selon leurs structures, leurs natures, leurs finesses, on peut les classer comme le montre la **figure I.1** (Les différents minéraux argileux) suivante :

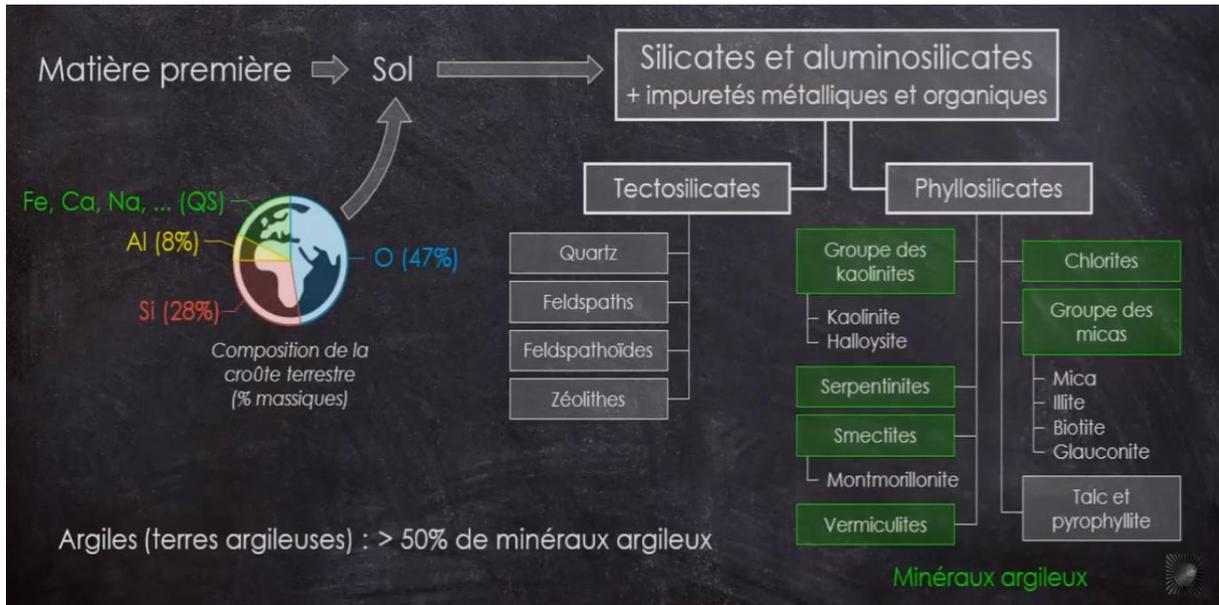


Figure I.1 Les différents minéraux argileux [1].

I.1.3 Structure des minéraux argileux

Pour la construction de ces minéraux, la nature a fait appel à deux types de structures : le tétraèdre constitué de silicium entouré de quatre oxygènes (coordination 4), et l’octaèdre ayant un atome d’aluminium (de magnésium ou de fer) entouré de six oxygènes (coordination 6) [4].

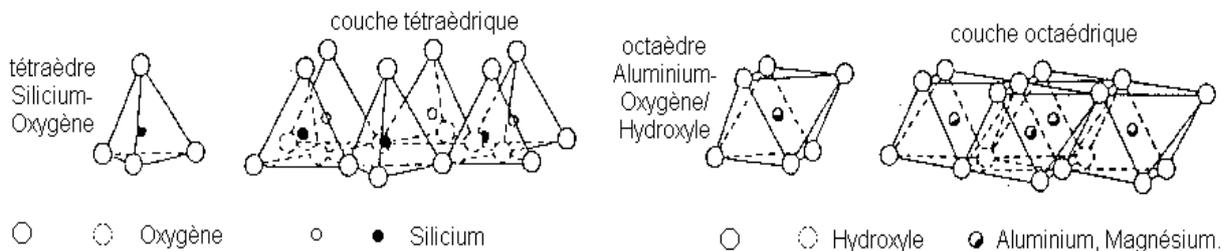


Figure I.2 Structure tétraédrique et octaédrique des argiles [4].

Cependant, c’est le mode d’association des couches structurales et l’épaisseur relative des différents types de feuillets qui ont pu servir de principal critère dans la classification des groupes de minéraux argileux [5].

a) Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}$) : Ce mot dérive de deux mots chinois « Kao Ling » qui signifient le sommet de la montagne, à base de kaolinite pratiquement pur, il s’agit du minérale argileux dont la teneur en eau la plus élevée, ce qui le désigne comme matière première des produits silico-argileux réfractaires.

Tandis que le kaolin est une roche pouvant contenir encore des reliquats d'autres minéraux, la kaolinite désigne essentiellement le minéral produit par altération de feldspaths, mais elle peut incorporer d'autres minéraux de même type tels que l'halloysite et la dickite.

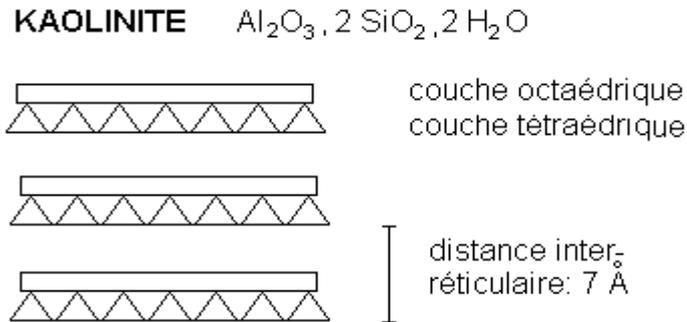


Figure I. 3 Structure d'une kaolinite [5]

b) Illite ($\text{K Al}_2(\text{OH})_2, (\text{Al Si}_3 (\text{O}, \text{OH})_{10}$) (du groupe des micas $\text{AC}_{2-3}\text{T}_4\text{O}_{10}\text{X}_2$)

Parmi les minéraux argileux, l'illite est le plus courant il s'agit donc d'un minérale a trois couches du même type de phyllites, sa structure est proche de la muscovite.

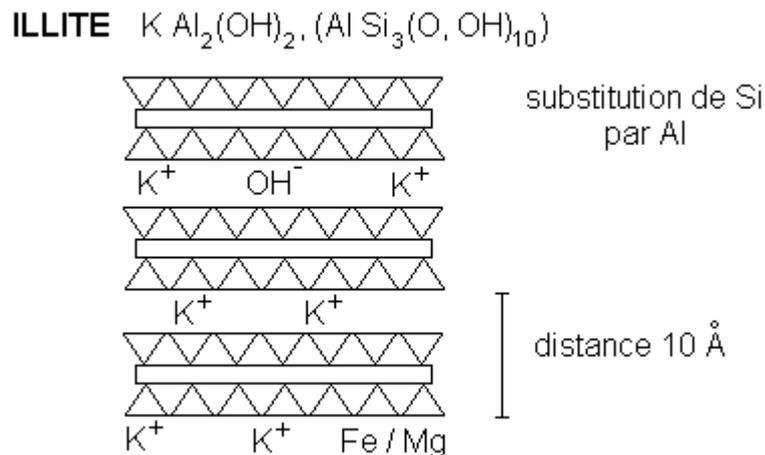


Figure I.4 Structure de l'illite [5]

c) Montmorillonite ($\text{Mg}, \text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, 5\text{SiO}_2, n\text{H}_2\text{O}$) (du groupe des Smectites $(2\text{Al}_2\text{O}_3, 8\text{SiO}_2, 2\text{H}_2\text{O}, n\text{H}_2\text{O})$)

Tout comme l'illite, il s'agit d'un minérale à trois couches mais avec de silicium à plus grande échelle, provenant de la pyrophyllite avec un nombre d'eau zéolitique variable.

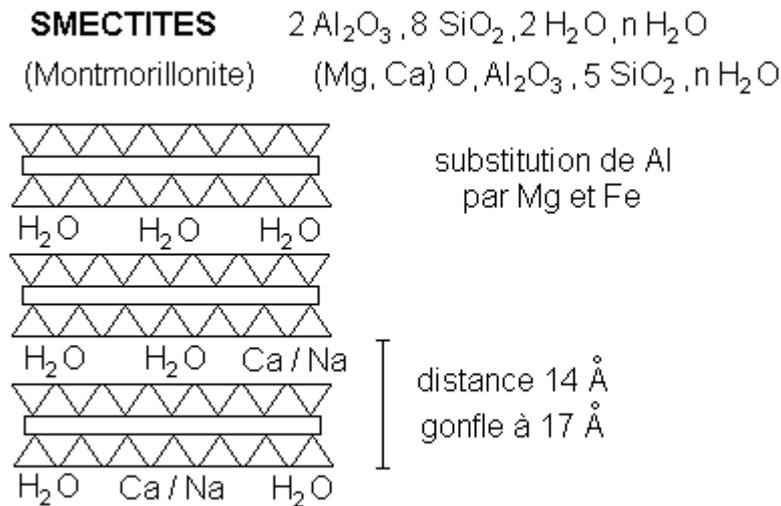


Figure I.5 Structure de Smectites [5]

d) Chlorites $(\text{Mg}_5(\text{Al}, \text{Fe})(\text{OH})_8(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10})$

Les chlorites existent en plus grands cristaux dans les roches magmatiques ; elles sont également formées pendant la diagenèse des roches sédimentaires. On les retrouve en éléments détritiques dans les sols sous climat peu agressif [6].

Sa structure se distingue de celles des autres puisqu'elle consiste en l'association des feuillet de mica reliés pour une couche de type brucite.

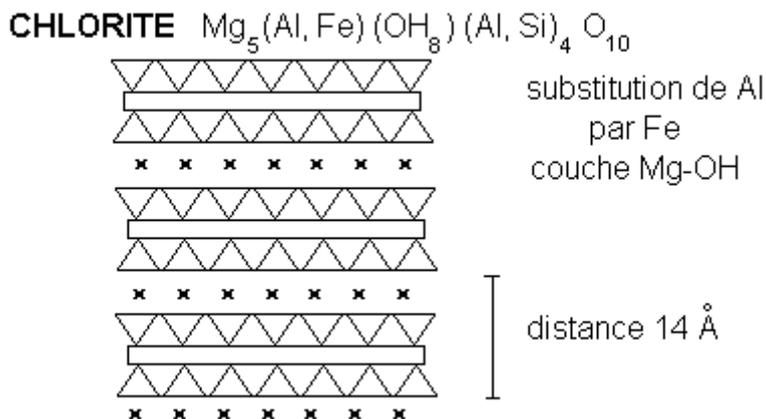


Figure I.6 Structure d'une Chlorite [7]

e) Vermiculites $((\text{Mg}, \text{Ca})_7(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})_6(\text{Al}, \text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O})$

Fréquente dans les surfaces où les températures ne sont pas extrêmes, la vermiculite est un silicate lamellaire dont la structure ressemble à celle du talc, mais dont l'aspect est similaire à celui du mica à partir duquel il a été géologiquement altéré [7].

I.2 Généralité sur les céramiques

I.2.1 Définition

Ce mot d'origine grecque *keramos* qui signifie argile a connu un développement insolite qui a remis en cause la définition de la céramique qui est un matériau minéral polycristallin car elle est constituée de grains cristallins, non naturel parce qu'elle est fabriquée par l'homme obtenus par un traitement thermique approprié.

Les céramiques sont des matériaux inorganiques non métalliques très connus dans la vie quotidien, apparue à la fin du paléolithique bien avant les verres, mais qui représentent aujourd'hui l'un des services tangibles indispensable aux besoins existentiel de l'homme, et pourtant c'était le matériau le plus facile a fabriqué à partir de la cuisson de la croute terrestre dite terre cuite mais le secteur de production et, en amont, celui de la recherche sont très actifs dans le but de générer de nouvelles technologies et domaines pour la fabrication et l'utilisation de ce matériau [7].

La structure moléculaire des céramiques est parmi les plus complexes de toutes celles du monde minéral. Les liaisons entre les atomes, de type covalent ou ionique, sont très fortes. En conséquence, du point de vue de la dureté, de la résistance thermique ou mécanique, les céramiques montrent une nette supériorité par rapport à la plupart des matériaux métalliques.

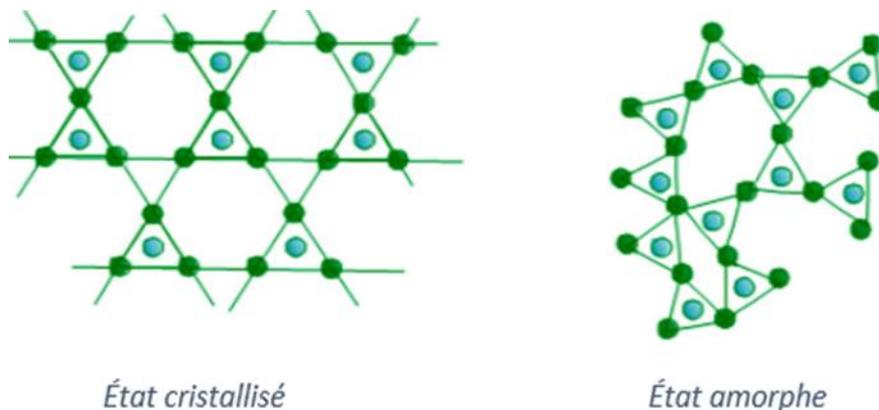


Figure I.7 Structure cristalline de la céramique [1].

I.2.2 Types de céramiques

De façon générale on peut énumérer les céramiques traditionnelles (les matières premières non traitées) et les céramiques techniques (les matières premières synthétisées, purifiées) qui sont classifiées selon divers critères théoriques et/ou pratiques tels sont :

- L'ordre chronologique
- Les compositions des produits et leurs usages

Vénus de Dolní Věstonice un petit œuvre de 11 cm découvert en 1925 qui date de 33 000 à 24 000 avant le présent qui correspond à la fin du paléolithique, l'utilisation de la céramique s'est généralisée au début du néolithique vers 11 000 ans avant le présent avec la sédentarisation, dès lors la céramique entre en évolution croissante jusqu'à nos jours auquel la céramologie nous a permis la maîtrise du mélange des premières matières, et de même cette discipline fondamentale a intégrée l'étude typologique des techniques de fabrication .



Figure I.8 Venus de Dolní Věstonice : La Escultura de Cerámicas Antigua [7].

Passer des objets rituels simplistes au vase fabriquer des grecques à la porcelaine chinoise puis les briques ont la révolution industrielle jusqu'aux tuiles modernes, les petites pièces électroniques utilisées sur les matériaux informatiques, les catalyseurs à gaz et les créations étonnantes de nos jours qu'on ne peut délimiter.

I.2.2.1 Céramiques traditionnelles

a. Terre cuites

À partir d'une terre argileuse additionner de l'eau puis cuire à haute température 1100°C avec un séchage après l'avoir modelé, on peut obtenir une pièce de céramique traditionnelle.

Pour une fabrication optimale on rajoute d'autres matières premières à cette pâte argileuse comme le sable, le calcaire la chamotte... sous forme de dégraissant pour assurer une double fonction (résistance à la déformation et au retrait), à ces derniers on rajoute des fondants pour réduire la température lors de formation de la face vitreuse tel que les feldspaths et les micas. Ces terres cuites sont utilisées essentiellement dans les bâtiments et les œuvres artistiques ou bien les ustensiles de cuisines comme l'indique la **figure I.9** (Usage des terres cuites)

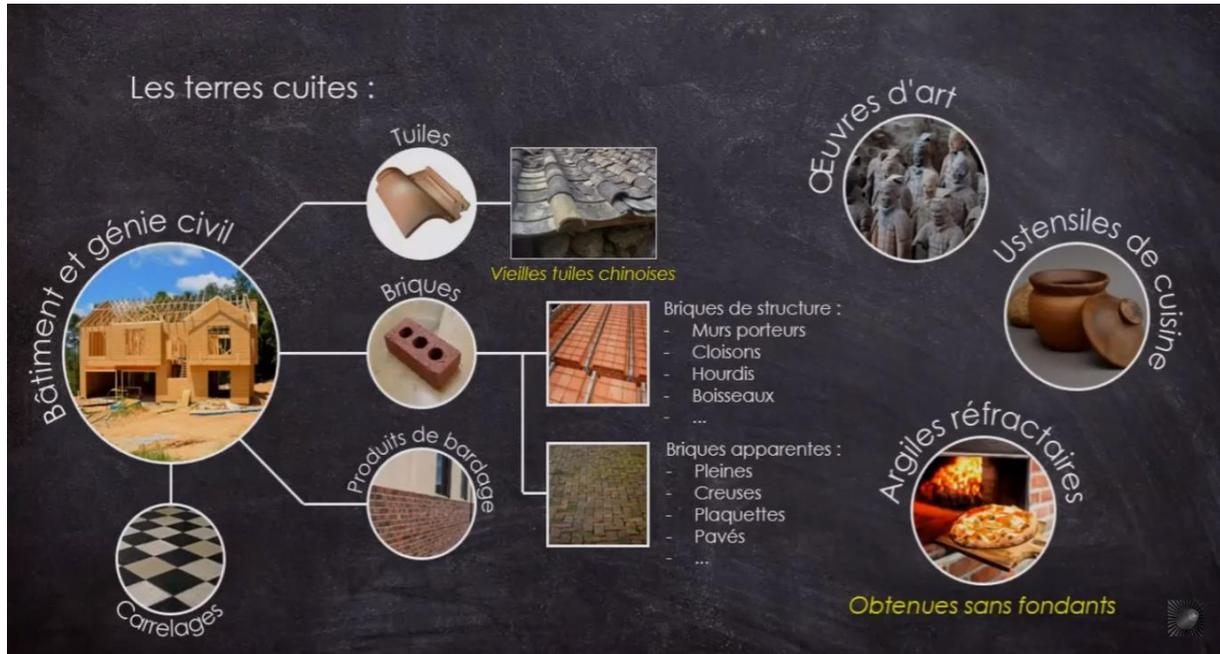


Figure I.9 Usage des terres cuites [8].

b. Les faïences

La différence entre celles-ci et la terre cuite est l'émail qui se trouve sur la pièce, il en existe deux sortes de faïences :

❖ **Faïences stannifères** : cette appellation nous vient du latin stannum qui désigne l'étain "Sn" puisque son décor est fait à base de 'Sn' et on démembrer deux types de procédés pour cette faïence :

❖ **A grand feu** : après la précuisson de dégourdi à 900°C pour ce cas la décoration aux oxydes métalliques est limitée qu'à cinq couleurs (le bleu le violet le rouge le jaune et le vert) car y'en a que ces couleurs qui peuvent résister à la seconde cuisson qui s'élève jusqu'à 1200°C dans le but d'une vitrification et la fixation des couleurs.

❖ **A petit feu** : appeler faïence réverbère, ce procédé consiste à peindre le biscuit qui est déjà cuit à 1200°C de façon où chaque couleur est séparée entre chacune par une cuisson a basse température de 600 à 700°C pour la fixer.

❖ **Faïences fines** : à base d'argile blanche ou ivoire ce type de faïence ne nécessite pas de l'étain car elle est d'origine blanchâtre en revanche on rajoute de l'oxyde de plomb au biscuit après la seconde cuisson à petit feu 700°C puisque ce dernier est un vernis transparent il n'a pour but que de réduire la température de fusion de la glaçure toute en maintenant sa transparence.



Figure I.10 Domaines d'usage des faïences [8].

c. Grès cérames

Par distinction la phase vitreuse de grès cérames remplit les pores tout au long de la pièce contrairement aux faïences où l'émail joue le rôle principal pour le revêtement de surface du tessou, les températures de cuisson touchent les 1300°C.



Figure I.11 Usage des Grès cérames [8].

d. Les porcelaines

Les gisements de la première matière pour la porcelaine 'kaolin' une argile très pure ne se trouve pas partout dans le globe.

La porcelaine dure cuit à 1450°C à ce stade de haute température tout comme les grès la phase vitreuse remplit la quasi-totalité des pores, en outre on retrouve la porcelaine tendre moins coûteuses mais aussi moins dure est faite à base d'un mélange d'argile fritte et de la chaux, et puis on a la porcelaine alumineuse qui est un mélange de porcelaine dure avec des corindon (saphir, rubis) contenant jusqu'à 90% de Al_2O_3 pour une cuisson de 1600°C.

