

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة بومرداس
Université M'Hamed Bougara de Boumerdès



Faculté des Sciences - Département de Chimie

Domaine : Science de la matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Mémoire de projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Présenté et soutenu par

BENAKLI Nada

Thème

Valorisation d'un déchet céramique comme dégraissant dans
les produits rouges

Le 07 Juillet 2022

Devant les membres de jury :

F. HAMIDOUCHE	Maitre de conférences A	FS-UMBB	Président
F. BENOUDJIT	Maitre de conférences A	FS-UMBB	Encadrante
M. OUALIT	Maitre de conférences A	FS-UMBB	Examineur
A. IREKTI	Maitre de conférences A	FS-UMBB	Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciements

Je remercie Allah le tout puissant qui m'a donnée la force, la volonté et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

*Tout d'abord, je remercie chaleureusement et profondément la meilleure promotrice **Dr. F. BENOUDJIT** pour tout, sa gentillesse, sa disponibilité, ses conseils, son aide dont elle a su faire preuve malgré ses charges académiques et professionnelles, ses orientations, ses encouragements et surtout sa confiance en moi, qui m'a permis d'exprimer mes compétences durant ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont au **Dr. F. HAMIDOUCHE** de m'avoir honoré en présidant ce mémoire et aux **Dr. M. OUALIT** Et **Dr. A. IREKTI** d'avoir accepté de l'examiner.*

Mes remerciements s'adressent également à toute l'équipe du CETIM, de la briqueterie EL BARAKAT et de Céramique BOUMERDES.

Enfin, j'exprime ma reconnaissance et mon affection à ma famille, mes ami(e)s ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenue et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A l'homme de ma vie, mon précieux cadeau de Dieu, à qui je dois ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père.

A ma mère mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur. Permets-moi aujourd'hui de te rendre ce bien faible hommage pour tes efforts, ta gentillesse, ta tendresse, ta compréhension, tes sacrifices et tes efforts. Nulle dédicace ne saurait traduire toute l'affection, l'admiration et la reconnaissance que j'ai pour toi et rien ne pourra égaler tous ce que tu m'as donné.

A mon frère MOHAMED

A ma sœur MANEL

A mes cousins AMINE et GHILES

A mes cousines SARA et NARIMANE

A ma grand-mère, ma tante et à toute ma famille pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes études, leur encouragement, leur présence à mes côtés. Que leur vie soit pleine de bonheur.

A ma famille universitaire

*NARIMANE, LYNDA, RATIBA, FAOUZI, MAJDA, LYLIA,
HADJER, MOUNIA, AMEL, SAMIA, AYMEN, NADIA,
SONIA, OUARDA, FARIDA, NABIL, HANANE, RACHID,
ABDELALI, IMANE, ABDERAHMANE.*

Sommaire

Sommaire

Introduction	1
Chapitre I : Rappels bibliographiques	
I.1. Généralité sur les argile	2
I.1.1. Introduction	2
I.1.2. Origine et définition	2
I.1.3. Classification et minéralogie	2
I.1.3.1. Kaolinite	3
I.1.3.2. Illite	3
I.1.3.3. Smectite	4
I.1.3.4. Chlorite	4
I.1.4. Propriétés	4
I.1.4.1. Absorbance et adsorbance	4
I.1.4.2. Surface spécifique	5
I.1.4.3. Gonflement	6
I.1.5. Utilisation	6
I.2. Généralités sur les matériaux céramiques	6
I.2.1. Définition	6
I.2.2. Classification	6
I.2.2.1. Terres cuites	6
I.2.2.2. Faiences	7
I.2.2.3. Porcelaines	7
I.3. Briques de terre cuite	8

I.3.1. Introduction	8
I.3.2. Composition	8
I.3.2.1. Matières premières plastiques.....	8
I.3.2.2. Matières premières non plastiques.....	8
I.3.3. Classification	9
I.3.3.1. Briques pleines	9
I.3.3.2. Briques à perforation	10
I.3.4. Propriétés et caractéristiques	11
I.3.5. Industrie de briques de terre cuite : cas de l'Algérie.....	12
I.3.6. Milieu d'étude : Briqueterie SARL ELBARAKATE	12
I.3.6.1. Présentation	12
I.3.6.2. Procédé de fabrication des briques	13
I.4. Valorisation des déchets en construction	22
I.4.1. Définition réglementaire des déchets	22
I.4.2. Types de déchets valorisés en construction.....	22
I.4.2.1. Laitiers de haut fourneau	23
I.4.2.2. Cendres volantes	23
I.4.2.3. Mâchefer	23
I.4.2.4. Boues rouges	23
I.4.2.5. Béton récupéré	23
I.4.2.6. Verre de récupération	24
I.4.2.7. Sciure de bois.....	24
I.4.2.8. Marbre	24
I.4.2.9. Céramique.....	24

Chapitre II : Matériel et méthodes

II.1. Introduction	25
II.2. Présentation, préparation et techniques expérimentales de caractérisation des matières premières.....	25
II.2.1. Présentation et préparation des matières premières	25
II.2.2. Techniques expérimentales de caractérisation des matières premières	26
II.2.2.1. Teneur en humidité	26
II.2.2.2. Masse volumique apparente	27
II.2.2.3. Masse volumique réelle ou absolue	28
II.2.2.4. Analyse granulométrique par tamisage	29
II.2.2.5. Perte au feu	30
II.2.2.6. Potentiel d'hydrogène	30
II.2.2.7. Teneur en carbonate	31
II.2.2.8. Surface spécifique Blaine	32
II.2.2.9. Analyse par fluorescence de rayons X (FRX)	33
II.2.2.10. Analyse par diffraction de rayons X (DRX)	34
II.2.2.11. Microscopie électronique à balayage (MEB).....	34
II.3. Valorisation des déchets de céramique dans la formulation de briquettes et caractérisation du produit fini	35
II.3.1. Confection des briquettes.....	35
II.3.2. Caractérisation du produit fini	37
II.3.2.1. Absorption, masse volumique et porosité	37
II.3.2.2. Perte de masse à la cuisson.....	37

II.3.2.3. Retrait linéaire	37
II.3.2.4. Absorption capillaire	38
II.3.2.5. Essai d'éclatement.....	39
II.3.2.6. Essai de flexion	39

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Résultats de la caractérisation des matières premières.....	40
III.1.1. Teneur en humidité.....	40
III.1.2. Masse volumique apparente	40
III.1.3. Masse volumique réelle	41
III.1.4. Analyse granulométrique pas tamisage	41
III.1.5. Perte au feu	42
III.1.6. Potentiel d'hydrogène.....	43
III.1.7. Teneur en carbonate.....	43
III.1.8. Surface spécifique Blaine	44
III.1.9. Analyse par fluorescence de rayons X	45
III.1.10. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	46
III.1.11. Microscopie électronique à balayage.....	48
III.2. Caractérisation des briquettes.....	49
III.2.1. Perte de masse à la cuisson.....	49
III.2.2. Retrait	50
III.2.3. Absorption, masse volumique, porosité	51
III.2.4. Absorption capillaire	53

III.2.5. Essai d'éclatement	53
III.2.6. Essai de flexion.....	54
Conclusion	55
Référence bibliographique	57

Liste des figures

Chapitre I : Rappels bibliographiques

Figure I.1 : Structure des minéraux argileux.....	3
Figure I.2 : Céramiques traditionnelles (terre cuite (a) ; faïence (b) ; porcelaine (c)).	8
Figure I.3 : Briques pleines.	10
Figure I.4 : Briques à perforations horizontales (12 trous (a) ; 8 trous (b) ; 6 trous (c)).....	11
Figure I.5 : Briques creuses à perforations verticales (a : bloc normal ; b : bloc de type G).	12
Figure I.6 : Localisation de la briqueterie SARL ELBARAKATE (photo Google Maps).	13
Figure I.7 : Étapes de fabrication de briques de terre cuite.	14
Figure I.8 : Stockage des matières premières pour vieillissement ((a)	15
Figure I.9 : Trémie doseuse.....	15
Figure I.10 : Brise mottes piocheur (a) et cylindre désagrégateur (b).....	16
Figure I.11 : Tamis rotatif.	16
Figure I.12 : Aspect du tuf avant (a) et après (b) tamisage.	17
Figure I.13 : Mouilleur-mélangeur (a) et mélange obtenu (b).	18
Figure I.14 : Stockage du mélange (argiles + dégraissant).	18
Figure I.15 : Cylindre laminoire dégrossisseur.	19
Figure I.16 : Mouleuse.	19
Figure I.17 : Découpage des boudins en briques.	20
Figure I.18 : Acheminement des briques crues vers le séchoir.	21
Figure I.19 : Acheminement des briques séchées vers le four.	22
Figure I.20 : Ouverture automatique du four après cuisson des briques.....	22
Figure I.21 : Briques cuites conditionnées.	23

Chapitre II : Matériel et méthodes

Figure II.1 : Aspect des matières premières.....	26
Figure II.2 : Etapes de détermination de la teneur en humidité.....	28
Figure II.3 : Etapes de détermination de la masse volumique apparente.	28
Figure II.4 : Mode opératoire de la masse volumique absolue.....	29
Figure II.5 : Tamiseuse de marque CONTROLS modèle D409/S.	30
Figure II.6 : Protocole de mesure du pH.....	31
Figure II.7 : Calcimètre de Bernard	32
Figure II.8 : Mode opératoire de la détermination de la SSB.....	33
Figure II.9 : Spectromètre à fluorescence X PANalytical Magix Pro.....	34
Figure II.10 : Diffractomètre des rayons X PANalytical XPERT-PRO.....	34
Figure II.11 : Microscope électronique à balayage QUANTA 650 W.....	35
Figure II.12 : Extrudeuse NETZSCH modèle D8672.	36
Figure II.13 : Découpeuse.....	36
Figure II.14 : Protocole de l'absorption capillaire.	38
Figure II.15 : Essai de flexion à trois points.	39

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 : Teneurs en humidité des matières premières.....	40
Figure III.2 : Masses volumiques apparentes des matières premières.	41
Figure III.3 : Masses volumiques réelles des matières premières.	41
Figure III.4 : Courbes granulométrique par tamisage des matières premières.....	42
Figure III.5 : PAF des matières premières.....	43

Figure III.6 : pH des matières premières.	43
Figure III.7 : Teneurs en CaCO ₃ des matières premières.	44
Figure III.8 : SSB des matières premières.	45
Figure III.9 : Diffractogramme des rayons X de l'échantillon AG.	46
Figure III.10 : Diffractogramme des rayons X de l'échantillon AJ.	47
Figure III.11 : Diffractogramme des rayons X de l'échantillon TF.	48
Figure III.12 : Diffractogramme des rayons X de l'échantillon DC.	48
Figure III.13 : Images du TF sous MEB.	48
Figure III.14 : Images du DC sous MEB.	49
Figure III.15 : Images de MA sous MEB.	49
Figure III.16 : Perte de masse à la cuisson des briquettes.	50
Figure III.17 : Retrait dû au séchage des briquettes.	51
Figure III.18 : Retrait dû à la cuisson des briquettes.	51
Figure III.19 : Absorptions des briquettes.	52
Figure III.20 : Masses volumiques réelles des briquettes.	52
Figure III.21 : Porosités des briquettes.	53
Figure III.22 : Absorptions capillaires des briquettes.	53
Figure III.23 : Résistances à la flexion des briquettes.	54

Liste des tableaux

Chapitre I : Rappels bibliographiques

Tableau I.1 : Comparaison des propriétés physicochimiques de l'adsorption.	5
Tableau I.2 : Surfaces spécifiques de quelques argiles.....	6
Tableau I.3 : Propriétés et utilisations des céramiques traditionnelles.	8
Tableau I.4: Propriétés des briques creuses.....	12

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III.1 : Résultats quantitatifs de FRX des matières premières.	45
Tableau III.2 : Essais d'éclatement des briquettes.	54

Liste des abréviations

d : distance inter-foliaire

TO : couche tétraédrique + couche octaédrique

TOT : deux couche tétraédriques et une couche octaédrique

AG : argile grise

AJ : argile jaune

TF : tuf

CETIM : Centre d'Études et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction

H : teneur en humidité

ρ_r : masse volumique réelle

ρ_a : masse volumique apparente

PAF : perte au feu

pH : potentiel d'hydrogène

SSB : surface spécifique blaine

FRX : analyse par fluorescence de rayons X

DRX : analyse par diffraction de rayons X

MEB : microscopie électronique à balayage

INTRODUCTION

Le besoin universel de protéger l'environnement et de bien gérer les ressources, nécessite d'établir de nouvelles lois et d'adapter des nouveaux concepts. La valorisation et le recyclage des déchets est un moyen efficace face aux contraintes d'ordres économiques et écologiques de ces dernières années. Les déchets constituent un réel problème, inévitable à toute vie biologique et à toute activité industrielle. La valorisation des déchets est aujourd'hui considérée comme une solution d'avenir afin de répondre au déficit entre production et consommation et de protéger l'environnement.

Les quantités énormes de déchets qui sont générées sans cesse immobilisent de plus en plus de grandes surfaces pour le stockage et réduisent ainsi les disponibilités des terrains sans compter la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences. Parmi les déchets ceux de céramique qui proviennent des usines de céramiques.

Ainsi, ce mémoire a pour objectif de valoriser les déchets de céramique, évacués par une faïencerie locale, dans un matériau de construction qui est la brique de terre cuite.

Ce mémoire se décline en trois chapitres :

Le premier chapitre est destiné à des rappels bibliographiques qui se divise en quatre parties. La première met en lumière des généralités sur les argiles, la deuxième décrit les généralités sur les matériaux céramiques, la troisième est consacré pour la brique en terre cuite et la quatrième concerne la valorisation des déchets en construction.

Le deuxième chapitre concerne les matières premières et le déchet de céramique utilisés, les protocoles de caractérisation de ces derniers ainsi que les étapes de valorisation du déchet dans les briques de terre cuites et leurs évaluations.

Le troisième chapitre présente les différents résultats expérimentaux obtenus accompagnés de leurs interprétations.

Ce mémoire se termine par une conclusion qui récapitule les principaux résultats obtenus ainsi que quelques perspectives.

Chapitre I
Rappels bibliographiques

I.1. Généralité sur les argiles

I.1.1. Introduction

Les matières premières argileuses sont utilisées par l'homme depuis l'Antiquité. Elles sont extraites, mises en forme et/ou cuites à des fins multiples. Leur connaissance implique de faire une étude minéralogique des argiles afin d'expliquer certains phénomènes (comme le gonflement lors de la cuisson, le retrait lors du séchage...), d'améliorer et de maîtriser le comportement des constituants argileux de l'extraction jusqu'au produit final.

I.1.2. Origine et définition

Les argiles sont des matériaux sédimentaires de la couche superficielle de l'écorce terrestre. Les minéraux argileux résultent soit de l'altération physique, c'est à dire de la désagrégation d'une roche préexistante (minéraux primaires), soit de l'altération chimique (minéraux secondaires). Dans ce cas, ils sont formés par transformation d'un minéral ou par précipitation à partir d'une solution (minéraux néoformés). Les argiles ont des particules de taille inférieure à 2 μm . [1]

I.1.3. Classification et minéralogie

Les minéraux argileux sont des phyllosilicates d'aluminium dont les feuillets sont constitués de couches d'octaèdres $\text{Al}(\text{OH})_6$ et de couches de tétraèdres SiO_4 reliées par des atomes O et OH mis en commun. La distance inter-réticulaire « d » sépare 2 feuillets successifs (Figure I.1). Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets et l'édifice cristallin peut être désorganisé. Il peut également y avoir des déséquilibres au niveau des charges qui est compensé par adsorption de cations dans l'espace interfoliaire. D'après la structure du feuillet, on distingue principalement les argiles 1/1 (1 couche tétraédrique et 1 couche octaédrique « TO ») et les argiles 2/1 (2 couches tétraédriques pour 1 octaédrique « TOT »). [2]

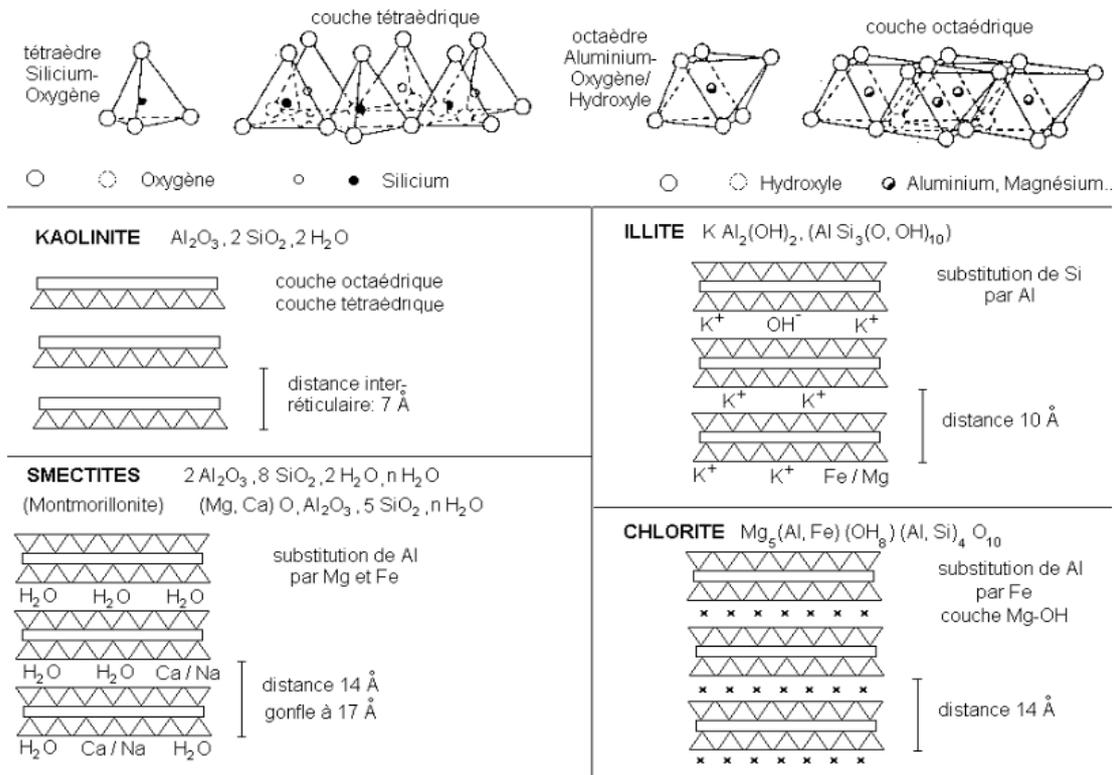


Figure I.1 : Structure des minéraux argileux. [3]

I.1.3.1. Kaolinite

La kaolinite est une roche argileuse blanche, douce, friable et réfractaire. Elle se forme dans les sols bien drainés, en milieu acide, surtout en climat subtropical et tropical. Peu concentrée en sels minéraux, la kaolinite est utilisée pour la fabrication de porcelaine et de céramique et en tant que liant dans les peintures, les plastiques ainsi que dans les médicaments. [4]

La kaolinite contient autant d'aluminium que de silice et a pour formule $[Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O]$. Sa structure contient ainsi une couche tétraédrique et une octaédrique (TO) avec une $d = 7\text{Å}$ (Figure I.1) et le feuillet est neutre. [5]

I.1.3.2. Illite

L'illite a été identifiée pour la première fois à Illinois (Etats-Unis). Sa formule est $[(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]]$. De composition riche en calcium, en fer et pauvre en magnésium, elle présente une capacité d'adsorption et de gonflement/rétraction faible. L'illite est utilisée en tant que cataplasme épais à appliquer sur les contusions diverses ou encore pour adsorber des impuretés (déchets organiques, micro-organismes). [4]

La structure des illites est une association d'une couche alumineuse et deux couches siliceuses (TOT) avec une $d = 10 \text{ \AA}$ (Figure I.1). Il peut y avoir des substitutions de silice par l'alumine. Des cations (K^+) sont adsorbés dans l'espace inter-foliaire afin de compenser le déséquilibre des charges. [5]

I.1.3.3. Smectite

Appelée aussi montmorillonite, la smectite est généralement calcique, plus rarement sodique. Elle est formée dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Les feuillets de la montmorillonite peuvent s'intercaler régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques. L'ensemble forme des inter-stratifiés. La smectite est caractérisée par une structure instable qui est affectée par la présence d'eau. En effet, la smectite a la capacité d'incorporer dans sa structure des molécules d'eau qui modifie la dimension de la couche en provoquant son gonflement et donc une augmentation de son volume pouvant atteindre 95%. [4]

La smectite contient deux couches tétraédrique et une couche octaédrique (TOT). L'empilement des feuillets est désordonné et les substitutions d'atomes sont importantes. Ce désordre et la faible charge des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption de molécules variées (eau, cations, molécules organiques) au niveau de l'espace inter-foliaire qui s'écarte d'une $d = 17 \text{ \AA}$ (Figure I.1). [5]

I.1.3.4. Chlorite

De formule $Mg_5(Al,Fe)(OH)_8(Al, Si)_4O_{10}$, le chlorite se forme dans les roches magmatiques et pendant la diagenèse des roches sédimentaires. Un chlorite est un minéral aluminosilicate de fer ou de magnésium. Il est formé de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique avec une $d = 14 \text{ \AA}$ (Figure I.1). L'espace inter-foliaire est garni par une couche composée de Mg et OH. L'Al est remplacé localement par le Fe. [5]

I.1.4. Propriétés

Les propriétés des argiles sont définies par leurs constitutions chimiques ainsi que par l'épaisseur et l'écartement de leurs feuillets.

