

Septembre

2020

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

Thème :

*Influence d'ajout des déchets industriels
sur les caractéristiques physiques,
mécaniques et thermiques des briques*

Présenté par :

Mr. HASSANE Meziane
Mr. AMAROUCHE Driss

Encadré par :

Dr. BOUZIDI Mohamed Amin

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ A. MIRA – BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de master en Génie Civil
Option : Structures

Thème :

Influence d'ajout des déchets industriels sur les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques des briques

Présenté par :

Mr. HASSANE Meziane

Mr. AMAROUCHE Driss

Encadré par :

Dr. BOUZIDI Mohamed Amin

Devant le jury composé de :

- M^{me} ATTIL Souad
- M^r CHELOUAH Nacer

Année universitaire 2019/2020



Remerciement

*Je tiens à exprimer notre gratitude et remerciement à **ALLAH** qui nous a donné la force et le pouvoir pour effectuer et terminer ce modeste travail.*

*Nous ne pouvons pas réellement trouver les expressions élégantes que mérite notre directeur de recherche **Mr BOUZIDI** pour son suivi, sa disponibilité, son soutien, sa patience et ses orientations durant l'élaboration de cette recherche ainsi que pour le temps qui il a consacré pour évaluer et critiquer ce travail et sa présence total au cours de cette modeste étude.*

*Mes vives gratitudes vont au **M^{me} ATTIL Souad** de m'avoir honoré en président ce mémoire. J'adresse mes remerciements aussi aux **Mr CHELOUAH Nacer** d'avoir accepté d'examiner ce mémoire.*

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Notre profonde gratitude à tous les enseignants du Département de génie civil en particulier dans notre spécialité structures. Avec un remerciement spécial aux étudiants du département de génie civil et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Enfin je remercie mes amies pour leur soutien moral et leur aide, ainsi que tous ceux qui m'ont soutenu et aidé tout au long de cette étude.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail :

À mon cher Père OMAR et ma très chère Mère DJAOUIDA en témoignage et en gratitude de leur dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leur sacrifice illimité, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.

À la mémoire de mon grand-père Mouhoub

À mes frères Mehdi ET Mouhoub

À mes sœurs Fadila, Sarah et Anais

À mon oncle paternel boubkeur, à mes oncles maternels et à tous mes tantes

À mes amis, Zerrouk Hicham, Benhacine Boukhalifa, Ouchiha Zoubir, Trik, Seddik, Aniss Bensghir, Lwifil Faycal, Touahria Houssam, Saidi Hicham, Amarouche Driss.

À mes trois meilleurs amis, Saadi Bousaa, Bairi Adel, Hadjkaci Abderezak,

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

HASSANE MEZIANE



Dédicace

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie
Du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant
La gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

Je dédie ce modeste travail :

À Ceux que j'aime :

*Mon père et ma mère qui ont toujours été présent pour me
Soutenir, me conseiller, sacrifient pour moi et m'avoir permis
D'arriver à ce stade d'éducation.*

Je le dédie aussi à :

*Mes frères et ma sœur, qui mon soutenus et crus en moi lors de mon parcours
Et à ce qui a partagé ce travail avec moi mon cher ami et*

Binôme Hassane.

*À tous mes camarades que j'ai eu le privilège de connaître durant la
Période universitaire.*

Merci à tous

Amarouche Driss

TABLE DE MATIÈRES

Tables de matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
I <i>Chapitre I</i> : Synthèse bibliographique.....	4
I.1 Construction en terre crue.....	4
I.1.1 Introduction.....	4
I.1.2 Histoire.....	4
I.1.3 Technique de construction en terre :.....	7
I.1.4 Avantages de la construction en terre crue.....	9
I.2 La brique.....	10
I.2.1 Introduction.....	10
I.2.2 Histoire de brique	11
I.2.3 Définition de la brique	11
I.2.4 Les briques de terre crues.....	12
I.2.4.1 Fabrication en terre crue.....	12
I.2.4.2 Adobe.....	13
I.2.4.2.1 Définition.....	13
I.2.4.2.2 La production.....	13
I.2.4.2.3 Méthode de production de l'adobe.....	13
I.2.4.2.4 Les produits	15
I.2.4.2.5 Les avantages de l'adobe.....	15
I.2.4.3 Les pisés.....	15
I.2.4.3.1 Définition.....	15
I.2.4.3.2 Technique de production	16
I.2.4.3.3 Les produits : différents types de pisé.....	17
I.2.4.3.4 Les avantages de pisé.....	17
I.2.4.4 Les blocs de terre comprimée	17
I.2.4.4.1 Définition.....	17
I.2.4.4.2 Production des blocs de terre comprimée.....	18
I.2.4.4.3 Les avantages des blocs de terre comprimée	19
I.2.4.5 Bauge	19
I.2.4.6 Torchis.....	19
I.2.5 La stabilisation des briques	20

TABLE DE MATIÈRES

I.2.5.1	Définition de la stabilisation.....	20
I.2.5.2	Procédés de stabilisation	20
I.2.5.2.1	Stabilisation mécanique.....	20
I.2.5.2.2	Stabilisation chimique.....	21
I.2.5.2.3	Stabilisation physique	22
I.2.6	Les briques de terre cuite :.....	22
I.2.6.1	Fabrication en terre cuite :.....	22
I.2.6.2	La cuisson :.....	23
I.2.6.3	Produits de brique en terre cuite :	25
I.2.6.3.1	Brique ordinaires :.....	25
I.2.6.3.2	Brique creuse de terre cuite à perforation horizontale.....	27
I.2.6.3.3	Brique de terre cuite à perforation verticales (blocs perforés).....	27
I.2.6.3.4	Brique réfractaire :	28
I.2.6.3.5	Brique de verre :.....	28
I.2.6.3.6	Brique de pavage :.....	29
I.2.6.3.7	Propriété et caractéristique des briques de terre cuite	29
I.2.7	Les différents types de briques :.....	30
I.2.7.1	Classification des briques en fonction de la qualité.....	30
I.2.7.2	Classification des briques en fonction du processus de construction.....	31
I.2.7.3	Classification des briques selon la méthode de fabrication	32
I.2.7.4	Classification des briques en fonction des matières premières.....	32
I.2.7.5	Classification des briques basée sur l'utilisation de l'emplacement	33
I.2.7.6	Classification des briques en fonction de la capacité de résistance aux intempéries : 33	
I.2.7.7	Classification des briques en fonction de leur utilisation	33
I.2.7.8	Classification des briques selon la région.....	34
I.2.8	Dimensions des briques :.....	34
I.2.9	Innovations et évolutions récentes.....	35
I.2.10	Économie :.....	35
I.2.11	Brique en fonction de ses propriétés	36
I.2.12	Composition des briques - fonction des ingrédients :	36
I.2.12.1	Pourcentage de constituants de la brique (base de poids).....	37
I.2.12.2	Principaux ingrédients de la brique et leurs fonctions.....	37
I.2.12.2.1	Alumine.....	37
I.2.12.2.2	Silice.....	37
I.2.12.2.3	Chaux	38
I.2.12.2.4	Oxyde de fer	38

TABLE DE MATIÈRES

I.2.12.2.5	Magnésie	39
I.2.12.3	Ingrédients nocifs de la brique :	39
I.2.12.3.1	Chaux	39
I.2.12.3.2	Alcalis	39
I.2.12.3.3	Cailloux, pierres et graviers	39
I.2.12.3.4	Pyrites de fer (FeS).....	40
I.2.12.3.5	Matière organique	40
I.3	Déchets industriels comme additif dans la fabrication des briques	40
I.4	Conclusion	43
II	<i>Chapitre II</i> : Influence des déchets industriels sur la fabrication des briques	45
II.1	Introduction.....	45
II.2	Stratégie de traitement des déchets.....	46
II.3	Déchets & valorisation : identification & principe général d'analyse	47
II.3.1	Principales sources de production des déchets du secteur de la construction.....	47
II.4	Déchets & gestion : classement.....	47
II.5	Définitions.....	49
II.5.1	Déchet	49
II.5.2	Récupération.....	49
II.5.3	Recyclage	49
II.5.4	Compostage.....	49
II.5.5	Incinération.....	49
II.5.6	Valorisation	49
II.6	Pourquoi valoriser ?.....	49
II.7	Gestion des déchets en Algérie : Entre stockage et valorisation	49
II.7.1	Quid de la valorisation des déchets ?.....	50
II.7.2	Qu'en est-il en Algérie ?	51
II.7.3	Le gisement des déchets valorisables.....	52
II.7.3.1	Volume des déchets produits annuellement en Algérie	52
II.7.3.2	Typologie des déchets domestiques valorisables.....	52
II.7.4	Analyse de la politique nationale en matière de gestion des déchets.....	53
II.7.5	Identification des principales contraintes	54
II.8	Utilisation des déchets comme matière alternatives dans la fabrication des briques.....	55
II.8.1	Substituant d'argiles	56
II.8.2	Matériaux de charge.....	57
II.8.3	Agents formateurs de pores.....	57
II.8.4	Agents fluxant	58

TABLE DE MATIÈRES

II.8.5	Agents combustibles	58
II.8.6	Agents colorants	58
II.9	Caractéristiques des matières premières secondaire recherchées pour la fabrication de briques.....	58
II.9.1	Composition chimique	58
II.9.2	Distribution granulométrique	59
II.9.3	Plasticité et mélange	60
II.10	Conditions de fabrications de briques cuites à base de déchets	61
II.11	Les propriétés des briques à base de déchets	62
II.11.1	Les propriétés technologiques et la durabilité des briques	62
II.11.2	Le comportement environnemental	63
II.12	Effet de l'utilisation de divers déchets industriels dans les briques	64
II.12.1	Utilisation des boues comme matériaux de brique	64
II.12.1.1	Définition.....	64
II.12.1.2	Surface spécifique des mélanges argile-boue	64
II.12.1.3	Test de compactage et tests d'Atterberg sur l'argile - mélanges de boues	64
II.12.1.4	Absorption d'eau	65
II.12.1.5	Densité des briques.....	66
II.12.1.6	Résistance à la compression des briques	66
II.12.2	Utilisation de déchets de poudre de marbre dans l'industrie de la brique.....	67
II.12.2.1	Définitions	67
II.12.2.2	Changements de taille et de poids après le processus de frittage.....	67
II.12.2.3	Résultats des tests de déplacement d'eau d'Archimède	68
II.12.2.4	Résultats de résistance mécanique	69
II.12.3	Études expérimentales sur la brique de cendre d'étang	71
II.12.3.1	Définitions	71
II.12.3.2	Résultats et discussions	71
II.12.4	Propriétés des briques fabriquées à partir de cendres volantes, de poussières de carrière et de billettes.....	73
II.12.4.1	Définitions	73
II.12.4.2	Résultats et discussions	73
II.12.5	Études expérimentales sur les briques cendres volantes-sable-chaux avec ajout de gypse	74
II.12.5.1	Définitions	74
II.12.5.2	L'effet du sable sur la force de compression.....	74
II.12.5.3	La détermination de la chaux optimale et contenu de cendres volantes.....	75
II.12.5.4	Quantité optimale d'ajout de gypse	76