I.2.2.2 Les céramiques techniques

Les céramiques techniques où les premières matières ont subi des traitements et des contrôles par voie synthétique, on les fabrique à partir de la compression d'une poudre réchauffer dite procédé de frittage, on les regroupe ainsi selon les éléments qui les constituent dont on peut citer :

- ❖ Les oxydes (oxygène + autre élément)
- ❖ Les carbures (carbone + autre élément)
- ❖ Les nitrures (azote + autre élément)
- ❖ Les borures (bore + autre élément)
- ❖ Les sulfures (sulfates + autre élément)
- ❖ Les siliciures (silice + autres élément)

Contrairement aux céramiques traditionnelles, elles sont utilisées selon leur propriétés techniques tels que :

- ❖ Propriétés thermomécaniques
- ❖ Propriétés thermiques
- ❖ Propriétés optiques
- ❖ Propriétés électriques
- ❖ Propriétés chimiques
- ❖ Propriétés nucléaires

Tableau I.1 Quelques propriétés des céramiques techniques [9]

Eléments		Propriétés	Applications
Les oxydes	Al ₂ O ₃ (Alumine)	-isolant électrique -tenue jusqu'à 1600°C -dureté élevée 1800 HV -haute stabilité Chimique	-filtre pour métal fondu -support de microcircuit -condensateur -isolateur haute tension
	ZrO ₂ (Zircone)	-point de fusion 2700°C -dureté élevée 1100 HV -conducteur électrique à chaud	-couteau à céramique -chemisage moteur -prothèse dentaire -sonde lambda
	BaTiO ₃ (titanate de baryum)	-un éventail de comportement très intéressant (photoferroélectriques)	Le domaine électronique et optique
Les carbures	SiC (carbure de silicium)	-tenue jusqu'à 1500 °C -dureté 2600 HV -conducteur et semi-conducteur thermique	-abrasif -résistante chauffante > 800°C -revêtement bouclier thermique pour navette spatiale
	WC (tungstène)	-dureté extrêmement élevée 3600 HV -densité très élevé	-outil de coupe -nucléaire (munitions antichars)
	B ₄ C (carbure de bore)	-dureté élevée 4000 HV -faible densité	-blindage militaire -outils de coupe
Les nitrures	Si ₃ N ₄ (nitrure de silicium)	-dureté élevée 1600HV -tenue 1700 °C -dilatation plus faible que SiC	-bille de roulement - pièce de moteur
	AlN (nitrure d'aluminium)	-isolant électrique et conducteur thermique à la fois -piézoélectrique	-transistors hyper fréquence -filtre acoustique -lampes LED's UV
	TiN (nitrure de titane)	-dureté élevée 2100HV -biocompatible -conducteur électrique et thermique	-zone de frottement des prothèses -contact en microélectronique

I.3 Propriétés mécaniques

I.3.1 Introduction

Les propriétés mécaniques sont extrêmement importantes tant pour la fabrication que pour les applications des matériaux céramiques. En effet, leur fragilité impose des limitations dans les techniques de fabrication et d'emploi, mais en revanche, au niveau atomique, les caractéristiques qui rendent fragiles les céramiques sont en même temps celles qui leur confèrent les propriétés désirées de dureté, réfractaire et résistance chimique ; les avantages et les inconvénients sont deux aspects du même phénomène de base [13].

D'un point de vue général, les propriétés mécaniques des matériaux peuvent être classées en trois catégories distinctes mais en corrélation :

- Propriétés élastiques dans la région où la suppression des tensions entraîne automatiquement une disparition des déformations.
- Propriétés plastiques dans la région où, après suppression des tensions persiste une certaine déformation.
- Enfin, fracture dans la région où les tensions appliquées deviennent trop grandes pour être supportées.

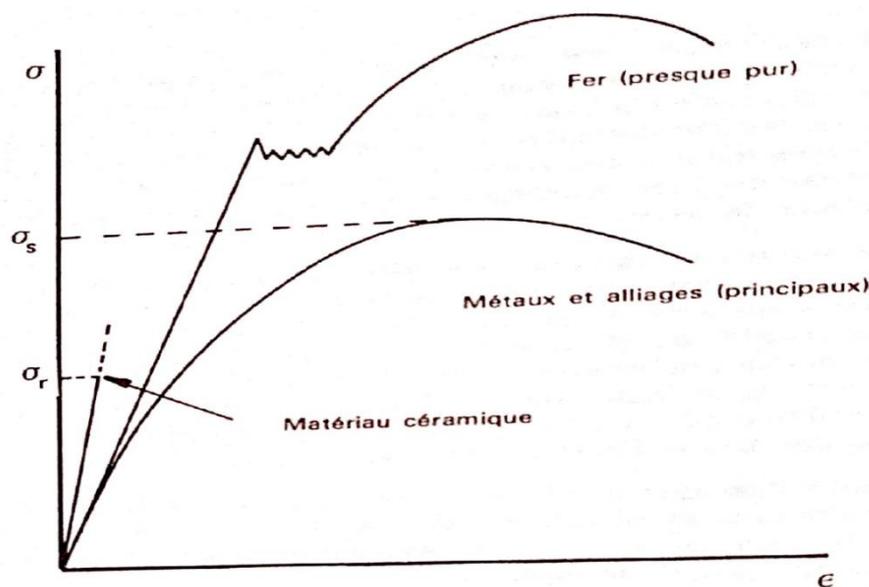


Figure I.12 Diagramme effort/déformation pour des matériaux différents

I.3.2 Propriétés Plastiques

Comme quelques défauts ponctuels (vacances et atomes interstitiels) sont les principaux responsables des propriétés conductrices des semi-conducteurs, de même les " déplacements", déterminent les caractéristiques essentielles du comportement mécanique des matériaux céramiques, aussi bien que des métaux. Ils sont donc fondamentaux pour la compréhension du mécanisme de la rupture.

Commençons par observer la différence entre déformation élastique et déformation plastique dans une éprouvette soumise à traction. Dans la déformation élastique, l'éprouvette, après suppression de la charge, revient à sa forme d'origine : la déformation élastique n'entraîne donc pas de changement permanent dans la forme et dans la structure de l'éprouvette (**figure I.13** a) déformation élastique - b) déformation plastique) ; ce qui a lieu, au contraire, dans une éprouvette ayant subi une déformation plastique, Ce changement permanent peut parfois être observé directement sur l'éprouvette sous forme d'un gradin sur la surface. Pour chaque solide de dimensions normales, un plan atomique contient des trillions d'atomes et il est donc extrêmement improbable que tous ces atomes commencent le clivage en même temps. En réalité, il arrive qu'une petite aire du plan atomique glisse la première et, par extension de cette petite aire, que le clivage intéresse à la fin le plan entier d'atomes : C'est le processus de " Formation d'un Noyau de Clivage et de sa propagation ". La limite entre la surface qui a glissé et celle qui n'a pas glissé est une ligne appelée précisément " DISLOCATION ".

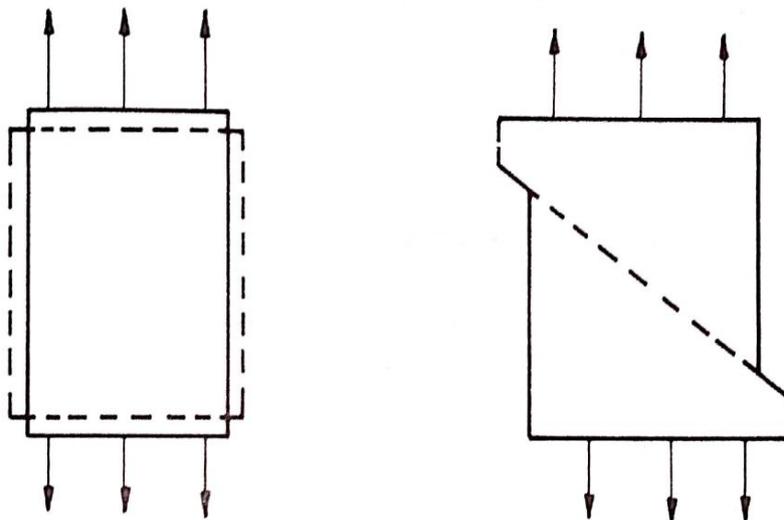


Figure I.13 a) déformation élastique - b) déformation plastique

I.3.3 Propriétés Élastiques

Dans le domaine élastique, la tension (σ) et la déformation (ϵ) sont directement proportionnelles (loi de Hooke) :

$$\epsilon = E \sigma \dots (\text{Eq 1})$$

E étant le module de Young

Il mesure, pratiquement, le rapport entre l'effort appliqué au matériau examiné et les déplacements des atomes et des ions à partir de leurs positions d'équilibre dans un système élastique.

De même, la tension de cisaillement est directement proportionnelle à la déformation de cisaillement (ou de torsion) ϵ_t :

$$\tau = M_r \epsilon_t \dots (\text{Eq 2})$$

M_r étant le MODULE DE RIGIDITE (ou de torsion).

Tableau I.2 Propriétés mécaniques (élasticité) de quelques céramiques (Kingery)

Matériau	kg/cm
Cristaux d'oxyde d'aluminium	385.10 ⁴
Alumine frittée (à. 5% porosité)	371.10 ⁴
Porcelaine alumineuse (90-95% Al ₂ O ₃)	371.10 ⁴
Oxyde de béryl fritté (à. 5% porosité)	315.10 ⁴
Nitride de bore comprimé à chaud (à. 5% porosité)	84.10 ⁴
Carbure de bore (à 5% porosité) comprimé à chaud	294.10 ⁴
Graphite (à. 20% porosité)	9,1.10 ⁴
Magnésie frittée (à. 5% porosité)	210.10 ⁴
Siliciure de M, fritté (à. 5% porosité)	413.10 ⁴
Spinnelle fritté (à. 5% porosité)	238 .10 ⁻⁸
Carbure de silicium dense (à. 5% porosité)	476.10 ⁴
Carbure de titane fritté (à. 5% porosité)	315.10 ⁴
Oxyde de zirconium stabilisé (à. 5% porosité)	154.10 ⁴
Verre de silice	70.10 ⁴
Verre pyrex	70.10 ⁴

Mullite	70.10^4
Stéatite	70.10^4
Réfr. Sil. Alum. 44% A1203	98.10^4
Réfr. Magnésie	175.10^4
Carbure de silicium lié (à. 20% porosité)	350.10^4

Le cas de valeurs plus basses n'est pas rare dans les céramiques ; par ex : porcelaine 0,15 - 0,18 ; cordiérite poreuse 0,13 - 0,18 ; carreaux 0,09 - 0,15 ; briques réfractaires 0,03 - 0,04 ; réfractaires Cr magnésie 0,01 - 0,013.

Cette relation ne peut être appliquée qu'à un corps isotrope dans lequel il y a une seule valeur pour la constante d'élasticité, indépendante de la direction.

L'allongement élastique d'un corps correspond à une augmentation uniforme et progressive de la distance entre les atomes, Par conséquent, il est directement corrélation avec les forces interatomiques et avec l'énergie structurale, comme ceci peut être facilement montré par un calcul entre les modules d'élasticité et les points de fusion.

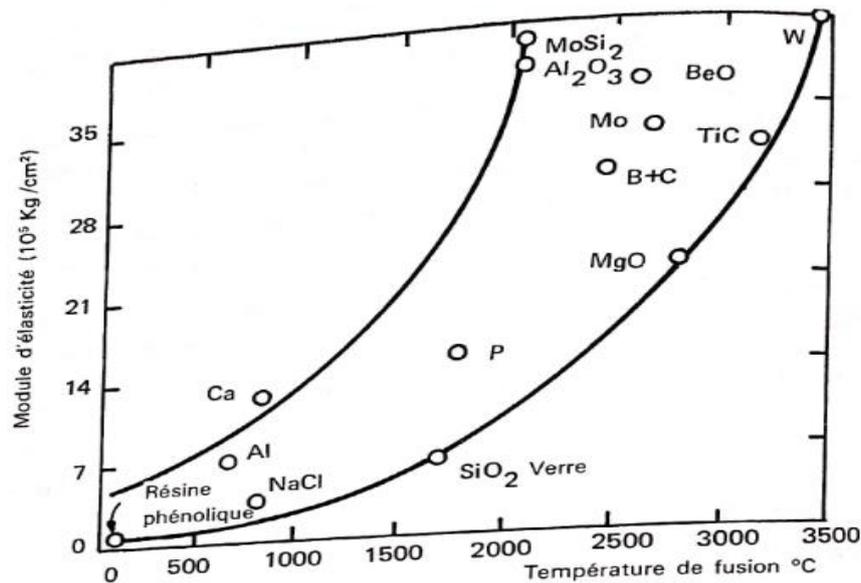


Figure I.14 Relation entre module élasticité et point de fusion pour différentes matériaux (d'après Kingery)

Le module d'élasticité des céramiques dépend beaucoup de la température, diminuant (généralement de façon non linéaire) avec l'augmentation de celle-ci.

I.3.4 Fracture fragile

I.3.4.1 Théories sur la fracture

De nombreux matériaux, comme les verres (non cristallins) qui entrent dans la composition de la plupart des céramiques, sont toujours extrêmement fragiles au-dessous de la température de ramollissement.

Griffith a donné une interprétation de la rupture des matériaux fragiles selon laquelle la différence entre la tension critique théoriquement calculée et la tension expérimentale dérive de la présence de microfissures (ou de défauts en général, comme gravure, variation d'épaisseur, etc.) agissant en concentrateurs de tension, de sorte que la tension aux extrémités d'une fissure peut être beaucoup plus grande que la nominale agissant sur l'échantillon entier. La tension critique, microscopique à l'extrémité d'une fissure, est donnée par :

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{\gamma E}{2C}} \dots \text{(Eq 3)}$$

γ étant l'énergie superficielle et C la longueur de la fissure.

La grandeur de ces microfissures est de l'ordre du [J. m], avec des dimensions transversales de l'ordre des distances interatomiques.

I.3.5 Propriétés mécaniques à températures élevées

Aux températures élevées, les matériaux céramiques peuvent être sollicités, au point de vue mécanique, de deux façons différentes. Ils peuvent être soumis à des tensions thermiques seulement ou ils peuvent rester longtemps, à températures élevées, soumis à une charge, constante ou non, avec ou sans gradient thermique interne (tensions thermomécaniques). La sensibilité des matériaux céramiques aux tensions thermiques est un des facteurs principaux limitant leur utilisation. Pour de nombreuses applications, à haute température, par exemple, les propriétés structurales permettent un bon comportement du matériau, alors qu'on peut avoir des ruptures par choc thermique à température inférieure.

I.3.5.1 Tensions thermiques

Elles peuvent avoir deux origines :

a) Par formation d'un gradient thermique dû à une chauffe qui n'est pas homogène dans tout le matériau,

b) Par des variations rapides de température entraînant des modifications importantes dans le gradient thermique ; c'est le " CHOC THERMIQUE ".

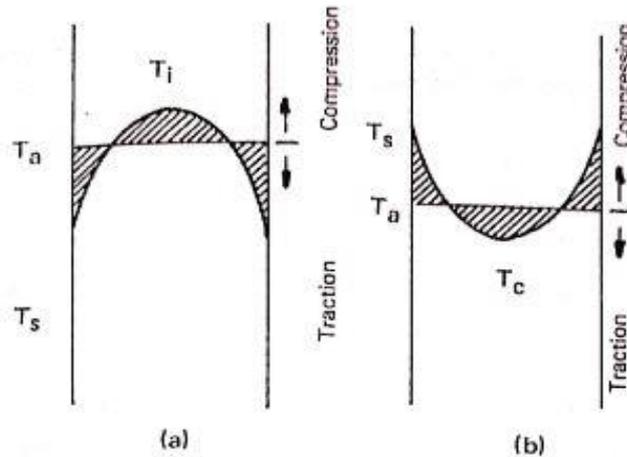


Figure I.15 Distribution des températures et des efforts -a) cas de refroidissement de la surface -b) cas de chauffage de la surface (de W. Kingery)

Les contraintes sont liées aux trois propriétés suivantes :

- Coefficient de dilatation
- Module d'élasticité
- Diffusivité thermique

I.3.5.2 Tension Thermomécanique

Dans un but pratique nous, pouvons les subdiviser en :

- Tensions à charge constante à température élevée que nous traiterons ici ;
- Tensions à charges variables.

Une longue permanence aux températures élevées avec une charge constante représente la sollicitation caractéristique imposée aux matériaux réfractaires dans lesquels la propriété mécanique la plus importante est la résistance à la déformation en fonction du temps dite " FLUAGE ". Les mesures à températures élevée (avec charge constante et pour une certaine période de temps) donnent lieu à une fusion-déformation du type illustré à la figure I.16 (Type de courbe de fluage (d'après W. Kingery)).

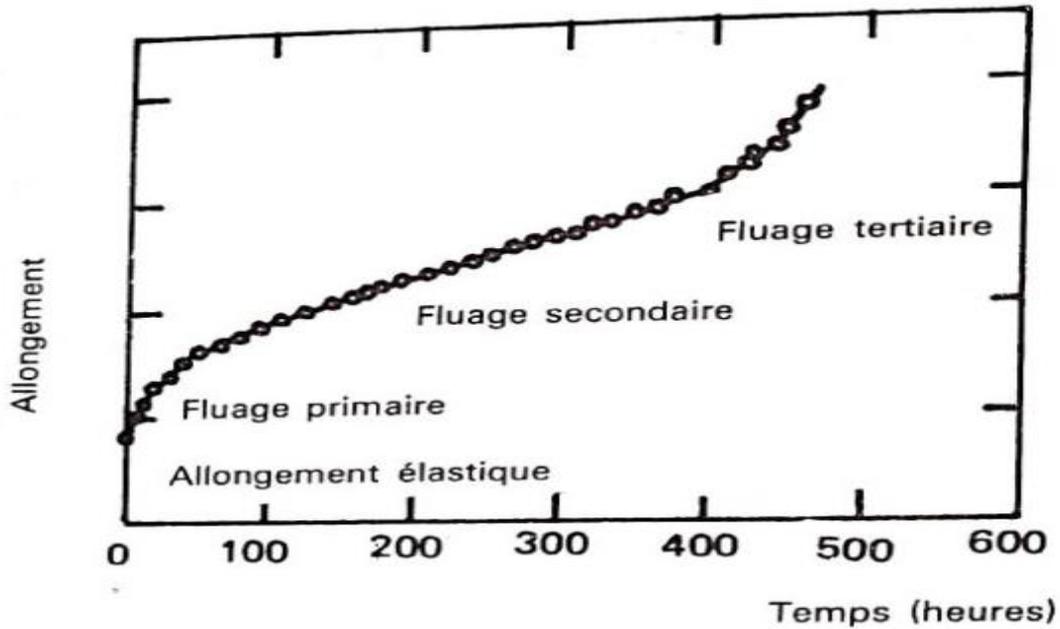


Figure I.16 Type de courbe de fluage (d'après W. Kingery)

Après un allongement élastique initial, suit une période pendant laquelle la vitesse de fluage (fluage primaire) diminue. Y succède une période, plus ou moins longue, (fluage secondaire) avec des vitesses de fluage constantes ou presque, souvent suivie d'une période dans laquelle la vitesse de déformation augmente car la fracture est imminente, (fluage tertiaire).

I.4 Propriétés thermiques

Les principales caractéristiques thermiques intéressant les matériaux céramiques sont :

- a) Le gradient de température
- b) La résistance aux tensions thermiques (chocs thermiques).
- c) Les propriétés mécaniques proprement dites à haute température.

L'examen de ces caractéristiques implique avant tout le rappel des concepts de :

- Chaleur spécifique,
- Coefficient de dilatation thermique,
- Conductivité thermique,
- Pouvoir de diffusion thermique,

- Pouvoir émissif.

I.4.1 La chaleur spécifique

C'est une caractéristique qui dépend surtout de la composition chimique et de l'état d'agrégation du matériau céramique. Elle exprime la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de l'unité de masse de la substance considérée. La chaleur spécifique dépend, en outre, de la température et croît en général avec l'augmentation de celle-ci (**figure I.17** (Chaleurs spécifiques de quelques matériaux réfractaires) et **tableau I.3** (Chaleurs spécifiques moyennes des matériaux réfractaires et des briques (entre 20 °C et T = °C) en Kcal/Kg °C)).

Par ailleurs, la chaleur spécifique entre, avec la densité et la conductivité, dans l'expression du " POUVOIR DE DIFFUSION THERMIQUE " qui, comme nous le verrons, est la grandeur qui règle les phénomènes thermiques non stationnaires. Elle est généralement mesurée comme une valeur spécifique à pression constante (C_p) ; toutefois on se rapporte souvent aussi à la chaleur spécifique à volume constant (C_v)[8].

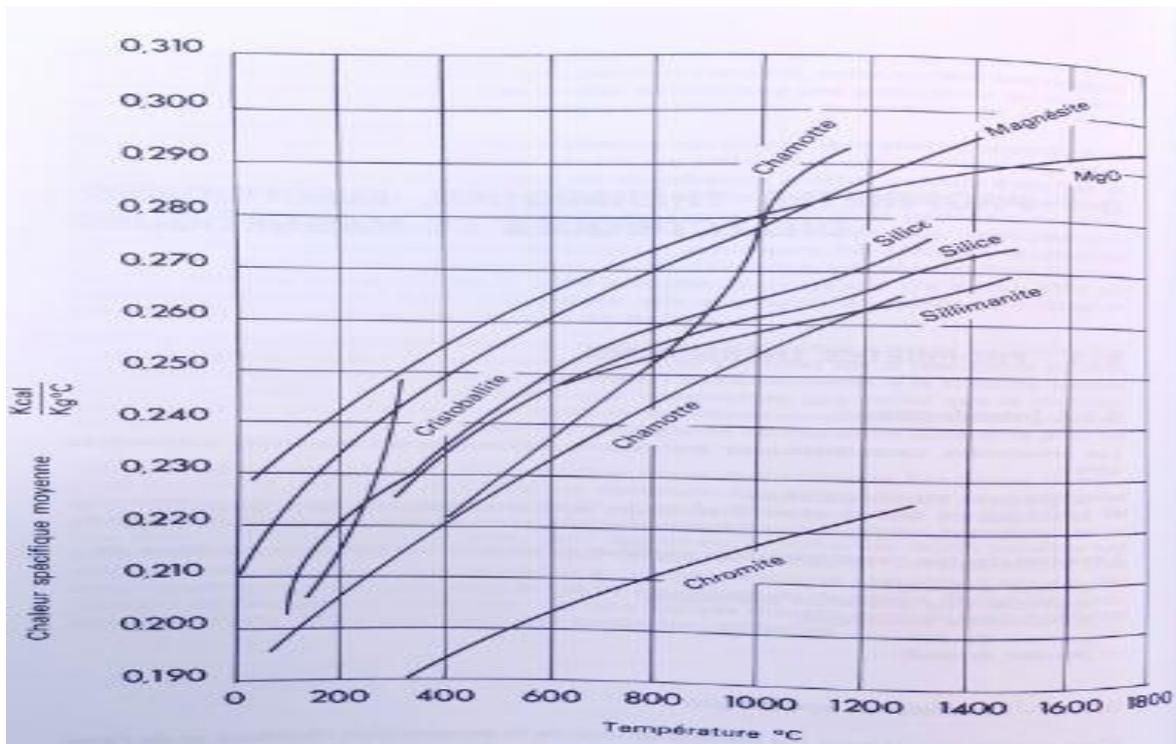


Figure I.17 Chaleurs spécifiques de quelques matériaux réfractaires

Tableau I.3 Chaleurs spécifiques moyennes des matériaux réfractaires et des briques (entre 20 °C et T = °C) en Kcal/Kg °C

°C	Alumine	Chromite	Graphite	Magnésie	Silico-alumineux	Farine Fossile (Tripoli)	Silice	Sillimanite	Briques
100	0,2060		0,192	-	0,197	0,199	0,189	-	-
200	-	0,178	0,228	0,223	0,202	0,203	0,210	-	0,207
300	0,2260	0,195	0,255	0,238	0,213	0,216	0,230	0,216	0,221
400	-	-	0,280	0,254	0,220	0,219	0,236	0,229	0,240
500	0,2395	-	0,300	0,263	0,231	Carbure	0,245	0,238	0,247
600	-	-	0,317	0,268	0,238	Silice	0,248	0,246	0,249
700	0,2500	0,206	-	0,265	0,244	0,252	0,253	0,251	0,247
800	-	0,211	0,342	0,264	0,251	0,255	0,258	0,255	0,242
900	0,25130	0,214	-	0,263	0,258	0,259	0,262	0,257	0,237
1000	-	0,217	0,362	-	0,277	0,263	0,266	0,258	-
1100	0,2645	0,220	-	-	0,288	0,266	0,269	0,261	-
1200	-	0,222	0,377	-	-	0,268	0,272	0,263	-
1300	0,2705	0,224	0,382	-	-	0,271	0,275	0,265	-
1400	-	0,226	-	-	-	-	-	0,268	-
1500	0,2755	-	-	-	-	-	-	0,270	-

La température à laquelle la chaleur spécifique devient constante ou change peu avec la température dépend de l'énergie de liaison, des constants élastiques, du point de fusion. Elle varie considérablement selon les différents matériaux.