I.1.4.1. Absorbance et adsorbance

Les argiles se différencient par leurs propriétés absorbantes et adsorbantes. Les argiles à structure

fibreuses ont un pouvoir adsorbant élevé qui peut atteindre jusqu'à 40% de leur poids en liquide. Elles ont donc des vertus nettoyantes qui leur permettent d'adsorber les impuretés ou d'éliminer les mauvaises odeurs. [7]

Selon les types et la nature des interactions adsorbat-adsorbant ou les forces qui maintiennent les adsorbats sur la surface solide, on distingue deux types d'adsorption : l'adsorption physique et l'adsorption chimique [8]. L'adsorption physique est dû à des forces d'interactions physiques entre les atomes qui font intervenir des forces de Van Der Waals ainsi que des liaisons hydrogène. Dans ce type d'adsorption les énergies mises en jeu sont faibles et inférieures à 20 kcal/mol [9]. L'adsorption chimique consiste en un transfert de charge et une distribution de celles-ci entre l'espèce adsorbée et l'adsorbant. Ceci aboutit à la formation de liaisons fortes à caractère covalent ou ionique. Les énergies mises en jeu sont plus grandes, généralement comprises entre 20 et 100 kcal/mol. [10]

Le Tableau I.1 résume les principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.

Tableau I.1 : Comparaison des propriétés physicochimiques de l'adsorption. [11-12]

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Types de liaison	Physique	Liaison chimique
Température du processus	Relativement faible comparé à la température d'ébullition de l'adsorbat	Plus élevée que la température d'ébullition de l'adsorbat
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide	Lente
Chaleur d'adsorption	5 à 10 Kcal/mol	20 à 100 Kcal/mol
Energies mise en jeu	Faible	Elevée
Couches formées	Multicouches	Monocouche

I.1.4.2. Surface spécifique

La surface spécifique (Tableau I.2) est un paramètre très important dans la caractérisation de l'argile. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir et un potentiel de gonflement plus importants. La surface spécifique est proportionnelle à la finesse de l'argile.

Tableau I.2 : Surfaces spécifiques de quelques argiles. [13]

Minéraux	Kaolinites	Illites	Smectites	Chlorites
Surface spécifique (m ² /g)	5-20	100-200	700-800	5-20

I.1.4.3. Gonflement

Le gonflement d'une argile est défini comme étant l'écartement des feuillets par l'entrée d'eau dans l'espace inter foliaire. Il varie selon le type d'argile et la surface spécifique de ce dernier.

I.1.5. Utilisation

Les argiles sont des matières premières peu onéreuses dont les propriétés intéressantes permettent leurs utilisations dans divers domaines notamment la céramique et les industries chimique, agro-alimentaire, pharmaceutique et cosmétique.

I.2. Généralités sur les matériaux céramiques

I.2.1. Définition

La céramique (du grec *keramikos*, « argile cuite ») est le premier matériau que l'homme ait fabriqué par transformation de matières premières. Une céramique peut être définie comme un objet composé de matières premières minérales (inorganiques) pulvérulentes qui est façonnée à une température généralement proche de l'ambiante, puis qui subit un cycle thermique au cours duquel sa microstructure est transformée de façon irréversible. [16]

I.2.2. Classification [17]

Les matériaux céramiques sont issus de matières premières minérales silicatées naturelles (argile, feldspath, kaolin, quartz) et généralement mise en œuvre par coulée (barbotine). Les céramiques traditionnelles sont présentes dans de nombreux secteurs d'activités tels que les matériaux de construction (briques, tuiles), le revêtement (carrelages, faïence).

Les céramiques traditionnelles peuvent être classées sous différentes familles (Figure I.2) :

I.2.2.1. Terres cuites

Les terres cuites sont principalement des produits pour le bâtiment, tels que les tuiles, les briques, les conduites de fumées, les tuyaux de drainage et les carreaux de dallage. Elles se composent d'argiles (souvent kaolino-illitiques) et d'additifs, tels que les dégraissants, les colorants ou les adjuvants organiques (liants), afin d'assurer une bonne maîtrise du comportement en fabrication et des caractéristiques finales. La mise en forme des tessons se fait le plus souvent à partir d'une pâte plastique. Le séchage des préformes est réalisé en chambre ventilée ou en séchoir tunnel.

La coloration des tessons peut varier du blanc jaunâtre au brun. Les produits de terre cuite sont appréciés pour leur esthétique, leur stabilité dans le temps, leur résistance en compression, leur faible conductivité thermique et leurs propriétés hygrothermiques et acoustiques.

I.2.2.2. Faïences

La faïence est un ensemble de produits céramiques constitués d'un tesson poreux recouvert d'une couche continue de glaçure décorée. L'émail permet de masquer la couleur du tesson et de fermer sa forte porosité ouverte (5% à 20%). Les faïences sont préparées à partir d'argiles généralement modifiées par des ajouts de quartz, de craie, de feldspath ou de verre pilé. Les techniques les plus couramment utilisées pour les mettre en forme sont le coulage de barbotine, le calibrage de pâte et le pressage de la poudre granulée. Après séchage, le produit cru est soumis à un traitement thermique.

I.2.2.3. Porcelaines

Les porcelaines sont blanches et translucides sous faible épaisseur. Elles sont dépourvues de porosité ouverte (<0,5%), mais peuvent présenter quelques gros pores fermés (alvéoles). Les porcelaines sont cuites à une haute température.



Figure I.2 : Céramiques traditionnelles (terre cuite (a) ; faïence (b) ; porcelaine (c)).

Les températures de cuisson, la porosité ainsi que quelques exemple d'utilisation des céramiques traditionnelles sont récapitulés dans le Tableau I.3 suivant :

Tableau I.3 : Propriétés et utilisations des céramiques traditionnelles. [18,19]

Types de céramiques traditionnelles	Température de cuisson (°C)	Porosité ouverte après cuisson (%)	Exemples d'utilisation
Terres cuites	900 – 1150	10 – 30	Briques, tuiles, conduites de fumée, tuyaux de drainage, revêtements de sols et de murs, poteries
Faïences	950 -1200	5 – 20	Equipements sanitaires, vaisselle, carreaux
Porcelaines	1100 – 1400	0 – 1	Vaisselle, appareils de chimie, isolateurs électriques

I.3. Briques de terre cuite

I.3.1. Introduction

Les briques sont considérées, depuis longtemps, parmi les éléments les plus importants dans le domaine de la construction. La fabrication des briques est passée par plusieurs étapes de développement dont la première est la brique crue, puis la brique cuite, enfin la brique stabilisée. La technologie actuelle permet de réaliser plusieurs types de briques avec des performances supplémentaires pour différentes destinations (brique de verre, brique cellulaire, brique monobloc ...). [20]

I.3.2. Composition

I.3.2.1. Matières premières plastiques

La matière première de base pour la fabrication des briques de terre cuite est l'argile. Mélangée avec une certaine quantité d'eau, la poudre forme une pâte plastique, malléable et cohésive. Cette plasticité est due à la forme en plaquette des grains de phyllosilicates et à leur forte affinité pour l'eau liquide. [21]

I.3.2.2. Matières premières non plastiques

Les matières premières non plastiques modifient la plasticité, le retrait et la porosité des matières plastiques.

Les matières colorantes comme les oxydes (fer, chrome, manganèse, cuivre, cobalt et nickel) pouvant provenir de certaines argiles font également partie des matières premières non plastiques. [21]

a) Dégraissants

Les matières dégraissantes regroupent les sables, les chamottes et le tuf. Les chamottes sont constituées par des argiles calcinées à une température supérieure à la température de cuisson des pâtes qu'elles composent alors que le tuf est une roche poreuse légère, souvent friable, formée de dépôts volcaniques ou calcaires.

b) Fondants

Les fondants sont des matériaux incorporés dans une pâte céramique afin d'assurer la formation d'une phase vitreuse au sein du produit cuit. Ce dernier ayant aussi pour but la diminution de la porosité et l'amélioration des propriétés du produit final. Feldspaths, craie (CaCO_3), poudre de verre, verre pilé, micas et laitiers (débris métalliques) représentent les matériaux utilisés comme fondant dans la fabrication des briques de terre cuite.

I.3.3. Classification

I.3.3.1. Briques pleines

Élément de construction traditionnel, la brique pleine possède des faces planes, sans reliefs (Figure I.3), dont le format d'appellation le plus courant est $6 \times 11 \times 22 \text{ cm}^3$. Elle permet de construire des murs porteurs ou des cloisons. Elle également utilisée pour l'habillage des cheminées et des chaperons de piliers. [23]

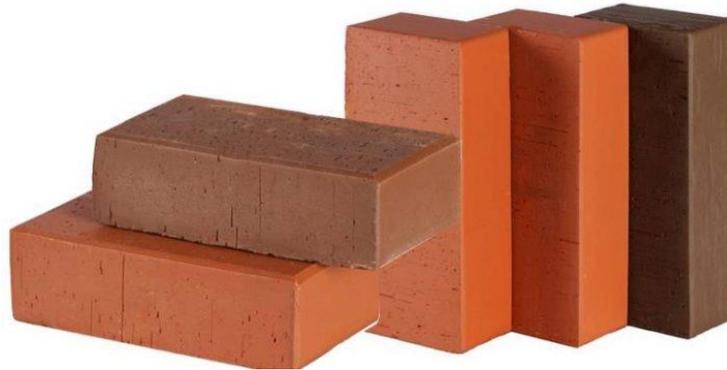


Figure I.3 : Briques pleines.

I.3.3.2. Briques à perforation [23]

Les briques à perforations, nommées également briques creuses à alvéoles, tiennent leurs noms des perforations horizontales ou verticales qu'elles contiennent. Ces briques ont la particularité de s'adapter à tous les types de travaux. Très solides tout en restant plutôt légères, elles permettent de monter des murs intérieurs et extérieurs, porteurs ou non. Les briques creuses à alvéoles offrent notamment de bonnes performances en matière d'isolation thermique. Les briques creuses sont souvent privilégiées au détriment des briques pleines qui imposent, quant à elles, de solides fondations en raison de leurs poids. Les trous de la perforation dans les briques sont faits soit verticalement, soit horizontalement.

a) Briques à perforations horizontales

Ce sont des briques dont les perforations sont horizontales, c'est-à-dire parallèles à la face de pose, et dont la plus grande dimension d'arête du parallélépipède est inférieure ou égale à 80 cm. La somme des perforations est supérieure à 40% de la section totale (Figure I.4).

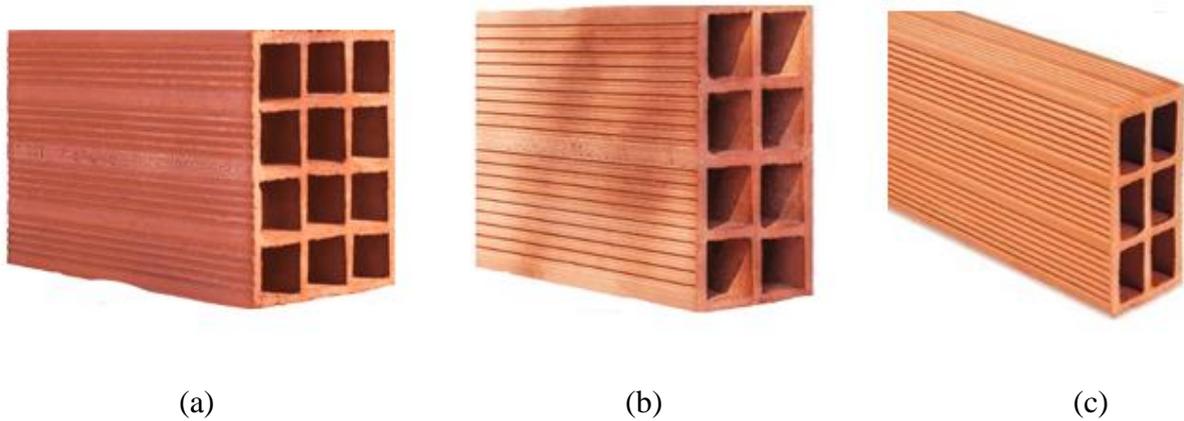


Figure I.4 : Briques à perforations horizontales (12 trous (a) ; 8 trous (b) ; 6 trous (c)).

b) Briques à perforations verticales

Les briques à perforations verticales sont des produits comportant des perforations perpendiculaires à la face de pose. Leur largeur est d'au moins 14 cm et la somme des perforations (i.e. alvéoles) est inférieure ou égale à 60% de la section totale. Selon leurs caractéristiques thermique, ces blocs peuvent être soit des blocs normaux soit des blocs de type G (Figure I.5).

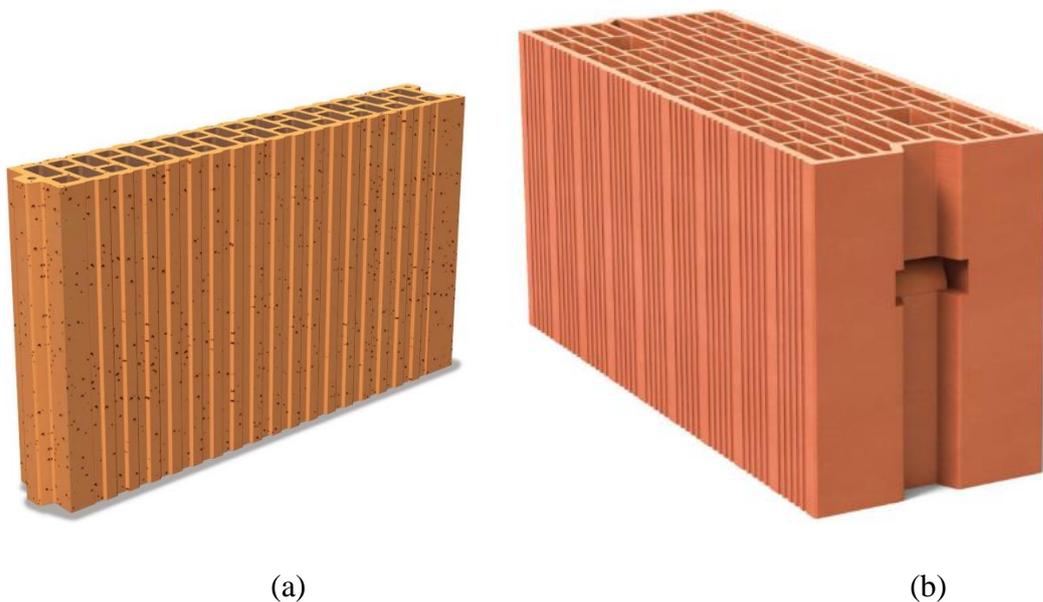


Figure I.5 : Briques creuses à perforations verticales (a : bloc normal ; b : bloc de type G).

I.3.4. Propriétés et caractéristiques

Les propriétés et les caractéristiques des briques de terre cuite sont récapitulés dans le Tableau I.4 suivant.

Tableau I.4: Propriétés des briques creuses. [24]

Types de briques	Dimensions (cm ³)	Masse (kg)	Résistance à la compression (MPa)	Masse volumique(kg/m ³)	Absorption d'eau (%)	Retrait (%)
6 alvéoles	05 x 30 x 20	2,04	4	1750-2050	≤15	≤ 2
8 alvéoles	10 x 30 x 20	3,8	5			
12 alvéoles	15 x 30 x 20	5,8	4			

I.3.5. Industrie de briques de terre cuite : cas de l'Algérie

L'industrie des produits rouges a évolué depuis le 19^e siècle, suite à la mécanisation de la production et à l'introduction de fours modernes utilisant l'énergie fossile (charbon, fuel, gaz) et/ou l'énergie électrique. La technologie de fabrication a encore progressé avec l'automatisation entière ou partielle du procédé.

La capacité nationale de production des produits rouges a atteint en 2013 près de 20 millions de tonnes, selon une étude publiée à l'occasion de 17^e Salon International du bâtiment, des matériaux de construction et des travaux publics « batimatec 2014 ». [26]

La brique creuse est sans conteste la plus répandue en Algérie. L'étude réalisée dans le cadre du programme d'appui aux petites et moyennes entreprises / petites et moyennes industries (PME/PMI) et à la maîtrise des technologies de l'information et de la communication (PME II), révèle que les 136 briqueteries recensées en 2013 sont dotées d'une capacité de production avoisinant les 19.678.500 tonnes/an. [26]

I.3.6. Milieu d'étude : Briqueterie SARL ELBARAKATE

I.3.6.1. Présentation

La briqueterie SARL ELBARAKATE se situe à Benrahmoune, Boumerdès (Figure I.6). Créée en 2003, cette briqueterie est spécialisée dans la fabrication des briques rouges (briques à 8 trous,

et 12 trous, et hourdis 15/20), avec des modèles toujours plus innovants pour le secteur de la construction.