TABLE DE MATIÈRES

II.12.5.5	Effet du processus de durcissement.....	76
II.12.5.6	Effet de la période de durcissement	77
II.12.6	Résistance à la compression de la brique de cendres volantes avec ajout de chaux, de gypse et de poussière de carrière.....	78
II.12.6.1	Test de résistance à la compression.....	78
II.12.6.2	Absorption de l'eau.....	78
II.12.6.3	Efflorescence	78
II.12.6.4	Pourcentage de mélange optimal	79
II.12.7	Utilisation des déchets de papeterie pour la fabrication de briques	82
II.12.7.1	Définitions	82
II.12.7.2	Brique brûlées.....	82
II.12.7.3	Brique brûlées.....	83
II.12.7.3.1	Resistance a la compression	83
II.12.7.3.2	Absorption de l'eau.....	84
II.12.8	Autres études	84
II.12.9	Discussion	94
II.13	Recommandation et Conclusion.....	94
II.13.1	Conclusion.....	94
Conclusion générale.....		89
Les références		
Résumé		

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 (a) Arche De Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki ; (d) Cité Chan-Chan.....	4
Figure I.2 Exemples anciens de constructions en terre. De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Ferres en Syrie, citadelle d'Ulug Dépe au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala au Turkménistan .	5
Figure I.3 Exemples récents de constructions en terre. De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili; le marché de Koudougou au Burkina-Faso; une école en pisé à Koné en Nouvelle Calédonie; quartier de 65 logements construit à L'Isle-d'Abeau en France .	5
Figure I.4 Construction en terre dans le monde.....	6
Figure I.5 Techniques de construction en terre	7
Figure I.6 La brique émaillée était déjà connue dans la Mésopotamie antique	11
Figure I.7 Comalcalco, Mexique : pyramide de briques mayas Pyramide de briquesmayas au site archéologique de Comalcalco, Tabasco, Mexique.	11
Figure I.8 Moulage et séchage de l'adobe.....	13
Figure I.9 Moule de l'adobe	14
Figure I.10 Coffrage utilisé dans la conception des murs en pisé	16
Figure I.11 Construction d'un mur en pisé.....	16
Figure I.12 Composition de pisé.....	17
Figure I.13 Brique de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle	18
Figure I.14 À gauche, différents formats des BTC, à droite désignation des joints .	18
Figure I.15 Quelques réalisations en BTC. De gauche à droite : la Mosquée Al Medy en Arabie Saoudite ; un chantier en BTC en R.D. Congo ; une maison en BTC à L'Isle-d'Abeau en France	18
Figure I.16 Technique de la construction avec le Bauge	19
Figure I.17 Technique de construction en Torchis	19
Figure I.18 Pile de briques modernes, faites d'argile et de sable	23
Figure I.19 Diagramme de Production de briques d'argile	25
Figure I.20 Brique pleines et perforées.....	26
Figure I.21 Brique pleines.....	26
Figure I.22 Briques perforées.....	26
Figure I.23 Brique perforées	27
Figure I.24 Briques creuses de terre cuite à perforation horizontale	27
Figure I.25 Briques creuses de terre cuite à perforation verticale type G	28
Figure I.26 Brique réfractaire.....	28
Figure I.27 Brique de verre	29
Figure I.28 Brique de pavage	29
Figure I.29 Route Päwesin-Riewend pavée de briques, dans le Brandebourg, Allemagne	35
Figure I.30 Briques crues (vertes)	36
Figure I.31 Argile pour la formation de briques	37
Figure I.32 Sable	38
Figure I.33 Chaux en poudre	38
Figure I.34 Poudre d'oxyde de fer	39
Figure I.35 Cailloux, pierres et graviers	40
Figure I.36 Modes d'utilisations de l'AF en 2014-2015.....	41
Figure II.1 Stratégies de traitement des déchets.	46
Figure II.2 Valorisation des déchets	47
Figure II.3 Gestion et classement des déchets	48
Figure II.4 Classification des types de déchets selon EWC (2002) et selon leur rôle potentiel dans la fabrication de briques cuite	57

LISTE DES FIGURES

Figure II.5 Diagramme ternaire illustrant les compositions chimiques des	59
Figure II.6 Diagramme de Winkler et Niesper	60
Figure II.7 Classification des sols argileux	61
Figure II.8 Diagramme de cause à effet pour le traitement de la brique de cendres volantes	65
Figure II.9 L'absorption d'eau des briques.....	65
Figure II.10 La densité de particules des briques	66
Figure II.11 La résistance à la compression des briques.....	66
Figure II.12 Changements de taille et de poids avec l'augmentation du taux de déchets et l'évolution graphiques de températures (a) longueur, (b) largeur, (c) épaisseur et (d) poids	68
Figure II.13 Rapports d'absorption d'eau avec une quantité croissante d'additifs de rebut dans la composition de brique	69
Figure II.14 Diagrammes de diffraction des rayons X pour 900, 1000 et 1100 °C (a) 20% de diagramme de diffraction des rayons X de marbre de rebut et (b) 50% de diagramme de diffraction de rayons X de marbre de rebut [105].	70
Figure II.15 Effet de l'ajout de sable sur la résistance à la compression	75
Figure II.16 Effet de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression	76
Figure II.17 Effet de l'ajout de gypse sur la résistance à la compression	76
Figure II.18 Effet du processus de durcissement sur la résistance à la compression	77
Figure II.19 Analyse FTIR des briques durcies sous différentes conditions de durcissement	77
Figure II.20 Résistance à la compression pour différentes proportions à 7, 14, 21 jours de séchage ...	80
Figure II.21 Variation de la résistance à la compression avec augmentation des cendres volantes [109]	81
Figure II.22 Variation de la résistance à la compression avec le pourcentage de boue de chaux	82
Figure II.23 Variation de la résistance à la compression avec le pourcentage de boue de chaux mélangée à des cendres volantes (10%)	83
Figure II.24 Variation de la résistance à la compression de la brique brûlée avec le pourcentage de boue de chaux	83
Figure II.25 Versions « crues » et « tranchées » des briques Aubergine, Caramel, Champignon et Nougat	92
Figure II.26 Versions « crues » et « tranchées » des briques Salami et Truffle	92
Figure II.27 Murs composites en briques à base de déchets	93
Figure II.28 « The TrueTalker » de Studioninedots fabriqué avec des briques à base de déchets de pierre	93

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Différentes techniques de construction en terre .	8
Tableau I.2 Principales techniques de construction en terre crue.	8
Tableau I.3 Les caractéristiques des briques de terre crue (Adobe, Pisé, BTC)	20
Tableau I.4 Propriétés des briques pleins et perforés	29
Tableau I.5 La résistance thermique des briques pleins et perforés.	30
Tableau I.6 Propriétés de la brique creuse	30
Tableau I.7 La résistance thermique des Brique creuse	30
Tableau I.8 Pourcentage des constituants de la brique (base de poids)	37
Tableau I.9 Principaux déchets solides industriels générés en inde.	42
Tableau I.10 utilisations de l'AF dans l'ingénierie des sols.	42
Tableau II.1 Volume des déchets produits annuellement en Algérie	52
Tableau II.2 Typologie des déchets domestiques valorisables	52
Tableau II.3 Effet de la proportion de boues sur la surface spécifique et l'indice plastique des mélanges	64
Tableau II.4 Résultat du test pour les propriétés de divers mélanges	72
Tableau II.5 teste de paramètres	75
Tableau II.6 Valeurs moyennes de la résistance à la compression (N/mm ²)	79
Tableau II.7 Calcul de la valeur d'absorption d'eau (%)	81

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviations et Symboles	Notations et abréviations
ONU	Organisation des nation unies
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
BTC	Bloc de terre comprimée
HIMO	Haute Intensité de Main d'œuvre
HQE	Haute Qualité Environnementale
BBC	Bâtiment Basse Consommation
RCC	Souillures sous la semelle ou le sous-sol
GES	GAZ à effet serre
FA	Cendres volantes
PG	Phosphogypse
ARVD	Activités de recyclage et valorisation des déchets
PME	Petites et Moyennes Entreprise
PMI	Petites et Moyennes Industries
CET	Centre D'Enfouissement Technique
DSI	Déchets industriels spéciaux
DID	Déchets industriels dangereux
DIB	Déchets industriels banal
DM	Déchets d'origine minérale
BM	Boues minérale
RPL	Résidus de pétrochimie et de liquéfaction
BPZ	Boues polluées de Zinc
S.org	Solvants organiques, résidus de peinture
BME	Boues métalliques et électroniques
RF	Résidus de fabrication
HV	Huiles de vidanges
DOI	Déchets Organiques Industriels
DDI	Divers déchets Industriels
DPP	Produits pharmaceutiques
STEP	Déchets organiques (stations d'épuration des eaux usées)
DFD	Déchets Ferreux Divers
DVI	Déchets de verres industriels
PED	Produits Electroniques Divers
MOV	Matières organiques valorisables
PDT	Papier Divers Types
PFR	Plastique Facilement Recyclable
VBR	Verre blanc recyclable
MFR	Métaux et Fer Réutilisable