Des élévations ultérieures de température ne modifient pas notablement cette valeur. La création de défauts de Frenkel et de Schottky, le désordre magnétique, etc., peuvent contribuer à augmenter la valeur de la chaleur spécifique à des températures plus élevées.

Le produit de la chaleur spécifique par la masse du réfractaire constitue la " capacité thermique " intervenant dans tous les processus qui entraînent une accumulation de chaleur (**figure I.18** (Capacité thermique de quelques matériaux céramiques à différentes températures (d'après Kingery)). Dans les Cowper et dans les régénérateurs en général, la capacité thermique détermine la variation de température du réfractaire dans les phases de chauffage et de refroidissement.

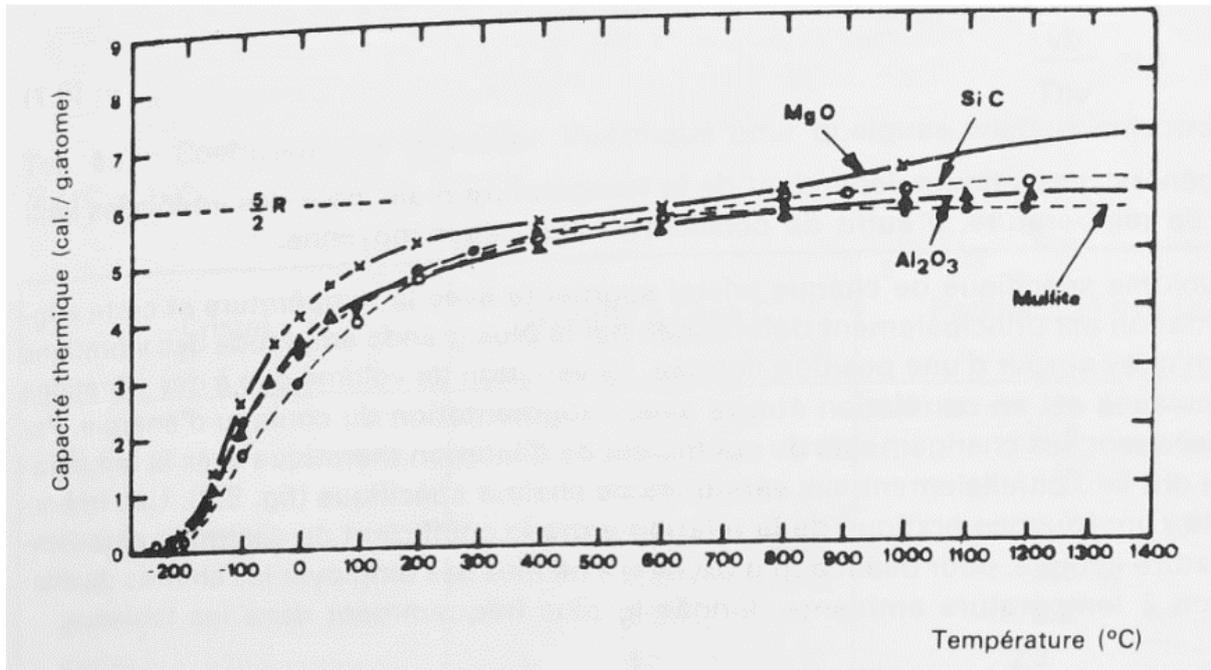


Figure I.18 Capacité thermique de quelques matériaux céramiques à différentes températures (d'après Kingery)

La capacité thermique intervient de façon remarquable même dans les fours soumis à des changements brusques et importants dans la capacité d'absorption de chaleur de la part de la charge (charge thermique) comme, par exemple, dans les fours de réchauffage pour gros forgés, dans les fours pit, etc. A la suite de la forte absorption de chaleur consécutive à la période de chargement, le four subit un refroidissement plus ou moins grand selon la capacité thermique des parois. Une capacité thermique suffisante est alors utile pour éviter des dommages au réfractaire.

Très souvent, dans les calculs thermiques, plus que la capacité thermique ou la chaleur spécifique " vraie " pour une certaine température, intervient la capacité thermique et la chaleur spécifique moyenne entre température ambiante et température de régime. En particulier, ces dernières valeurs sont utiles lorsqu'on veut calculer la quantité de chaleur nécessaire pour atteindre un certain régime partant d'une température déterminée.

I.4.2 Coefficient de dilatation thermique

Les variations de longueur et de volume associées aux changements de température sont importantes pour beaucoup d'applications.

Pour chaque température, nous pouvons définir un coefficient de dilatation linéaire :

$$a = \frac{dl}{l dt} \dots (\text{Eq 4})$$

Et un coefficient de dilatation volumétrique :

$$\alpha = \frac{dv}{v dt} \dots (\text{Eq 5})$$

En général, ces valeurs dépendent de la température mais, pour des intervalles limités de température, il suffit de considérer une valeur moyenne.

Le volume spécifique de chaque cristal augmente avec la température et cette augmentation est principalement déterminée par la plus grande amplitude des vibrations atomiques autour d'une position donnée. La variation de volume due à des vibrations réticulaires est en corrélation étroite avec l'augmentation du contenu d'énergie. Par conséquent, les changements du coefficient de dilatation thermique avec la température ont lieu parallèlement aux variations de chaleur spécifique (**figure I.19** (Variations de chaleur spécifique et de dilatation thermique en fonction de la température (d'après Kingery)) [9]).

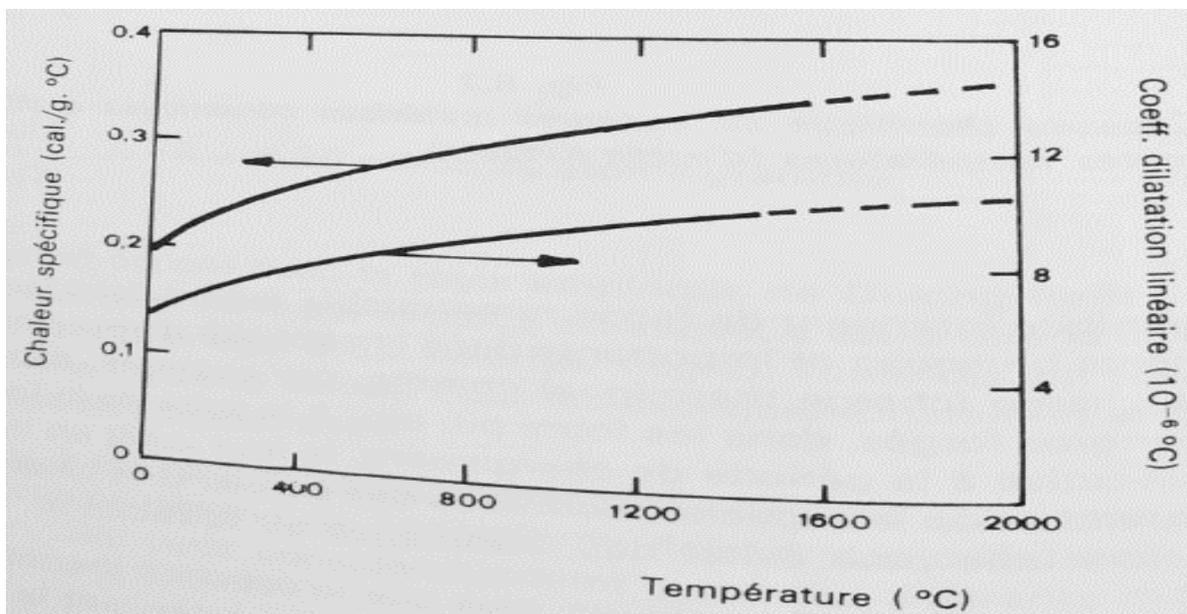


Figure I. 19 Variations de chaleur spécifique et de dilatation thermique en fonction de la température (d'après Kingery)

I.4.3 Conductibilité thermique dans les matériaux céramiques

C'est la caractéristique thermique la plus connue et la plus utilisée dans les matériaux céramiques.

Elle est exprimée par la quantité de chaleur qui, en une heure, traverse un mètre carré de parois d'une épaisseur d'un mètre du matériau considéré, pour une différence d'un degré entre la température des deux surfaces qui la délimitent. Généralement, la loi de conduction thermique de Fourier est exprimée par :

$$Q = \lambda A \cdot \frac{dT}{ds} \text{ (kCal/h) ... (Eq 6)}$$

Dans cette équation, λ (kCal/m/h °C) est le coefficient de conductibilité thermique du corps, dT °C, la diminution de température sur la petite épaisseur ds (m); dT/ds est le gradient de température et A la section (en m²).

La conductibilité thermique dépend de la composition chimique, de l'état d'agrégation et de la température (**figure I.20**(Relations entre la conductibilité thermique et la température)). Elle dépend aussi considérablement de la forme, de la grosseur, de l'orientation et de la répartition des pores. Des considérations purement théoriques il résulte que, dans les structures vitreuses la conductibilité thermique croît avec la température, dans les corps cristallins, au contraire, elle est inversement proportionnelle à la température.

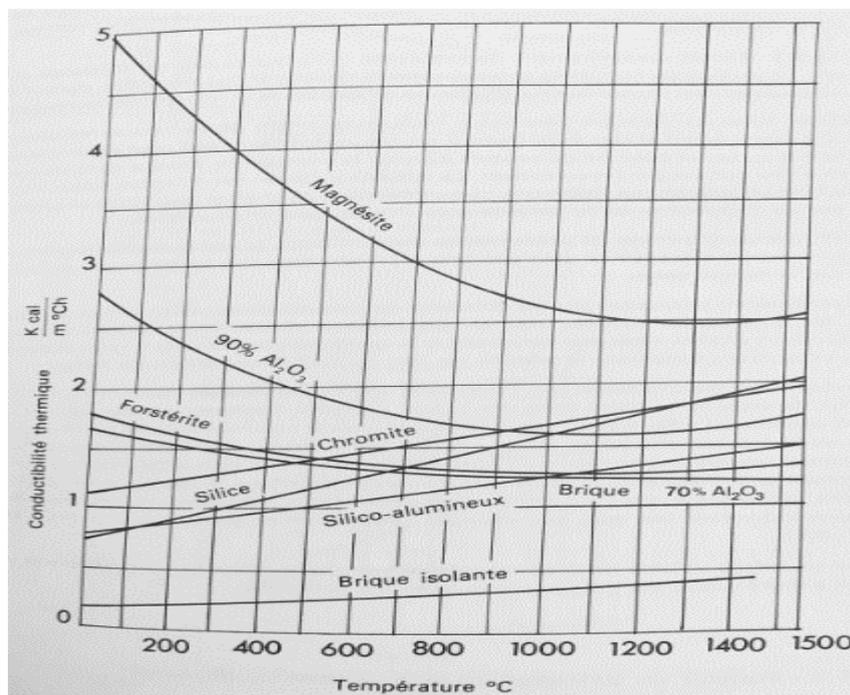


Figure I.20 Relations entre la conductibilité thermique et la température.

I.4.4 Pouvoir de diffusion thermique (thermo-diffusion)

Il est exprimé par le rapport entre la conductibilité thermique et le produit de la chaleur spécifique par la densité.

Tandis que la mesure de la conductibilité thermique correspond à un phénomène stationnaire, la mesure de la thermodiffusion correspond à un flux de chaleur variable. Cette diffusion thermique a est liée à la conductibilité thermique λ à la chaleur spécifique c et à la densité apparente P_v par la relation :

$$a = \frac{\lambda}{cP_v} \dots \text{(Eq 7)}$$

Puisque les valeurs présentes au dénominateur sont généralement connues, ou au moins faciles à déterminer, la thermodiffusion peut être utilisée pour calculer la conductibilité thermique, par comparaison avec un matériau de référence à conductibilité thermique connue [10].

I.4.4.1 Pouvoir émissif

Cette caractéristique a une grande importance pour les réfractaires même si, généralement, elle n'est pas souvent mise en évidence. Le matériau en charge dans les fours de réchauffage est chauffé aussi bien par les radiations reflétées par les parois sur la charge que par l'action directe de la flamme et des gaz.

Les oxydes colorés en surface (fer et titane) augmentent considérablement le pouvoir émissif, même s'ils ne sont présents qu'en petites quantités, ainsi que les phases vitreuses.

En ce qui concerne les matériaux réfractaires, l'alumine pure a le pouvoir émissif le plus bas, puis, dans l'ordre de pouvoir émissif croissant, viennent les silico-alumineux, la silice, les réfractaires basiques de chrome-magnésie et enfin la dolomie

Toutefois cet ordre n'est valable que dans ses grandes lignes, car le pouvoir émissif de matériaux réfractaires de même type diffère parfois sensiblement en fonction des facteurs mentionnés ci-dessus, qui en conditionnent l'état de surface.

I.5 Propriétés chimiques et environnementales

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'elles ne présentent pas de danger pour l'homme et pour la nature. On les utilise d'ailleurs largement pour les équipements sanitaires, médicaux ou alimentaires. On appelle inertie chimique la capacité à résister aux attaques chimiques. Les céramiques oxydant étant déjà oxydées, elles résistent beaucoup mieux aux effets corrosifs que certains métaux [11].

Conclusion

Les céramiques sont à base de plusieurs matières premières associées à des proportions diverses selon la nature des céramiques lesquelles on veut fabriquer et suivant la température de cuisson. Il y'a deux types de céramiques : les céramiques techniques et les céramiques traditionnelles dont les céramiques dalle de sol font partie. Les propriétés céramiques dépendent intrinsèquement du procédé de fabrication et des types de matériaux associés (plastifiant, kaolin, dégraissant (sable, chamotte) ou fondant (feldspath)).

Références bibliographiques :

- [1] J.AUBERT, P.LEFORT, J.POIRIER, S.VALETTE, Céramiques : propriétés et élaboration, Réf. Internet : 42578 | 7^e édition
- [2] Nedjima BOUZIDI, "Influence des impuretés des kaolin sur les propriétés des produits de cuisson" Thèse de doctorat, université de Bejaia 2012.
- [3] J.RIGAUD, Edition SEPTIMA - l'industrie céramique – 1991 dépôt légal 1^{er} trimestre 1991 ISBN 2-904845-10-0.
- [4] Nathalie FAGEL. " Géologie des argiles, chapitre 3, département de géologie, unité argile et paléoclimat (URAP) ". Université de liège Belgique 2005.
- [5] M.Eslinger, D.J Peaver. "Clay Minerals for the Petroleum Geologists and Engineers ". SEPM Short Course Notes, v.84(2), p. 464-465. Review written by P.A. Schroeder. 1988.
- [6] A. Michot « Caractéristiques thermo physiques de matériaux à base d'argile évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C ". Thèse de Doctorant. (GEMH). ENSCI Limoges. 2008.
- [7] M. Kolli. "Elaboration and characterization of a refractory based on Algerian kaolin", Ceramics international N° 33; pp 1435–1443; 2007.
- [8] GIOVANI ALIPRANDI. Matériaux réfractaires et céramiques techniques - Edition SEPTIMA, 14 rue Falguière- 75015 Paris.
- [9] K Devineau, "Déstabilisation haute température de poudres granitiques : évolution des Propriétés minéralogiques et physiques". Thèse doctorat de l'université de Lorraine, (2002).
- [10] B. Singh and R. Gilkes, Clays Clay Miner. 40, 212, (1992).
- [11] J.F. Pasquet, "Le kaolin, mémento roches et minéraux industriels", BRGM, 1988.

Chapitre II : Méthodes Physico-Chimiques de Caractérisations

Introduction

Ce Chapitre présente la description des différents matériels et méthodes employées dans ce projet pour la caractérisation physico-chimiques et minéralogiques des matières premières à savoir la XRF, XRD et Granulométrie. En partant des propriétés spécifiques des céramiques. Il s'agit de présenter pour chaque technique le principe et les modes opératoires sans entrer dans le détail. Les résultats collectés et étudiés proviennent de trois laboratoires différents.

- Le premier laboratoire est à la cimenterie Ain Kebira située à Sétif (XRF) ;
- Laboratoire de SCS (Société Céramique de la Soummam) située à Bejaïa est le laboratoire des résultats de la granulométrie ;
- Le troisième point est le CRAPC (Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-Chimique) (XRD) ;

Nous présenterons dans ce chapitre les différentes techniques d'analyses et de caractérisation que nous avons utilisé au cours de notre travail.

II.1 Caractérisation physique

II.1.1 Analyse granulométrique

La granulométrie permet de déterminer la distribution granulométrique des fines composantes de matières premières. L'appareil utilisé est une tamiseuse vibrante électrique RETSCH AS 200 BASIC. Il utilise une technique d'agitation mécanique de la série de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Les particules en suspension sont introduites sur la partie supérieur du premier tamis. Ils sont ensuite soumis à des vibrations dans le but de les classer selon leurs dimensions.

II.1.2 Mesure de la teneur en eau

Pour les carreaux céramiques, l'absorption d'eau est utilisée pour la classification des produits en utilisant des techniques archimédiennes classiques.

La détermination de la teneur en eau des matières premières selon la norme française NF P 94-050 (1995) se fait par séchage en étuve [1]. Le principe consiste à sécher une masse de 1 à 3 kg de matières premières dans une étuve réglée à 80 et 120°C jusqu'à ce que la masse reste constante pendant 24 heures. La différence entre le poids avant et après séchage exprime la teneur en eau de l'échantillon initial cette mesure est exprimée en (%) (Eq 1).

$$W (\%) = \frac{\text{masse humide} - \text{masse sèche}}{\text{masse sèche} - \text{la tare}} \times 100 \dots (\text{Eq 1})$$

II.2 Caractérisation chimique et minéralogique

La valorisation des matières premières nécessite une connaissance de leurs compositions chimique et minéralogique pour comprendre et voir les réactions qui peuvent avoir lieu au sein du produit valorisé. La composition chimique est déterminée par la fluorescence aux rayons X (FRX) qui permet d'évaluer les répartitions massiques des différents oxydes. L'analyse minéralogique définit la nature des minéraux cristallisés à l'aide d'une diffraction aux rayons (DRX).

II.2.1 Analyse chimique

Elle permet de quantifier (en pourcentage massique) les oxydes majeurs et mineurs. A partir de ces résultats et en considérant les masses molaires, les pourcentages en oxydes (SiO_2 , CaO , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O et SO_3) sont déduits.

La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire qui permet la détermination des espèces chimiques contenues dans un échantillon. Le principe de cette méthode consiste à bombarder la matière à analyser par un faisceau de rayons X, ce qui aboutit à une émission secondaire des rayons X. On obtient donc un spectre de rayons X émis qui présente les pics caractéristiques des différents éléments existant dans l'échantillon. L'analyse du spectre peut se faire de deux manières : analyse dispersive en longueur d'onde et analyse dispersive en énergie. La position des pics renseigne sur la nature de l'élément (analyse qualitative) alors que son intensité permet de quantifier la teneur de chaque élément.

La spectrométrie par fluorescence à rayons X dispersive à longueurs d'ondes (WDXRF) est une application très précise et très fiable. Elle s'est implantée dans 61 plusieurs applications industrielles en particulier, l'industrie du ciment, les polymères, les exploitations minières, les raffineries et les minéraux industriels. La fluorescence à rayons X dispersive de l'énergie (EDXRF) est une application spéciale de contrôle de la qualité et des procédés qui ont besoin d'une utilisation simple et d'un dispositif compact. Elle offre une grande flexibilité analytique dans le cadre de tâches de recherche et de surveillance. La fluorescence X permet la caractérisation chimique de plusieurs matières comme les céramiques, les argiles, les aluns, les minéraux, les métaux, les huiles... Dans le cadre de ce travail, on a utilisé cette technique pour déterminer la composition chimique des argiles. Cette analyse a été effectuée à l'aide de l'appareil WDXRF, S4 Pioneer fourni par BRUKER [2].