Figure I.6 : Localisation de la briqueterie SARL ELBARAKATE (photo Google Maps).

I.3.6.2. Procédé de fabrication des briques

La fabrication des briques de terre cuite se déroule en plusieurs étapes (Figure I.7). Il est à noter que la production fonctionne en flux continu. Le procédé comporte des réactions chimiques et mécaniques du fait de la transformation de l'argile en briques.

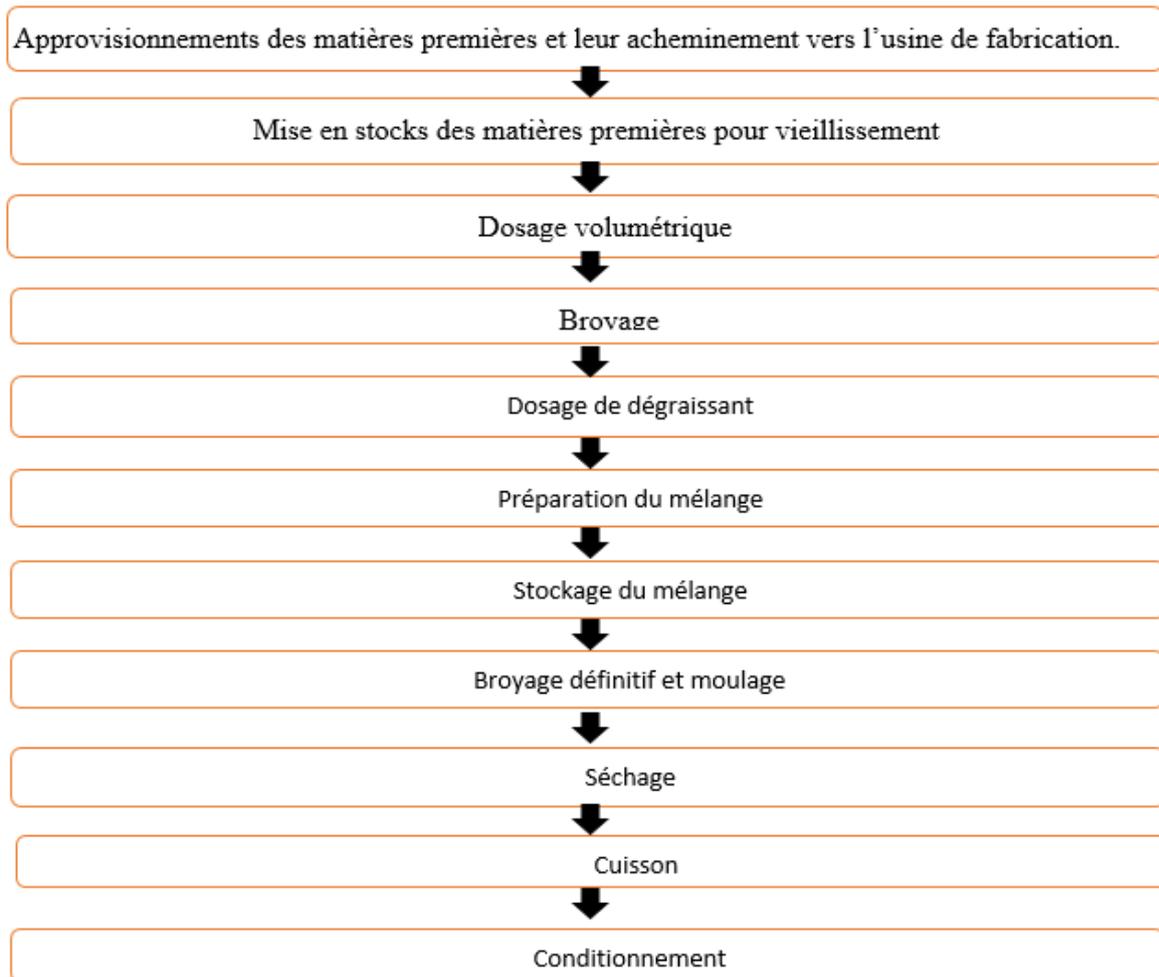


Figure I.7 : Étapes de fabrication de briques de terre cuite.

a) Approvisionnement des matières premières et acheminement vers l'usine

La première étape consiste en l'extraction des matières premières (argile et dégraissant) dans des carrières situées à proximité de l'usine.

b) Mise en stocks des matières premières pour vieillissement

Les matières premières sont acheminées par des camions jusqu'à l'usine. Elles sont entreposées dans une aire de stockage (Figure I.8) pour vieillissement.

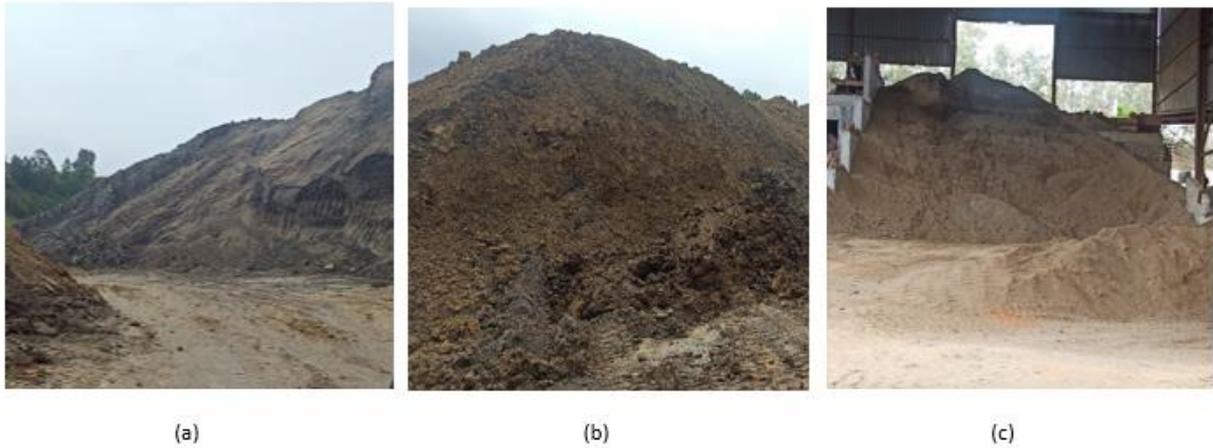


Figure I.8 : Stockage des matières premières pour vieillissement ((a) : argile grise ; (b) : argile jaune ; (c) : tuf).

c) Dosage volumétrique

Le dosage volumétrique est l'étape de préparation des argiles. Elle consiste en la prise de volumes bien définis des deux types d'argiles utilisés par la briqueterie (argile jaune « AJ » et argile grise « AG ») et au versement du mélange argileux dans une trémie doseuse (Figure I.9) puis son passage vers le brise motte où commence le broyage.



Figure I.9 : Trémie doseuse.

d) Broyage

Les mottes d'argiles subissent des réductions dimensionnelles à l'aide d'un brise mottes piocheur (4 à 5 cm), puis d'un cylindre désagrégateur (2 à 3 cm) (Figure I.10).

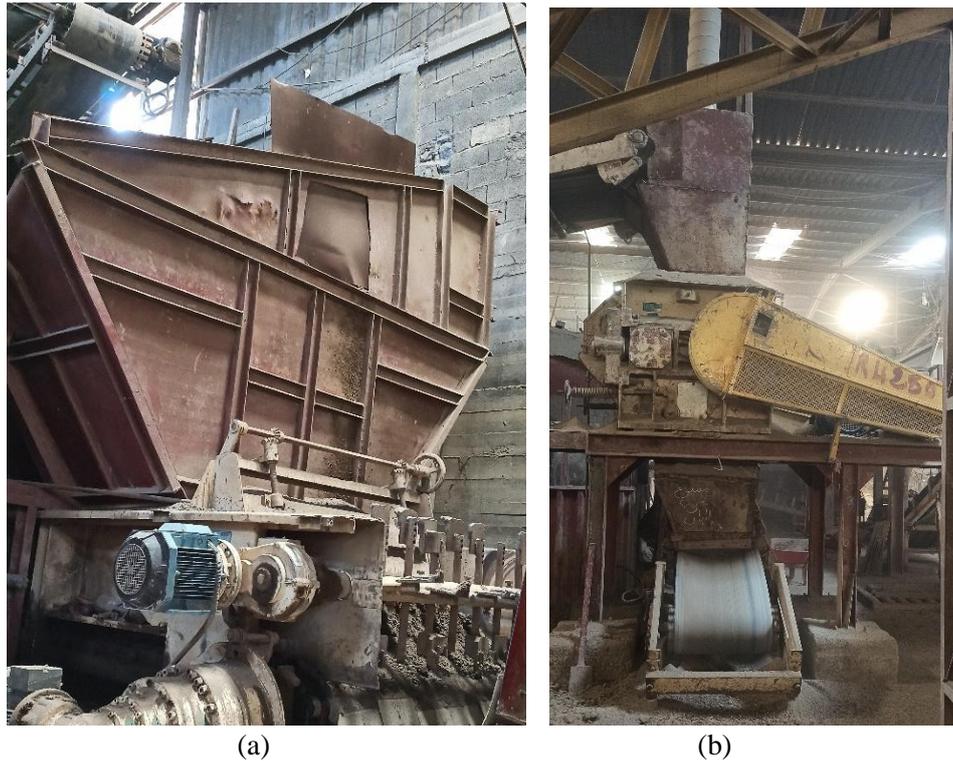


Figure I.10 : Brise mottes piocheur (a) et cylindre désagrégateur (b).

e) Dosage du dégraissant

Le dégraissant utilisés par la briqueterie est le tuf (TF). Ce dernier est tamisé à travers un tamis rotatif (Figure I.11) de 8 mm d'ouverture de mailles (Figure I.12).



Figure I.11 : Tamis rotatif.



Figure I.12 : Aspect du tuf avant (a) et après (b) tamisage.

f) Préparation du mélange

Lors de cette étape, le dégraissant (i.e. TF) est rajouté au mélange argileux en quantité réglable selon la vitesse de la bande du doseur du dégraissant. Le tout est envoyé vers une machine nommée « mouilleur-mélangeur » (Figure I.13) où l'eau est rajoutée en mélangeant à l'aide de pâles tournantes.



Figure I.13 : Mouilleur-mélangeur (a) et mélange obtenu (b).

g) Stockage du mélange

Le mélange humidifié (argiles + dégraissant) est transféré par tapis aux aires de stockage où il va séjourner au minimum pendant 24 heures afin d'homogénéiser son humidité (Figure I.14).



Figure I.14 : Stockage du mélange (argiles + dégraissant).

h) Broyage définitif et moulage

Le broyage final du mélange est réalisé en faisant passer ce dernier à travers un cylindre laminoir dégrossisseur (5 mm) (Figure I.15). Le mélange est transporté par des bandes transporteuses vers la mouleuse (Figure I.16).



Figure I.15 : Cylindre laminoir dégrossisseur.



Figure I.16 : Mouleuse.

Le moulage consiste à comprimer sous vide la pâte argileuse et à la faire sortir à travers un moule dit « filière » sous forme de boudins, qu'une machine coupeuse vient découper en plusieurs briques de dimensions bien définie (Figure I.17). Ces briques vont être chargés sur des chariots métalliques, puis dans le séchoir.

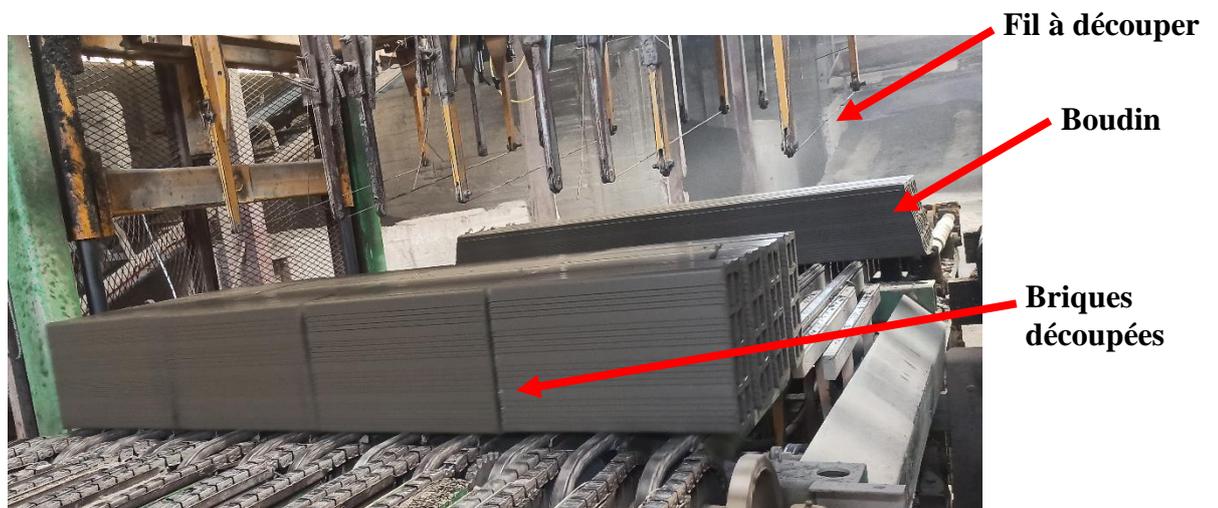


Figure I.17 : Découpage des boudins en briques.

i) Séchage

Afin d'éliminer l'eau et d'y mettre fin à la malléabilité des produits, les briques crues sont introduites dans un séchoir (Figure I.18). L'opération de séchage est effectuée selon un cycle préalablement établi. Celui-ci doit permettre l'évacuation de presque la totalité de l'eau dans un temps minimum et sans causer aucun dommage au produits.



Figure I.18 : Acheminement des briques crues vers le séchoir.

j) Cuisson

Une fois secs, les produits vont subir un traitement thermique dans un four tunnel (Figures I.19 et I.20). Ainsi la cuisson donnera aux briques leur aspect final en matière de coloration et de caractéristiques physico-mécaniques.



Figure I.19 : Acheminement des briques séchées vers le four.



Figure I.20 : Ouverture automatique du four après cuisson des briques.

k) Conditionnement

Ce procédé commence à partir de la sortie des briques du four. Une fois prêtes, les briques sont transportées à l'aide de wagons vers un lieu où elles seront superposées les unes au-dessus des autres sur des plateformes en bois appelée « palette » et maintenues par des ceintures en plastique afin de faciliter leur transport (Figure I.21).



Figure I.21 : Briques cuites conditionnées.

I.4. Valorisation des déchets en construction

La protection de l'environnement et la gestion de ressources sont deux problème majeur auxquels le monde fait face spécialement en notre époque que ce soit sur le plan économique ou écologique puisqu'il faut gérer les ressources à utiliser et les déchets qui en résultent.

La solution adéquate à cette équation possède pour nom la valorisation des déchets, une manière très efficace pour préserver les ressources naturelles et l'environnement.

I.4.1. Définition réglementaire des déchets

Selon la loi N° 01-19 du 12 décembre 2001, parue au journal officiel de la République Algérienne Démocratique et Populaire du 15 décembre 2001 portant sur « La gestion, le contrôle et l'élimination des déchets », on entend par déchet « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et plus généralement toute substance ou produit et tout bien meuble, dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou d'éliminer » [27]

I.4.2. Types de déchets valorisés en construction

Les déchets de construction qui sont à la fois lourds et volumineux, à travers le monde entier, ne cessent de se produire en des quantités énormes. En effet, de grandes surfaces de terrain sont immobilisées par les déchets stockés ce qui engendre la réduction des disponibilités des terrains ainsi que la pollution de l'environnement avec toutes ses conséquences. De nombreux produits

secondaires et déchets résiduels peuvent remplacer des matières premières naturelles ainsi qu'une large gamme de matériaux de construction.

Parmi les sous-produits et déchets utilisés en construction ce qui suit.

I.4.2.1. Laitiers de haut fourneau

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits de l'industrie sidérurgique qui sont générés lors de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux. Les laitiers sont formés de constituants non ferreux, de fondants et de cendres de coke. Leur composition en oxydes et leur structure vitreuse obtenue par trempe à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'ajout dans les ciments, dans la construction des couches de base, dans la fabrication des briques....

I.4.2.2. Cendres volantes

Les cendres volantes sont également valorisées dans les matériaux de construction. Elles constituent un produit minéral pulvérulent résultant de la combustion du charbon pulvérisé. Elles résultent du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques, qui utilisent du charbon broyé comme combustible en présence ou non de matériaux de co-combustion.

I.4.2.3. Mâchefer

Le mâchefer regroupe les résidus de la combustion de la houille dans les centrales électriques anciennes. Il contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Le mâchefer est utilisé principalement pour la fabrication des blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé. [28]

I.4.2.4. Boues rouges

Les boues rouges sont des déchets insolubles issus de l'extraction de l'alumine qui nécessite de la soude, et de la bauxite qui donne cette couleur rouge à ces boues. Elles sont composées de plusieurs métaux lourds tels que l'arsenic, le fer, le mercure, la silice et le titane. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules. Chauffées à des températures de 1260 à 1310 °C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la

composition de bétons de résistances convenables. [29]

I.4.2.5. Béton récupéré

Les bétons issus de la déconstruction peuvent être réutilisés pour créer des granulats recyclés. Ils pourront être mélangés à des granulats naturels pour créer de nouveaux matériaux de construction.

I.4.2.6. Verre de récupération

Les déchets de verre sont utilisés comme matières premières en tant que substitut d'agrégat dans le béton et les chaussées. La poudre de verre, quant à elle, peut être utilisée comme additifs dans l'industrie céramique. [30]

I.4.2.7. Sciure de bois

Le bois est utilisé dans l'industrie et dans la menuiserie. Il génère une grande quantité de déchets. L'utilisation de copeaux de bois en construction contribue à valoriser certains sous-produits de l'industrie du bois. [31]

I.4.2.8. Marbre

Le marbre est un calcaire (sous forme de calcite) compact, parsemé de fissures remplies de matières diversement colorées et dont certaines variétés sont très pures. Le déchet du marbre a été recyclé avec succès dans la confection des bétons hydrauliques en substitution du sable ou du gravier et ce à des différentes proportions. [32]

I.4.2.9. Céramique

En fonction de leur composition chimique et de la température de cuisson, les matériaux céramiques disposent de propriétés spécifiques qui font varier leur usage. La céramique est le plus souvent constituée d'alumine, de kaolin ou de silice. Ces matières premières sont transformées sous l'effet de températures élevées. Cette cuisson apporte aux produits une très grande solidité et leur permet de résister à l'usure et à la chaleur. Les céramiques disposent aussi de véritables propriétés isolantes, solidité et résistance à l'usure, résistance à la chaleur qui les rendent intéressantes pour une valorisation dans les matériaux de construction.

Chapitre II
Matériel et méthodes

II.1. Introduction

L'objectif de ce travail est la valorisation d'un déchet de céramique dans les briques de terre cuite. Cela a été réalisé à l'échelle laboratoire, par la confection de briquettes, au niveau du Centre d'Études et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction (CETIM), qui se trouve à la wilaya de Boumerdès.