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ECO-JEM	Système public de reprise et de valorisation des déchets d'emballages
ANSEJ	Agence Nationale de soutien à l'emploi des jeunes
PROGDEM	Programme de gestion des déchets ménagers
EWC	European waste catalogue (Catalogue européen des déchets)
FSDRS	Fonds de Soutien et de Développement aux Régions Sahariennes
FEDEP	Fonds de l'Environnement et de la Dépollution
CEN	Le comité européen de normalisation
ASTM	American Society Testing Material (Matériel d'essai de la société américaine)
TCLP	Toxicity Characteristic Leaching Procedure (Procédure de lixiviation caractéristique de toxicité)
US-EPA	L'agence américaine de protection de l'environnement
EC	Le conseil de décision européen
AASHTO	Une méthode d'essai
OMC	Optimum moisture content (teneur en humidité optimale)
OPC	Ordinary Portland cement (ciment portland ordinaire)
UPV	Ultrasonic Pulse Velocity (vitesse d'impulsion ultrasonique)
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
UBB	Unfired building bricks (briques de construction non cuites)
URHA	Unground rice husk ash (cendres de balle de riz non moulues)
DMDA	Densified mixture design algorithm (algorithme de conception de mélange densifié)
IRS	Initial aspiration rate (taux d'aspiration initial)
OF	Le fruit de palmier à huile
PF	Les avant-toits d'ananas
BA	Bottom Ash (Machefer)
SEM	Scanning electric microscope (microscope électronique à balayage)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CW	Clay waste (déchets d'argile)
RM	Red mud (boue rouge)
FW	Fine waste of boron (fin déchet de bore)
MSWI	Municipal solid waste incineration (incinération de déchets solides municipaux)
CNS	Chinese national standard (norme national chinoise)
IGCC	Le laitier IGCC est un produit vitreux inorganique qui est produit à la suite du processus de combustion des centrales électriques par le cycle combiné IGCC.
WTR	Water treatment recycling (le recyclage du résidu de traitement des eaux)
RHA	Rice husk ash (cendres de balle de riz)
SF	Silica fume (fumée de silice)
GGBS	Ground granulated blast-furnace slag (Laitier granulé de haut fourneau broyé)
IS1007	Norme indienne
QD	Poussière de carrière
BS	Billets
R	Resistance thermique
Fes	Pyrites de fer
CO₂	Oxyde de Carbon
SiO₂	Silice
Al₂O₃	Alumine
Fe₂O₃	Oxyde de fer
MgO	Magnésie
CaO	Chaux
CaCO₃	Carbonate de calcium
Na	Sodium
K	Potassium
CaCl₂	Chlorure de calcium
MgCl₂	Chlorure de magnésium
Si₂O₅ Al₂(OH)₄	Kaolinite
Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O	Kaolinite
(K,H₃O)(Al,Mg,Fe)₂(Si,Al)₄O₁₀ [(OH)₂,(H₂O)	Illite
(Mg₅(Al,Fe)₃(OH)₈(Al,Si)₄O₁₀)	Chlorite
Na₂O et K₂O	Les oxydes alcalins
Ca (OH)₂	Hydroxide de calcium
NH₃	Amoniac
Cu	Cuivre

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Zn	Zinc
Cr	Chrome
Cd	Cadmium
Pb	Plomb
CSH	Silicate de calcium hydrate
CASH	Silicate de calcium et d'aluminium hydratée
fig	Figure
m	Mètre
cm	Centimètre
µm	Micromètre
mm	Millimètre
Kg	Kilogramme
g	Gramme
MPA	Mégapascal
W	Watt
°C	Degré Celsius
J	Joule
dB	Décibel
h	Heure
min	Minute
K	Kelvin
T	Tonne
psi	Pound-force per square inch (unite de pression)
DA	Dinar algérien
N	Newton
s	Seconde
Km	Kilomètre
GJ	Gigajoule

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Face aux défis environnementaux actuels liés aux changements climatiques et à l'épuisement des ressources (Programme des Nations Unies pour l'environnement, 2016), le secteur du bâtiment doit rénover ses pratiques et méthodes de conception tout en tenant compte de critères économiques, sanitaires et de confort. ONU Habitat estime que 3 milliards d'êtres humains seront mal logés à l'horizon 2030. Vu sa disponibilité, la terre crue constitue une alternative viable dans le secteur de la construction afin de répondre aux besoins de la population mondiale [1, 2]. Cependant des études scientifiques doivent être menées sur ce matériau afin de définir des conditions de fabrication à l'échelle industrielle, les précautions de mise en œuvre et de maintenance. En effet, malgré ses nombreux avantages écologiques, thermiques et économiques, la terre crue présente l'inconvénient de se détériorer sous l'effet des conditions climatiques. Il est donc essentiel de prendre des précautions afin d'accroître sa durabilité.

Au cours des dernières décennies la terre a, comme matériau de construction durable, suscité un important regain d'intérêt. Ainsi, environ 15% des œuvres architecturales inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco sont construites en terre [3]. De nos jours, les matériaux biosourcés constituent une alternative prometteuse aux matériaux de construction conventionnels. Il a été montré que la terre est un matériau qui répond aux exigences de la protection de l'environnement et contribue à un gain énergétique appréciable pour assurer le confort thermique dans l'habitat. Pittet et al [4] ont montré, par une étude comparative entre les différentes technologies de construction (terre, béton, brique et pierre), les avantages économique et environnemental de ce matériau. Ils ont également indiqué que l'utilisation de l'adobe et de torchis comme matériau de construction d'un habitat contribuait à réduire sensiblement sa consommation énergétique et donc les émissions de CO₂.

Contrairement au ciment, au béton ou à l'acier, la terre à l'état naturel peut être utilisée comme matériaux de construction pratiquement sans dépense d'Énergie. Elle présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. La terre largement utilisée dans la construction des bâtiments est très sensible à l'eau. Par exemple les blocs de terre sont produits par la compression de terre crue dans une presse manuelle ou hydraulique. La terre est retenue dans un moule ou elle est comprimée entre deux plateaux qui se rapprochent lentement. Cette compression permet de réduire le volumes des vides, ce qui diminue ainsi sa sensibilité à l'eau et augmente sa résistance à la compression.

Certaines propriétés des briques de terre (faible masse volumique, faible conductivité thermique) justifient leur utilisation pour l'amélioration des caractéristique physique, mécanique et thermique comme par exemple les briques alvéolées et les briques creuses. Il s'avère utile de recherche des matériaux locaux qui améliore la résistance physique, mécanique et thermique des bâtiments et dont le coût de production est faible.

La technique de la stabilisation des sols est connue de longue date (Muraille de Chine, chaussées romaines, ...). Par exemple, en Belgique, la stabilisation des sols a été utilisée à grande échelle dans les années 60, au moment des grands programmes autoroutiers. Actuellement, cette technique connaît un important regain d'intérêt en raison du renforcement des législations environnementales et de la pression croissante sur les matières premières.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Cette technique offre une solution technique, économique et écologique à la problématique des terres de déblais, tant pour les petits que pour les grands chantiers

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire particulièrement dans les zones rurales et les régions arides.

L'industrie de la brique en Amérique du Nord repose sur d'abondantes réserves naturelles d'argile et de schiste, qui sont extraits du sol et utilisés pour produire des briques avec une utilisation minimale d'additifs. Bien que cette méthode de production soit actuellement rentable, la disponibilité de la matière première et le coût de la production devient une préoccupation pour l'industrie. L'un des remèdes possibles est l'utilisation de déchets, ayant une composition chimique similaire à celle de l'argile ou du schiste naturel, à remplacer un pourcentage de la matière première. Les bénéfices possibles sont triples : les bénéfices économiques dus à une réduction du volume de matière première nécessaire par unité produite, ainsi qu'une réduction du température de cuisson requise; les avantages environnementaux dus au détournement des déchets solides des décharges et le placement des déchets dans un milieu sain, inerte et utile; et avantages de force dus à la possibilité d'augmenter la résistance et la durabilité des briques en utilisant déchets pour agir comme un agent fondant dans la brique.

Une revue de la littérature pour évaluer la faisabilité d'ajouter des déchets industriels à l'argile a été menée. L'examen comprenait des additifs tels que le verre, les cendres volantes, poussière de carrière...etc. L'évaluation de l'ajout de tels matériaux aux briques est basée sur les résultats des tests rapportés pour la résistance, la durabilité, absorption d'eau...etc.

Les conclusions tirées de cette comparaison conduiront à une discussion sur les futures exigences de test pour la détermination de la faisabilité de l'ajout de déchets industriels aux briques.

Le présent mémoire est subdivisé en deux chapitres qui sont les suivants :

Le chapitre I est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre crue et en terre cuite, les différents matériaux utilisés dans la fabrication des briques avec un passage historique, et les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes et les moyens de stabilisation. Puis on a donné un aperçu l'utilisation des déchets industriels comme additifs à la fabrication des briques

Le chapitre II est destiné à étudier l'impact d'utilisation des déchets industriels sur la fabrication des briques en se basant sur les différentes recherche mené par différents chercheurs. Plusieurs paramètres sont étudiés et analyser dont, la résistance mécanique, physique et thermique.

Chapitre I*Synthèse bibliographique*

Introduction

Dans ce premier chapitre des notions et définitions générales sur la brique ont été faites, avec un petit passage historique. Les différents étapes et processus de fabrication de ce matériau, depuis la préparation de la matière première jusqu'à l'obtention de produit final. Comme on a parlé sur l'ajout des déchets industriels dans la fabrication des briques.

I *Chapitre I* : Synthèse bibliographique

I.1 Construction en terre crue

I.1.1 Introduction

La terre crue, utilisée depuis des siècles, est une des ressources naturelles les plus abondantes et les plus faciles à mettre en œuvre. Pourtant, si elle ne manque pas d'atouts, elle souffre encore aujourd'hui d'une absence de reconnaissance, de la perte des savoir-faire transmis oralement, et du manque de normes internationales. Malgré cela, la terre crue présente de nombreux avantages susceptibles de répondre aux attentes énergétiques et environnementales d'aujourd'hui. Elle est en parfaite adéquation avec la démarche d'écoconstruction.

I.1.2 Histoire

La Terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau.

Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak (Fig. a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (Fig. b) par exemple), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (Fig. c), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (Fig. d).

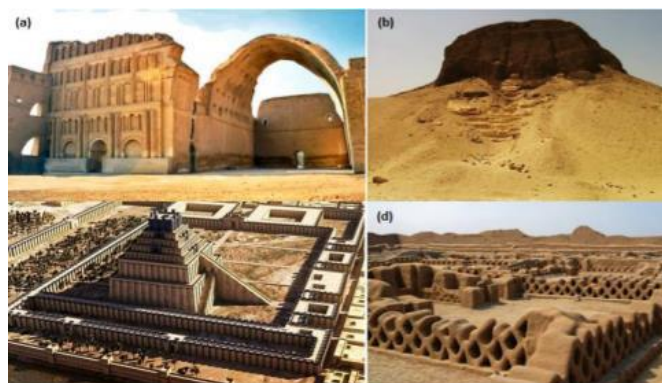


Figure I.1 (a) Arche De Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki ; (d) Cité Chan-Chan.

Ce terme désigne un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols et les sédiments qui résulte de l'altération physique (fragmentation sans modification de la nature des minéraux), chimique et biologique d'une roche mère sous l'action du climat, de l'érosion ou des organismes vivants [5, 6]. Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. D'après l'UNESCO, 20% du nombre de site enregistrés comme patrimoine mondial sont entièrement ou partiellement construits en terre [7]. Ceci témoigne du riche patrimoine architectural en terre crue.

Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'Homme. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds [7]. La ville syrienne de Tell Ferres de plus de 7000 ans ainsi que la Citadelle d'Ulug Dépé de plus de 5000 au Turkménistan sont quelques exemples (Figure I.2). À l'Antiquité et au Moyen-

Age, plusieurs constructions en terre ont été réalisées telles que la cité antique de Volubilis au Maroc, ou le grand Kyz Kala à Merv au Turkménistan [8], (Figure I.2).



Figure I.2 Exemples anciens de constructions en terre. De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Ferres en Syrie, citadelle d'Ulug Dêpé au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala au Turkménistan [8].