Figure II.1 Analyseur fluorescence X (S4 Pioneer)

II.2.2 Analyse minéralogique

La diffraction des rayons X est une technique puissante pour l'étude des cristaux à l'état solide. Elle permet d'accéder à leur structure cristalline. Elle est indispensable à l'identification des minéraux argileux des argiles naturelles ainsi que les minéraux (« impuretés ») associés. Le principe de cette technique est basé sur la diffusion des rayons X par la matière. Ce phénomène de diffusion est le résultat d'une interaction entre le faisceau de rayons X et la matière. La propriété cristalline de cette dernière exige des directions privilégiées au faisceau de rayons X incident. Ce phénomène a été découvert par Max Von Laue (prix Nobel en 1914) [2].

Le processus de diffraction des rayons X par la matière est interprété par la loi de Bragg qui consiste à déterminer les directions selon lesquelles les interférences des rayons diffusés sont constructives (pics de diffractions). Cette loi est exprimée par l'équation (Eq 1) suivante :

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad \dots \text{(Eq 1)}$$

Avec :

d_{hkl} : Distance inter-réticulaire exprimé en Å.

n : Nombre entier correspondant à l'ordre de réflexion.

λ : Longueur d'onde du rayonnement utilisé (nm) lié à la nature de l'anticathode.

θ : Angle de diffraction (°).

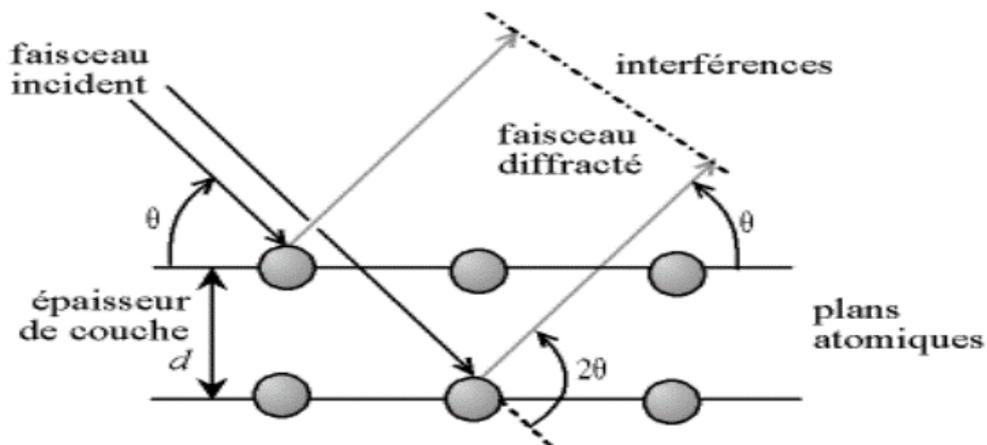


Figure II.2 Schéma représentatif du phénomène de diffraction des rayons X

L'étude des argiles par la technique de diffraction des rayons X permet la détermination de la composition minéralogique de ces matériaux. Elle permet ainsi de connaître les différentes phases argileuses et celles des minéraux associés. Pour y parvenir, il faut se baser sur une étude comparative et une interprétation complète des spectres [3].

Plusieurs étapes sont généralement requises pour une identification complète voir la détermination de la structure du minérale argileux.



Figure II.3 Diffractomètre aux Rayons X de système XPERT-PRO

Conclusion

Nous voyons ainsi que les approches pour la caractérisation de nos échantillons sont multiples. Dans ce chapitre nous avons choisi une présentation qui aide l'utilisateur ou le concepteur à retenir quelques méthodes de caractérisation physico-chimiques et minéralogique, chacune d'elles faisant l'objet en général d'une ou plusieurs informations qui peuvent identifier les matières premières.

Références Bibliographiques

[1] NF, P. (1991). 94-050. Sols : Reconnaissance et essais-détermination de la teneur en eau pondérale des sols-méthode par étuvage, Association Française de Normalisation.

[2] Yassine Bentahar. Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse. Autre. COMUE Université Côte d'Azur (2015 - 2019) ; Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 2016.

[3] Caillere, S., S. Henin, and M. Rautureau, Minéralogie des argiles : 1. structures et propriétés physico-chimiques. 2. Classification et nomenclatures. 1982, Masson, Paris

Chapitre III : Analyses physico-chimiques des matières premières

Introduction

Les matières premières minérales qui sont à la base des compositions céramiques silicatées sont des mélanges naturels complexes de minéraux dont la caractérisation requiert l'utilisation de méthodes diverses pour déterminer leurs compositions chimiques, physiques et minéralogiques. En fonction de l'origine des matières premières, une petite variation de l'une de ces caractéristiques peut limiter considérablement le domaine d'application [1].

III.1 Analyse granulométrique

La granulométrie a pour objectif de mesurer la taille de particules élémentaires ou de grains. Elle consiste aussi en l'analyse de la distribution statistique des classes de tailles d'une collection de grains. Les méthodes qui permettent cette mesure doivent être reproductibles [2].

Tableau III.1 Granulométrie des poudres céramiques

Dimensions Tamis (mm)	Masse des tamis (g)	Refus (g)	Refus cumulés (g)	Tamisats cumulés %
0,600	476,5	7,2	7,2	92,8
0,425	484,2	35,5	42,7	57,3
0,300	463,9	33,9	76,6	23,9
0,250	449,6	8,8	85,4	14,6
0,180	424,5	7,5	92,9	7,1
0,125	413,5	5,1	98,0	9,0
0,063	397,3	1,4	99,4	0,6
<0,063	468,8	0,1	99,5	0,5

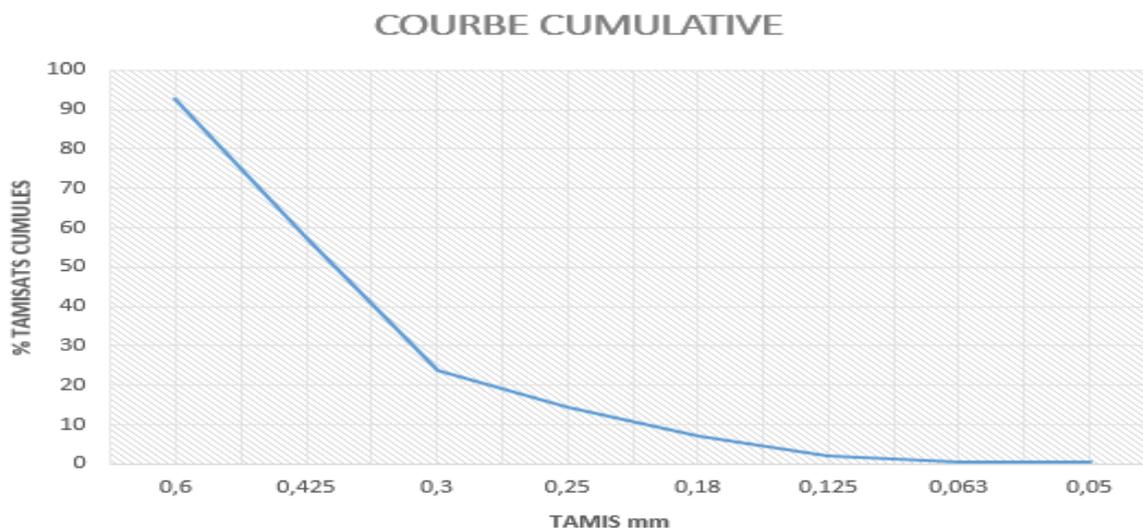


Figure III.1 Courbe cumulative de la poudre céramique.

Le pourcentage du tamisat diminue à mesure que la dimension des tamis diminue. On remarque au point où les dimensions des tamis atteignent 0,3 mm et le % tamisat correspond à 23,9%, dans cette zone les tailles des grains deviennent très fines, cela peut engendrer des défauts dans les carreaux.

III.2 Analyses chimiques des matières premières

Les analyses chimiques des matières premières sont effectuées par la fluorescence des rayons x au niveau de laboratoire de la cimenterie Ain Kebira wilaya de Sétif.

Les résultats de l'analyse chimique faite par XRF sont dressés dans le tableau qui suit :

Tableaux III.2 Composition chimique (% massique) des matières premières

M.P	KoA	AgR	AgN
Oxydes			
Si ₂ O ₃	50,18	52,71	54,63
Al ₂ O ₃	21,36	20,64	19,69
Fe ₂ O ₃	2,58	7,57	6,49
CaO	0,23	0,77	1,74
MgO	0,83	7,16	3,67
K ₂ O	1,67	3,3	3,05
Na ₂ O	1,04	0,65	0,51
Cl	0,066	0,005	0,04

SO3	0,15	0,13	0,2
PAF	24,04	7,07	9,98

Selon les résultats présentés dans ce tableau, on peut déduire que les argiles étudiées sont grésantes (teneur en SiO₂ entre 50,18 % et 54,63 %), et non réfractaires, puisque les argiles réfractaires présentent un pourcentage en Al₂O₃ supérieur à 45 %. Elles ne cuisent pas blancs, car une argile qui cuit blanc se caractérise par un pourcentage en Fe₂O₃ toujours inférieur à 1,5% (IKAYA, 2004). Par ailleurs, si l'on compare les trois argiles ; elles sont de nature essentiellement silico-alumineuse avec des teneurs plus faibles en carbonates obtenus à partir du CaO (**Tableau III.1** (Granulométrie des poudres céramiques)).

La représentation des compositions chimiques des différentes argiles sont illustrées dans les histogrammes suivants :

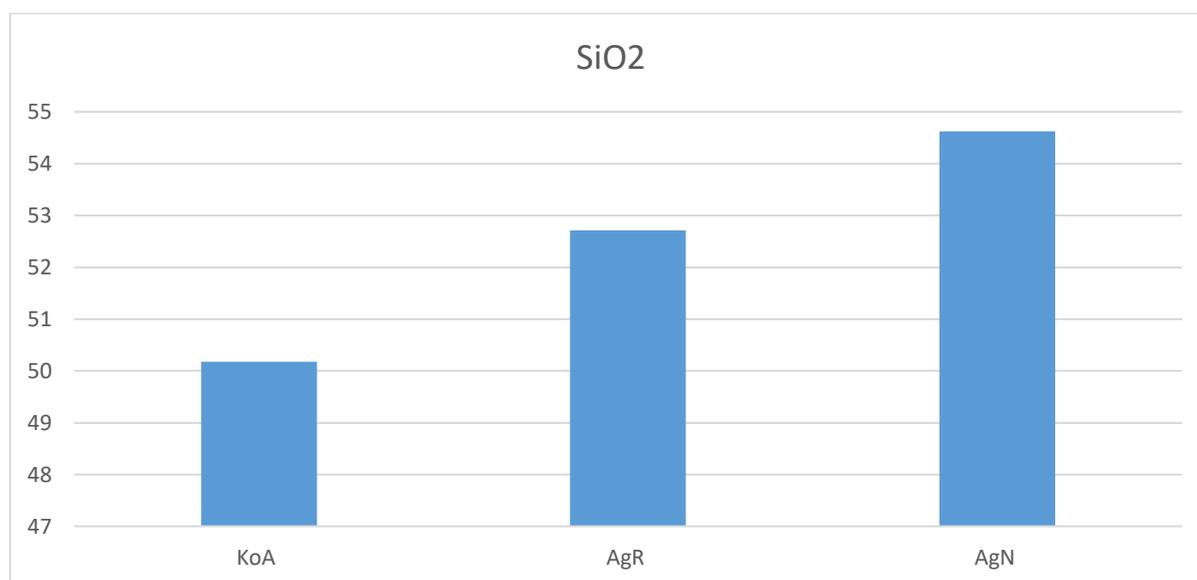


Figure III.2 Histogramme du taux de SiO₂ dans les matières premières

Le taux de SiO₂ relatif au quartz est plus important dans l'argile noire que les autres matières, vient après l'argile rouge et le kaolin. Ce taux important peut engendrer des défauts au niveau de la planéité des carreaux céramique car la silice participe essentiellement à la formation de la matrice vitreuse [3]. Ce pourcentage est justifié par la présence de la silice libre.

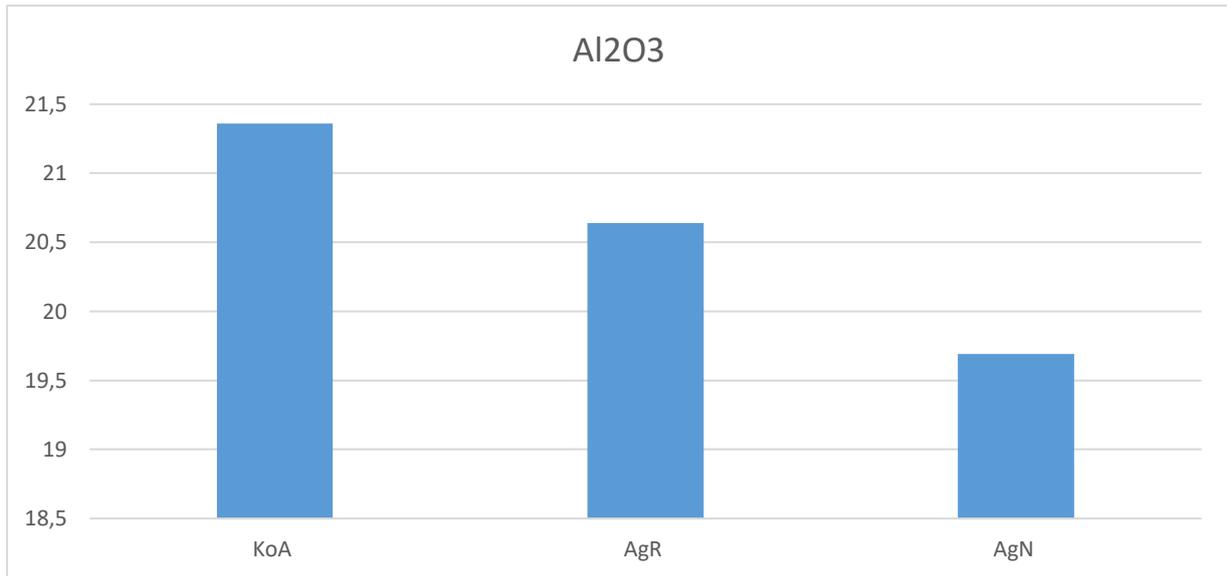


Figure III.3 Histogramme du taux de Al_2O_3 dans les matières premières

On remarque une teneur en Al_2O_3 est importante dans le kaolin (Kaolinite) un composé réfractaire par rapport aux deux autres argiles, Cette teneur participe à la réfractarité du matériau, ce qui conduit à la bonne tenue au feu (température de cuisson de 1120 °C). Aussi cette kaolinite participe à la plasticité lors du façonnage des carreaux céramiques (Pressage).

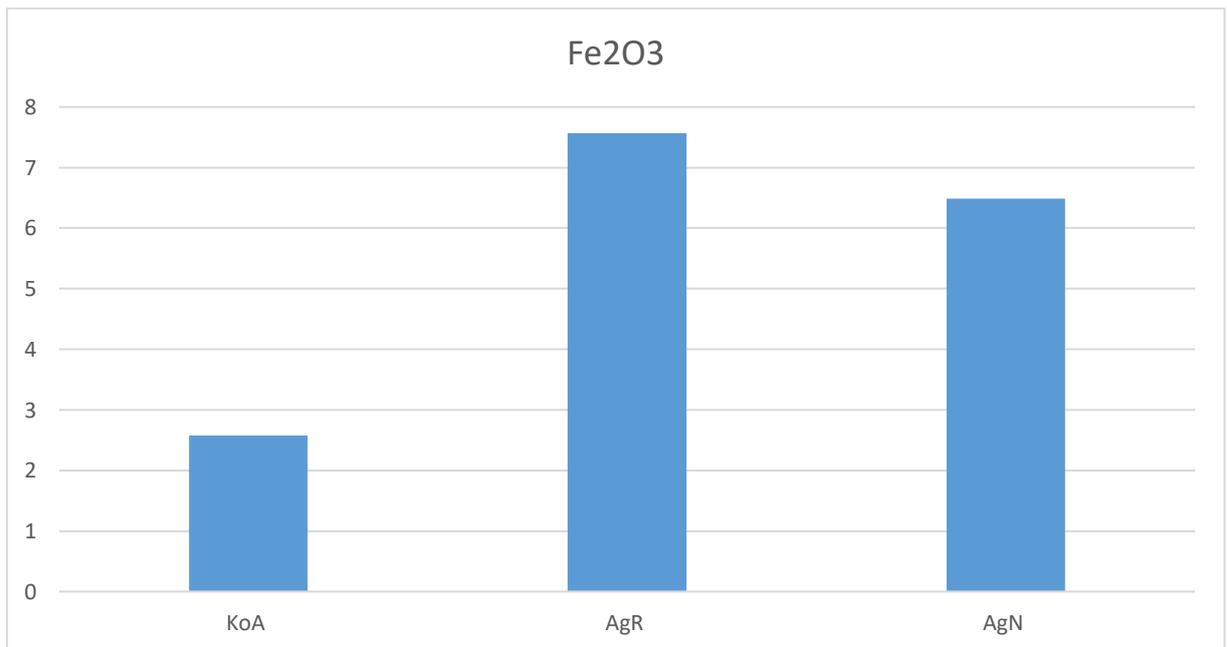


Figure III.4 Histogramme du taux de Fe_2O_3 dans les matières premières

La teneur la plus élevée de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) correspond à l'argile rouge, ce taux n'est pas négligeable (8%) ; il pourrait participer à l'abaissement de la température de cuisson et jouer le rôle de fondant.

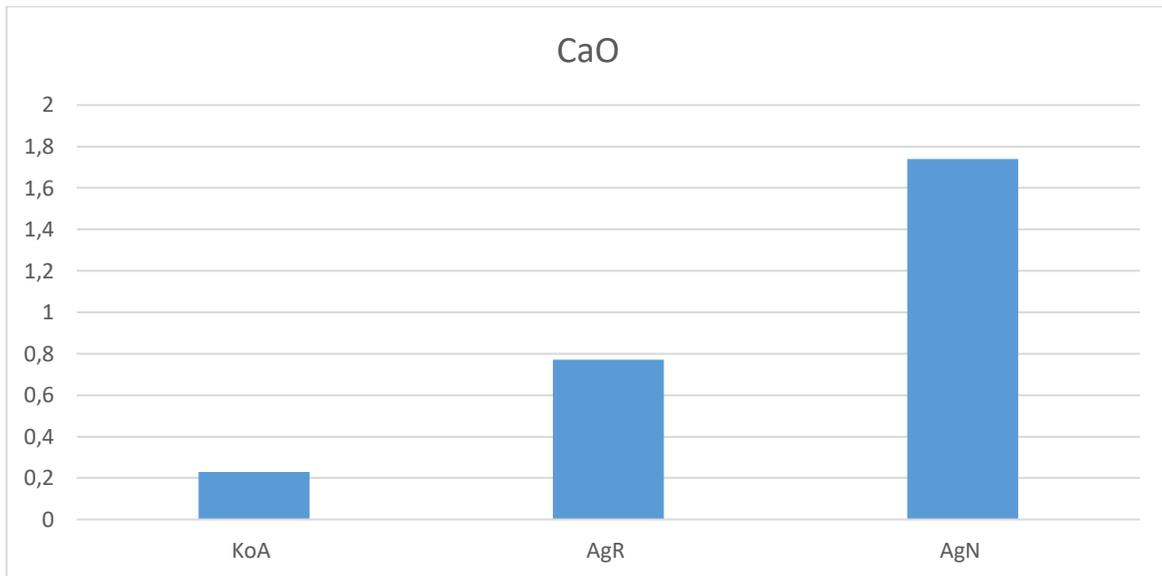


Figure III.5 Histogramme du taux de CaO dans les matières premières

L'oxyde de calcium présent en quantité considérable dans l'argile noire synonyme de la présence importante des carbonates. Le CaO participe à la formation des cristaux d'hydroxyapatite en présence de phosphore, un excès de cet oxyde peut générer un défaut de bullage lors de la cuisson des carreaux céramiques.