Ce travail se divise en deux parties. La première partie consiste en la préparation et la caractérisation des matières premières entrant dans la formulation des briques de terre cuite de la briqueterie SARL ELBARAKATE ainsi que le déchet de céramique qui va être valorisé. La seconde partie est la confection de briquettes à base de déchets ainsi que leurs caractérisations en les comparant à des briquettes témoins.

A noter que la majorité des analyses et des essais ont été effectués au niveau du CETIM.

II.2. Présentation, préparation et techniques expérimentales de caractérisation des matières premières

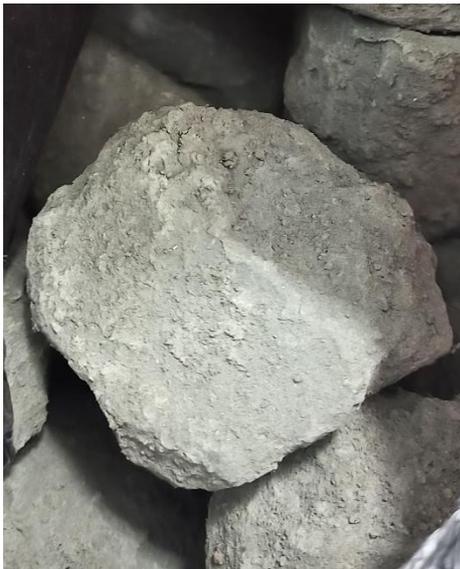
II.2.1. Présentation et préparation des matières premières

Les matières premières utilisées pour la confection des briquettes sont les suivantes (Figure II.1) :

- Argile grise (AG) et argile jaune (AJ) : elles proviennent de la carrière de Benrahmoune, Boumerdès.
- Tuf (TF) : il provient de la carrière de Thénia, Boumerdès.
- Déchet de céramique : il est évacué par la faïencerie « SARL CERAMIQUE BOUMERDES » qui se trouve aux Issers, Boumerdès.

Les prélèvements des matières premières, pour la caractérisation et la valorisation, ont été effectués manuellement dans des sacs en plastique.

Chaque matière première a été concassée, séchée à 105°C puis broyée avant les étapes de caractérisation et de valorisation.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.1 : Aspect des matières premières.

(AG (a), AJ (b), TF (c), DC (d)).

II.2.2. Techniques expérimentales de caractérisation des matières premières

II.2.2.1. Teneur en humidité [33]

La teneur en humidité (H) permet la détermination de la quantité d'eau existante dans l'échantillon. L'expérience (Figure II.2) consiste à introduire dans un creuset, préalablement séché et pesé (a), une masse d'échantillons (b). L'ensemble est séché dans une étuve à 105°C (c). Après 24h, l'ensemble sec est retiré de l'étude et est pesé. Connaissant la masse initiale et la masse finale, la teneur en humidité est calculée selon l'équation II.1.

$$H(\%) = 100 \times \frac{m_r - m_s}{m_s - m_v} \dots\dots \text{(Equation II.1)}$$

Avec :

m_v : masse du creuset vide (g);

m_r : masse du creuset contenant l'échantillon avant séchage (g);

m_s : masse du creuset contenant l'échantillon après séchage (g).

L'expérience est répétée 03 fois pour chaque échantillon.

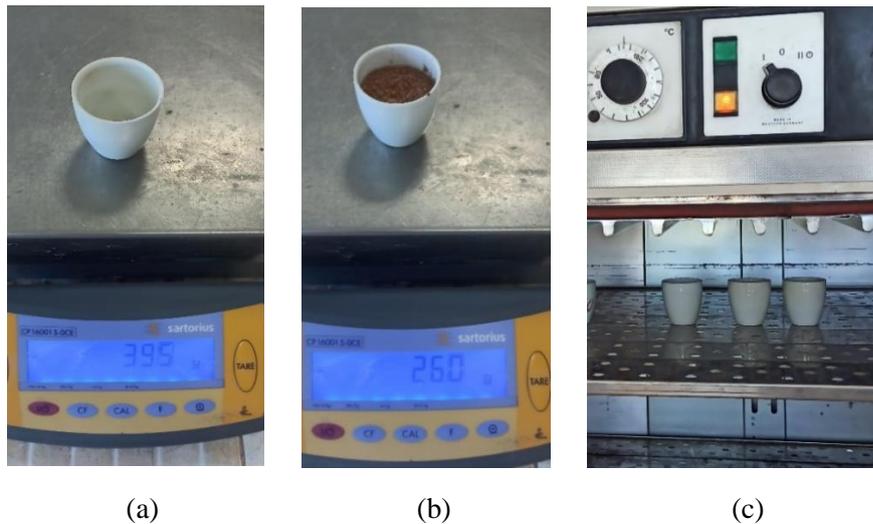


Figure II.2 : Etapes de détermination de la teneur en humidité.

II.2.2.2. Masse volumique apparente

Le protocole de détermination de la masse volumique apparente (Figure II.3) consiste en la pesée un récipient vide d'un volume d'un litre (a). Ce dernier est ensuite rempli à ras bord avec l'échantillon à analyser (b) et araser à l'aide d'une règle. Enfin, le récipient rempli est pesé (c).

Le calcul de la masse volumique apparente s'opère par l'équation II.2.

$$\rho_a = \frac{m_1 - m_0}{v} \dots\dots \text{(Equation II.2)}$$

Avec :

m_0 : masse de récipient à vide (g);

m_1 : masse de récipient + masse d'échantillon (g);

v : volume de récipient (mL).

L'expérience est répétée 03 fois pour chaque échantillon.

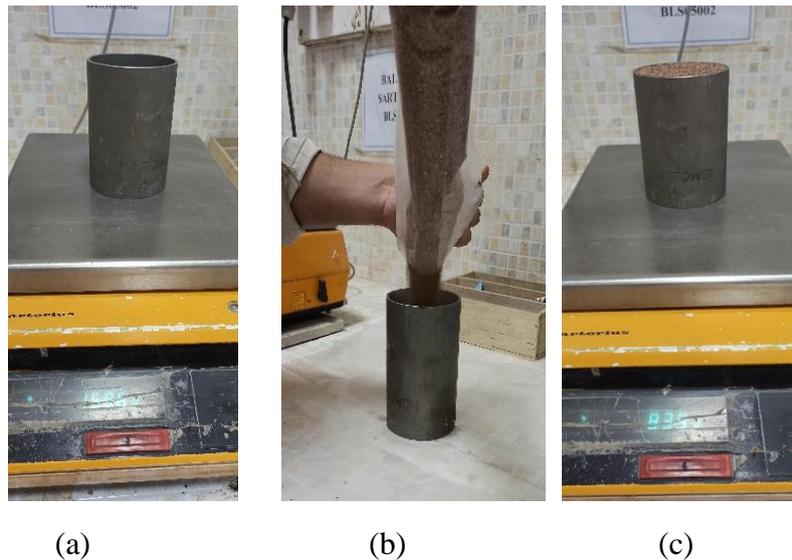


Figure II.3 : Etapes de détermination de la masse volumique apparente.

II.2.2.3. Masse volumique réelle ou absolue

L'expérience (Figure II.4) consiste à remplir un densimètre le Chatelier avec de l'eau jusqu'à la graduation 0 ml (a) et le mettre dans un bain thermostaté (c) à une température de $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ pendant 1h. Une masse d'échantillon est pesée et introduite dans le densimètre soigneusement (b). Secouer le densimètre afin de dégager les bulles d'air emprisonnées dans l'échantillon. Ensuite, remettre le densimètre dans le bain thermostatique (c) pendant 1h et lire le déplacement du liquide.

La masse volumique réelle de l'échantillon est calculé par l'équation II.3.

$$\rho_r = \frac{m}{V} \dots\dots \text{(Equation II.3)}$$

m : masse de l'échantillon (g);

V : le déplacement en volume (ml);

ρ_r : masse volumique réelle (g/ml);

La masse volumique de l'eau ρ_w est égale à 1 g/ml .

L'expérience est répétée 03 fois pour chaque échantillon.

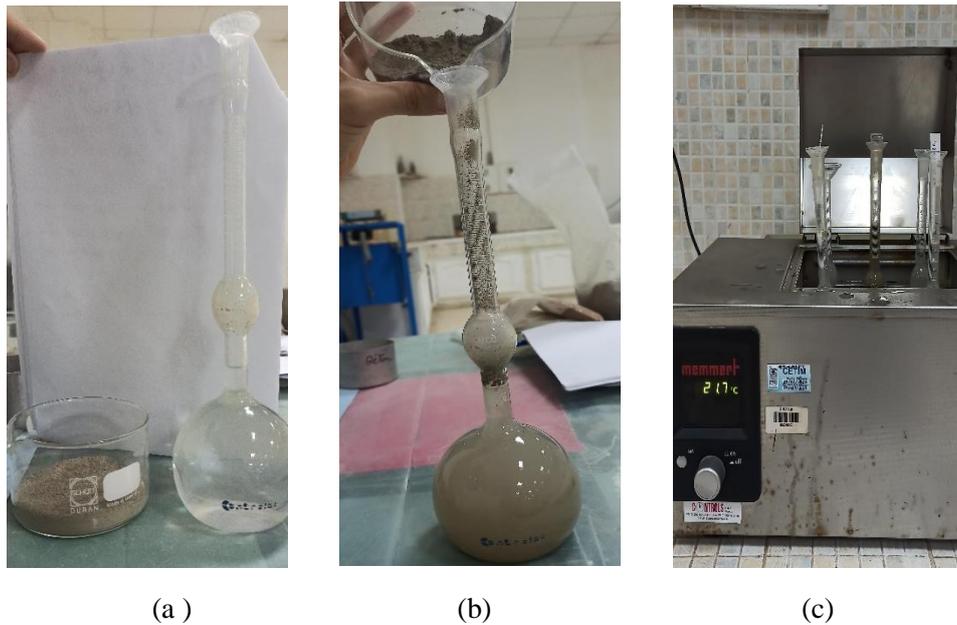


Figure II.4 : Mode opératoire de la masse volumique absolue.

II.2.2.4. Analyse granulométrique par tamisage

L'expérience consiste à constituer une colonne de tamis (Figure II.5), propres et secs pesés préalablement, dont l'ouverture des mailles est respectivement de bas en haut (en mm) [34] : **0,063 – 0,125 – 0,250 – 0,500 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 - 63 – 125**. Peser 1,0 kg de matériau à analyser sec puis, verser le matériau sec sur la colonne. Après 5 minutes d'agitation sur la tamiseuse de marque CONTROLS modèle D409/S (Figure II.5), arrêter cette dernière et séparer avec soin les différents tamis et peser chaque tamis contenant le refus ainsi que le fond. Noter leurs masses respectives (m_i).

A partir des résultats obtenus déduire le refus partiel de chaque tamis (R_i) et calculer les refus cumulés pour tous les tamis utilisés.

Le tamisât cumulé est donné par l'équation II.4.

$$T = 100 - R_c \dots\dots\dots \text{(Equation II.4)}$$

T : tamisât cumulé (%)

R_c : refus cumulé (%)



Figure II.5 : Tamiseuse de marque CONTROLS modèle D409/S.

II.2.2.5. Perte au feu [35]

La perte au feu (PAF) est mesurée sur un échantillon préalablement séché et broyé. Ce dernier est introduit dans un four à moufle à 950°C. La pesée avant et après calcination permet de déterminer la PAF exprimée en pourcentage.

$$PAF (\%) = 100 \times \frac{m_s - m_c}{m_s} \dots\dots\dots \text{(Equation II.5)}$$

Avec :

m_s : masse du creuset + masse de l'échantillon sec (g);

m_c : masse du creuset + masse de l'échantillon calciné (g).

II.2.2.6. Potentiel d'hydrogène

Le potentiel d'hydrogène (pH) a été mesuré (Figure II.6) en pesant 10 g de l'échantillon à analyser (a) et en lui ajoutant 50 ml d'eau. Le mélange est agité pendant 1h (b). La mesure du pH a été effectuée en utilisant un pH-mètre HI 2210 HANNA Instruments (c). L'expérience est répétée 02 fois pour chaque échantillon. Ces essais ont été réalisés au niveau des laboratoires du département de Chimie (FS-UMBB, Boumerdès).

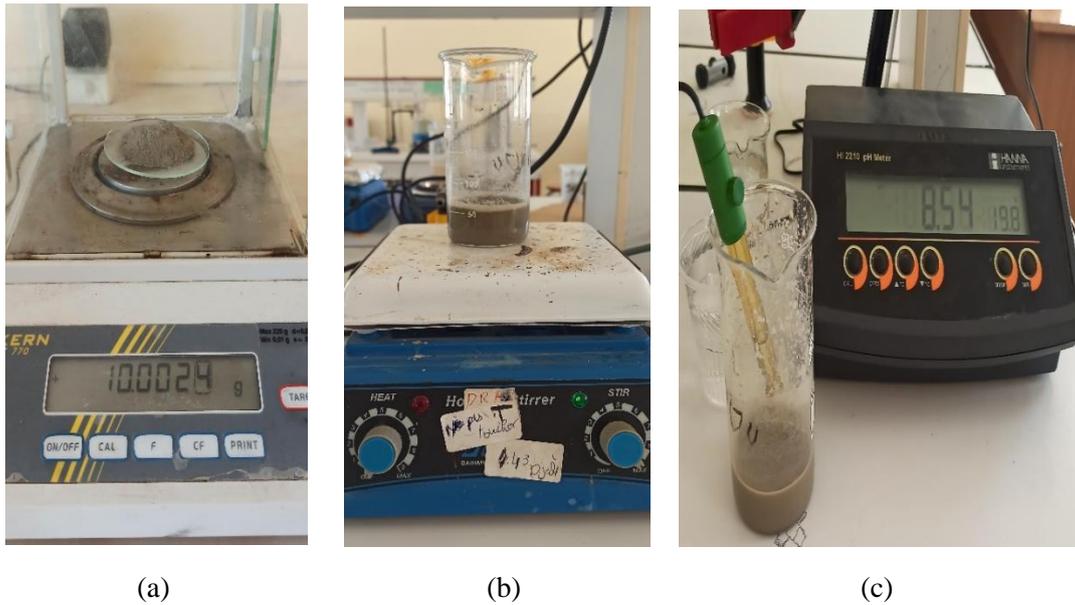


Figure II.6 : Protocole de mesure du pH.

II.2.2.7. Teneur en carbonate [36]

L'essai consiste à déterminer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé sous l'action d'acide chlorhydrique (HCl) en excès par un échantillon préparé pour l'essai. L'appareil (Calcimètre de Bernard (Figure II.7)). Le réactif (HCl), l'échantillon à analyser et l'étalon de calcite (CaCO_3) sont disposés à côté de l'appareil. Peser 300 mg d'échantillon et l'introduire au fond de la fiole conique. Introduire délicatement 8 ml du réactif HCl dans le doigt de la fiole au moyen de la pipette courbe en veillant à ce qu'aucune trace d'acide ne s'écoule hors de l'appendice. Fermer la fiole en la raccordant au Calcimètre. Ajuster le niveau du liquide dans le tube au niveau 0, puis fermer le robinet du Calcimètre. Incliner la fiole tenue au moyen de la pince en bois ou en matière plastique pour faire couler le réactif acide sur la prise d'essai. Agiter en maintenant l'eau dans le tube gradué et dans l'ampoule sensiblement au même niveau. Lorsque le niveau dans la colonne s'est stabilisé, soit après 5 à 6 secondes, procéder à la lecture (volume V_1 en ml). Procéder immédiatement après à l'attaque dans les mêmes conditions de 300 mg de calcite pure et procéder à la lecture (volume V_0 en ml). La teneur en pourcentage de CaCO_3 se calcul par l'équation II.6.

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{V_0}{V_1} \times 100 \dots\dots \text{(Equation II.6)}$$

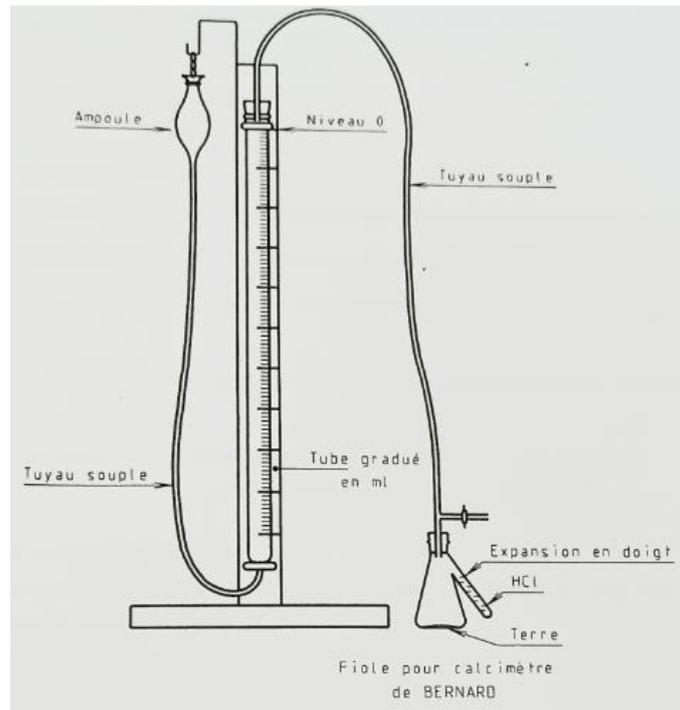


Figure II.7 : Calcimètre de Bernard [36].

II.2.2.8. Surface spécifique Blaine [37]

La surface spécifique Blaine (SSB) est une méthode de mesure de la finesse des poudres, en utilisant un perméabilimètre de Blaine de marque Toni Technik - ToniLAB (Figure II.8 (c)). L'analyse commence par une étape préalable qui consiste à déterminer la masse exacte de poudre (i.e. échantillon) nécessaire à l'expérience (Figure II.8 (a)). Le cylindre est rempli par l'échantillon pour obtenir une hauteur de couche de poudre fixée (Figure II.8 (b)). Dès lors, la cellule est placée sur le porte cellule, étanchéifié par de la graisse. Dans le circuit prévu à cet effet, un fluide visqueux est aspiré jusqu'au trait. Ensuite, la mesure du temps mis par le liquide pour descendre d'une certaine hauteur, aspirant donc à travers l'échantillon une quantité d'air fixée. Les données de l'expérience (masse poudre, hauteur cylindre, temps, température, pression, humidité...) permettent de calculer la valeur de la surface spécifique Blaine par l'équation II.7.

$$SSB = \frac{k\sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho(1-e) \sqrt{10 \eta}} \dots\dots\dots \text{(Equation II.7)}$$

Avec :

SSB : surface spécifique Blaine (cm²/g).

K : constante de l'appareil (2,852).

e : porosité du lit ou de l'échantillon (0,5).

t : temps mesuré en secondes (s).

ρ : masse volumique réelle de l'échantillon (g/cm^3).

η : viscosité de l'air à la température de l'essai (Pa.s).