Plusieurs constructions modernes en terre réparties aux quatre coins de la planète montrent la persistance de l'intérêt pour la construction en terre (Figure I.3). Dans des régions rurales d'Amérique Latine, d'Asie ou d'Afrique, la terre a été toujours utilisée comme un matériau de construction privilégié. Par contre, en Europe, comme dans d'autres pays industrialisés, la terre crue a perdu de plus en plus d'importance avec l'industrialisation au XIX^e siècle. Il s'en est suivi une perte des savoir-faire [9]. Suite à la crise énergétique des années 1980, la terre crue a peu à peu regagné l'intérêt des architectes. Mais la terre crue doit encore retrouver sa place dans la gamme des matériaux de construction existants.

Dans les pays en voie de développement, la terre crue est souvent considérée comme symbole de pauvreté. La construction en terre est remplacée par des constructions en béton, tôle et parpaing, considérées comme modernes et durables [10 ; 11 ; 7].

Dans le bâtiment, la terre peut être utilisée comme isolant associé à la paille ou pour la rénovation, réparateur des bâtiments construits en terre, couche de finition intérieure, mur porteur, enduit intérieur [12].



Figure I.3 Exemples récents de constructions en terre. De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili; le marché de Koudougou au Burkina-Faso; une école en pisé à Koné en Nouvelle Calédonie; quartier de 65 logements construit à L'Isle-d'Abeau en France [115].

Au cours des dernières années, un intérêt croissant est considérablement apparu pour le matériau terre en tant que matériau durable. Il présente plusieurs avantages lui permettant d'être une solution aux enjeux économiques et écologiques. En effet, le matériau terre est l'un des matériaux de construction les plus anciens et les plus utilisés dans l'histoire humaine. On estime que près d'un tiers de la population mondiale vit dans une habitation en terre. Environ 50% de la population des pays en développement, et au moins 20% de la population urbaine vivent dans des maisons de terre [15]. Ci-après, une figure présente le patrimoine mondial en terre crue.

Hélas, ce matériau a souffert au siècle dernier de l'industrialisation et de la perte des savoir-faire. Ceci est dû principalement à la fascination pour les matériaux modernes comme le béton, la brique et l'acier. De plus, le manque de normes internationales, pour évaluer ces différents produits, présente un obstacle important pour le développement de ce matériau écologique, tel que mentionné par Delgado [16].



Figure I.4 Construction en terre dans le monde [3]

La construction en terre crue connaît un regain d'intérêt dans les dernières décennies, et ceci est lié essentiellement aux différents atouts qui représentent ce matériau noble pour les constructions écologiques et bioclimatiques. L'architecte égyptien Hassan Fathy a contribué clairement dans la renaissance de l'architecture de terre, au milieu du XX^e siècle, utilisée comme solution provisoire de lutte contre le sous-développement [17].

Avec la prise de conscience mondiale pour le développement durable, la construction en terre est devenue une technique d'avenir offrant de multiples avantages. En effet, l'utilisation de la terre comme une ressource naturelle abondante et recyclable, permet de diminuer la quantité d'énergie nécessaire pour la construction, ainsi que la réduction de l'impact du transport [18]. Elle est l'un des matériaux de construction à faible énergie grise, qui est en parfaite adéquation avec le contexte actuel du Grenelle de l'environnement et des exigences en matière de construction (Haute Qualité Environnementale (HQE), Bâtiment Basse Consommation (BBC)) [19] a présenté le matériau terre comme un matériau de futur, vu ses attributs qui peuvent produire une architecture intéressante dans le temps moderne.

Plusieurs études ont décrit ces avantages, tel que démontré par Pittet (2009) dans son étude comparative entre les différentes technologies de construction (terre, béton, brique et pierre) [20]. Shukla (2009) a montré que la construction et l'entretien d'une maison en adobe permettent d'économiser 370 GJ d'énergie par année, par rapport aux matériaux conventionnels, et à réduire les émissions de CO₂ de 101 tonnes par an [21]. Enfin, Chel (2009) et Zami (2010-a) ont prouvé les avantages économiques de la construction en terre, en réduisant l'énergie requise pour la fabrication de ces produits, ainsi que la réduction de l'impact environnemental [22] [23].

I.1.3 Technique de construction en terre :

À travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre de très nombreuses techniques de construction avec une infinité de variantes adaptées à la qualité de la terre et au degré d'élaboration du savoir-faire, traduisant l'identité des lieux et des cultures. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction présentée sur le diagramme établi par le groupe CRATerre en 1986 [13]. Parmi celle-ci huit sont d'un usage courant et constituent les techniques principales :

Adobe (brique crue), Pisé, Torchis, Bauge, Bloc de terre comprimée.

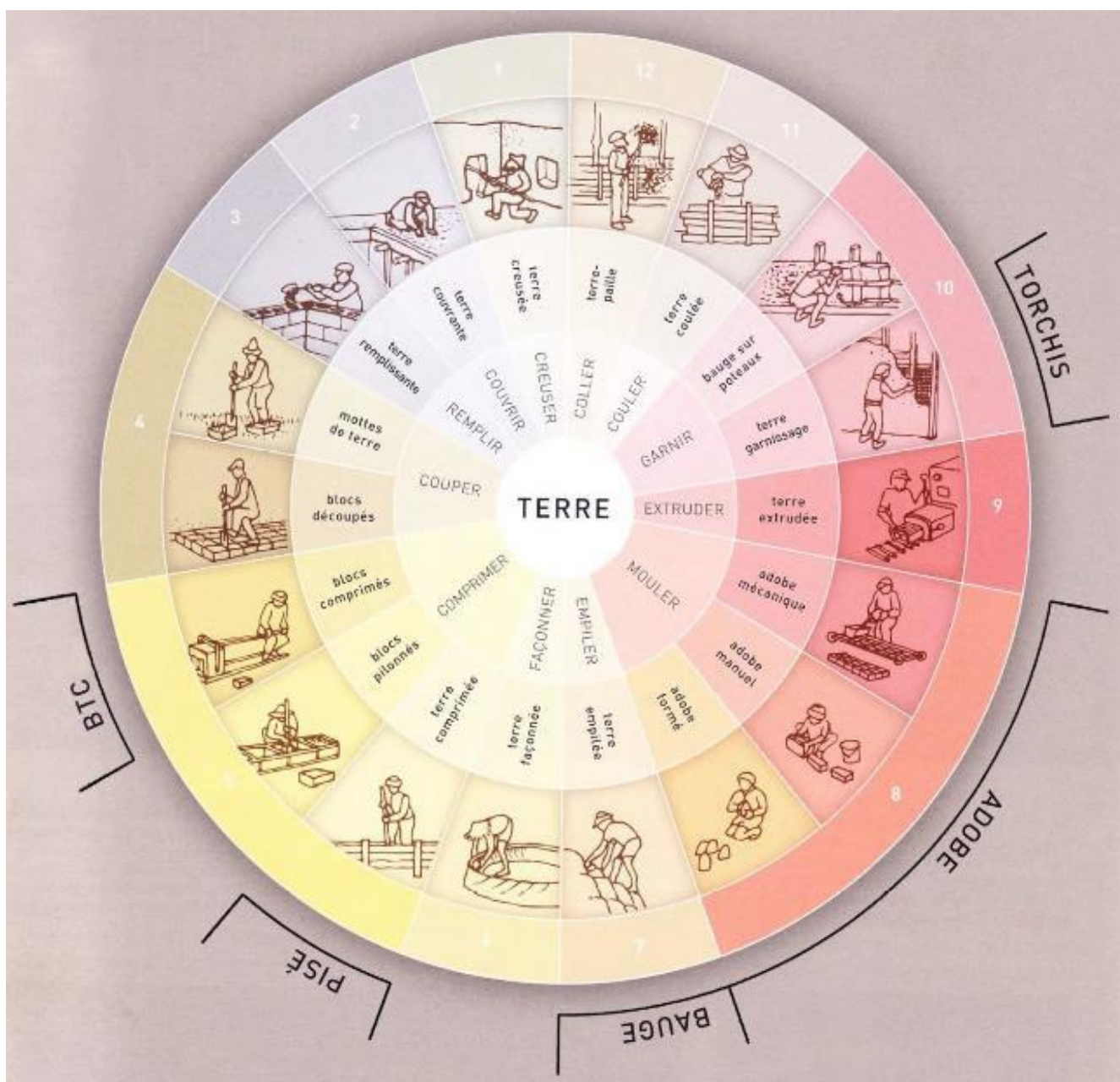


Figure I.5 Techniques de construction en terre [11].

Tableau I.1 Différentes techniques de construction en terre [63].

Techniques	Descriptions
Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur du sol
Terre recouvrante	Terre qui recouvre une structure construite avec un autre matériau
Terre remplissante	Terre qui remplit une enveloppe faite de matériaux creux
Terre découpée	Blocs de terre directement découpés dans le sol
Terre comprimée	Terre comprimée dans des moules ou des coffrages
Terre façonnée	Terre façonnée à l'état plastique à la main
Terre empilée	Boules de terre empilées en murs épais
Terre moulée	Terre moulée dans des moules de formes diverses
Terre extrudée	Terre extrudée à l'aide d'une machine
Terre coulée	Terre coulée dans un coffrage ou un moule
Terre-paille	Matériau léger constitué d'une barbotine argileuse liée aux fibres
Terre garnissante	Terre mélangée aux fibres qui garnit en couches minces un support

Tableau I.2 Principales techniques de construction en terre crue.

Techniques courantes	Pisé	Bauge	Torchis	Adobe ou brique crue	Terre comprimée
Description	Le pisé est un procédé de construction qui consiste à compacter de la terre disposée dans un coffrage en couches successives	La construction en bauge consiste à façonner des murs massifs et épais à l'aide d'une terre mise en œuvre à l'état	Le torchis est une technique de remplissage d'ossature avec un mélange de terre fibrée (CRAterre et al., 1979	Les adobes sont des briques de terre crue moulées sans compactage et séchées au soleil. Leur taille et leur	(BTC) est une évolution de l'adobe. La terre, généralement stabilisée, est compactée à l'aide de presse

	peu épaisses à l'aide d'un pilon [63].	plastique, généralement sans l'aide de coffrage [63].		forme varient selon les moules utilisés [63]	manuelle ou mécanique [63]
Terre utilisée	La terre à pisé est un mélange hétérogène de particules de terre de grosseurs variables allant de cailloux (< 6 cm) aux argiles (< 2µm) [63 ;11].	La terre à bauge est généralement très argileuse, avec du sable, des graviers, ainsi que des fibres végétales [63].	La terre limono-argileuse est une des meilleures terres pour la construction en torchis. Cependant, différentes recettes existent pour fabriquer le torchis[116].	Les terres constituées de sable, de limon et d'argile seraient les plus aptes à la fabrication de l'adobe [10].	La brique de terre comprimée est produite à partir de la même terre que le pisé, mais débarrassée par tamisage de grains > 2 cm [63].