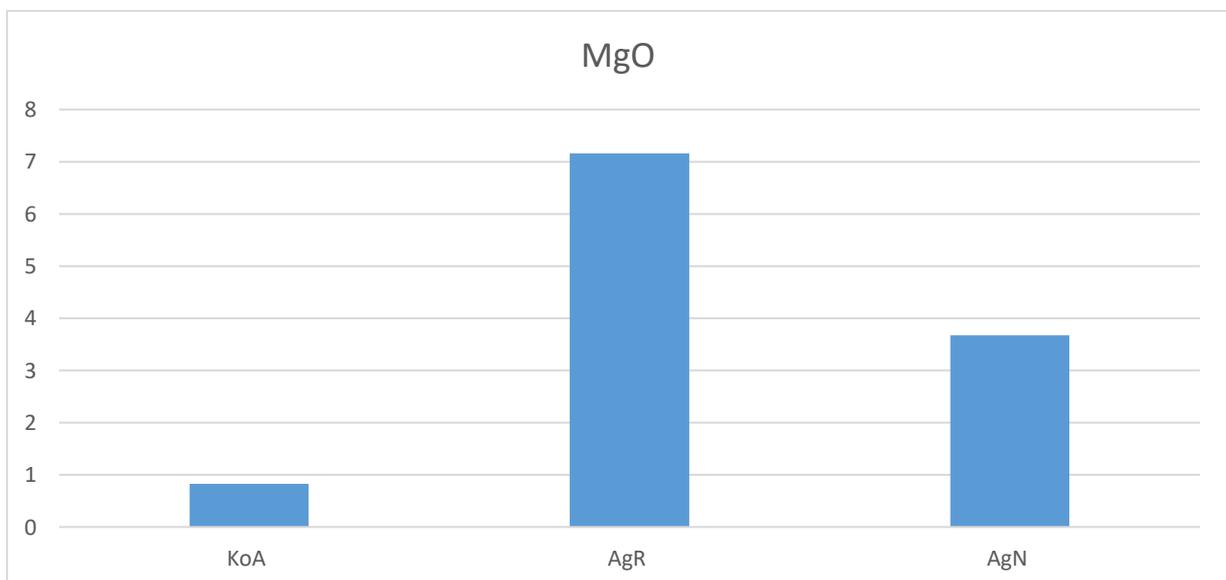


Figure III.6 : Histogramme du taux de MgO dans les matières premières

Une quantité mineure de MgO est présente dans les trois argiles. Le taux le plus élevé est attribué à l'argile rouge, ceci prédit la présence de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Après cuisson, cette phase minéralogique peut se transformer en cordiérite ($\text{Al}_3\text{Mg}_2\text{AlSi}_5\text{O}_{18}$) avec la présence d'alumine et de silice. Les carbonates sont des indésirables dans les matériaux céramiques puisqu'ils participent aux défauts de bullage et peuvent même engendrer des fissures.

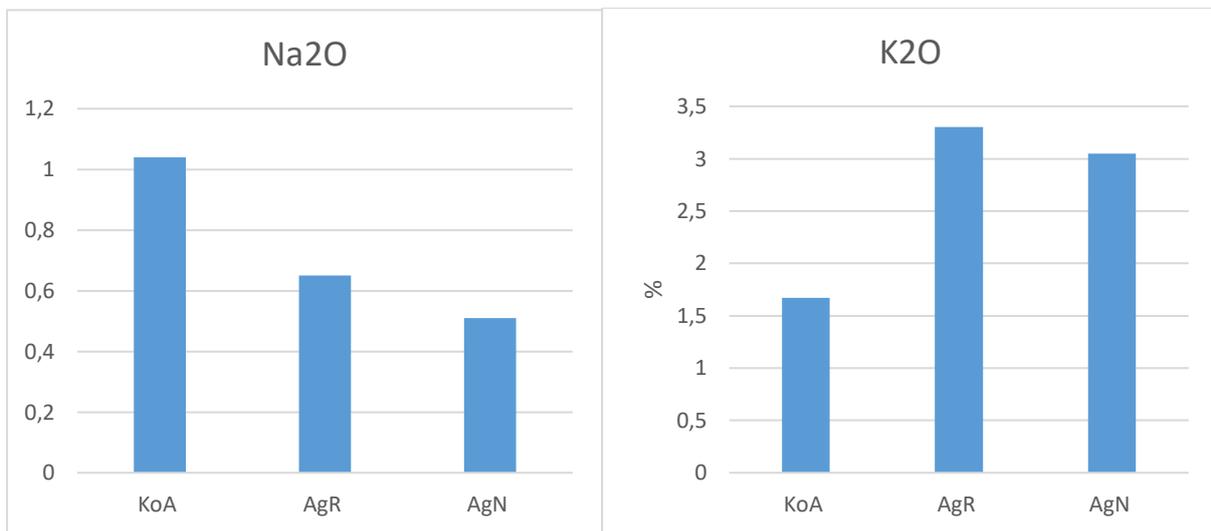


Figure III.7 : Histogramme du taux de Na₂O et K₂O dans les matières premières

L'oxyde K₂O se présente par un taux élevé dans l'argile rouge et le Na₂O dans le kaolin. Ces oxydes sont des signes de présence de feldspaths potassique (orthose) et sodique (albite) respectivement. Ces des cations alcalins monovalents (Na₂O, K₂O, Li₂O...) sont des modificateurs de la phase vitreuse. Les oxydes modificateurs abaissent la température de ramollissement, augmentent le coefficient de dilatation thermique en dessous de la température de transition vitreuse et diminuent la tension superficielle et la viscosité [4].

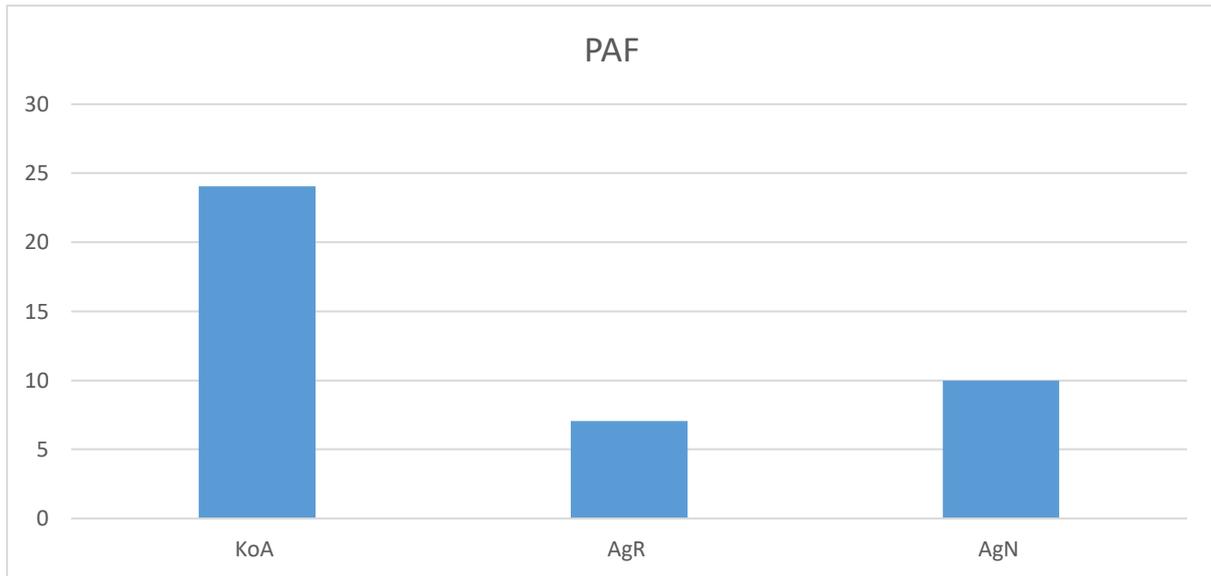


Figure III.8 Histogramme du taux de PAF dans les matières premières

La détermination de cette grandeur (Pertes Au Feu) permet en principe d'estimer le taux de matières organiques, des hydroxydes, de carbonates et de sulfures présents dans les trois échantillons. La valeur la plus élevée des pertes au feu est attribuée au kaolin (riche en hydroxyde (kaolinite)). Pour les autres argiles la valeur de perte au feu ne dépasse pas 10 %. Ce résultat reflète la faible valeur des matières organiques par rapport à la fraction minérale.

En résumé, les différents teneurs en oxydes dans les différentes matières premières sont représentées dans la figure qui suit :

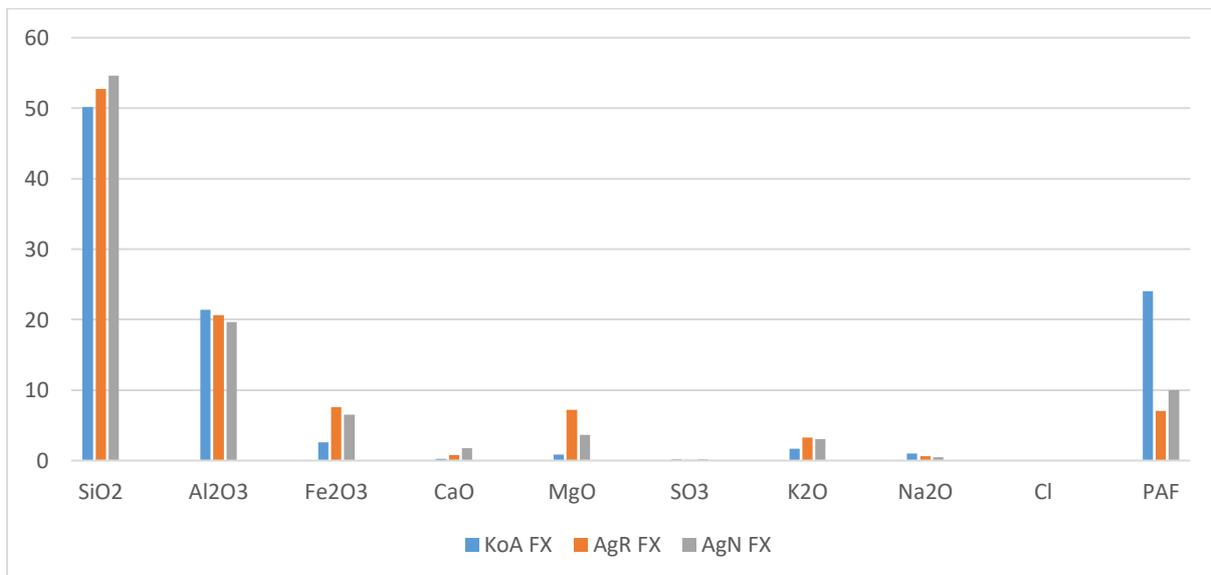


Figure III.9 Histogramme des taux de composants chimiques dans les matières premières.

Le pourcentage de la Silice et de l'Aluminium est très important, ceci indique la présence de Kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), avec un rapport silice/alumine élevé en moyenne de 2,5 pour ces échantillons. La composition globale des autres oxydes (Fe_2O_3 , MgO , K_2O et Na_2O) atteint un pourcentage de 7,57% qui montre que notre argile n'est pas pure, elle contient d'autres minéraux accessoires.

III.3 Analyses minéralogiques des différentes matières premières

III.3.1 Analyse minéralogique de l'argile noire

Les résultats de l'analyse minéralogique de l'argile noire faite par la diffraction des rayons X est dressé dans la figure III.10

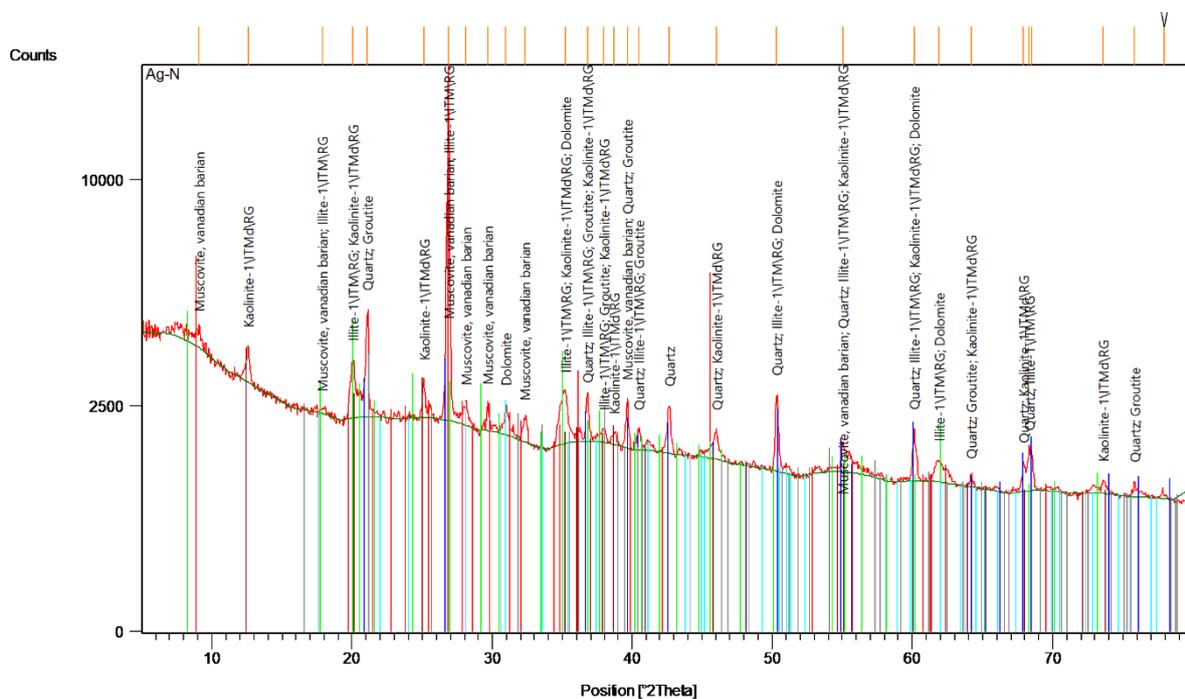


Figure III.10 Le diffractogramme des rayons X de l'argile noir.

Cette figure révèle que notre argile noire est essentiellement constituée par ordre décroissant de phase majoritaire de quartz et de kaolinite. En plus de ces deux phases minérales, elle contient aussi de la dolomite, de la muscovite et de l'illite.

III.3.2 Analyse minéralogique de l'argile rouge

Les résultats de l'analyse minéralogique de l'argile rouge faite par la diffraction des rayons X est dressé dans la figure III.11 (Le diffractogrammes des rayons X de l'argile rouge)

La figure III.12 révèle que notre kaolin est essentiellement constitué par ordre décroissant de phase majoritaire de quartz, de l'albite et de kaolinite. En plus de ces deux phases minérales, il contient aussi de la muscovite.

Conclusion

La caractérisation de ces matières premières montre que les compositions chimiques et minéralogiques des argiles sont assez proches. Elles sont essentiellement constituées de kaolinite, de quartz, d'illite et de la muscovite, en conformité avec les résultats de la diffraction des rayons X et la fluorescence des rayons X. Enfin, leur teneur élevée en quartz permet de les classer dans le groupe des argiles peu plastiques et relativement réfractaires. Il faudra envisager un apport de composés fondants supplémentaires en vue d'une exploitation industrielle. Toutefois, une caractérisation du comportement en température de ces argiles a été effectuée afin de mettre en évidence leurs spécificités [5].

Références Bibliographiques

- [1] BLANCHART Philippe, Les céramiques silicatées. Article Techniques de l'Ingénieur 7200038948 – université de limoges // 164.81.216.75, le 20 février 2015.
- [2] FOURNIER Jérôme, BONNOT-COURTOIS, PARIS Raphaël, VOLDOIRE Olivier, LE VOT Monique, Analyses granulométriques : principes et méthodes. CNRS, Dinard, 2012, p. 99.
- [3] N.Bouzidi, M. A. Bouzidi, K. Bouguermouh, R. O. Nunes, N.Benabdeslema, L. Mahtouta, D. Merabet.. "Mechanical and dielectric properties of high temperature coating insulators based on by-product of Algerian kaolin". Trans. Ind. Ceram. Soc., vol. 73, issue 4, pp. 1-7 (2014).
- [4] N.Bouzidi, A.Bouzidi, P.Gaudon, D.Merabet, P.Blanchart. "Porcelain containing anatase and rutile nanocrystals. Ceramics International. 39 (2013) pp 489-495.
- [5] Marthe Tatiana Diatta. Matières premières argileuses du Sénégal : caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion. Matériaux. Thèse de doctorat. Université de Limoges, 2016.

Chapitre IV : Suivi des paramètres technologiques des carreaux céramiques

Introduction

Cette partie est consacrée à la description du procédé général de synthèse des céramiques, dans une partie nous ferons une brève description des appareillages et des principes de mesure pour contrôle de qualité des carreaux céramique de l'usine SCS de Bejaia.

D'autre part nous allons présenter les résultats obtenus pour différents essais réalisés au sein de l'entreprise sur la poudre, la barbotine et les carreaux (à savoir la densité, la viscosité, le refus et les caractéristiques des carreaux ...).

IV.1 Broyage des matières premières

Extraite de la carrière, les matières premières (sable, argile blanche, talc, feldspath, argile kaolinite) seront entreposées dans une zone de stockage de l'usine de manière à séparer sur différents coins afin de les reconnaître, ensuite par un bulldozer on dépose cette matière première dans une grande balance suivant les normes imposées, des convoyeurs de types tapis roulants vont les transporter jusqu'au broyeur où on ajoute de l'eau et un défloculant pour obtenir une pâte molle (barbotine).



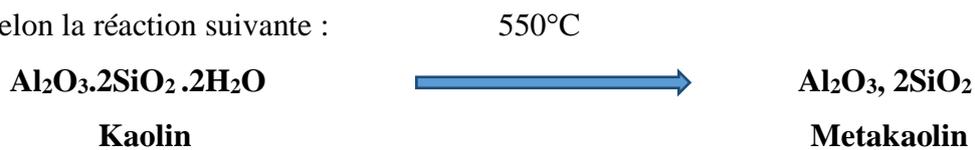
Figure IV.1 Moulins à broyer

Le broyage des matières premières prend en moyenne 24 heures, pour une vitesse de rotation dans les environs de 100 tours/min.

IV.2 Atomisation de la barbotine

A partir d'une cuve principale souterraine sous agitation la barbotine sera pompée vers un atomiseur par des pompes à pression, ce dernier est muni des lances comme des pistolets qui vaporisent cette barbotine dans son enceinte fermée auquel il travers un air chaud créer par des bruleurs qui se trouvent dans les parties latérales de l'atomiseur.

Lorsque la température atteint un niveau suffisamment élevé de 550°C, la barbotine se décompose en particules de différents diamètres (selon l'ouverture des lances qui éjectent la barbotine moyennant une presse hydraulique) par la transformation du kaolin en Metakaolin selon la réaction suivante :



Et avant la transformation du quarts alpha en quartz beta qui a lieu généralement vers 570°C, le feldspath quant à lui ne subit qu'une légère transformation liée à la déshydratation (départ de l'eau structural).

Les points de contact entre ces particules individuelles fusionnent. Ce processus repose sur un mécanisme de diffusion, très accéléré par l'élévation de la température qui la sèche rapidement et elle se transforme en poudre et tombe au fond de l'atomiseur.

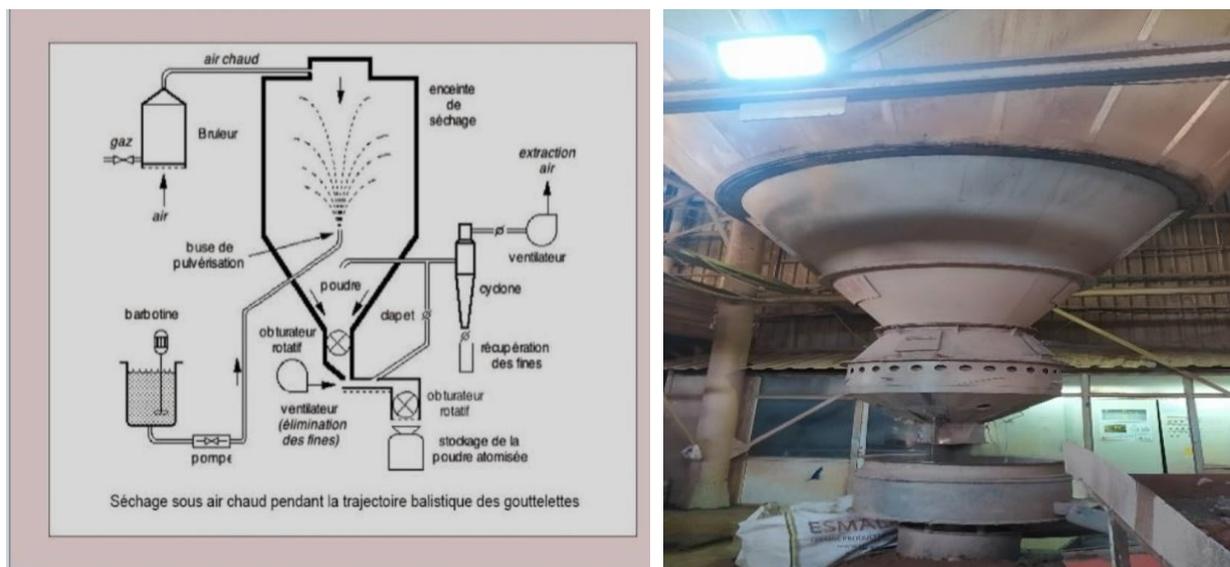


Figure IV.2 Schéma technologique d'un atomiseur

IV.3 Le pressage de la poudre atomisée

La poudre atomisée à 550°C est transférée depuis un canal vers la presse, ensuite à partir d'un chariot à niveler la poudre va être déposée de manière égale dans les moules de format 33×33.

Le pressage se déroule de manière unidirectionnelle, c'est à dire un compactage vertical sous une pression de 220 bar, où la poudre obtenue par broyage et agglomération lors de l'atomisation, réapparaissent littéralement adhérentes les unes aux autres sous forme d'un carreau crus contenant une humidité comme fluidifiant.



Figure IV.3 Photo de la presse à carreau

IV.4 Le séchage des carreaux crus

Après que les carreaux crus soient sortis de la presse, ils passent par un séchoir à colonne pendant 20-30 min pour une vitesse de 0.76m/min afin d'obtenir une humidité résiduelle optimale. Les températures vont être comprises entre 160°C à 220°C. Ce phénomène se traduit par l'évacuation des eaux de surfaces (hygroscopiques), mais surtout pas au-delà de cette norme car notre carreau devient fragile, or qu'il doit subir certaines actions mécaniques qui pourra le briser s'il s'avère trop fragile (complètement sécher). De même le séchage augmente la résistance de flexion du carreau afin d'assurer sa stabilité durant la cuisson au four.