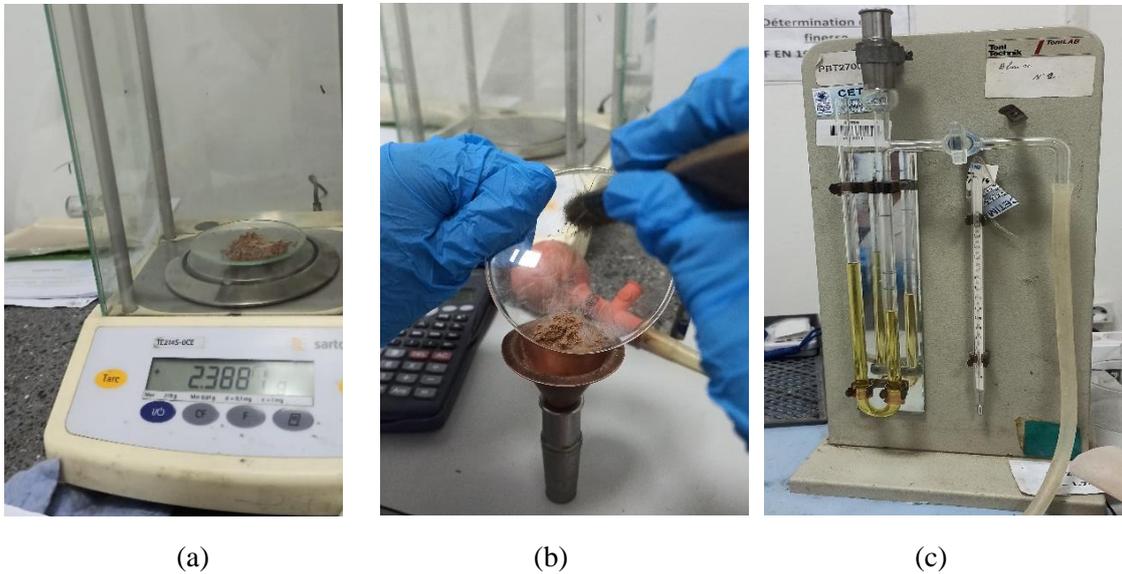


Figure II.8 : Mode opératoire de la détermination de la SSB.

II.2.2.9. Analyse par fluorescence de rayons X (FRX) [35]

L'appareil utilisé est un PANalytical Magix Pro (Figure II.9). Une pastille, préparée par compression, contenant l'échantillon est introduit dans l'appareil pour analyse. Les résultats obtenus, sous forme d'oxydes, sont exprimés en pourcentage massique de matière sèche. Le logiciel utilisé pour le traitement des données est Super Q.



Figure II.9 : Spectromètre à fluorescence X PANalytical Magix Pro.

II.2.2.10. Analyse par diffraction de rayons X (DRX)

La détermination des phases minéralogiques dans les différentes matières premières a été faite, par un diffractomètre PANalytical XPERT-PRO (CuK α = 1,5418 Å ; 45kV, 40 mA) (Figure II.10). Le logiciel d'analyse utilisé est Xpert Data Collector. Les diffractogrammes obtenus sont exploités par le logiciel HighScore.



Figure II.10 : Diffractomètre des rayons X PANalytical XPERT-PRO.

II.2.2.11. Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'analyse par microscopie électronique à balayage a été effectuée en utilisant un microscope électronique à balayage (MEB) de marque QUANTA 650 W (Figure II.11). L'analyse au MEB des différents échantillons a été réalisée au niveau du CRD-SONATRACH.



Figure II.11 : Microscope électronique à balayage QUANTA 650 W.

II.3. Valorisation des déchets de céramique dans la formulation de briquettes et caractérisation du produit fini

II.3.1. Confection des briquettes

Les briquettes ont été confectionnées en incorporant différents pourcentages de DC en remplacement d'une partie du TF. Quatre (04) formulations ont été choisies : un mélange de référence non substitué et 3 autres mélanges dans lesquels 6, 12 et X % du mélange (MA + TF) ont été remplacés par le DC. La formulation témoin est notée F1. Les formulations confectionnées avec 6, 12 et X % de DC sont notées F2, F3 et F4 respectivement. A noter que la valeur X correspond à une valeur exacte variant entre 15 et 20% utilisée par la briqueterie est qu'il n'est pas possible de mentionner dans le mémoire pour des raisons de confidentialités.

La confection des briquettes suit les étapes suivantes :

- **Façonnage** : le mélange argileux (MA) composé de AJ et de AG est versé dans un récipient. Le TF, pour mélange F1, et le mélange (TF + DC) pour F2, F3 et F4 sont rajoutés au MA.

- **Moulage** : le mélange obtenu est introduit en petite quantité dans l'extrudeuse de marque NETZSCH modèle D8672 (Figure II.12) où il est comprimé et formé en boudin.



Figure II.12 : Extrudeuse NETZSCH modèle D8672.

- **Découpage** : le boudin obtenu lors de l'étape précédente est découpé en briquettes d'une longueur d'environ 7 cm pour les briquettes utilisées pour les analyses chimiques et 12 cm pour les essais mécaniques. Chacune à l'aide d'une découpeuse (Figure II.13).



Figure II.13 : Découpeuse.

- **Séchage** : les briquettes fraîchement préparée sont d'abord séchées à l'air libre pendant 24h puis introduites dans l'étuve pendant 24h à 105°C.
- **Cuisson** : les briquettes sèches sont introduites dans un four pour la cuisson. Pour chaque formulation la cuisson a été effectuée à trois températures différentes : 850°C, 900°C et 950°C. Après cette dernière étapes les briquettes cuites (i.e. produit fini) sont prêtes pour la caractérisation.

II.3.2. Caractérisation du produit fini

II.3.2.1. Absorption, masse volumique et porosité

L'expérience consiste à sécher l'échantillon dans l'étuve pendant 24h à 105°C. L'échantillon est ensuite retiré de l'étuve pour qu'il refroidisse puis pesé (m_s). L'échantillon est plongé dans l'eau pendant au moins 24h puis retiré de l'eau et pesé sur une balance hydrostatique (m'_a). L'eau excédentaire est essuyée, à l'aide d'un chiffon, puis pesée encore une fois sur la balance (m_a). La masse volumique (ρ), l'absorption (abs) et la porosité (ε) sont calculées respectivement par les équations II.8 , II.9, II.10 respectivement.

$$\rho = \frac{m_s}{m_a - m'_a} \text{ (g/cm}^3\text{)} \dots\dots\dots \text{(Equation II.8)}$$

$$abs = \frac{m_a - m_s}{m_s} \times 100 \% \dots\dots\dots \text{(Equation II.9)}$$

$$\varepsilon = \frac{m_a - m_s}{m_a - m'_a} \times 100 \% \dots\dots\dots \text{(Equation II.10)}$$

II.3.2.2. Perte de masse à la cuisson

La perte de masse à la cuisson (P_c) est déterminée en pesant les échantillons (i.e. briquettes) après séchage et après cuisson en notant leurs masses respectives.

$$P_c(\%) = \frac{m_s - m_c}{m_s} \times 100 \dots\dots\dots \text{(Equation II.11)}$$

Avec :

m_s : masse de l'échantillon après séchage (g).

m_c : masse de l'échantillon après cuisson (g).

II.3.2.3. Retrait linéaire

Le retrait linéaire a été mesuré à l'aide d'un pied à coulisse en prenant les longueurs des briquettes avant séchage, après séchage et après cuisson.

a) Retrait dû au séchage

Le retrait dû au séchage est calculé par l'équation II.12.

$$RL_S(\%) = \frac{L_H - L_S}{L_S} \times 100 \dots\dots\dots \text{(Equation II.12)}$$

Avec :

RL_S : retrait linéaire au séchage (longueur).

L_H : longueur de l'échantillon à la confection (cm).

L_S : longueur de l'échantillon après séchage (cm).

b) Retrait dû à la cuisson

Le retrait dû à la cuisson est calculé par l'équation II.13.

$$RL_c(\%) = \frac{L_s - L_c}{L_s} \times 100 \dots\dots\dots \text{(Equation II.13)}$$

Avec :

RL_c : retrait linéaire dû à la cuisson (longueur).

L_s : longueur de l'échantillon après séchage (cm).

L_c : Longueur de l'échantillon après cuisson (cm).

II.3.2.4. Absorption capillaire

L'expérience (Figure II.14) consiste à peser un échantillon (i.e. briquette) et à noter sa masse (m_1) (a). L'échantillon est ensuite placé dans un bac contenant de l'eau (b), de sorte que l'eau ne la touche que d'une hauteur de presque de 5mm de la profondeur du bac. Après 1 minute de temps, retirer l'échantillon, le peser et noter sa masse (m_2) (c). L'augmentation de la masse de l'échantillon en fonction du temps se calcule suivant l'équation II.14.

$$C_b \left(\frac{g}{cm^2 \sqrt{min}} \right) = \frac{100 \times (m_1 - m_2)}{S\sqrt{t}} \dots\dots\dots \text{(Equation II.14)}$$

Avec :

$m_1 - m_2$: masse d'eau absorbée (g).

t : temps (min).

S : Surface de la face sciée (cm²).

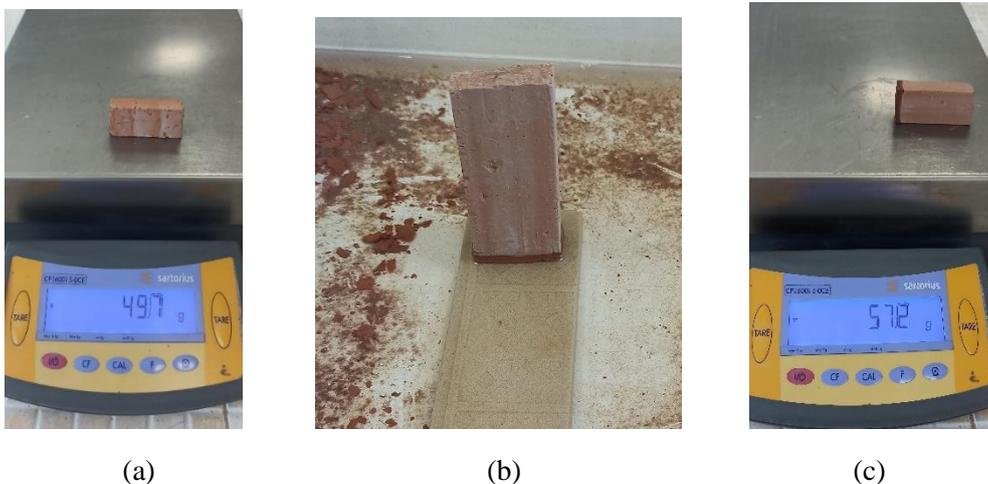


Figure II.14 : Protocole de l'absorption capillaire.

II.3.2.5. Essai d'éclatement

Consiste à examiner d'abord attentivement les briquette et repérer les éclatements qui peuvent déjà exister. Immerger les briquettes dans de l'eau portée à au moins 80 °C puis à l'ébullition, et les y maintenir pendant 3 h. Ensuite, retirer les produits de l'eau et les examiner. Enfin, noter, le cas échéant, le nombre et la dimension des nouveaux éclatements.

II.3.2.6. Essai de flexion

La résistance en flexion trois points est mesurée sur les briquettes à l'aide d'une presse GABBRIELLI CRAB 424 (Figure II.15). L'appareil est pourvu d'un dispositif de flexion constitué de deux rouleaux d'appui en acier, distants l'un de l'autre de 100 mm, et d'un rouleau de mise en charge en acier de même diamètre, équidistant des deux premiers. La vitesse de montée en charge est constante. Le test de flexion (vitesse : 1,2 dyne/s) casse les éprouvettes en deux parties et les valeurs des résistances sont données par le système d'exploitation en Newton par centimètre carré (N/cm²). Cet essai est peut-être calculé suivant l'équation II.15.

$$R_f = \frac{3}{2} \left(\frac{F \times d}{l \times e^2} \right) \dots\dots\dots \text{(Equation II.15)}$$

Avec :

- F : force appliquée, exprimée en newtons ;
- d : distance entre les deux appuis en millimètres ;
- l : largeur de l'éprouvette en millimètres ;
- e : épaisseur de l'éprouvette en millimètres.



Figure II.15 : Essai de flexion à trois points.

Chapitre III
Résultats et discussions

III.1. Résultats de la caractérisation des matières premières

III.1.1. Teneur en humidité

Les résultats des teneurs en humidité de MA, TF et DC sont représentés sur la Figure III.1. On remarque que ces matières premières ne représentent pas une teneur en humidité élevée ($H < 3\%$) tel que la teneur la plus faible est celle du DC (0,13%). Ces résultats dépendent de la nature de chaque matériau.

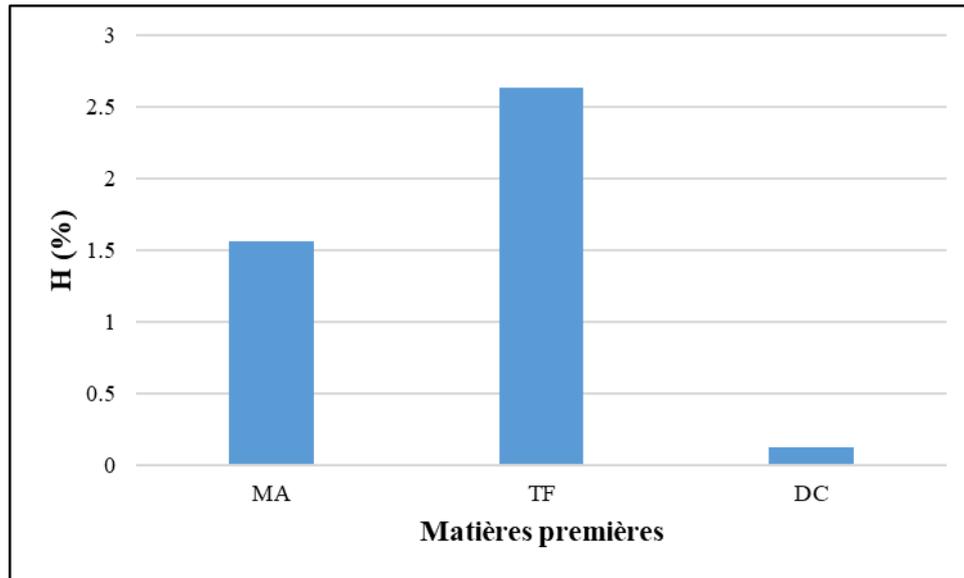


Figure III.1 : Teneurs en humidité des matières premières.

III.1.2. Masse volumique apparente

La Figure III.2 regroupe les masses volumiques apparentes des matières premières. Ces résultats montrent une similitude entre les valeurs obtenus pour MA et DC ($< 1 \text{ g/cm}^3$). Cependant celle du TF est plus importante ($> 2.5 \text{ g/cm}^3$). Ces résultats dépendent de la nature de chaque matériau et sont en accord avec ceux des teneurs en humidité (Partie III.1.1).

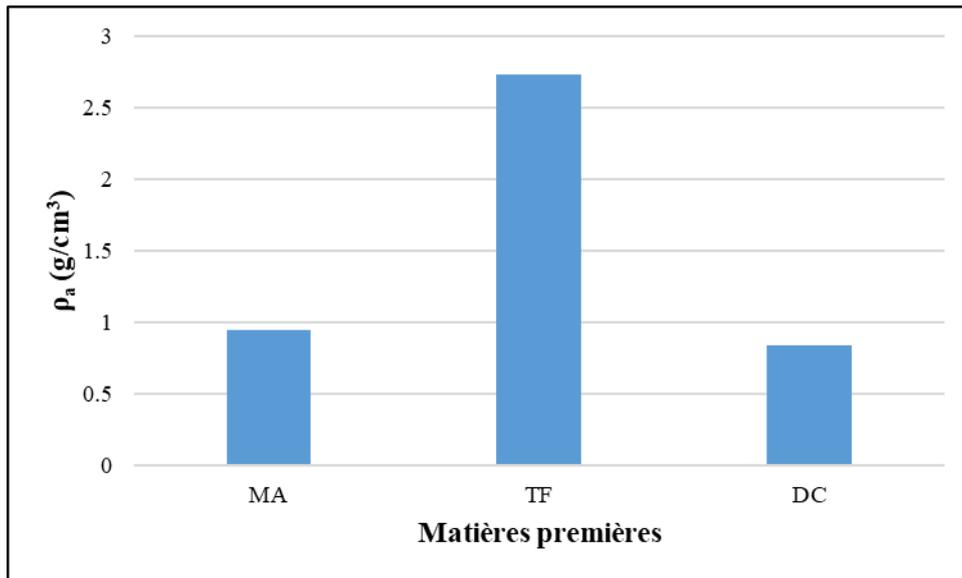


Figure III.2 : Masses volumiques apparentes des matières premières.

III.1.3. Masse volumique réelle

On remarque que la masse volumique réelle de MA et DC sont similaires (Figure III.3) alors que celle du TF est inférieure de 0,1 g/cm³ de celles-ci.

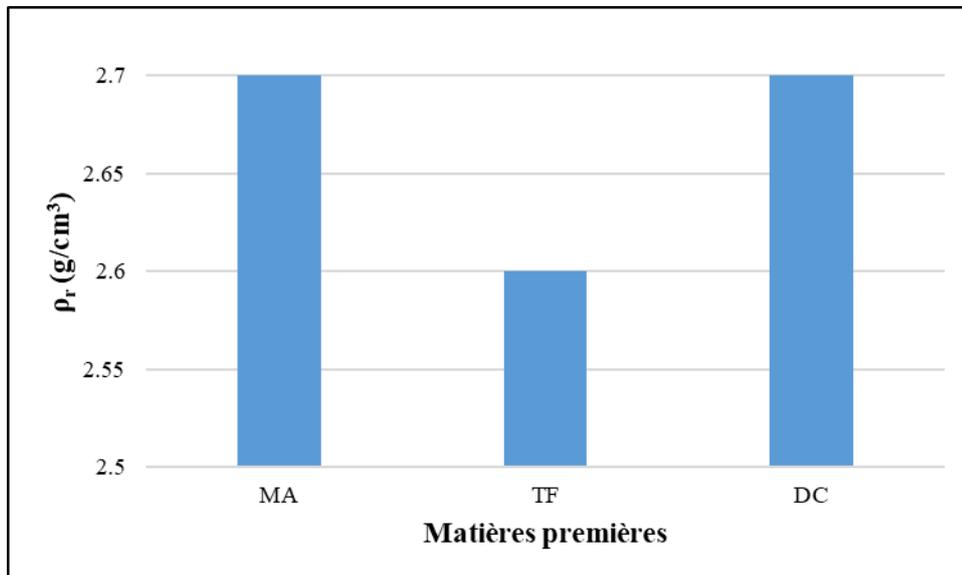


Figure III.3 : Masses volumiques réelles des matières premières.

III.1.4. Analyse granulométrique pas tamisage

Les résultats des analyses granulométriques par tamisage des matières premières sont exprimés par des courbes semi-logarithmiques du tamisât cumulé en fonction du logarithme de la dimension des ouvertures des tamis en valeurs croissantes (Figure III.4). On remarque que la

granulométrie du DC est grandement similaire à celle du TF, alors que celle de MA est plus fine que ces derniers.