I.1.4 Avantages de la construction en terre crue

Aujourd'hui, la terre crue réapparaît de plus en plus dans les constructions non seulement à cause de ses qualités constructives indéniables, mais également car ses propriétés permettent de répondre aux enjeux environnementaux actuels. La terre contribue ainsi pleinement à une réelle démarche de développement durable [14].

❖ **Avantages constructifs**

Elle présente une masse volumique élevée, ce qui lui confère de précieuses qualités d'inertie thermique pour le stockage de la chaleur et la régulation des changements de températures entre jour et nuit.

- C'est un bon régulateur de l'humidité ambiante grâce à sa perméabilité à la vapeur d'eau.
- Elle possède de bonnes qualités phoniques (absorption).
- Elle résiste bien au feu.

❖ **Avantages environnementaux**

- Comme elle n'est pas cuite, la terre crue nécessite peu d'énergie pour sa fabrication par rapport aux briques cuites ou au ciment et génère très peu d'émissions de CO₂.
- Ce matériau est abondant et renouvelable.

- Il est souvent possible d'utiliser une terre disponible localement, voire prélevé sur le site même de la construction.
- La construction en terre peut ne produire aucun déchet et son recyclage se fait sous la forme d'une réutilisation ou une simple restitution aux milieux naturels locaux, si l'argile n'a pas été stabilisée.
- C'est un matériau qui n'a pas d'impact négatif sur la santé des occupants.

❖ **Avantage économique**

- Elle permet la réduction de la fuite des devises par une substitution aux matériaux importés (ciment, acier, bois).
- Sa production manuelle est caractérisée par une Haute Intensité de Main d'œuvre (HIMO), ce qui favorise l'économie locale, la création d'emplois et participe concrètement à la lutte contre la pauvreté.

❖ **Avantages sociétaux**

- Elle valorise le patrimoine et le savoir-faire ancestral
- Elle permet de répondre à la demande d'habitat dans les pays du Sud et de lutter contre la précarité des populations.

I.2 La brique

I.2.1 Introduction

Les briques, depuis longtemps, sont considérées 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 ...etc.)

Dans cette partie, nous allons exposer les étapes de progression de la technologie de confection des différentes briques et en suite nous allons donner l'état des briques de terre crue et cuite.

I.2.2 Histoire de brique

L'origine de la brique remonterait à 7 000 ans avant J. C. dans la région du Tigre et de l'Euphrate. Son utilisation se généralise au III^e millénaire comme matériau de construction avec la sédentarisation de l'homme. L'obligation de se protéger de façon durable des intempéries et des prédateurs impose à l'homme de trouver un matériau dur et résistant. De plus, la brique est aisément réalisable à partir d'argile ou de terre. Les premières maisons en brique ont été découvertes en Irak puis en Mésopotamie et son usage couvre rapidement dans tout le Moyen-Orient [24].

Pendant longtemps, la brique (appelée « adobe ») était moulée puis séchée au soleil. Ainsi, elle permettait de monter des habitations ou des monuments comme la pyramide d'Amenemhat III. Mais elle restait fragile et ne résistait pas aux intempéries. Les hommes découvrent que la brique laissée au soleil devient plus dure et par conséquent plus résistante. La cuisson de la brique est expérimentée 2500 avant J. C. en Mésopotamie et dans la vallée de l'Indus [25]. La cuisson sert à réaliser des constructions plus importantes. En Assyrie et en Grèce, la cuisson de la brique sert à créer des frises et de réaliser des briques émaillées. Au XV^e siècle, le nord de l'Italie devient maître dans cet art avec la décoration des habitations et des monuments avec des frises, des guirlandes et des festons.

En 1830, Auguste Virebent dépose un brevet d'invention d'un dispositif de presse de brique. C'est le début de l'industrialisation de la brique. Il met au point aussi une invention dénommée « plinthotomie » qui était une machine agissant comme un emporte-pièce pour découper diverses formes sur la glaise fraîche. Cette technique sert à s'affranchir de sculpteur et d'industrialiser sa fabrication [26].

Avec la révolution industrielle, des briqueteries se regroupent et forme de véritables usines. Des fours à charbons permettent de créer des fours plus grands et les grandes cheminées de briques deviennent des éléments caractéristiques de ces briqueteries. Actuellement, les briqueteries ont quasiment disparu. L'après-guerre marque le remplacement de la brique par le béton et l'acier.

I.2.3 Définition de la brique

Une **brique** est un élément de construction généralement en forme de parallélépipède rectangle constitué de terre argileuse crue, séchée au soleil — brique crue — ou cuite au four, employée principalement dans la construction de murs [27].



Figure I.6 La brique émaillée était déjà connue dans la Mésopotamie antique [27]



Figure I.7 Comalcalco, Mexique : pyramide de briques mayas Pyramide de briques mayas au site archéologique de Comalcalco, Tabasco, Mexique [27].

La brique est un matériau de construction qui est fabriqué en portant une petite quantité d'argile, préalablement mise en forme, à une température appropriée- la température de frittage. Les particules d'argile commencent alors à fondre et s'agglomèrent pour former une masse à caractère pierreux. Après la cuisson, la brique conserve une certaine porosité, qui lui confère d'ailleurs des propriétés spécifiques et la distingue des autres matériaux de construction.

I.2.4 Les briques de terre crues

La terre crue est le matériau de construction traditionnel par excellence. On en retrouve la trace à l'âge de Bronze et la muraille de Chine présente des tronçons. De nombreux monuments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue : forteresses marocaines, pyramides d'Égypte..... [28]. Aujourd'hui encore, environ 40% de l'humanité habite des constructions en terre crue. Facilement mobilisable dans les régions où les pierres et bois manquent, sa mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de matériel sophistiqué. De même sa mise en œuvre, sans transport, sans cuisson, sans processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO₂ exceptionnel [28].

I.2.4.1 Fabrication en terre crue

On retrouve la technique de brique crue en Lorraine où — dit un manuel de 1825 — on construisait aussi avec des briques desséchées au soleil et posées avec un mortier d'argile, l'exécution étant facile et peu coûteuse. On labourait en plusieurs sens une portion de terre dont la surface est calculée en raison de la dimension du bâtiment à construire ; on battait avec une masse cette portion de terre et la forme en surface unie ; puis, avec des règles et un tranchant, on coupait cette terre battue en lignes droites, espacées de 8 à 9 pouces, et par d'autres transversales de quatre à cinq pouces de distance. Tous ces carreaux ainsi tracés présentaient un champ couvert de briques. On laissait cette terre bien sécher et prendre le plus de consistance possible et après un temps convenable, on enlevait chaque carreau qui présentait alors la forme d'une brique de deux pouces environ d'épaisseur. C'est avec de pareilles briques qu'on élevait un bâtiment en posant chaque assise à la manière ordinaire sur un lit de la même terre délayée en consistance de mortier [29].

La technique prend le nom « d'adobe » sur les bords de la Méditerranée et par voie de colonisation en Amérique latine où elle est encore le patrimoine de beaucoup de familles pauvres, qui conservent cette tradition depuis des temps immémoriaux.

La terre crue est une alternative à une industrie briqueterie énergivore (qui consomme beaucoup d'énergie). Les coûts d'approvisionnements énergétiques des fours à brique poussent d'ailleurs certaines briqueteries à une inévitable reconversion dans la fabrication de briques en terre crue [30].

Il existe plusieurs types de terre crue entre autres nous citons :

I.2.4.2 Adobe

I.2.4.2.1 Définition

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », sont des technologies utilisées depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité du paillé hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusque à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau). Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexible [19, 20,21]. Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon fabriqué des petits éléments de maçonnerie, la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (figure.I.8). La brique d'adobe peut varier d'une dimension de (15*25*10) cm a (30*60*10) cm. La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen –Orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, en France et États Unis d'Amérique [31, 32,33].



Figure I.8 Moulage et séchage de l'adobe [31.32]

I.2.4.2.2 La production

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction [34].

I.2.4.2.3 Méthode de production de l'adobe

On distingue deux principaux modes de production des adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de production traditionnel et un mode de production modernisé.

a. Mode de production manuel

• Moule simple

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main (figure.I.9), la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi- ferme La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi- molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit

sous forme de pâte mi-ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour 2 ouvriers.

- **Moules multiples :**

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, couramment en forme d'échelles ou de forme carrée divisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion.

Les moules doivent être manipulés facilement par 2 ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un danger de retrait et donc de fissuration plus importante.

Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, la production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8 000 à 10 000 blocs par jour [34].



Figure I.9 Moule de l'adobe [34]

- b. Le mode de production mécanisé :**

La production mécanisée de blocs d'adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux États Unis d'Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Sumpf. Celui-ci mettait au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d'un système de trémie mobile au-dessus d'un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés. Ce type de machine permet une production pouvant aller de 20 à 30 000 blocs par jour.

I.2.4.2.4 Les produits

Les produits de la fabrication des adobes, manuelle ou mécanisée, sont extrêmement variés. Ils sont le plus souvent directement tributaires des savoir-faire traditionnels et varient quant au type de terre utilisée, au mode de moulage, aux dimensions des blocs (très changeantes) et aux destinations d'emploi plus ou moins spécifiques (blocs spéciaux). Les moules utilisés sont généralement en acier ou en bois (le plus souvent) et de forme très variée. Les dimensions les plus fréquentes de (40*40*15) cm ou (40*30*15) cm, ou (4020*10) cm.... On distingue globalement trois principaux types de produits : Produits classique, produits spéciaux, produits antisismiques [34,35].

I.2.4.2.5 Les avantages de l'adobe

L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels sont :

- Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- D'emmagasiner la chaleur.
- Réduire la consommation d'énergie.
- De ne produire virtuellement aucune pollution.
- Construction peu coûteuse.
- N'entraîne pas la production de gaz [31].

I.2.4.3 Les pisés

I.2.4.3.1 Définition

Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes [36]. Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». C'est à dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade.

Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée.

(Figure I.10) montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé.