IV.5 La décoration et l'émaillage des carreaux

Sous l'effet de l'émaillage les carreaux deviennent lisses et colorés par une couche fine de verre auquel on ajoute une couleur de base.

On utilise deux sortes d'email pour couvrir les carreaux :

- Email monocouche (dépôt direct sur le carreau crû)
- Email cristallin (qui nécessite un engobe juste avant le dépôt)

Ce dernier sollicite tout un procédé de préparation, d'abord mélanger 50%-70% d'eau à la poudre dans un broyeur, puis tamisé et stocké dans des cuves d'agitation permanente.

L'email est composé de :

- * Oxydes alcalins
- * Oxyde calcium
- * Oxyde aluminium (alumine)
- * Silice

L'engobage consiste à remplir les pores du carreau si nécessaire, il sert à faciliter l'adhérence de l'email, il sert aussi à optimiser la quantité de l'email à mettre sur la face du carreau céramique à l'email qui dure dans le temps [1]. Le dépôt se fait par aspersion sur la surface de la pièce avant l'émaillage. La décoration du carreau céramique s'accomplit par une méthode adaptée ; c'est la sérigraphie qui est la technique des points injection digital d'ancre avec impression.



Figure IV.4 Cloche d'engobe

IV.6 La cuisson des carreaux

L'étape de la cuisson dans un four de longueur allant de 185 à 190 m, les carreaux céramiques sont transportés sur des rouleaux d'entraînement, et vont séjournés sur un cycle entre 55 à 62 min, passant par 3 phases de températures :

- * Le préchauffage entre 200 et 795°C
- * La cuisson l'étape la plus importante entre 1095 et 1120°C
- * Le refroidissement 800 et 120°C

Le four contient des brûleurs au-dessous et au-dessus du carreau, ils sont alimentés par du gaz naturel et de l'air.

VI.7 Le triage et emballages des produits finaux

Le contrôle de qualité de défaut des carreaux peut signaler toute erreur de production en marquant la pièce pour que la machine à triage puisse la sélectionner et l'écartier des autres carreaux.

Une fois triée et emballée, la boîte est belle et bien prête à être livrer sur des moyens de transports quelconque vers les points de ventes.



Figure IV.5 Emballage des carreaux

IV.8 Contrôle de qualité des carreaux céramiques

IV.8.1 La masse des matières premières utilisées

Le système argile + eau est celui qui développe la plasticité de même qu'il conditionne les propriétés rhéologiques des pâtes argileuses et des suspensions [2]. Les conditions

climatiques varient et changent, le taux d'humidité des matières premières peut être important du moment qu'elles sont exposées à l'air libre.

Le calcul de cette humidité est une étape nécessaire à chaque changement de matières premières, cette opération consiste en :

- * On pèse le récipient en acier vide.
- * On tare le récipient à l'aide d'une balance
- * On prélève un échantillon des trois différentes argiles et on les pèse (poids humide), une à une
- * On les met dans une étuve de 120°C pour sécher
- * Après 24h de séchage on repese nos échantillons l'un après l'autre (poids séché)

Par la formule suivante on obtient le taux d'humidités de chaque matière :

$$\text{Taux d'humidité}\% = \frac{\text{masse humide} - \text{masse sèche}}{\text{masse humide} - \text{la tare}} \times 100 \dots (\text{Eq 1})$$

Tableau IV.1 Taux d'humidité des matières premières

Matière Première	Tare (g)	Masse humide (g)	Masse sèche(g)	Taux d'humidité %
Kaolin	560.1	3155.5	2897.5	9,94
Argile 1	531.9	3049.8	2846.0	8,09
Argile 2	539.6	1973.6	1852.4	8,45

Notre objectif est d'estimer les nouvelles masses qui correspondent à ce taux d'humidité calculé car le poids à utiliser a un rapport direct avec le taux d'humidité, puisque l'ancien poids était de 17740 kg pour un taux d'humidité élevé, alors pour se référer à la norme qui est de 16000 Kg on procède au calcul par la formule suivantes :

$$M_{\text{humide à utilisé}} = \frac{\text{la masse de la matière selon la norme}}{100 - \text{le taux d'humidité}} \times 100 \dots (\text{Eq 2})$$

Exemple :

$M_t = 16000 \text{ kg} ; M_{M1} = 8000 \text{ kg} ; M_{M2} = 4000 \text{ kg} ; M_{M3} = 4000 \text{ kg} ;$

Taux d'humidité = 9,94 %

$$M_{\text{humide à utilisé}} = \frac{8000}{100 - 9,94} \times 100 \simeq 8883 \text{ kg}$$

Tableau IV.2 Les nouvelles masses des matières premières

Matière Première	Taux d'humidité %	Ancien masse (kg)	Nouvelle masse (kg)
M ₁	9,94	9000	8883
M ₂	8,09	4340	4352
M ₃	8,45	4400	4369

IV.8.2 La quantité d'eau à rajouter

Afin d'obtenir une barbotine à partir des matières sèches on rajoute des quantités d'eau considérable au broyeur. La quantité à ajouter dépend du taux d'humidité qui est selon la norme de l'usine qui est de 38% :

Le calcul se fait de la manière suivante :

$$\frac{M_{\text{total selon la norme}} \times \text{Taux d'humidité}}{100 - \text{taux d'humidité}} \dots \text{(Eq 3)}$$

Application numérique :

$$Q_{\text{eau}} = \frac{16000 \times 38}{100 - 38} = 9806,45 \text{ l}$$

La formation d'une barbotine idéale nécessite des quantités d'eaux précises, alors que notre poids total humide de 17604 kg contient déjà de l'eau, on doit soustraire cette quantité d'eau du résultat calculé pour avoir un résultat final.

La quantité d'eau se trouvant dans les matières est de 1604.

$$17604 - 16000 = 1604 \text{ l}$$

Le résultat final de la quantité d'eau :

$$9806,45 - 1604 = 8202,45 \text{ l}$$

Donc on doit rajouter 8200 l aux premières matières.

On rajoute de l'huile de silicate de sodium (stpp) comme défloculant au mélange (argile + eau) dans le but d'obtenir une barbotine optimale non-visqueuse et pour cela on rajoute 200 litres.

IV.8.3 Le contrôle de qualité de la poudre atomisée

On prélève une petite quantité de poudre juste à la sortie de l'atomiseur sur le tapis roulant pour effectuer quelque contrôle de qualité particulièrement.

On réalise cette manipulation à partir de la balance pour l'humidité en granulés PCE-MB qui détermine l'humidité et le contenu à sec avec précision des marchandises en vrac avec des granulés divers (granulés de plastique, sels, sables...). Cette balance pour l'humidité en granulés donne le résultat exact de la mesure en 2 à 3 minutes seulement selon le mode de récupération du séchage. Cet appareil a été spécialement conçu pour être utilisé dans le contrôle d'entrée des marchandises du secteur industriel.

IV.8.3.1 La granulométrie

La distribution dimensionnelle des grains est comprise entre 0,600 et 0,063mm.

On rappelle :

⇒ REFUS sur un tamis : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.

⇒ TAMISAT (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

L'essai consiste à fractionner notre poudre sur une série de tamis où les dimensions sont de la norme ASTM International (American Society for Testing and Materials,), l'opération débute par la pesé des tamis séparer et vide de manière consécutive après les avoir bien nettoyés au pinceau, ensuite, à l'aide d'une tamiseuse vibrante, l'agitation des tamis empilés conduira à filtrer les grains, et les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



Figure IV.6 Tamiseuse Vibrante

IV.8.4 Contrôle de qualité de la barbotine

IV.8.4.1 Densité de la barbotine

La densité est un paramètre de contrôle et surveillance mesurée à l'aide d'un densimètre, la fréquence du contrôle est courante et qui peut être modifiée selon les conditions.



Figure IV.7 Densimètre

Le densimètre est rempli de barbotine à ras bord, puis le bouchon est enfoncé dans le densimètre après, le densimètre est positionné sur la balance est on lit la masse en gramme. Par la suite on déduit la densité.

- La densité doit être dans l'intervalle de 1600 à 1700, elle sera alors corrigée avec l'ajout ou diminution de la quantité d'eau.

IV.8.4.2 Viscosité de la barbotine

La viscosité définit l'état d'un fluide dont les molécules sont freinées dans leur déplacement par des interactions ou des associations moléculaires plus ou moins intense. La viscosité de la barbotine est mesurée à l'aide d'un viscosimètre dont le diamètre intérieur du tube de sortie est 4mm. Pour mesurer la viscosité, On suit les étapes suivantes :

- Prélever un échantillon représentatif de barbotine.
- Boucher l'extrémité du viscosimètre avec le doigt et le remplir de barbotine à ras bord.
- Déboucher le viscosimètre et déclencher simultanément le chronomètre.
- Surveiller l'écoulement de la barbotine.
- Lorsque le filet de barbotine se rompt, arrêter le chronomètre.
- Les valeurs de la viscosité varient entre 30 s et 60 s, elle sera alors corrigée par l'ajout de défloculant (silicate de sodium ou tripoly- phosphate de sodium).



Figure IV.8 Viscosimètre

IV.8.4.3 Refus sur le tamisât < 63µm

Le refus caractérise les grains dont la taille est supérieure à 45 µm. Pour mesurer le refus on prend la même masse utilisée pour mesurer la densité, on verse cette dernière dans un tamis puis on fait passer de l'eau à travers la maille du tamis et à la fois on le fait vibrer pour récupérer le refus dans une burette graduée.



Figure IV.9 Étapes de mesure de refus : tamis (a) ; lavage de barbotine avec l'eau (b) ; lecture de valeur du refus sur une burette graduée (c)

- La valeur du refus doit être comprise entre 7% et 10% selon la norme de l'usine. Si la valeur de refus est importante, on peut augmenter la quantité du corps broyant pour la diminuer ou augmenter le temps du broyage.

IV.8.4.4 Mesure du taux d'humidité

Le contrôle de l'humidité consiste à déterminer la teneur en eau de la barbotine sèche, après avoir taré le récipient, on rajoute 100g de barbotine et on prend note de son poids humide puis on la met dans un séchoir (étuve) de 120°C ; après 1h-2h on vérifie si la barbotine est séchée totalement, on la repese et on note son poids sec.

On obtient le taux d'humidité d'une barbotine sèche selon la formule suivante :

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{M_{\text{humide}} - M_{\text{sèche}}}{M_{\text{humide}} - \text{Tare}} \times 100 \dots (\text{Eq 4})$$

Exemple : Tare : 50,3g ; M_{humide} : 170,2g ; M_{sec} : 123,5g ; densité : 1,642 ;

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{170,2 - 123,5}{170,2 - 50,3} \times 100 = 38,95 \%$$



Figure IV.10 Contrôle de taux d'humidité de la barbotine

- Le taux d'humidité d'une barbotine change avec le changement de densité tel qu'on le représente dans le tableau suivant ; au fur et à mesure la densité augmente le taux d'humidité décroît la siccité augmente.

Tableau IV.3 Taux d'humidité de la barbotine

Densité	Tare (g)	M _{Humide} (g)	M _{Sèche} (g)	Taux d'humidité
1,639	49,1	150,7	111,4	39,68
1,642	50,3	170,2	123,5	38,9
1,673	50,3	151,2	114,9	35,67
1,678	49,2	150,6	115,7	34,41
1,690	49,4	148,7	115,4	33,53

IV.9 Contrôle des carreaux

Les carreaux sont contrôlés dans les divers états, ils sont contrôlés sur le crûs, sur l'émaillé puis après cuisson.

IV.9.1 Contrôle du carreau crû à la sortie de la presse

a) Densité apparente

La mesure de la densité apparente est importante pour savoir si toutes les parties du carreau ont la même charge c'est-à-dire toutes les régions du carreau ont un compactage homogène.

Une grande variation au niveau de la densité apparente peut engendrer une différence de côté du carreau après cuisson.

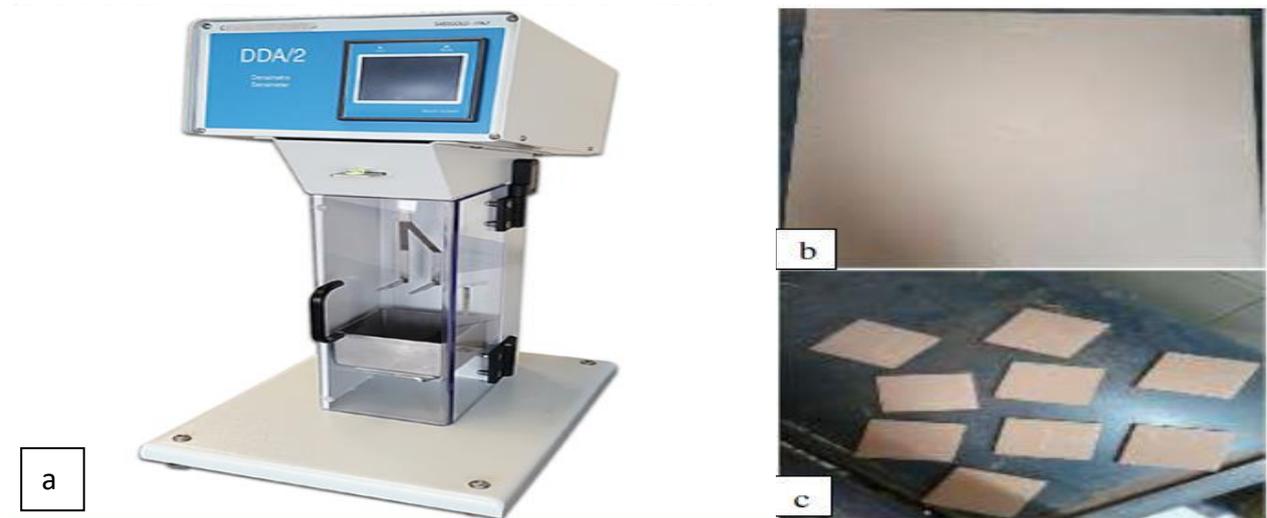


Figure IV.11 Mesure de la densité apparente : Appareil DDA/2 (a) ; Carreaux après pressage (b) ; Carreau découpé en petits morceaux et numéroté de 1 à 9 (c)

La mesure de la densité apparente s'effectue à l'aide de l'appareil CPR. On prend un carreau à la sortie de la presse, ce dernier est numéroté de 1 à 9 et on le divise en neuf morceaux, en suite on place les petits morceaux dans l'appareil CPR qui donne la densité apparente de chaque morceau.

Tableau IV.4 Densité apparente du carreau crû

Numéro du morceau	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densité apparente (g/cm ³)	2,058	2,077	2,059	2,076	2,069	2,087	2,070	2,081	2,067
Ecart des densités du carreau Crû	2,087(valeur MAX) -2,058(valeur MIN) =0,029								

- Les valeurs de l'écart doivent être inférieures à 0,06 g/cm³, les valeurs des densités apparentes doivent être entre 1,9-2,1 g/cm³, sinon il faut agir sur les paramètres de la presse.

IV.9.2 Remplissage des carreaux

Le contrôle du remplissage consiste à mesurer la masse du carreau à la sortie de la presse à l'aide d'une balance électronique. Pour les carreaux de format 33*33, la masse du carreau est environ 2050g, un mauvais remplissage peut conduire à une faible épaisseur.

IV.10 Contrôle du carreau crû à la sortie du séchoir

IV.10.1 Humidité Résiduelle

À la sortie du séchoir le carreau doit avoir une humidité résiduelle inférieure à 1%, pour mesurer ce paramètre on suit les étapes suivantes :

- On prend des carreaux de sortie séchoir on les pèse
- On les fait passer par un flexiomètre pour mesurer leur résistance à la flexion
- Ensuite on prend un morceau de chaque carreau pesé et numéroté pour les mettre dans un séchoir (étuve) de 120°C pendant 2h.
- Après cette période on les retire et on les repese pour calculer leur humidité résiduelle selon la formule suivante :

$$H_{\text{résiduelle}} \% = \frac{M_H - M_{\text{Se}}}{M_H} \times 100 \dots (\text{Eq 5})$$

IV.11 Contrôle du carreau cuit à la Sortie du four

Différents contrôles sont réalisés sur les produits finaux dite carreaux cuits à la sortie du four que ça soit un contrôle visuel ou de maîtrise.

a) L'abrasion :

La présente norme européenne définit les méthodes d'essai à utiliser pour déterminer la résistance à l'usure en surface des carreaux et dalles céramiques émaillés utilisés en revêtement [1], on entend par abrasion la réduction des surfaces des corps due au frottement avec d'autres corps solides mobiles [2].

On utilisera la charge abrasive par voie humide méthode PEI (Porcelain Enamel Institute), la charge totale pour chaque éprouvette comprend [3] :

- 70 g de billes d'acier d'un diamètre 5mm
- 52,5 g de billes d'acier d'un diamètre 3mm
- 43,75 g de billes d'acier d'un diamètre 2mm
- 8,75 g de billes d'acier d'un diamètre 1mm
- 3,0 g de poudre d'oxyde d'aluminium blanc de granulométrie 80



Figure IV.12 Charge totale d'éprouvette

Le classement PEI du carrelage selon sa résistance à l'abrasion et son lieu d'utilisation peut être départagé en cinq, voire six catégories. Voici la classification PEI selon la norme NF EN 14411 [4] :

- **PEI 0** : Carreaux fortement déconseillés pour une application au sol à cause de leur faible résistance. Cette catégorie définit les carrelages muraux.
- **PEI 1** : Carrelage au sol adapté pour les surfaces supportant une faible abrasion. (Pièces où l'on marche avec des semelles souples, voire pieds nus, et non exposées à des particules abrasives comme les salles de bain et chambres à coucher des habitations sans accès direct depuis l'extérieur).
- **PEI 2** : Carreaux de sol pour les surfaces sur lesquelles on marche avec des chaussures à semelles souples ou normales. Ces revêtements sont adaptés pour les pièces exposées à de petits dépôts occasionnels de particules abrasives (« Pièces à vivre » des habitations, à l'exception de la cuisine, l'entrée et toutes autres pièces exposées à un passage intense).
- **PEI 3** : Carreaux de sol pouvant supporter un passage fréquent avec des chaussures normales dans des pièces souvent exposées à de petits dépôts de particules abrasives (par exemple, cuisines, couloirs, balcons, loggias et terrasses des habitations).
- **PEI 4** : Carreaux de sol pouvant résister à un passage fréquent tout en étant plus résistant que les carreaux de classe PEI 3 (par exemple, entrées, cuisines d'entreprise, hôtels, salles d'exposition et de vente).

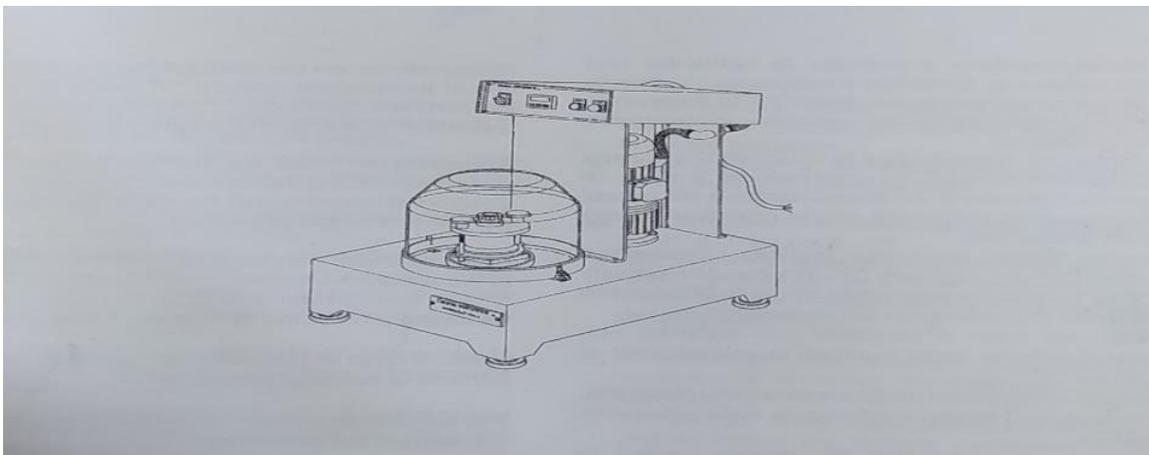
L'étalonnage de l'appareil n'est nécessaire qu'occasionnellement ou lorsqu'il y a un doute sur la validité des résultats.

La surface émaillée de chaque éprouvette est maintenue à l'aide d'une cerce métallique fixé sur l'appareil **PEI**, introduire la charge abrasive dans la cerce par l'orifice situé sur la face supérieure. Cet orifice peut ensuite être obturé afin d'empêcher les pertes de charge abrasive, pour le nombre de tours à fixer à l'avance est de 150, 450, 900 tours pour chaque étape de l'essai [5].

Après l'abrasion, rincer les éprouvettes à eau courante et les sécher dans une étuve à 120 °C.

La comparaison visuelle se fait en plaçant l'éprouvette soumise à l'abrasion, au milieu de carreaux du même type n'ayant pas subi l'essai sous une intense lumière.

A noter, afin d'éviter la rouille des billes après utilisation on les nettoie avec de l'alcool.



FigureIV.13 Dispositif d'Abrasion

b) La résistance au tressailage

Ce test de contrôle est effectué chaque fois qu'il y a un changement des matières dans l'engobe ou modification du cycle de cuisson [6], le tressailage se traduit sous forme de fissures ayant l'aspect d'un cheveu et limité à la surface émaillée d'un carreau

La résistance à la formation de tressaillures est déterminée en soumettant des carreaux entiers à l'action de la vapeur, sous une pression élevée, dans un autoclave et en les examinant

ensuite du point de vue du tressailage après l'application d'un colorant sur les surfaces émaillées.