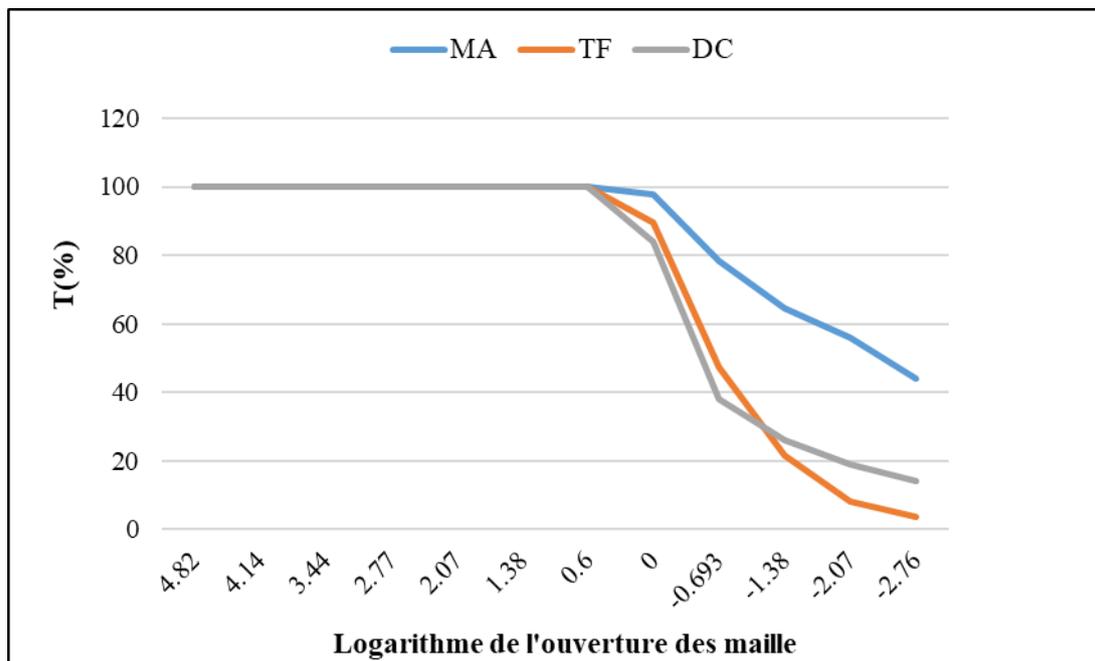


Figure III.4 : Courbes granulométriques par tamisage des matières premières.

III.1.5. Perte au feu

La PAF a été calculée pour les matières premières et les résultats sont représentés sur la Figure III.5. Les MA (AG et AJ) présentent des PAF élevées (> 15%) par rapport à TF et DC qui ont des PAF inférieures à 4%. Cette PAF importante pour les argiles pourrait être expliquée par la teneur en eau élevée de ces échantillons [38], par rapport au DC et au TF. A noter que la PAF permet non seulement l'oxydation de la matière organique mais aussi la décomposition d'autres éléments tels que les carbonates.

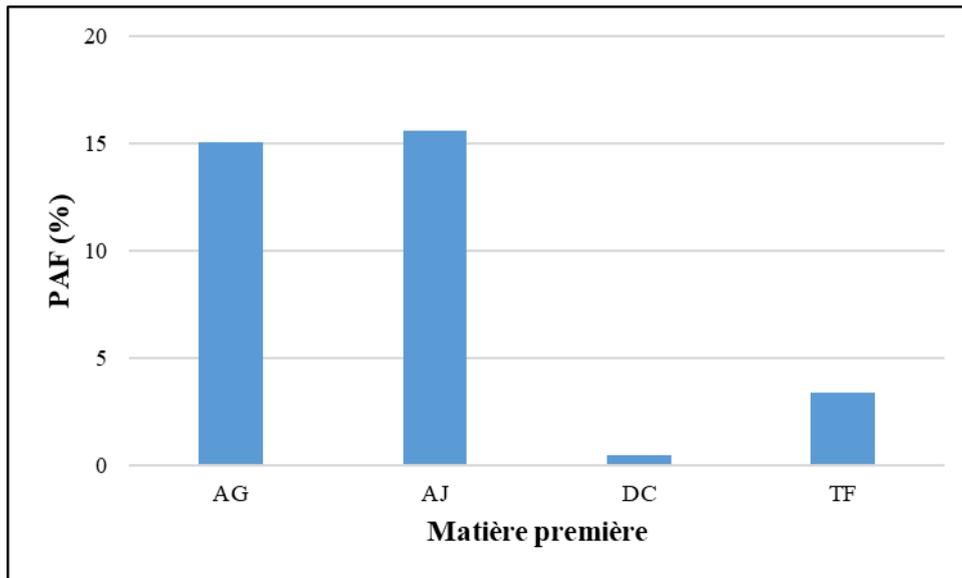


Figure III.5 : PAF des matières premières.

III.1.6. Potentiel d'hydrogène

Les résultats du pH des matières premières étudiées, reportés sur la Figure III.6, montrent leurs caractères basiques. Il faut noter que le DC affiche le degré de basicité le plus élevé par rapport aux deux autres matières (MA et TF) et la MA est composée d'un mélange argileux basique.

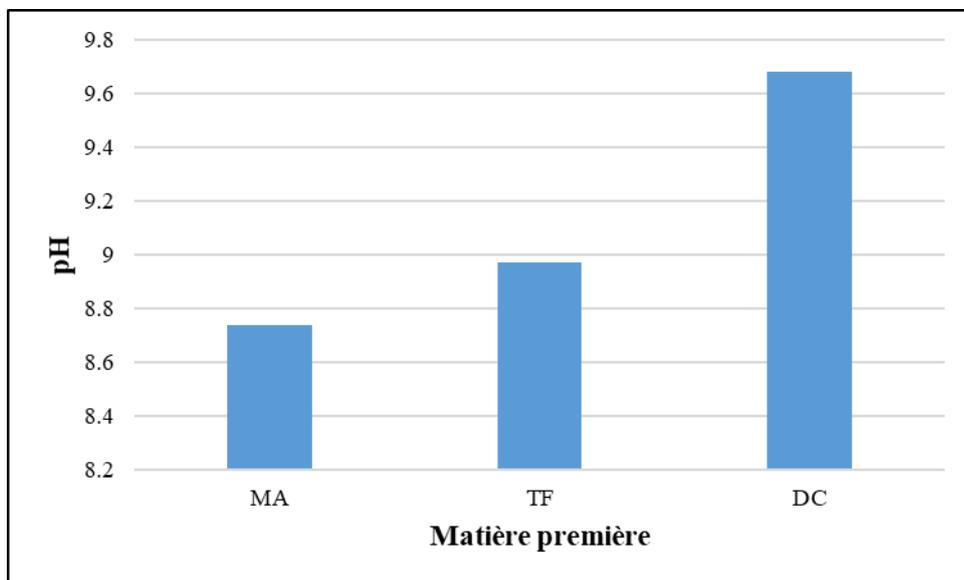
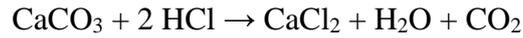


Figure III.6 : pH des matières premières.

III.1.7. Teneur en carbonate

Cet essai permet de mesurer le volume de dioxyde de carbone (CO_2) dégagé par action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3). La réaction de l'échantillon avec l'acide chlorhydrique est exprimée par l'équation suivante :



L'histogramme ci-dessous (Figure III.7) récapitule les résultats illustre les résultats des teneurs en carbonates de calcium de MA, TF et DC respectivement. L'analyse des résultats montrent que le DC et le TF sont classés comme des matériaux non calcaires, puisque la teneur en carbonate de calcium ne dépasse pas les 10%. Par contre pour le MA la teneur en carbonate de calcium est supérieure à 10% ; ce qui permet de la classer comme matériau ou argile calcaire. La présence des carbonates pourrait induire des défauts au cours de la cuisson des briques de cette argile [39].

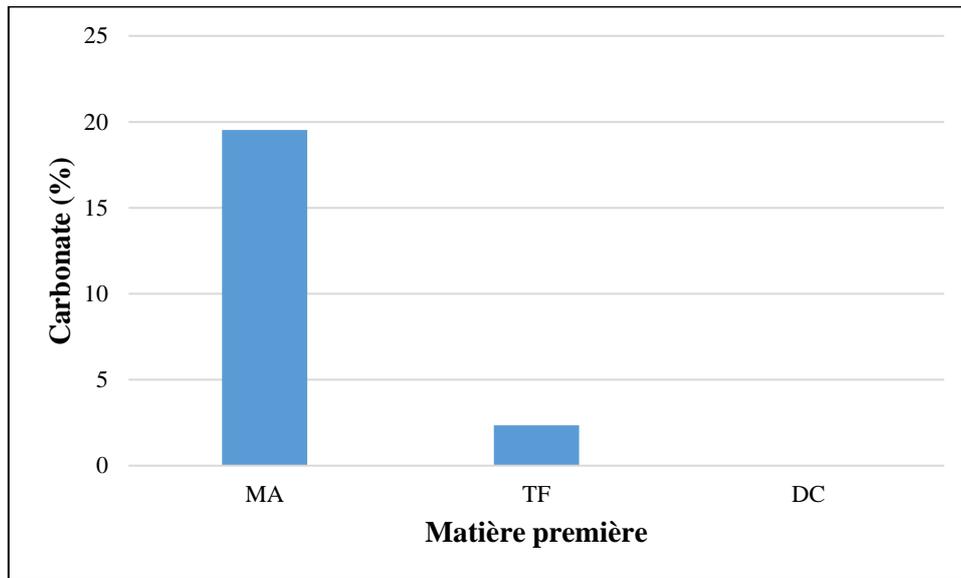


Figure III.7 : Teneurs en calcaire des matières premières.

III.1.8. Surface spécifique Blaine

Selon les résultats des SSB des matières premières de la Figure III.8 on constate que le DC est de loin la matière la plus fine ($7133 \text{ cm}^2/\text{g}$) par rapport aux MA et TF dont les SSB sont aux alentours de $3800\text{-}3900 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Figure III.8). A noter que la SSB ne prend en compte que les volumes des interstices entre les grains de matière. [40]

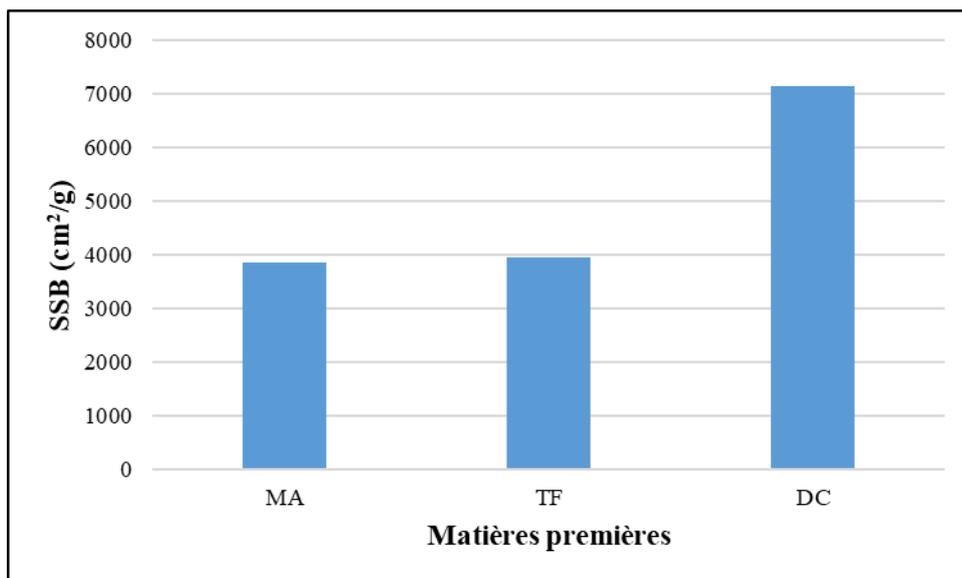


Figure III.8 : SSB des matières premières.

III.1.9. Analyse par fluorescence de rayons X

Les compositions chimiques des matières premières, déterminées par spectrométrie de fluorescence X (FRX), sont récapitulés dans le Tableau III.1. Les échantillons analysés se composent majoritairement de silice. Cette dernière, provient principalement des silicates d'alumine et du quartz. Ils possèdent également d'importantes teneurs en Al_2O_3 et en CaO , liées généralement aux silicates argileux et contribuent à l'obtention d'une bonne plasticité [6]. La présence des oxydes de fer, avec un pourcentage compris entre de 5,38% et 6,84 dans les matières premières étudiées, communique aux briques leur couleur rouge après la phase de cuisson, et ceci provient de l'apparition de pyrite dans la composition minéralogique. La présence d'oxyde de fer dans les argiles et dans le tuf sont proches alors que celle du déchet et légèrement supérieure. D'autres oxydes (Mg, Na, Ti, ...) ont été détectées dans l'analyse chimique de ces échantillons à des teneurs moins importantes.

Tableau III.1 : Résultats quantitatifs de FRX des matières premières.

Echantillon	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	TiO ₂ (%)
AG	46.38	13.36	5.79	13.93	1.73	0.15	1.88	0.81	0.22	0.68
AJ	46.74	13.78	5.60	13.52	1.48	0.01	1.81	0.58	0.22	0.71
DC	59.85	19.74	6.84	6.31	1.40	0.05	3.32	0.95	0.19	0.86
T	61.34	16.47	5.38	3.33	2.91	0.01	3.51	2.88	0.18	0.59

III.1.10. Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

La composition minéralogique des échantillons a été déterminée par la technique de la diffraction des rayons X. Les diffractogrammes des différents échantillons sont présentés sur les Figures III.9, III.10, III.11 et III.12. Les résultats montrent que les 4 échantillons sont composés de quartz et d'albite. La présence de quartz est responsable d'une plasticité assez faible. La présence de kaolinite dans le TF, AG et AJ contribue à une bonne aptitude au façonnage et au séchage des briques [6]. Cependant, la composition minéralogique du AJ et TF contient de la montmorillonite. Ceci peut provoquer des difficultés lors du séchage, à cause du retrait important et de la rétention capillaire. [38]

On remarque une phase amorphe dans AJ, AG et DC qui est quasi absente dans le TF.

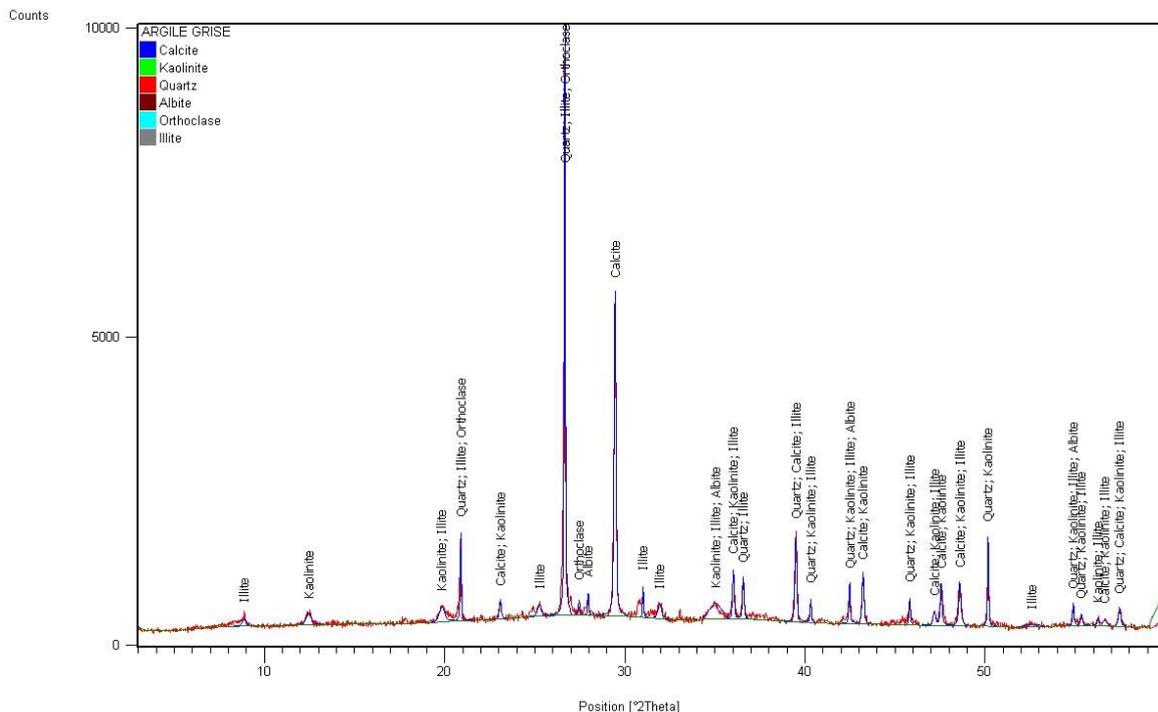


Figure III.9 : Diffractogramme des rayons X de l'échantillon AG.

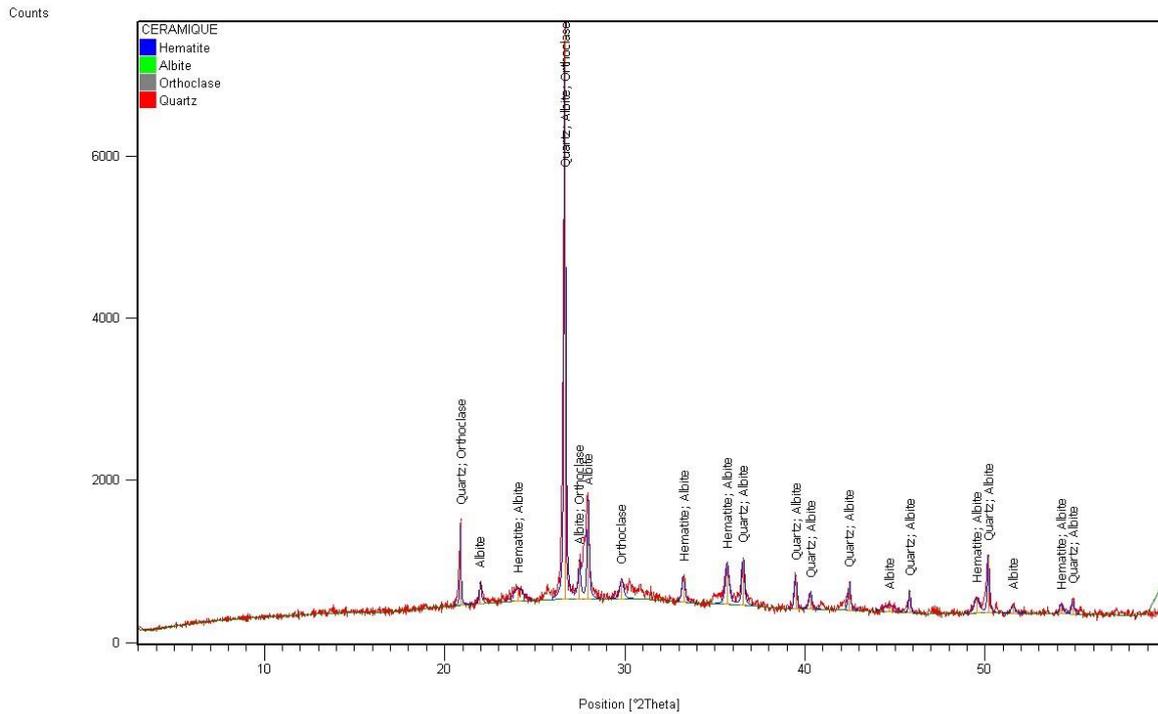


Figure III.12 : Diffractogramme des rayons X de l'échantillon DC.