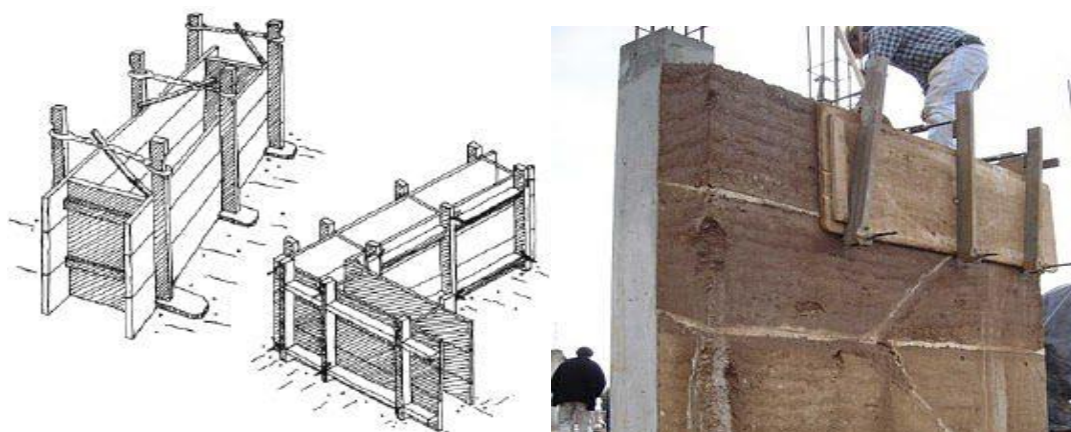


Figure I.10 Coffrage utilisé dans la conception des murs en pisé [36]

I.2.4.3.2 Technique de production

Le pisé est une technique particulière pour monter un mur en terre crue : celle-ci est compactée (à l'aide d'un pilon) dans des coffrages (appelés banches) de grande largeur qui se superposent pour constituer la hauteur des murs (figure I.11) [36].

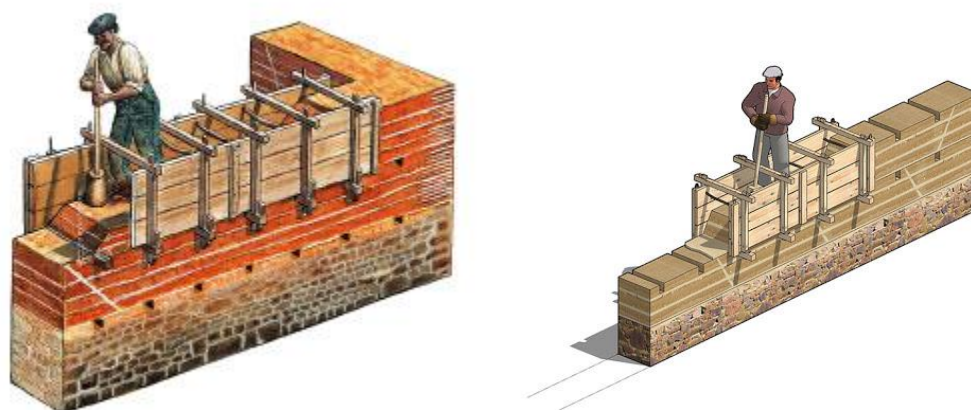


Figure I.11 Construction d'un mur en pisé [36]

Cette technique permet d'utiliser la terre généralement directement issue du site de la construction, et ne nécessite pas de transformation (pas d'utilisation d'énergie pour altérer ses propriétés basiques) [36].

Des « lits de chaux » ou « cordons de chaux » font souvent office de liant entre les différentes « banchée » (hauteur de coffrage).

En revanche, cette technique n'est pas applicable avec toutes les terres. En effet, la terre à pisé doit avoir une granulométrie variée : graviers, sables, limons et argiles dans des proportions bien définies, même si selon les lieux d'extraction, la matière se comportera différemment (couleur, tenue aux intempéries, ...) (figure I.12) [36].



Figure I.12 Composition de pisé [36]

I.2.4.3.3 Les produits : différents types de pisé

L'aspect général du matériau pisé, une fois compacté et décoffré est celui d'un "béton maigre de terre", variable selon le type de terre (apparence de graviers et cailloux ou texture plus fine), selon le type de coffrage utilisé et les principes constructifs adoptés pour édifier la maçonnerie de terre en "banchées" successives (en progression horizontale ou verticale avec des coffrages traditionnels) [34].

I.2.4.3.4 Les avantages de pisé

La terre possède de multiples qualités dans le domaine du bâti :

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau.
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).
- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité à stocker la chaleur et à la restituer par rayonnement.
- Isolation phonique et qualité acoustique.
- Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire [36].

I.2.4.4 Les blocs de terre comprimée

I.2.4.4.1 Définition

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont des éléments de maçonnerie, des dimensions réduites et des caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique. Figure (I.13, I.14, I.15) de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat. Les blocs de terre comprimée ont généralement un format parallélépipédique rectangle et sont pleins ou perforés, à relief verticale ou horizontal. Les blocs de terre comprimée sont constitués principalement de terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre (gravier, sable, limon et argile) ; un additif tel que de (ciment, chaux, pouzzolane etc..) peut être ajouté néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des produits. Les caractéristiques finales des BTC dépendent de la qualité des matières premières de (terre, additif) et de la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression, cure) [37].



Figure I.13 Brique de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle [37]

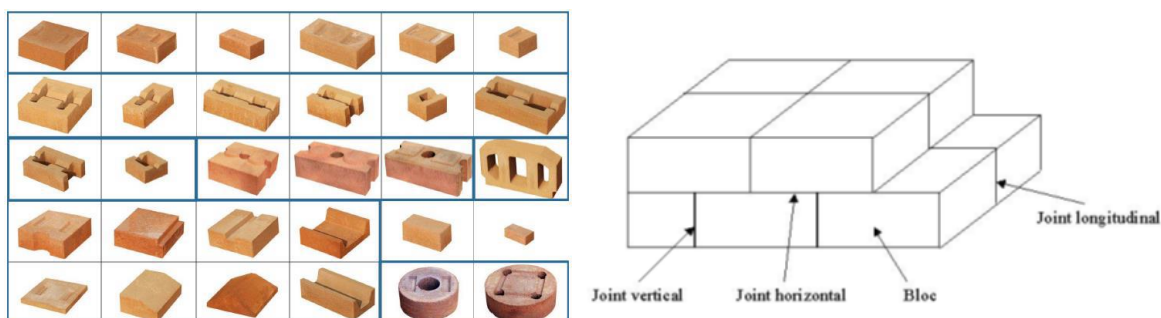


Figure I.14 À gauche, différents formats des BTC, à droite désignation des joints (P'Kla, 2002).



Figure I.15 Quelques réalisations en BTC. De gauche à droite : la Mosquée Al Medy en Arabie Saoudite ; un chantier en BTC en R.D. Congo ; une maison en BTC à L'Isle-d'Abeau en France [11]

I.2.4.4.2 Production des blocs de terre comprimée

La production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits pas compactage avec exception de la phase de cuisson. L'organisation de la production sera selon qu'elle est réalisée dans le cadre de petites unités de production artisanales (ou briqueteries) ou bien dans le cadre d'unités de production semi-industrielles ou industrielles. Les aires de production, de séchage et des stockages varient également selon les modes de production adoptés et les conditions de production issues de l'environnement climatique, social, technique et économique [33].

I.2.4.4.3 Les avantages des blocs de terre comprimée

1. La BTC est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, sable et gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson.
2. La BTC procure un confort thermique et phonique excellent : de par son inertie thermique et sa masse, un mur en BTC apporte confort thermique et isolation phonique.
3. La BTC offre une grande résistance : la résistance à la compression d'une BTC dépasse les 60 bars (60 kg/cm²)
4. La BTC présente un intérêt architectural et esthétique : en cloison, en mur porteur, la BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.
5. La BTC est simple à mettre en œuvre : la BTC se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre [38].

I.2.4.5 Bauge

Ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses [114].

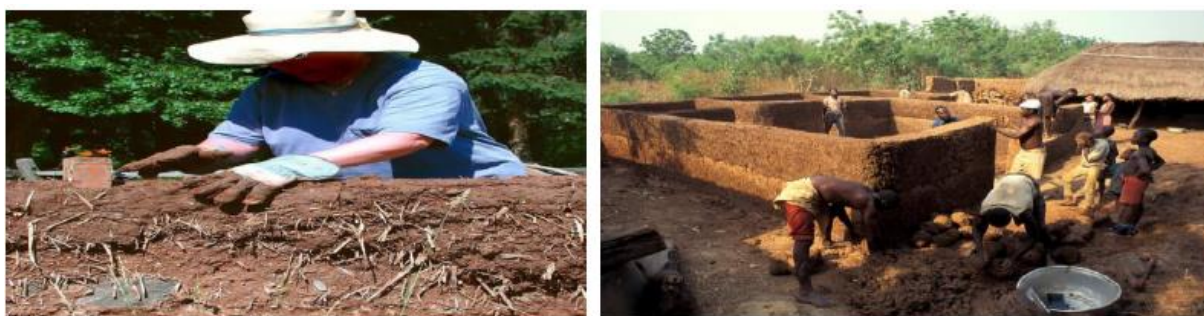


Figure I.16 Technique de la construction avec le Bauge [114].

I.2.4.6 Torchis

Une structure en colombages et claires de bois est hourdée avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres fibres, constitue les parois de la bâtisse [114].



Figure I.17 Technique de construction en Torchis [114].

Tableau I.3 Les caractéristiques des briques de terre crue (Adobe, Pisé, BTC) [39]

Caractéristique	Type de brique de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique (Kg/m ³)	1200-1700	1700-2200	1700-2200
Résistance à la compression (MPA)	2-5	<2.4	<2.4
Résistance à la traction (MPA)	-	0.5-1	-
Conductivité thermique (W/m.°C)	0.46-0.81	0.81-0.93	0.81-1.04
Chaleur spécifique (J/Kg.°C)	900	850	-
Capacité thermique (KJ/m ³ . °C)	1350	850	-
Absorption d'eau (%)	5	10-20	10-20
Isolation acoustique (dB)	-	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20 cm	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20 cm
Retrait au séchage (mm/m)	1	1-2	0.2-1
Emploi en maçonnerie	Porteur	Porteur	Porteur
Surface	Irrégulière	Rugueuse a lisse	Lisse
Éthique	Pauvre	Bon a excellent	Moyen a bon

I.2.5 La stabilisation des briques

I.2.5.1 Définition de la stabilisation

La stabilisation est un ensemble de procédés physique, chimique ou mécanique visant à améliorer les caractéristiques d'une brique, en particulier sa résistance portante, sa sensibilité à l'eau et sa durabilité. Elle doit permettre :

- De réduire le volume des vides entre les particules solides.
- De colmater les vides que l'on peut supprimer.
- De créer des liens ou d'améliorer les liaisons existantes entre les particules (résistance mécanique).
- L'amélioration de ces caractéristiques doit garder un caractère irréversible.

I.2.5.2 Procédés de stabilisation

On dénombre généralement trois principaux procédés de stabilisation :

A. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique améliore la brique par la modification de sa densité naturelle C'est ce qu'on appelle la densification. Il s'agit du compactage qui consiste essentiellement en une réduction de porosité du matériau par resserrement des particules. Les effets de compactage effectué dans de bonnes conditions, se traduisent par une diminution de la perméabilité, de la compressibilité, de l'absorption d'eau et du gonflement. Les résistances mécaniques initiales et à long terme augmente. Le compactage à lui seul permet d'obtenir un matériau aux

caractéristiques mécaniques élevées. Cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mise au contact de l'eau, la brique redevient plastique et ne résiste plus du tout à la compression. L'immersion d'une brique de terre dans un seau d'eau, donne le lendemain un tas de boue au fond du seau. Si les briques de terre sont protégées des intempéries (débords de toiture importants, protections contre le rejaillissement, soubassements suffisamment élevés. Drainage en pied de mur), il n'est pas nécessaire de stabiliser.