Examiner d'abord tous les défauts visibles à l'œil nu, ensuite placer les éprouvettes dans l'autoclave en ménageant un espace entre chacune d'elles. Augmenter la pression de l'autoclave progressivement pendant 1 heure jusqu'à ce qu'elles atteignent les 520 kPa et maintenir cette pression pendant 1 autre heure, puis arrêter la source de vapeur, faire revenir à la pression atmosphérique aussi rapidement que possible et refroidir les éprouvettes dans l'autoclave pendant 1/2 heure, puis placer les éprouvettes une à une sur une.

Appliquer à la brosse une teinture composée par exemple d'une solution aqueuse à 1 % de bleu de méthylène Contenant une petite quantité d'agent mouillant, sur la surface émaillée des éprouvettes. Après 1 minute essuyer cette teinture à l'aide d'un chiffon humide.

Examiner les éprouvettes du point de vue tressailage en prenant soin de distinguer les tressailures des rayures et Sens tenir compte des fissures.



Figure IV.14 Photo d'un autoclave

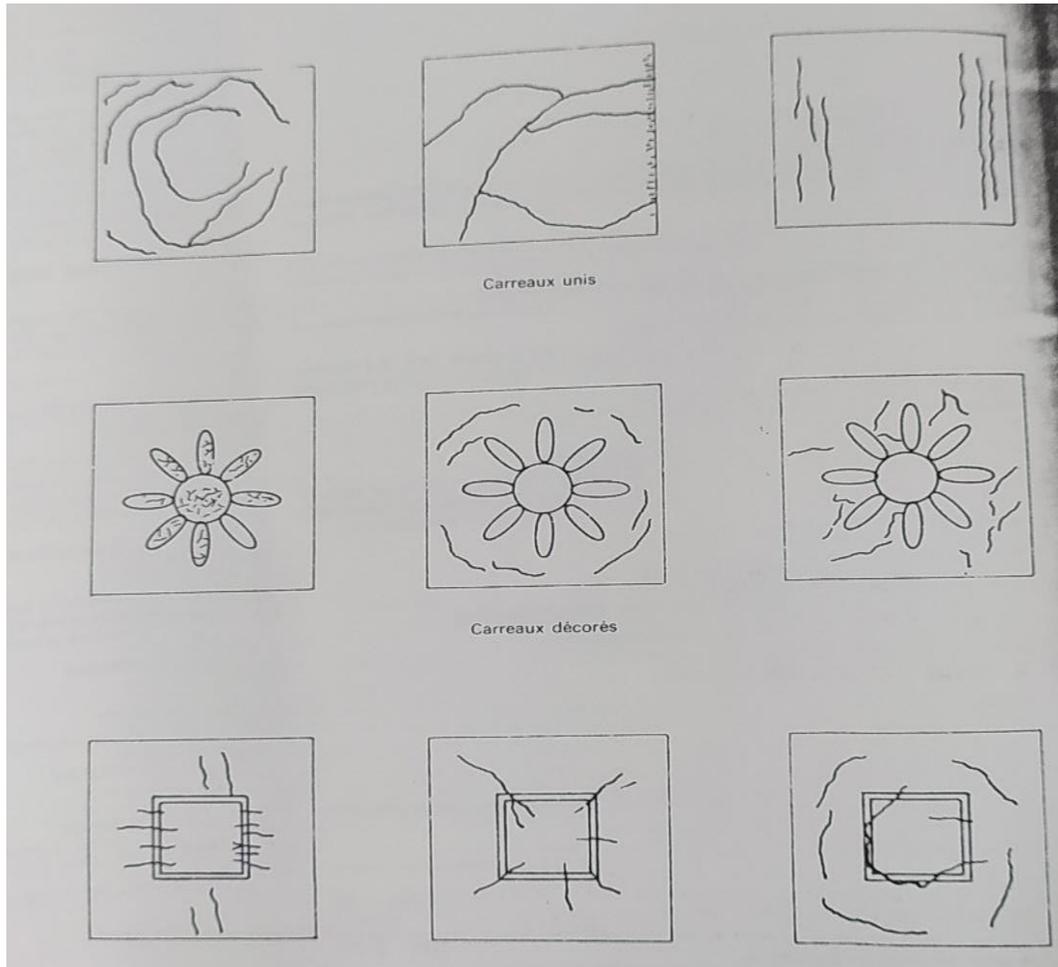


Figure IV.15 Exemple de Tressaillures

c) Contrôle de la Porosité

La porosité est l'ensemble des interstices (le vide) d'une roche ou d'un autre matériau pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz). Elle caractérise la compacité du produit céramique et influe sur ses propriétés physiques (mécaniques) et chimiques, aussi bien qu'elle aide les technologies en question du choix des paramètres technologiques de fabrication (granulométrie de la matière première et température de cuisson). La porosité est aussi une valeur numérique qui caractérise ses interstices ; c'est le rapport du volume des vides du matériau divisé par le volume total. [7]

Le calcul du pourcentage d'eau dans la masse, a été faite de la manière suivante :

- On divise un carreau en deux parties et on prend la masse de chaque partie (masse sèche).

• On place les carreaux en position verticale, sans contact entre eux, dans l'appareil chauffant rempli d'eau, de façon que le niveau d'eau soit au-dessus et en dessous des carreaux soit de 5cm.

• Porter l'eau à l'ébullition et la maintenir en ébullition pendant 2h.

• Retirer ensuite la source de chaleur et laisser refroidir les carreaux jusqu'à température ambiante tout en les maintenant complètement immergés.

• Peser chaque carreau et noter la masse humide.

La porosité ou l'absorption d'eau est calculée par la formule suivante :

$$\text{porosité \%} = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \dots (\text{Eq 6})$$

m_h : masse humide (g)

m_s : masse sèche (g)

d) Contrôle de la planéité des carreaux cuits

Les défauts de bombage (convexité, concavité, effet trapèze...) est un contrôle visuel à l'œil nu, facile à réaliser sur tous les côtés du carreau, il suffit juste de prendre en considération le côté de sa sortie du four car il est important de savoir d'où provient ces défauts et on note :

- Carreau convexe si la lunette est du côté du tesson
- Carreau concave si la lunette est du côté de la belle face (face émailler)
- Si le défaut n'est pas au du côté médian carreau on l'appelle trapèze

On utilise aussi un pied à coulisse pour mesurer les côtés du carreau :

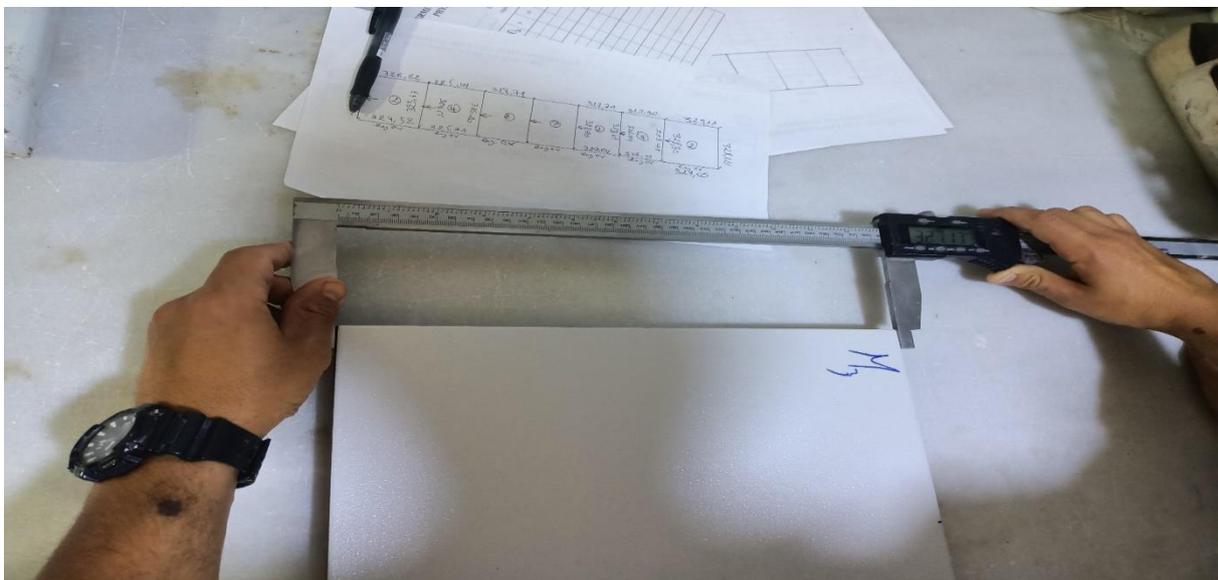


Figure IV.16 Mesure de la dimension des carreaux

e) Humidité résiduelle

À la sortie du four on pèse les poids humides et sec des pièces coupées du carreau cuit et la mettre dans un système fermé remplis d'eau et la laisser chauffer pendant 2h retiré les pièces et refaire la pesé pour obtenir le poids humide et le résultat de l'humidité résiduelle est calculé selon la formule suivantes :

$$W_{\text{résiduelle}} \% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \times 100 \dots (\text{Eq 7})$$

Exemple de résultats de contrôle de qualité des carreaux rassemblé dans une fiche :

Carreau N°	G ₁	G ₂	3	M ₁	M ₂	6	D ₁	D ₂	9	10	MOY	OBSERVATIONS
Caractéristiques	(2)	(1)		(2)	(1)		(3)	(4)				
Dimensions (mm)	L											W: 5,9
	L											
	Ep.	9,1	9,3		9,4	9,5		9,4	9,4		9,35	P: 160 bar
Planéité												T(°C):
Rectitude des côtés												T _H : 1063 - 1080
Poids (gr)	2293,2	2290,1		2290	2286,9		2296	2398,1			2297,2	T _B : 1093 - 1147
Humidité (%)	MH											
	MS											
	W											Cycle: 56 min
Coefficient d'absorption d'eau (%)	MS	354,7	259,2		309,9	308,2		277	212			
	MH	386,3	277,5		333,9	327,1		291,6	226,1			
	AW	8,62	7,06		7,74	6,13		5,27	6,65		6,91	

Figure IV.17 Fiche technique rassemblant les différents résultats d'un contrôle de qualité du carreau céramique

f) Les pertes au feu

Elles consistent à mesurer les pertes au feu d'un carreau cuit remis dans le four pour une deuxième fois, suivant cette formule :

$$\text{Perte au feu} = \frac{M_i - M_f}{M_i} \dots (\text{Eq 8})$$

Application numérique : M_i = 2484,3gr ; M_f = 2256,5gr

$$\text{Perte au feu} = \frac{2484,3 - 2256,5}{2484,3} = 0,091$$

g) Résistance de Flexion

Un contrôle qui comprend les carreaux à la sortie de presse, du séchoir et du four (carreau cru ou cuit), le principe de ce mode est de :

- Prendre trois carreaux à la sortie de chaque appareil
- Indiquer leur positionnement en les marquant
- Mesurer leurs épaisseurs avec une jauge d'épaisseur
- Placer le carreau de manière où l'épaisseur la plus basse en dessous du support dynamique
- Programmer la machine selon le carreau utilisé
- Exécuter le test

Sous une pression exercée par le support métallique, l'appareil mesure automatiquement la charge et la résistance de flexion.

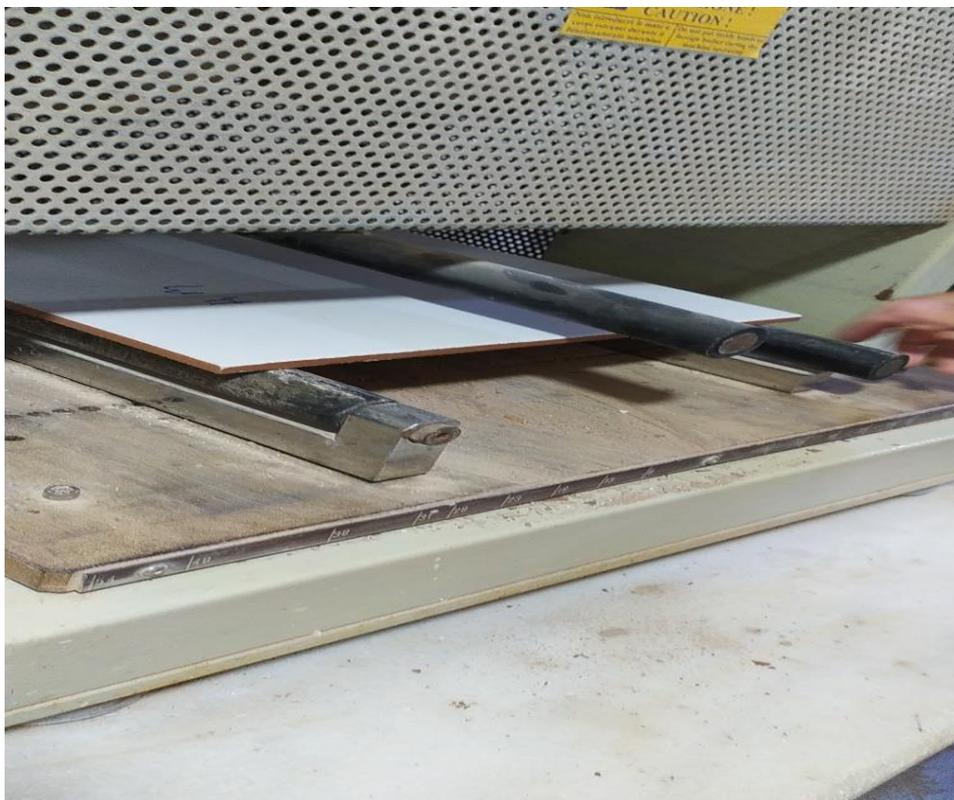


Figure IV.18 Dispositif de Flexion

Les résultats des résistances à la flexion des différents carreaux sont présentés dans le tableau qui suit :

Tableau IV.5 Résultats des résistances à la flexion des différents carreaux

Carreau N°	G ₁	G ₂	M ₁	M ₂	D ₁	D ₂
Caractéristiques	Moule(2)	Moule(1)	Moule(2)	Moule(1)	Moule(3)	Moule(4)
Épaisseur (mm)	9,1	9,3	9,4	9,5	9,4	9,4
Poids (gr)	2293,2	2290,1	2290	2285,9	2296	2328,1
Charge (Kg/cm ²)	217,4	212	203,4	179,1	218,4	237,1
Résistance de Flexion (Kg/cm ²)	319,3	310,9	298,3	285,2	320,4	347,7

- G₁ et G₂ représente la position gauche des séries des carreaux à la sortie du four.
- M₁ et M₂ représente la position milieu des séries des carreaux à la sortie du four.
- D₁ et D₂ représente la position droite des séries des carreaux à la sortie du four.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter le suivi des paramètres technologiques comme supports aux travaux réalisés pendant ce dernier. Durant le contrôle de qualité, les paramètres tels que la densité, la viscosité, le refus sur tamis, la résistance à l'abrasion et la flexion etc..., sont intimement liés à la préparation des matières premières (broyage, temps de broyage, séchage etc...).

Références bibliographiques

- [1] Comité Européen De Normalisation, Secretariat centrale, rue bréderode, 2, B1000 bruxelles.
- [2] G.Aliprandi, "Matériaux réfractaires et céramiques techniques", édition Septima, 14 rue Falguière - 75015 Paris.
- [3] Comité technique, ISO/TC 189 Carreaux en céramique, ISO 13006:1998.
- [4] Normes nationales et documents normatifs nationaux, novembre 2016, NF EN 1441191.100.23, Carreaux et dalles en céramique, 97.150-Revêtements de sol,P61-530
- [5] Comité Européen De Normalisation, Secrétariat centrale, rue bréderode, 2, B1000 bruxelles.
- [6] M.Manal, "Contribution à l'amélioration du taux des carreaux céramiques de premier choix", mémoire fin d'étude, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah Faculté des Sciences et Technique, 2011/2012
- [7] B.Hicham, « procédé de fabrication des carreaux céramiques et étude des facteurs influençant la résistance à la flexion des carreaux crûs ». Université Cadi Ayyad. Projet de Fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état option : Génie des Matériaux et Procédés, 2020/2021.

Chapitre V : Défauts de Fabrication des carreaux céramiques

Introduction

Dans le secteur de l'industrie céramique il existe de nombreux défauts qui influent négativement sur l'économie de l'entreprise. On distingue Parmi ces défauts les fentes, les fissures, les écaillages, le tressillage, le cœur noir, la planéité, etc....Il existe plusieurs types de défauts relatifs à chaque unité de fabrication et dans chaque procédé. En effet, commençant par la qualité des premières matières à la sortie du carreau cuit, le principal travail d'un contrôle de qualité est d'effectuer des contrôles dans les différentes zones pour détecter un nombre de défauts qui sera noté dans une fiche afin de détecter à quel niveau du procédé de fabrication et surtout quelle est la cause ? A noter aussi la vérification des paramètres dans chaque atelier est obligatoire tels que la température du four, du séchoir, les pressions de la presse, les cloche d'engobe, etc...

Dans ce chapitre on dressera tous les défauts des carreaux sols ainsi que les paramètres qui induisent ces défauts.

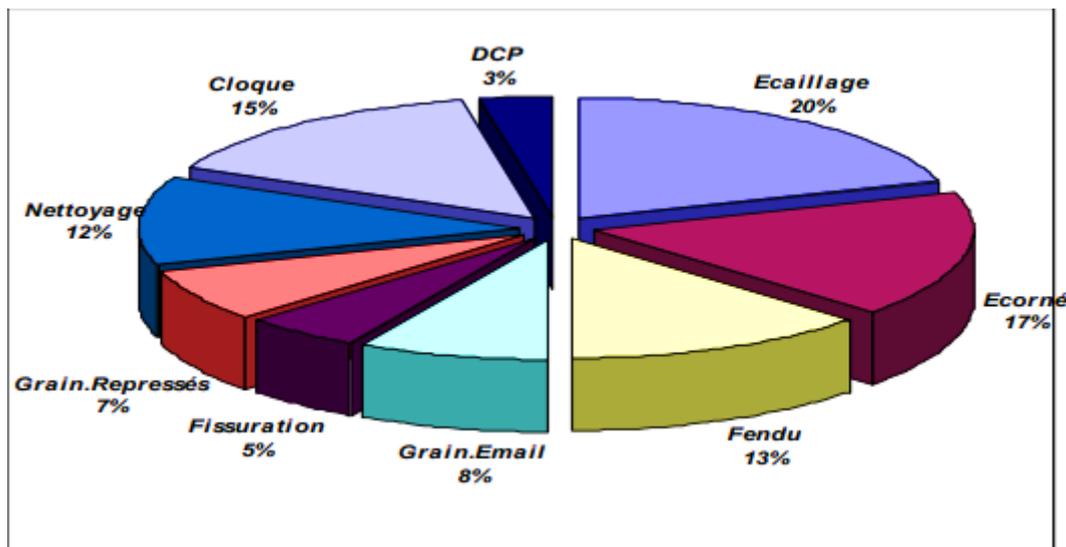


Figure V.I Diagramme des défauts des carreaux céramiques

V.1 Les défauts de fabrication des carreaux céramiques

V.1.1 Défauts liés aux matières premières

Généralement à ce stade on ne trouve pas beaucoup de défauts, dont on peut citer :

- Insuffisante homogénéisation d'argiles qui extraites de différentes parties d'une carrière.
- Présence de corps étranger (corps feuilleté, métalliques etc...).
- Le choix et la qualité de la matière.
- Impureté des argiles, présence de matières organiques.



Figure V.2 Photo de présence d'un corps étranger dans un carreau

Afin de pallier à ces défauts, il faut cribler les matières premières et augmenter la teneur de la matière dégraissante dans la formulation des argiles (sable, feldspath) pour limiter le retrait et former un squelette qui empêche la masse d'argile de se fissurer.

V.1.2 Défauts liés au broyage

La partie broyage est indispensable dans la fabrication des carreaux céramiques, cette opération repose sur l'utilisation de corps broyant mélanger aux premières matières avec l'eau et les defloculants (Tripolyphosphates de sodium STPP).

L'une des causes des détériorations des corps broyant est une usure prématurée qui se manifeste juste au début de la mise en service des boulets se traduisant par une cassure complète des boulets, générant des débris dans l'enceinte du broyeur et gênent le fonctionnement du broyeur ce qui cause une baisse dans le rendement.

Les défauts internes tels que les soufflures sont à l'origine de cette dégradation, en conséquence les boulets perdent leur morphologie, leur fonctionnement lorsqu'ils cassent, et dégagent un agrégat de matières laissant un creux à l'intérieur du boulet, affectant ainsi le rendement de l'opération de broyage [1].

Dans le broyeur à boulets, les trois modes que sont la percussion, l'impact et le frottement sont plus ou moins mis en jeu selon la vitesse de rotation utilisée. Il existe plusieurs états de broyage selon la vitesse de rotation. Parmi eux, si la vitesse est faible, un état de glissement donne lieu à un broyage par frottement. Lorsque la vitesse est trop importante, toute la matière est plaquée contre les parois du broyeur, et la fragmentation ne peut pas se produire.

Dans un broyeur à boulets ayant une vitesse intermédiaire entre les deux précédentes, le régime de cascade est atteint. Les nodules d'argiles sont réduits grâce aux modes de broyage par percussion, par impact et par frottement.