III.1.11. Microscopie électronique à balayage

Les Figures III.13, III.14 et III.15 montrent les images microscopiques des différents échantillons sous MEB. L'observation microscopique des échantillons montre que la texture est relativement compacte pour MA par rapport à TF et DC. On note la présence de quelques pores et vides dans la structure TF et DC par rapport à MA.

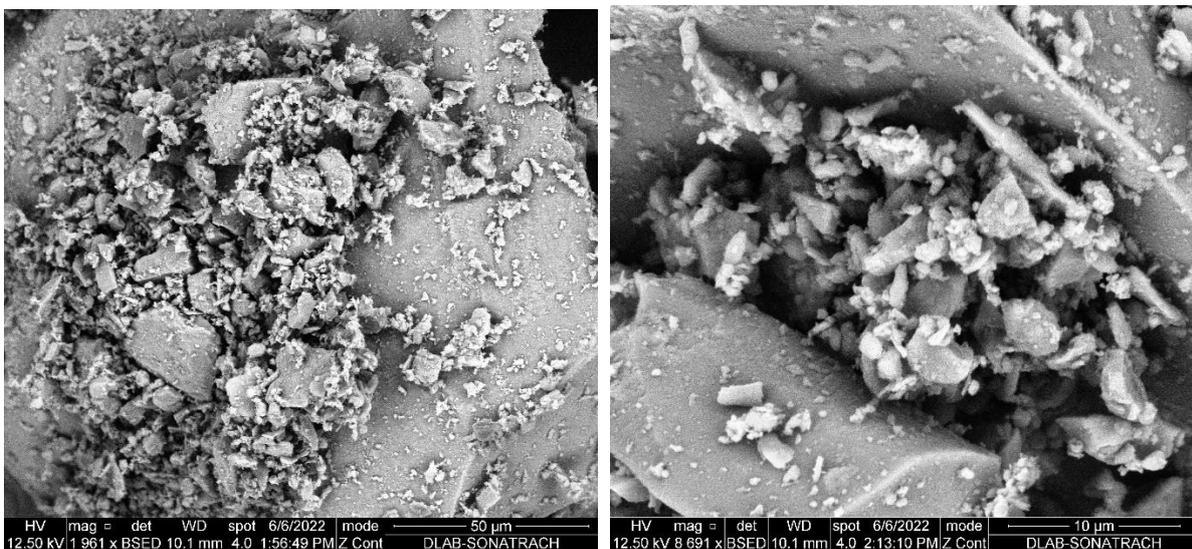


Figure III.13 : Images du TF sous MEB.

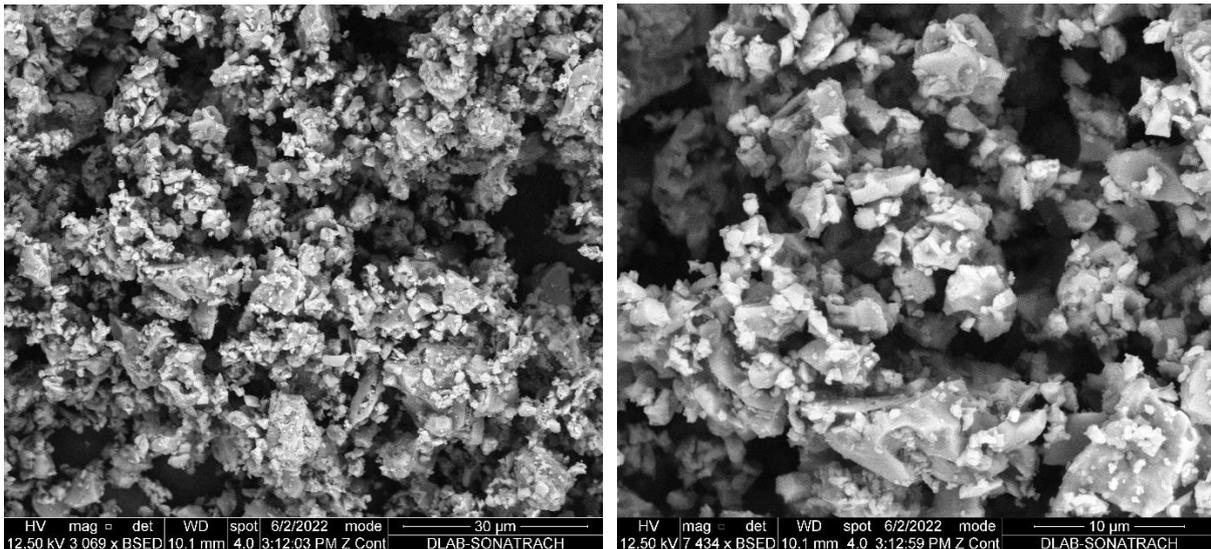


Figure III.14 : Images du DC sous MEB.

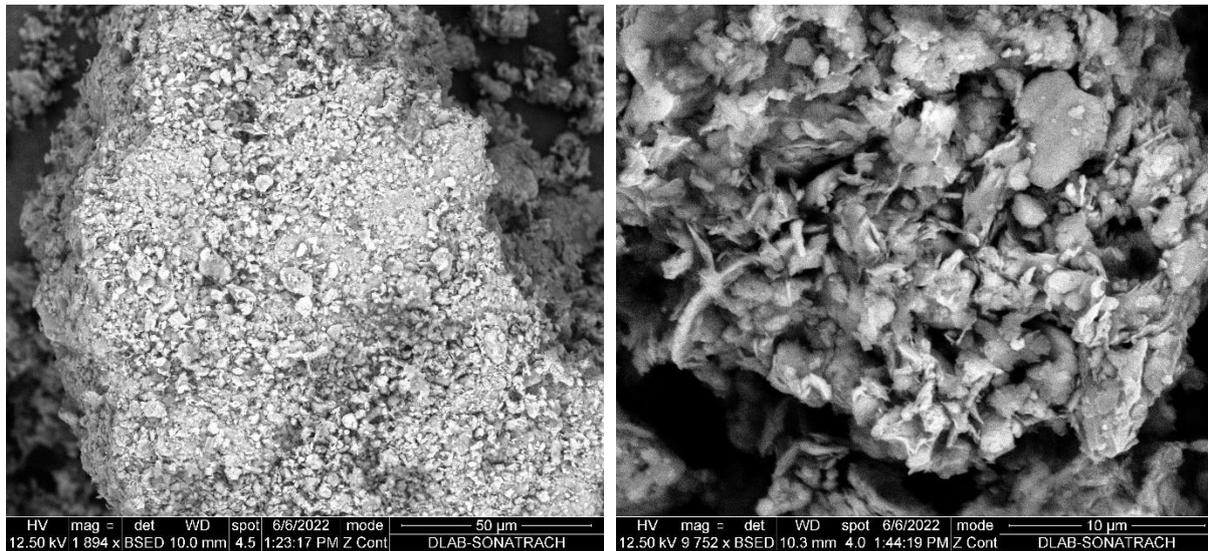


Figure III.15 : Images de MA sous MEB.

III.2. Caractérisation des briquettes

III.2.1. Perte de masse à la cuisson

Les pertes de masse à la cuisson des briquettes cuites à différentes températures sont illustrées sur la Figure III.16. On constate une perte de masse de 5-6% à 850°C et de 12-14% à 900°C et 950°C. Il faut savoir qu'afin de conserver une résistance mécanique satisfaisante, il est préconisé de maintenir la perte de masse de cuisson inférieure à 15%. Ce qui est le cas de toutes les briquettes formulées.

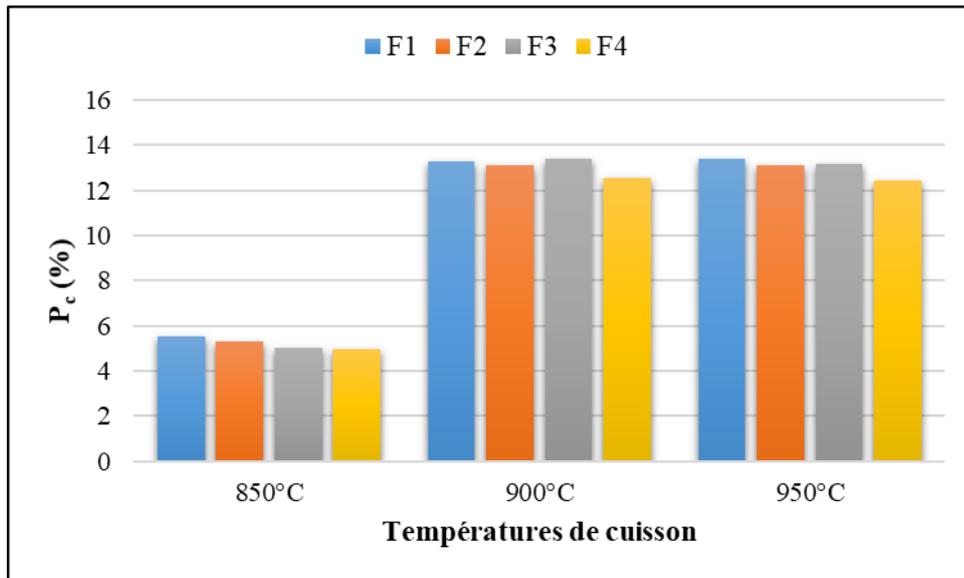


Figure III.16 : Perte de masse à la cuisson des briquettes.

III.2.2. Retrait

Les retraits dus au séchage et à la cuisson des différentes briquettes sont représentées sur les Figure III.17 et III.18 respectivement.

Les briquettes présentent un retrait après séchage compris entre 4,9% à 5,3 % qui diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du TF par le DC. Il faut savoir que le retrait au séchage d'une argile varie de 2 à 8 %, selon la nature minéralogique de l'argile, la granulométrie, la teneur en éléments dégraissants, la teneur en eau de façonnage, les contraintes subies par l'argile au cours de la mise en forme...etc. De plus, au cours du séchage, l'eau autour des particules est éliminée et les particules commencent à se rapprocher ce qui entraîne un retrait correspondant au volume de l'eau retirée. Le retrait en longueur après séchage correspond donc au départ de l'eau d'hydratation et de l'eau de façonnage. Le départ de l'eau est totalement compensé par la création de porosités.

Après cuisson un léger retrait dans les briquettes inférieures à 1,5 % a été noté. Ceci peut être dû au dégagement du CO₂ associé à la décarbonatation de la calcite ou à la transformation de la calcite en portlandite (Ca(OH)₂) qui conduisent à un retrait qui est compensé par la création de porosités.

Ce retrait augmente avec l'augmentation de la température de 850°C à 950°C sauf pour F1 qui diminue à 950°C par rapport à 900°C.

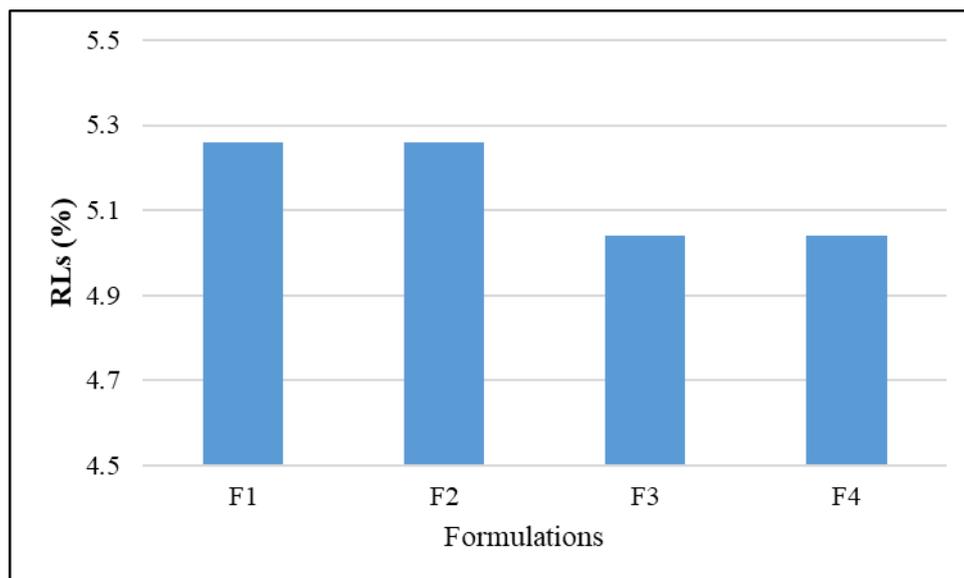


Figure III.17 : Retrait dû au séchage des briquettes.

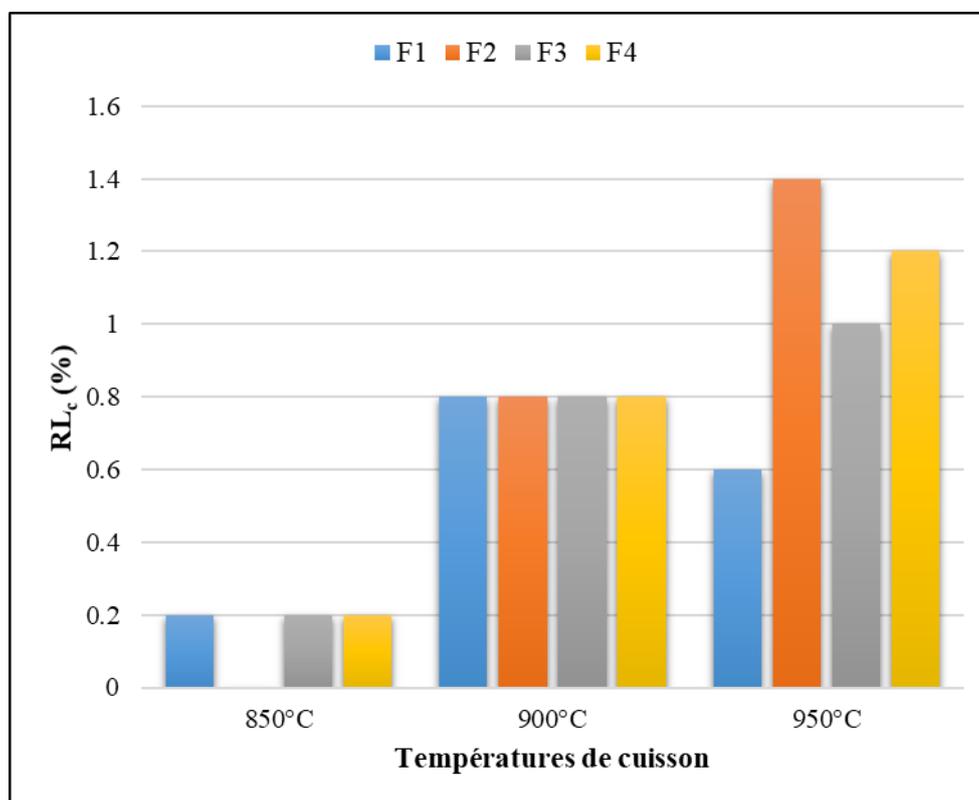


Figure III.18 : Retrait dû à la cuisson des briquettes.

III.2.3. Absorption, masse volumique, porosité

L'absorption d'eau, la porosité et la masse volumique sont des paramètres importants pour la formulation d'une brique cuite. Les résultats obtenus sont respectivement représentés sur les Figures III.19, III.20 et III.21 respectivement.

On constate l'absorption et la porosité et la masse volumiques des briquettes diminuent avec l'augmentation de la température. En effet, les produits cuits à des températures élevées subissent les plus grands changements de volume (contraction) et de porosité où les petits pores entre les particules d'argile disparaissent en raison de la vitrification et de la coalescence des particules ce qui engendre une diminution de porosité [39], Ceci est en accord avec les résultats obtenus pour le retrait dû à la cuisson.

La masse volumique d'une brique en terre cuite est généralement inférieure à 2 g/cm^3 ce qui est le cas des toutes les briquettes élaborées.

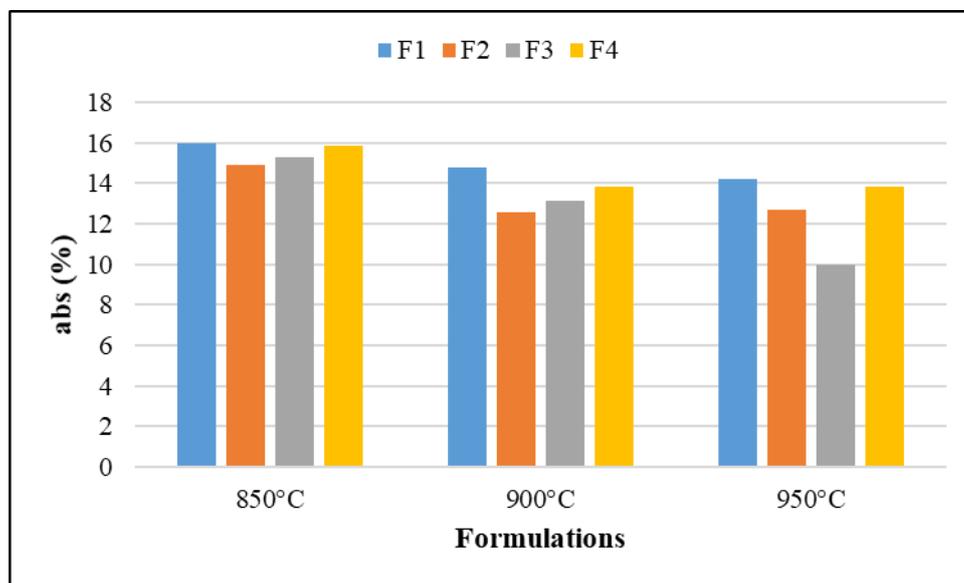


Figure III.19 : Absorptions des briquettes.

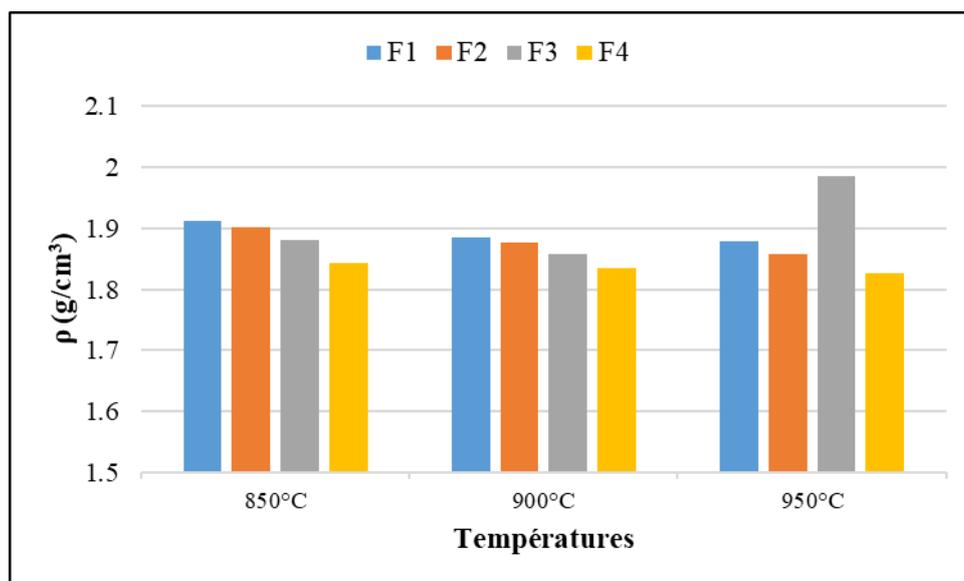


Figure III.20 : Masses volumiques réelles des briquettes.