- **Ajouts des fibres**

La stabilisation par ajout de fibres est couramment employée dans les techniques de construction en terre traditionnelles. Elle consiste notamment à ajouter de la paille dans les terres qui sont travaillées par pétrissage puis appliquées sur des clayonnages en bois ou moulées sous forme de blocs de terre séchée au soleil.

L'ajout de fibres joue plusieurs rôles : réduction, voire élimination de la fissuration de retrait, accélération du séchage par drainage de l'humidité vers l'extérieur du matériau, allègement du matériau, augmentation de la résistance à la traction, ce qui est sans doute le meilleur avantage.

Les fibres employées, hormis la paille qui est la plus courante sont aussi d'autres fibres végétales telles que balle des céréales, fibres de chanvre, de noix de coco, de sisal, débris du teillage du lin ou du chanvre, charges végétales légères telles que sciures de bois et copeaux. On utilise aussi dans certaines traditions des fibres d'origine animale telles que poils, crins ou bourre d'animaux et plus récemment des fibres de synthèse telles que cellophane, fibres d'acier ou de verre [62] [63].

B. Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les propriétés d'une brique de terre par l'intermédiaire de certains adjuvants. Afin de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de produits (liants hydrauliques par exemple), rendant les sols traités moins hydrophiles. L'adjonction du chaux ou ciment qui ont des liants hydrauliques permet de lier les grains de sable tout en stabilisant l'argile de terre. On obtient ainsi une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la sensibilité à l'eau. Il faudra veiller ce que l'eau de gâchage ne contienne ni de matière organique, ni des sulfates. D'après Remillon cité par Ottou (1987), la technique anglaise estime que tous les sols sont utilisables, sauf ceux dont la nature est trop plastique, c'est-à-dire ceux dont l'indice de plasticité est supérieur à 20% et ceux contenant des sulfates nuisibles au ciment ou chaux ou des matières organiques [61].

L'ajout à une terre d'autres matériaux (liants hydrauliques par exemple) ou de produits chimiques c'est ce qu'on appelle la liaison, en modifie ses caractéristiques en générant des réactions physico-chimiques qui peuvent entraîner la création d'une matrice d'enrobage ou de liaison des particules ou même la formation d'un autre matériau [62] [63].

- **Imperméabilisation**

Une matière insensible à l'eau (bitume, bentonite, etc.) est introduite dans la terre qui va remplir les vides, pores et fissures et imperméabiliser la terre. Ce moyen contribue à améliorer la résistance à l'érosion et à stabiliser le gonflement et le retrait [62] [63].

- Ajout de chaux

La stabilisation des terres à la chaux a été développée grâce aux travaux routiers dès le début du XX^e siècle et suscite un intérêt croissant dans le domaine du bâtiment.

a) Mécanisme :

- L'absorption d'eau : dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur
- La carbonatation qui résulte d'une réaction de la chaux avec le dioxyde de carbone de l'air contenu dans la terre et qui forme des ciments carbonates ;
- La réaction pouzzolanique que l'on considère être le mécanisme le plus important. Il contribue à une dissolution des minéraux argileux en milieu alcalin suivi d'une création de silicates et de l'aluminium et de calcium (recombinaison de la silice et de l'alumine des minéraux argileux) qui cimente les grains entre eux [62] [63].

a) Efficacité de dosage :

La réaction exothermique d'hydratation de la chaux contribue à assécher la terre. Pour 2 à 3% de chaux ajoutée, on observe une diminution de la plasticité, On pratique en général des dosages en chaux de l'ordre de 6 à 12% [62] [63].

b) Stabilisation physique

La stabilisation physique modifie les propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité (correction de texture). Le mélange obtenu conduit selon le cas, soit diminué l'indice de plasticité de matériau de base, soit à lui conférer une certaine cohésion, Sikali cité par Ottou (1987) a étudié la stabilisation granulaire d'une latérite par ajout de gravillons concassés. Il a constaté que pour un pourcentage optimum du matériau d'apport, la portance du matériau étudié s'améliore considérablement [61].

Il s'agit essentiellement d'une intervention sur la texture de la terre en modifiant sa composition granulaire par tamisage de fractions de grains excédentaires ou par apport de fractions de grains faisant défaut [62] [63].

I.2.6 Les briques de terre cuite :

Les matériaux de terre cuite sont utilisés depuis plusieurs siècles dans le bâtiment. Ils se sont adaptés à l'évolution de la construction et à ses impératifs, dans le domaine traditionnel, Ils sont fabriqués à partir d'argiles communes devenant souvent rouges à la cuisson (sauf les argiles calcaires dont la couleur de cuisson varie du rose au jaune et au blanc) [40].

Dans la suite on va citer les étapes principales de la fabrication de brique de terre cuite.

I.2.6.1 Fabrication de la brique en terre cuite :

• Méthode traditionnelle :

L'extraction de la terre indispensable à la fabrication de brique était faite à partir de puits rudimentaires, de mines ou de carrières. Avant la mécanisation, les hommes arrachaient l'argile avec fers à plats. Une fois l'argile extraite, un travail de broyage permet d'affiner la matière première. Par la suite, l'ajout d'eau en grande quantité permet d'obtenir une pâte homogène à la plasticité voulue. Le pétrissage, jadis au pied et désormais avec de puissantes machines, permet

d'éliminer les derniers cailloux. Cette préparation de l'argile se termine par une phase de pourrissage pendant laquelle la terre glaise se « repose » [41].

Son façonnage se fait grâce à un moule en bois dont les bords et le fond sont ensablés pour que la glaise n'adhère pas. Un morceau de glaise est déposé dans le moule, puis identiqueisé. La surface est identiqueisée et arasée de son excédent avec un archet ou d'une plane humide. Le tout est démoulé et déposé sur une grille pour aller au four. Ce travail manuel forme des briques caractéristiques. Actuellement, ce travail est industrialisé et permet d'obtenir différentes tailles de briques idéalement semblables. Un dispositif de coupes automatique produit des briques à partir de boudins de glaise. La brique subit ensuite une série de séchage qui évitera les fissures et les éclats lors de la cuisson [42].

- **Méthode moderne**

La fabrication d'une brique moderne passe par les grandes étapes suivantes :

- Extraction de l'argile rouge et de l'argile verte. On mélange à peu près 10% d'argile verte avec 90% d'argile rouge. La terre argileuse, le plus souvent extraite à proximité de la briqueterie, n'a pas le droit de comporter trop de sable.
- Broyage de la terre pour obtenir la granulométrie désirée
- Humidification et mélange des divers types de terres ; ajout d'une faible quantité de lignosulfite, résidu de l'industrie du papier, dérivé de la lignine contenue dans les arbres ; le lignosulfite favorise l'extrusion.
- Extrusion au travers de filières correspondant à une forme donnée de brique
- Coupage
- Séchage dans un séchoir à gaz (durée entre 20h et 50h)
- Cuisson à peu près 900°C, jusqu'à 30 heures
- Peut-être rectification (fraisage des bords jointifs pour favoriser le montage).



Figure I.18 Pile de briques modernes, faites d'argile et de sable [27]

I.2.6.2 La cuisson :

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée, avant de pouvoir devenir une brique de terre cuite à proprement parler. C'est là une phase d'une grande importance qui doit se dérouler très progressivement. On augmente graduellement la température jusqu'à l'obtention de la température de cuisson (comprise entre 850 et 1200°C, en fonction du type d'argile), on diminue ensuite progressivement la température jusqu'au refroidissement complet. Chaque mélange d'argile se caractérise par sa propre « courbe de cuisson » [43].

- **Types de fours**

Dans le passé, on utilisait différents types de fours. On peut facilement classer ces différents fours en deux catégories : les fours continus et les fours discontinus.

Pour les fours à fonctionnement discontinu, le mode opératoire comprend le chargement du four, sa mise à feu, son extinction et refroidissement lorsque la cuisson est terminée. Dans un four de type continu, le feu ne s'éteint jamais, et c'est le chargement qui est introduit et extrait du four suivant un cycle régulier et ininterrompu. Aujourd'hui, on utilise un four continu de type four tunnel. Dans celui-ci, le chargement de briques parcourt un tunnel rectiligne sur des wagonnets et passe successivement par les zones de « préchauffage », de « cuisson » et de « refroidissement ».

- **Les étapes de cuisson**

Concernent la réaction des matières premières à la cuisson, la chaleur provoque des modifications de masse volumique, de porosité, de dureté, de dimensions. Elle provoque également des déshydratations, des décompositions et des combinaisons qui modifient les propriétés comme suit :

- Jusqu'à 200°C environ, évacuation de l'eau résiduelle de séchage (évacuation de l'eau physique)
- De 200 à 450°C, décomposition de matières organiques ;
- De 450 à 650°C, destruction des minéraux argileux avec départ de l'eau de constitution (évacuation de l'eau chimique)
- De 650 à 750°C, décomposition du carbonate de chaux (cas des argiles calcaires) [40].