Il existe une vitesse dite critique, à partir de laquelle l'état de centrifugation se produit. L'équation ci-dessous permet d'estimer cette vitesse critique.

$$\Omega_c = \frac{32}{\sqrt{D_i}} \dots \text{(Eq 1)}$$

Avec :

Ω_c , vitesse de rotation du broyeur (tr/min)

D_i , diamètre intérieur du broyeur (m)

Une amélioration au niveau mécanique des installations de broyage peut mener à une bonne optimisation du rendement de cette opération. Plusieurs solutions sont possibles. La présence d'un séparateur dynamique à air (cyclone) des particules les plus fines conduit à une économie de 10 à 15 % d'énergie électrique. Dans ce cas l'installation de broyage est dite à circuit fermé, par opposition au circuit ouvert où aucun dispositif d'évacuation des plus fines particules n'est présent [2].

De cette manière, l'agglomération des particules et leur adhérence sur les corps broyant et sur les parois du broyeur au cours du broyage est évitée [Beke, 1973]. Ceci est permis grâce au recyclage constant des matériaux broyés dans un circuit fermé, qui améliore ainsi le processus de fragmentation [Dombrowe et Scheibe, 1983].

Le taux de remplissage et l'échelonnement de la taille des boulets de broyage est aussi un moyen d'améliorer l'efficacité de l'installation. Dans la phase de broyage fin, les tailles de boulets plus petites utilisées permettent d'améliorer cette phase finale du broyage [Beke, 1973 et 1974]. Enfin, le système de broyage peut subir des modifications radicales afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'installation.



Figure V.3 Boulets de broyage

En outre, une mauvaise formation de barbotine peut être due à un mauvais calcul des quantités du mélange utilisé ou de dégraissants, tout comme une utilisation d'un mauvais défloculant peut engendrer la mauvaise formation de la pâte.

V.1.3 Défauts liés à l'atomisation

La partie la plus importante dans ce procédé est la transformation de la pâte en poudre, la présence des défauts à ce niveau présente une diminution dans le rendement à l'étape suivante, tels que :

- Exploitation d'une barbotine non reposée (variation de la densité), influe sur l'humidité de la masse atomisée

- Une barbotine de faible densité, faible viscosité ou bien à faible refus entraîne une mauvaise production de poudre.
- Un tamisage qui provoque un mélange de l'air et de la barbotine est résultant des piqûres ou des bulles.
- Mauvais réglage des paramètres d'atomisation ; provoque la variation de l'humidité.
- Endommagement ou un mauvais choix des Diamètres des pastilles impact sur la granulométrie de la poudre.
- Salissure des parois de l'atomiseur provoque une agglomération de poudre.
- Faible lance de barbotine qui n'atteigne pas l'attitude des brûleurs engendre un mauvais séchage de la barbotine.
- Un changement de pression des pompes par rapport à la norme influe de manière directe sur les lances de l'atomiseur.
- Endommagement de la matière isolante de l'atomiseur (laine de verre) peut faire entrer de l'air.
- Mauvais tamisage de la poudre à l'ouverture d'atomiseur provoque des problèmes au niveau de la presse.



Figure V.4 Poudre céramique en sortie de l'atomiseur

V.1.3 Défauts liés à la presse des carreaux céramiques

La négligence d'une maintenance systématique de la presse a tendance de faire apparaître des divers défauts qui changent les poinçons de la presse.

- a) **Utilisation anormale des bords** : C'est le versement de la poudre qui est trop important donc pour cela il faut diminuer la quantité de poudre à presser.

- b) Accrochage de la pièce au démoulage :** C'est le soufflage insuffisant, manque de porosité et la profondeur irrégulière de la gaine qui cause cet accrochage et pour cela il faut voir la mise en place de la gaine et augmenter le temps de soufflage.
- c) Défauts de surface de la pièce fabriquée :** Elles sont les rayures sur la pièce, microcanaux et la pièce trop épaisse et sont dues :
- Présence de grains durs.
 - Présence d'agent de démoulage, absorption.
 - Porosité du moule insuffisant.
 - Moule usé, réglage de la presse.

V.1.4 Défauts liés au séchoir

Si le séchage est homogène, il se déroule convenablement, si par contre certaines pièces sèchent plus vite que d'autres il en résulte des déformations, des fentes liées aux tensions internes qui créent des vides dans le tesson de manière hétérogène.

- a) Croûtage :** Les pièces épaisses se rétractent en surface mais pas en profondeur et risquent de se fendre, le séchage doit être le plus homogène possible surtout dans sa première phase. La réhumidification d'une pièce trop sèche est délicate.
- b) Les déformations :** Sont dues aux actions mécaniques extérieures, poids, vibrations, déplacements, efforts au démoulage, il faudra alors respecter les paramètres suivants :
- Temps de désaération faible (corps feuilleté),
 - Séchage rapide et température de séchage non homogène sur le carreau,
 - Rétrécissement excessif au séchage provoque généralement plusieurs petites fissures sur les bords,
 - Exploitation d'une barbotine non reposée, influe sur l'humidité de la masse atomisée.

V.1.5 Les défauts liés à l'émaillage

Il existe une multitude d'ouvrages permettant de pointer les erreurs d'émaillage. Toutefois, rien n'est plus important que la pratique. Il existe tellement d'émaux différents, qui réagissent en fonction de la nature des matières premières, du four, de la manière de travailler. Il existe plusieurs types de défauts :

- a) **Bulles, Cloques** : Des cloques et boursouflures se forment à la surface de l'émail, elles sont causées par la présence de gaz qui s'échappent du biscuit et l'émail lors de la cuisson.



Figure V.5 Photos d'une bulle sur l'émail du carreau

- b) **Brillance excessive** : La brillance est une qualité de l'émail mais peut être l'inverse du résultat attendu, elle est dû à la surcuisson, la montée de température et refroidissement très rapide et à l'agent de fusion en trop grande quantité.
- c) **Fentes, craquelures** : La pièce est cassée à la sortie du four ou présente des fentes et craquelures sont produites par la différence de tension entre le tesson et l'émail, souvent l'émail rétrécit plus que le tesson, l'émail trop épais et l'humidité dans la pièce après cuisson du biscuit [3].
- d) **Manque de brillant** : La pièce est terne, souvent à un seul endroit à cause de proximité de la pièce dans le four avec une surface poreuse, la sous cuisson et la glaçure trop fine.
- e) **Retrait** : L'émail laisse des parties d'argile apparentes, le retrait peut être dû à une multitude de causes, qu'il faut écarter et corriger au fur et à mesure jusqu'à obtenir le résultat voulu et parmi ses causes :
- Email posé trop épais,
 - Teneur en argile de l'engobe trop haute,
 - Séchage de la glaçure trop rapide,
 - Manque d'adhésion du tesson,
 - Tension trop forte de la glaçure,

- Engobe stocké en floculation (avec des alcalis solubles),
 - Surcharge de l'émail avec des opacifiants ou du feldspath,
 - Surface du biscuit trop lisse, trop polie,
 - Double émaillage sur une première couche trop sèche.
- f) Surface rugueuse :** L'émail n'est pas lisse, il présente une rugosité au toucher parce que l'émail posé trop fin et il y a un manque de cuisson et l'agent de fusion en sous quantité.
- g) Tâches / Moucheté :** L'émail présente des tâches plus ou moins grands non attendus, elles sont engendrées par des éléments étrangers qui se sont collées dans la glaçure avant le processus du séchage et avant application de l'émail.
- h) Trous :** De petits trous sont présents sur la glaçure sont à l'origine du gaz qui s'échappe du biscuit lors de la cuisson et de la glaçure, et aussi l'engobe qui est très visqueux le manque de séchage de l'émail.



FigureV.6 Photo du défaut de trous sur l'émail

- i) Tressailage :** La formation d'un fin réseau de fissures (trésaillures) dans l'émail cuit et le défaut visible dès la sortie du four ou des jours voir des mois après la cuisson.

Généralement ils sont dus :

- Tension entre l'émail et le tesson,
- Mauvais accord de dilatation entre la pâte et l'émail (coefficient de dilatation de l'émail nettement supérieur à celui du tesson),
- Gonflement du tesson en présence d'humidité abondante,
- Surépaisseur de la couche d'émail.



Figure V.7 Traissailage d'un carreau céramique

j) **Écaillage** : L'écaillage apparaît quand la glaçure subit une trop grande compression qui la force à se détacher de l'argile sous formes d'écailles ou d'éclats (principalement sur le bord des pièces), elle est causée par :

- Tension entre l'émail et le tesson,
- Mauvais accord de dilatation entre la pâte et l'émail,
- Couche d'émail déposée trop fine,
- Finissage excessif des pièces en crue,

V.1.6 Défauts liés à la sérigraphie

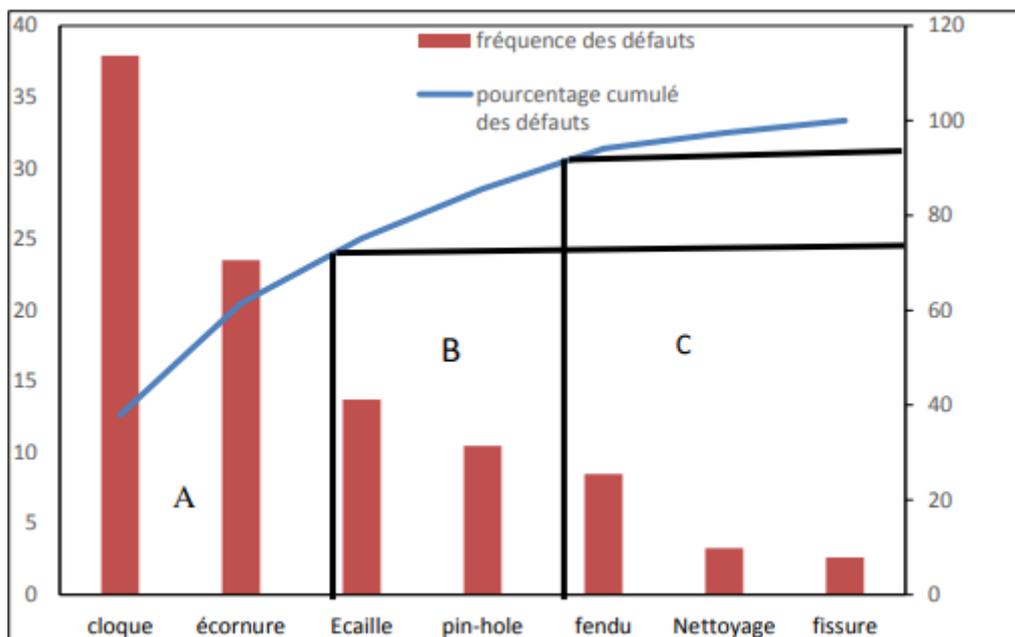
Tous types des défauts liés à la décoration causée par la sérigraphie reviennent à la salissure ou bien au mauvais traitement de la machine, on distingue quelques problèmes et leurs remèdes :

- La salissure des têtes qui doivent être nettoyées avec un solvant non agressif,
- Maintenir la température des encres aux environs de 25°C selon les indications du fournisseur,
- Une expiration des encres,
- Eviter la charge des carreaux,
- Nettoyage de la barre du chariot de nettoyage,

- Mauvais fonctionnement des agitateurs,
- Refroidir la température des carreaux avant l'entrée de la machine,
- Fuites dans les modules du couleur,
- Vérification des paramètres de recirculation (ménisque, différentielle, température, pompe).

V.1.7 Défauts liés à la cuisson

C'est lors de la cuisson des carreaux céramiques que les défauts dimensionnels apparaissent. Si la taille des défauts est d'un ordre important, la pièce peut être détecté et écarté durant les différentes phases qui devance l'étape du four, par conséquent la finition après cuisson et refroidissement feront apparaître la totalité des défauts sur le carreau cuit, la cause ne vient pas forcément du four mais la majorité des cas sont dues au changement de température surtout les défauts liés à la décoration et la coloration des émaux. La figure V.8 montre l'ampleur des défauts des carreaux après cuisson.



FigureV.8 Diagramme de Pareto des défauts à la sortie du four de cuisson.

De ce fait, le contrôle des températures du four se fait quotidiennement.

On peut citer :

- a) **Le cœur noir** : un mauvais rendement de la zone de préchauffage sera à l'origine de ce défaut, de manière à générer une combustion non terminée des matières organiques qui ne sont pas dégagées.

Ces matières organiques sont plus ou moins anciennes, certaines sont encore à l'état de végétaux alors que d'autres, plus anciennes sont déjà à l'état de charbon où cette différence induira un début de combustion décalé, alors que les premières commencent leur combustion à partir de 250 °C jusqu'à 450 °C, le charbon lui commencera sa combustion vers 450°C et ce défaut se manifeste par l'apparition d'une couleur noire dans l'épaisseur du carreau [4].



Figure V.9 Photo d'un cœur noir

b) **Défaut de planéité** : Entre la fin du préchauffage et le début de la cuisson, la différence des températures de chauffage des brûleurs en dessous et au-dessus du carreau peut provoquer des courbures (convexe, concave, effets rouleaux)

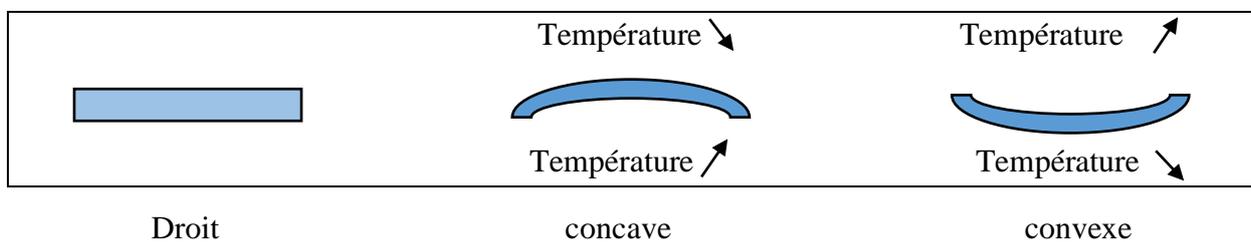


Figure V.10 Schéma représentatif des défauts de planéité

Si l'un des paramètres de température dépasse ou n'atteigne pas la norme que ça soit de la part des brûleurs au-dessous ou bien ceux au-dessus du carreau y'aura une malformation dans les dimensions de ce dernier (observation d'une lunette positive ou négative).

- c) **Défauts de cratère** : ce défaut peut être à l'origine du cycle de passage du carreau dans le four qui est accélérer, pour y remédier, il suffit juste de réduire le cycle de cuisson.
- d) **Défauts de bullage** : présence de bulles sur le décor causé par l'augmentation de température de cuisson.
- e) **Défauts de la couleur** : la couleur ne brille pas où la température de cuisson est trop basse.
- f) **Défauts de décoloration** : la teinte est atténuée pour des températures trop élevées.
- g) **Défauts liés à la salissure des rouleaux et de calibrage** :
 - La maintenance est consignée pour le rendement des rouleaux,
 - Un nettoyage spécifique pour les huiles de graisses,
 - Formation de trapèze dû à une mauvaise étanchéité du mur du four,
 - Les espaces entre les lignes des séries de carreaux non respectés,
- h) **Défauts dû aux chocs thermiques** : ces défauts ont lieu à la fin du cycle de cuisson et le début du refroidissement qui est trop brusque.

Conclusion

Dans l'objectif de mieux appréhender les défauts de fabrication des carreaux céramiques, on a pu étudier expérimentalement l'impact des différentes étapes d'élaboration, sur leurs qualités.

Les défauts de fabrication des carreaux céramiques sont directement liés aux matières premières de départ, à l'atomisation (granulométrie de poudres céramiques), à la viscosité de la barbotine de l'email, l'homogénéisation sortie de séchage des carreaux céramiques. Les défauts sont accentués lors de la cuisson qui donne lieu à des rétrécissements excessifs, aux défauts de planéité (mauvais réglage du four), aux défauts de la belle face du carreau qui sont liés soit en amont par le mauvais choix de la viscosité ou en aval par un mauvais réglage de la température de cuisson.

Références bibliographiques :

[1] M. Dondi, G. Ercolani, C. Melandri, C. Mingazzini, M. Marsigli, The chemical composition of porcelain stoneware tiles and its influence on microstructural and mechanical properties, *Interceram* 48 (1995)75–83.

[2] Elodie Romilliat. Etude des modes d'action d'agents de mouture sur le broyage du clinker. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2006. Français.

[3] I.W. Boyd, *Laser Processing of Thin Films and Microstructures*, Springer Verlag, 1988.

[4] B.Hicham, " Procédé de fabrication des carreaux céramiques et étude des facteurs influençant la résistance à la flexion des carreaux crûs" » Projet de Fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état option : Génie des Matériaux et Procédés, Université Cadi Ayyad. 2020/2021.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'études effectué au sein de l'entreprise Société Céramique Soummam et dont l'objectif est de découvrir le procédé de fabrication des carreaux céramiques ainsi que les différents contrôles réalisés à partir de la réception des matières premières jusqu'à l'obtention du produit fini.

- Les différents tests rhéologiques réalisés ont permis de mettre en évidence le comportement rhéofluidifiant ou pseudo-plastique qui est caractérisé par une bonne distribution granulométrique des matières premières, la présence du quartz presque dans toutes les compositions chimiques des matières premières, sa réduction excessive peut altérer la qualité de la pâte après cuisson, parce que cet oxyde est connu par son caractère vitrifiant.
- Les défauts rencontrés dans le produit finale peuvent être d'origine des erreurs techniques tels que la faible résistance à la flexion des carreaux crûs liés à l'humidité qui doit normalement être dans la norme 4% à 6%, pour la pression on doit garder une valeur qui nous donne une résistance et une compaction compatible avec l'humidité de la poudre afin de donner un point optimal de pressage, le réglage de temps désaération de la presse est essentiel pour éviter le corps feuilleté ainsi que le réglage de séchoir pour avoir une humidité résiduelle faible.
- Les argiles étudiées sont grésantes (teneur en SiO_2 entre 50,18 % et 54,63 %), et non réfractaires, puisque les argiles réfractaires présentent un pourcentage en Al_2O_3 supérieur à 45 %. Elles ne cuisent pas blancs, car une argile qui cuit blanc se caractérise par un pourcentage en Fe_2O_3 toujours inférieur à 1,5% (IKAYA, 2004). Par ailleurs, si l'on compare les trois argiles ; elles sont de nature essentiellement silico-alumineuse avec des teneurs plus faibles en carbonates obtenus à partir du CaO .
- L'analyse par la fluorescence des rayons X montre que :

La silice est l'élément le plus abondant, comme il existe d'autres éléments de faible teneur tel que MgO , CaO , Na_2O ...etc. La teneur en fer est non négligeable dans l'argile noir, ce qui contribue d'une part à la coloration en rouge brique lors de sa mise à feu et de participer en tant que fondant dans la composition des matières premières des carreaux céramiques.

- L'analyse par la diffraction des rayons X montre que :

Les argiles sont essentiellement constituées de quartz, d'illite et de la muscovite, alors que le kaolin est essentiellement constitué de kaolinite et de quartz. L'albite et l'orthose présents dans les matières premières participent à abaisser la température de cuisson et à promouvoir la formation de la phase vitreuse.

En perspective, nous recommandons :

- L'effet du taux de quartz existant dans les matières premières sur les défauts des carreaux céramiques (densité, viscosité, planéité, propriétés mécaniques).
- La modélisation du phénomène du séchage de la poudre céramique et son influence sur le retrait.
- La substitution du kaolin par des rejets miniers contenant des métaux lourds et la modélisation des phénomènes de durabilité et de relargage des métaux lourds.

Résumé

Le présent mémoire constitue la synthèse de notre travail dans le cadre du projet de fin d'études effectué au sein de Société Céramique de la Soummam. Le but de ce travail est de connaître le processus de fabrication des carreaux céramiques et les contrôles effectués à chaque étape de production. Nous sommes intéressés plus particulièrement aux propriétés physicochimiques des matières premières et aux paramètres technologiques de fabrication de ces céramiques.

En général, les étapes fondamentales pour obtenir des carreaux céramiques de type dalle de sol sont : la préparation de la barbotine, l'obtention de la poudre par atomisation, Le pressage, le séchage, l'émaillage, la décoration, la cuisson, le triage et l'emballage.

Les contrôles réalisés sur la matière première sont les taux d'humidités des argiles. La poudre atomisée est caractérisée par son humidité et sa granulométrie. Les contrôles à réaliser lors de la préparation de la barbotine et les émaux sont : la mesure de la viscosité, la densité et le refus. Le produit fini est caractérisé par la mesure de la porosité, de la résistance à la flexion.

Pour mener cette étude, nous avons, tout d'abord, essayé d'analyser les minéraux qui se présente dans les matières premières argile et kaolin, traduire les défauts générer en problématique et proposé des solutions.

Mots clés : Carreaux céramiques, argile, kaolin, procédé technologique, propriété, défauts.

Abstract

This thesis is the synthesis of our work within the framework of the end-of-studies project carried out at the project carried out within the Société Céramique de la Soummam. The aim of this work is to know the manufacturing process of ceramic tiles and the controls carried out at each stage of production. We are particularly interested in the physicochemical properties of the raw materials and the technological parameters of the manufacture of these ceramics.

In general, the basic stages for obtaining ceramic floor tiles are: preparation of the slip, obtaining the powder by atomisation, pressing, drying, glazing, decoration, firing, sorting and packaging.

The controls carried out on the raw material are the humidity levels of the clays. The atomised powder is characterised by its humidity and granulometry. The controls to be carried out during the preparation of the slip and glazes are: measurement of the viscosity, density and refusal. The finished product is characterised by the measurement of porosity and flexural strength.

In order to carry out this study, we first tried to analyse the minerals present in the raw materials clay and kaolin, translate the defects generated into problems and propose solutions.

Keywords : ceramic tiles, clay, kaolin, technological process, properties, defaults.