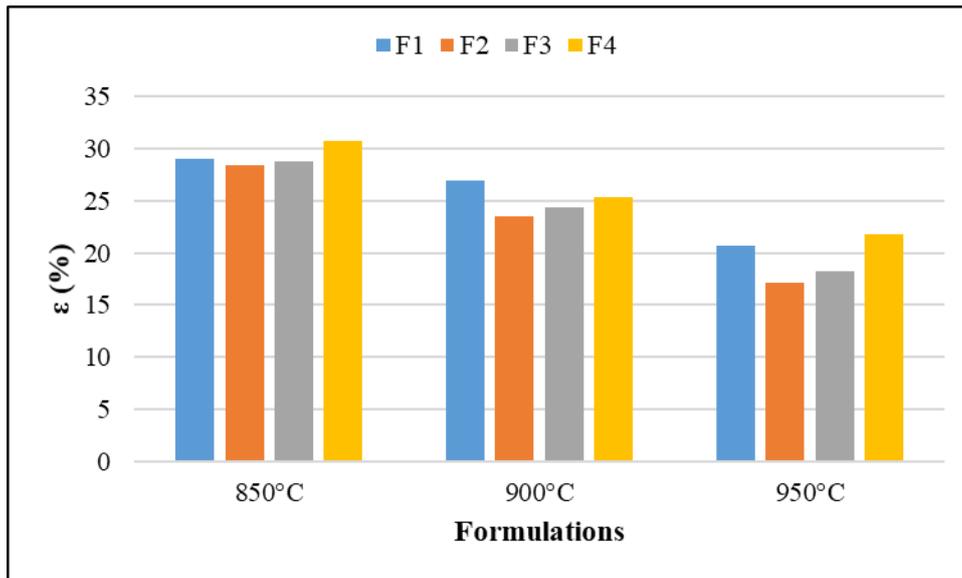


Figure III.21 : Porosités des briquettes.

III.2.4. Absorption capillaire

Les résultats de l'absorption capillaire sont illustrés dans la Figure III.22. Après avoir ajouté le déchet on a remarqué que l'absorption augmente. Le taux d'absorption augmente globalement avec l'augmentation de la température car la facilité de pénétration de l'eau dans les briquettes diminue.

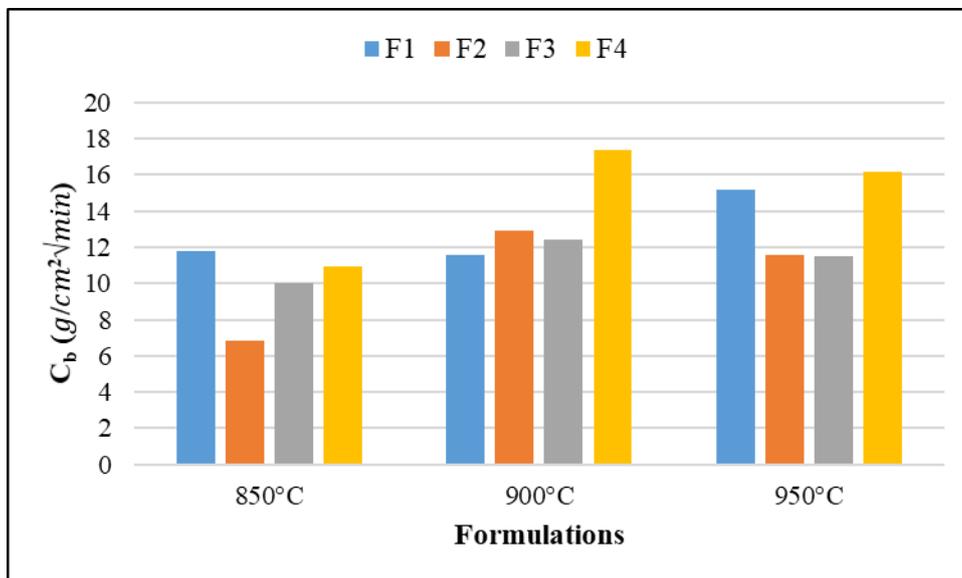


Figure III.22 : Absorptions capillaires des briquettes.

III.2.5. Essai d'éclatement

Les résultats des essais d'éclatement sont donnés dans le Tableau III.2. On remarque que le nombre de cratères des briquettes F1 est compris entre 1 et 2. Aucun éclatement n'a été enregistré pour F2, F3 et F4. Ainsi les résultats du test d'éclatement pour les différentes

formulations aux différentes températures sont conformes aux exigences de la norme NF EN 771-1/CN. [41]

Tableau III.2 : Essais d'éclatement des briquettes.

Echantillons	850°C	900°C	950°C
F1	2 cratères de 0,2 et 0,3 cm de diamètre	1 caractère de 0,2 cm de diamètre	1 caractère de 0,2 cm de diamètre
F2	Aucun éclatement	1 caractère de 0,3 cm de diamètre	Aucun éclatement
F3	Aucun éclatement	Aucun éclatement	Aucun éclatement
F4	Aucun éclatement	Aucun éclatement	Aucun éclatement

III.2.6. Essai de flexion

Les résultats des essais de flexion des briquettes sont récapitulés sur la Figure III.23. On remarque une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la température. De plus les résistances des briquettes F2, F3 et F4 sont supérieures à celles de F1. Ceci signifie que l'ajout du DC améliore la résistance à la flexion.

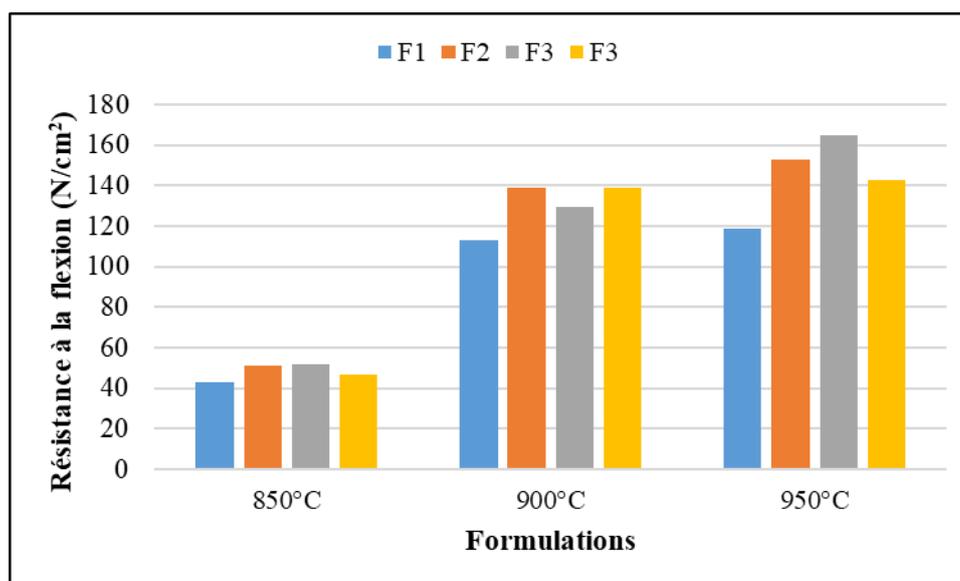


Figure III.23 : Résistances à la flexion des briquettes.

Conclusion

Ce travail s'est intéressé à la valorisation des déchets de céramiques dans l'élaboration des briquettes. Ces dernières sont composées d'un mélange argileux et de tuf qui est remplacé par différents pourcentage de déchet.

Les matières premières ainsi que le déchet ont été caractérisées par des analyses physico-chimiques et mécanique. La caractérisation physico-chimiques a montré ce qui suit :

- La teneur en humidité et la masse volumique apparente dépendent de la nature des matières premières.
- Les MA (i.e. AG et AJ) présentent des PAF élevées par rapport à TF et DC.
- Le DC a un pH plus élevé que ceux deux autres matières (i.e. MA et TF).
- La teneur en CaCO_3 permet de classer DC et TF comme matériaux non calcaires. Par contre la MA est une argile calcaire.
- La SSB du DC est plus élevée par rapport à celles de MA et TF.
- Les argiles, le TF et le DC se composent principalement de silice, d'alumine et d'oxyde de calcium.
- L'analyse minéralogique révèle que les matières premières sont toutes composées de quartz et d'albite. Une présence de kaolinite dans TF, AG et AJ est également notée.
- Les observations au MEB révèlent une texture relativement compacte pour MA par rapport à TF et DC.

La caractérisation des briquettes a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le retrait après séchage diminue avec l'augmentation du taux de remplacement du TF par le DC.
- Le retrait cuisson augmente avec l'augmentation de la température.
- L'absorption, la porosité et la masse volumiques des briquettes diminuent avec l'augmentation de la température. Les briquettes élaborées ont des masses volumiques inférieures à 2 g/cm^3 .
- L'absorption par capillarité augmente globalement avec l'augmentation de la température.
- Les essais d'éclatement pour les différentes formulations sont conformes à la norme NF EN 771-1/CN.
- Les résistances à la flexion des briquettes contenant le DC augmentent avec l'augmentation de la température et sont supérieures au briquettes de référence.

Ainsi la substitution du TF par le DC permet d'obtenir des briquettes aux propriétés intéressantes et prometteuses.

En perspective, il serait intéressant d'effectuer une application à l'échelle industrielle en concevant des briques, dans lesquelles les déchets de céramiques sont valorisés, en les caractérisant et en les comparant au brique non substituées.

***Références
bibliographiques***

Références bibliographiques

- [1] BELMILOUD L., BENKANOUN D., Recyclage des déchets inertes de marbre et de granite de la marbrerie YAHIAOUI-DBK dans la fabrication des dallages de sol, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2017.
- [2] CAILLIERE S., HENIN S., RAUTUREAU M., Minéralogie des argiles, Ed Masson, Paris, 1982.
- [3] BEAUCHAMP J., les argiles, plan de cours, Université de Picardie Jules, Paris, 2005.
- [4] GUECHI M., SAADI N., Béton à base de graviers industriels (déchets céramiques), Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf, M'sila, 2020.
- [5] BELGHALI M., MERABTIN., Traitement des eaux usées huileuse de CEVITAL par le kaolin KT3B selon la méthode d'adsorption, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2015.
- [6] KORNMAN M., Matériaux de construction en terre cuite : Fabrication et propriétés, Septima Ed, Paris, 2005.
- [7] ZIADI O., Elaboration des carreaux céramiques à base de verre recyclé, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2019.
- [8] ATKINS P., W., Physical chemistry, 5th Ed, Oxford University Press, Oxford, 1994.
- [9] NOOLK E., GOURANIS V., Adsorption Technology for air and water pollution control, LEWIS Publishers Ed, INC, USA, 1992.
- [10] YOUNG D M., MARIDASSOUG D., Cinétique des réactions hétérogènes, Ed Masson, 1982.
- [11] SLASLIM A., Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux, Thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, Suisse, 2002.
- [12] BOULAAJOUL S., Etude cinétique de l'adsorption statique du 4-Nitrophénol sur charbon actif commercial (NC60), Université Kasdi Merbeh, Ourgla, 2013.
- [13] KORNMAN M., Matériaux de terre cuite – Matières de base et fabrication, Techniques de l'Ingénieur, C905 v2, 20 février 2015.

- [14] TIFFO E., Elaboration et caractérisation de céramique à base de mélanges argile kaolinite poudre de tesson de verre incolore de récupération, Mémoire de Master, Université de YAOUNDE I, Cameroun, 2014.
- [15] LEBSSISSE L., Synthèse, étude structurale et morphologique des nouveaux matériaux en céramique, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2017.
- [16] HAUSSONNE J., CARRY C., BROWEN P., BARTON J., *Traité des Matériaux 16 Céramiques et Verres, Principes et techniques d'élaboration*, France, 2015.
- [17] BOUSSAK H., Effet de la température sur les performances des céramiques contenant la bentonite de Maghnia, Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès, 2015.
- [18] BLANCHART P., Les céramiques silicatées, *Techniques de l'Ingénieur*, N4800 v1, 20 février 2015.
- [19] Bonnet J-P., Gaillard J-M., *Céramiques silicatées, Matériaux et processus céramiques*, BOCH H, Paris, 2001.
- [20] CHAHMA S., Etude des propriétés thermomécaniques des briques en terre gypse traditionnel (Tenchent) stabilisée par le ciment ou par la chaux, Cas de la ville d'OURGLA, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouragla, 2018.
- [21] DIATTA M., Matières premières argileuses du Sénégal : caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion, Thèse de Doctorat, Université Assène Seck de Ziguinchor et Université de Limoges, 2016.
- [22] BOCHE P., *Propriétés et applications des céramiques*, Hermes science, Paris, 2001.
- [23] BECH-CHAR H., Procédé de fabrication des carreaux céramique et étude des facteurs influençant la résistance à la flexion des carreaux crus, Université de Cadi Ayyad, Marrakech, 2021.
- [24] RIFKIN J., *Bulletin des Energies Renouvelables, Conference International et Exposition sur les Energies Renouvelables*, ALGER, Juin 2007.
- [25] MEKHERMECHE A., Etude thermique des briques en terre destinées aux constructions en zones sahariennes, Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbeh, Ouargla, 2017.

- [26] SALIHA., produits rouges : la capacité de production de l'Algérie en hausse en 2013 à 20 millions de tonnes, 2014.
- [27] Loi n° 01 - relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, Journal Officielle Algérie, 77, 19 du 12 décembre 2001.
- [28] BARKAT A., Valorisation des déchets de brique dans la réalisation des ouvrages en béton, Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2006.
- [29] BOUREMA M., Etude des caractéristiques d'un BHP à base de déchet de brique rouge à l'état frais et durci, Mémoire de Master, Université de Skikda, 2015.
- [30] LOUVIGNIV N., Conséquences de l'apport de verre pilé à la surface du champ et de son incorporation dans la couche travaillée, Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, 2001.
- [31] RAMACHANDRAN V-S., Utilisation des déchets et sous-produits comme granulats du béton, CBD-215-F, juin 1981.
- [32] BENSAFI B., BELKACEM O., Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température, Mémoire de Master, CUBBAT, 2018.
- [33] NF EN 1097-5 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 5 : Détermination de la teneur en eau par séchage en étuve ventilée, 2008.
- [34] NF EN 933-1 : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage, 2012.
- [35] NF EN 196-2 : Méthodes d'essais des ciments partie 2 : Analyse chimique des ciments, 2013.
- [36] NF P 18-508 : Additions pour béton hydraulique - Additions calcaires - Spécifications et critères de conformité, 2012.
- [37] NF EN 196-6 : Méthodes d'essai des ciments - Détermination de la finesse, 2018.
- [38] EL FGAIER F., Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue, Thèse de Doctorat, Ecole Centrale De Lille, France, 2013.
- [39] SAMARA M., Valorisation des sidéments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite, Thèse de doctorat, Ecole Centrale De Lille, France, 2007.

[40] MIRAUCOURT D., Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée, Mémoire de Master, Université de Liège, Belgique, 2017.

[41] NF EN 771-1/CN : Spécifications pour éléments de maçonnerie — Partie 1 : Briques de terre cuite, 2008.

Résumé : L'objectif de ce travail est l'étude de la possibilité de valorisation des déchets de céramique dans la brique de terre cuite à l'échelle laboratoire. Cette étude s'est scindée en deux étapes. La première étape consiste en la caractérisation physico-chimique et minéralogique des matières premières composant la brique cuite ainsi que le déchet de céramiques afin de déterminer leurs compositions et d'évaluer leurs propriétés. La deuxième étape comprend la formulation de briquettes dans lesquelles le déchet de céramique est incorporé en tant que remplacement d'une partie ou de l'intégralité du tuf. Ces briquettes ont subi des cuissons à trois températures différentes puis ont été caractérisées et comparées aux échantillons témoins obtenus dans les mêmes conditions. Les résultats révèlent que le déchet a des propriétés globalement similaires au tuf. La caractérisation des briquettes a permis de déduire la faisabilité de l'incorporation des déchets de céramiques dans la formulation des briquettes. En effet, les briquettes substituées et cuites à 900°C et 950°C permettent d'obtenir des produits finis avec des propriétés intéressantes. Ce qui se révèle prometteur pour une application industrielle.

Mots-clés : valorisation, déchet de céramique, brique de terre cuite, caractérisation, traitement thermique, matière argileuse, tuf.

Abstract: The objective of this work is to study the possibility of recycling ceramic waste in fired bricks on a laboratory scale. This study is divided into two steps. The first step consists of the physico-chemical and mineralogical characterisation of the raw materials composing the fired brick as well as the ceramic waste in order to determine their compositions and evaluate their properties. The second step involves the formulation of briquettes in which the ceramic waste is incorporated as a replacement for some or all of the tuff. These briquettes were fired at three different temperatures and then characterised and compared with control samples obtained under the same conditions. The results show that the waste has broadly similar properties to tuff. The characterisation of the briquettes allowed to deduce the feasibility of incorporating ceramic waste in the formulation of the briquettes. Indeed, substituted briquettes fired at 900°C and 950°C make it possible to obtain finished products with interesting properties. This is promising for an industrial application.

Keywords: valorisation, ceramic waste, fired brick, characterisation, thermal treatment, clay material, tuff.

ملخص: الهدف من هذا العمل هو دراسة إمكانية استعادة بقايا السيراميك في الطوب الطيني على مستوى المختبر. تم تقسيم هذه الدراسة إلى مرحلتين. تتكون المرحلة الأولى من التوصيف الفيزيائي والكيميائي والمعدني للمواد الأولية المكونة للطوب المشتعل وكذلك بقايا السيراميك من أجل تحديد تركيباتها وتقييم خصائصها. تتضمن المرحلة الثانية صياغة قوالب يتم فيها دمج مخلفات السيراميك كبديل لجزء أو كل للحجر المسامي. تم تطبيق ثلاث درجات حرارة مختلفة على هذه القوالب ثم تم تمييزها ومقارنتها بعينات شاهدة التي تم الحصول عليها في ظل نفس الظروف. وتكشف النتائج أن البقايا لها خصائص مشابهة إلى حد كبير للحجر المسامي. سمح توصيف القوالب باستنتاج إمكانية دمج مخلفات السيراميك في صياغة القوالب. في الواقع، القوالب المستبدلة التي يتم إطلاقها عند 900 درجة مئوية و 950 درجة مئوية تسمح بالحصول على منتجات نهائية بخصائص مثيرة للاهتمام. هذا واعد بالنسبة للتطبيق الصناعي.

الكلمات المفتاحية: تميمين، بقايا السيراميك، طوب الطين، التوصيف، المعالجة الحرارية، مادة الطين، حجر مسامي.