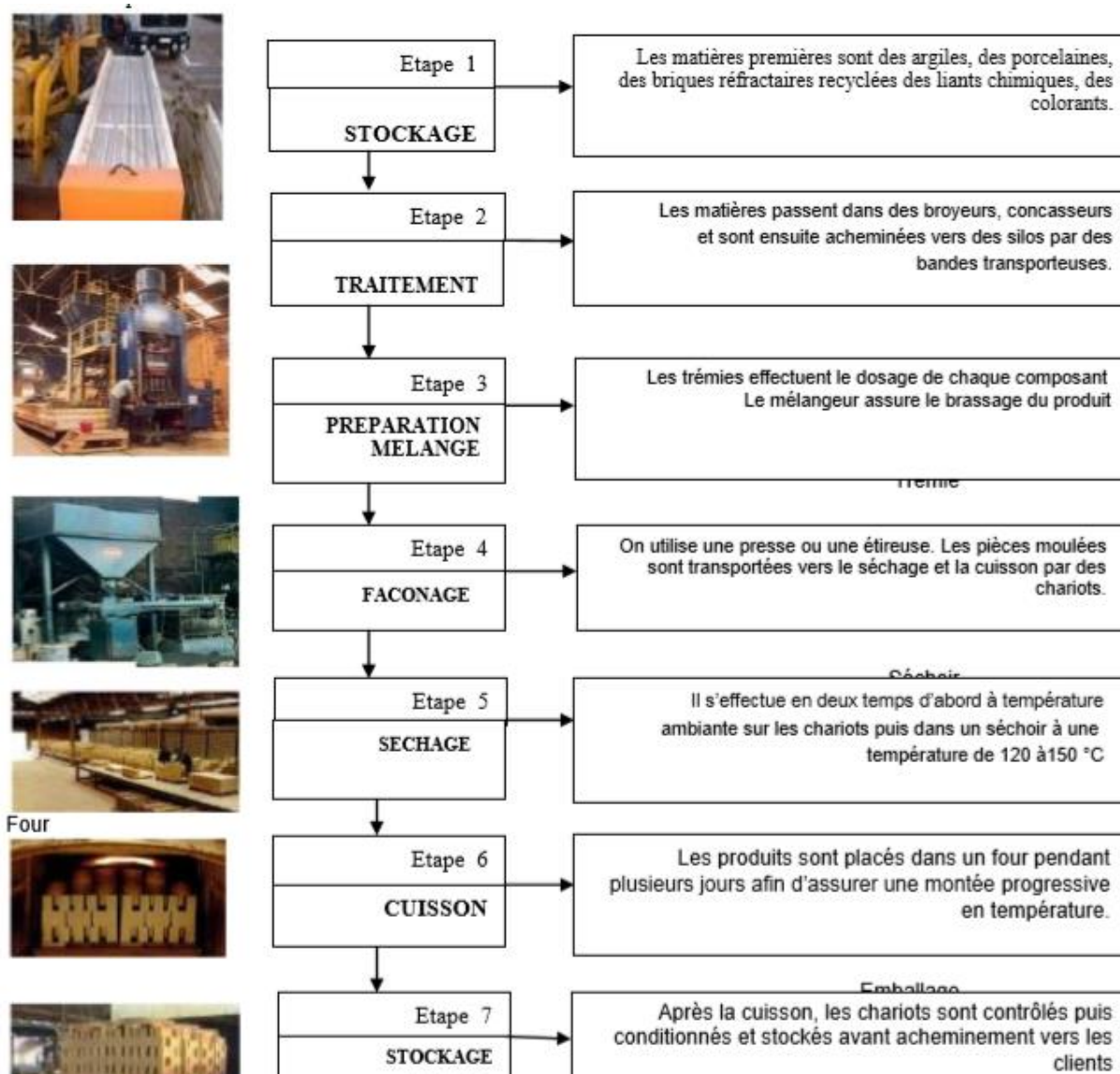


Figure I.19 Diagramme de Production de briques d’argiles [44]

I.2.6.3 Produits de brique en terre cuite :

I.2.6.3.1 Brique ordinaires :

Les briques de terre ordinaire se présentent sous la forme de parallélépipèdes rectangles obtenus par extrusion « filage » ou éventuellement par pressage lorsqu’il s’agit de brique pleine. Selon la norme XP P13 305 la brique plein ordinaire se compose en deux catégories pleins ou perforés en terre cuite (figure I.18) [45,46].

- **Brique pleine** : brique ne comprend aucune perforation et dont le format d’appellation le plus courant est dimensions : 250*120*55 mm (figure I.20 et I.21)
- **Brique perforée** : Les briques perforées qui comportent au moins quatre conduits non débouchant sont fabriqués par voie demi-sèche. Ces briques doivent avoir les dimensions suivants 250*120*88-65mm. On fabrique les briques à 8 et 18 conduits dont les diamètres sont de 35-45 mm et de 17-18 mm Les trous de la perforation sont

faits soit verticalement dans la proportion de 60 % de la section totale, soit horizontalement avec alvéoles parallèles au lit de pose dans la proportion de 40 % de la section totale.

Selon la technologie de fabrication des briques traditionnelles, il est difficile d'obtenir des briques ayant des dimensions exactement précises, à cause du retrait à l'air et retrait de cuisson. Les tolérances sur les briques peuvent être calibrées de la manière suivante : ± 6 mm sur la longueur ; ± 4 mm sur la largeur et ± 3 mm sur l'épaisseur [33.34] (figure.I.22 figure.I.23)

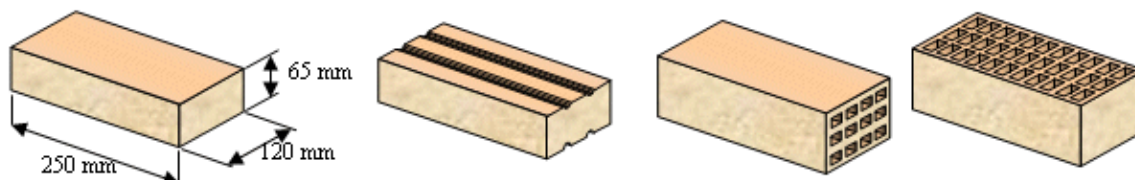


Figure I.20 Brique pleines et perforées



Figure I.21 Brique pleines

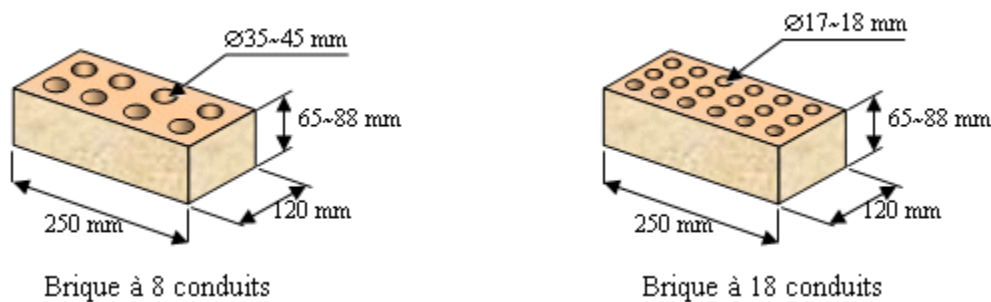


Figure I.22 Briques perforées

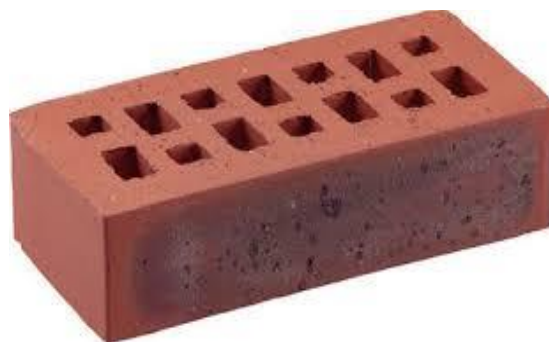


Figure I.23 Brique perforées

I.2.6.3.2 Brique creuse de terre cuite à perforation horizontale

Selon la norme NF P 13-301. Les briques creuses à perforation horizontale sont des produits comportent des perforations sont parallèles au plan de pose et dont la section totale dépasse 40% de la section du produit [45, 46,47]. Briques plâtrières : d'épaisseur de 3.5 à 7.5 cm. Les briques creuses sont classées :

❖ **D'après la forme :**

Type C : à faces de pose continue,

Type R.J: à rupture de joint (coupure de joint horizontal).

❖ **D'après la résistance :**

On distingue les briques ordinaires et les briques à résistance garantie.

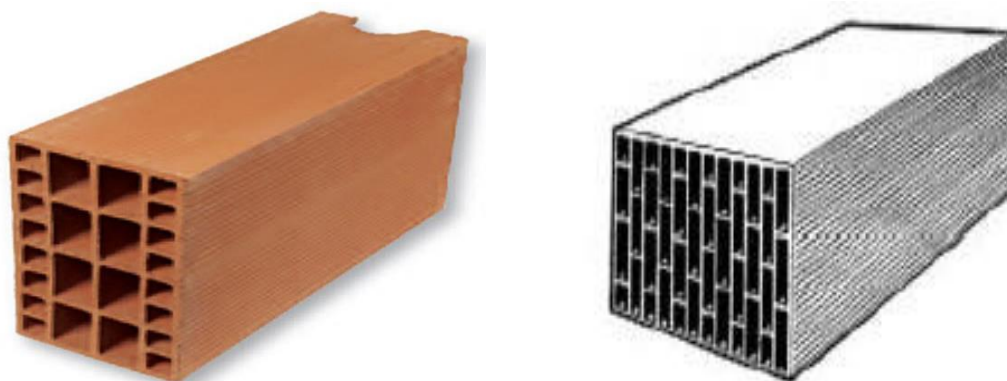


Figure I.24 Briques creuses de terre cuite à perforation horizontale

I.2.6.3.3 Brique de terre cuite à perforation verticale (blocs perforés)

Les blocs perforés sont des produits permettant d'une paroi réaliser toute l'épaisseur avec un seul élément, et comportant des perforations perpendiculaires à la face de pose. Leur largeur est au moins de 14cm, et la somme des perforations est égale ou inférieure à 60% de la section totale. Selon leurs caractéristiques thermiques, ces blocs peuvent être soit des blocs normaux soit des blocs de **type G** (figure I.23) [40,45]

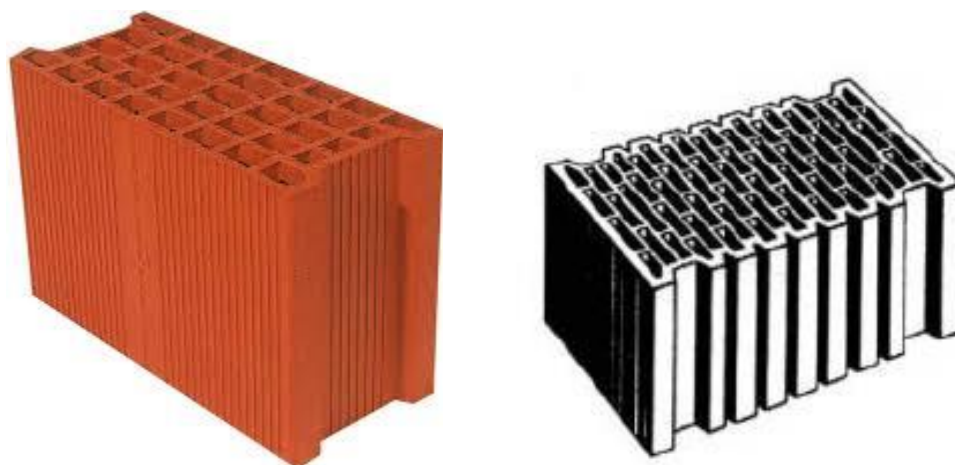


Figure I.25 Briques creuses de terre cuite à perforation verticale type G

I.2.6.3.4 Brique réfractaire :

Autre type, la brique réfractaire qui est davantage utilisée dans la construction de fours ou de cheminées en raison de sa résistance aux fortes températures (jusqu'à 1700 degrés). Et pour cause, la brique réfractaire est matériau très isolant qui conserve la chaleur pour mieux la restituer. Grâce à son excellente inertie thermique, elle chauffe et se refroidit lentement. Cette brique est très peu utilisée pour la construction d'un mur en raison de son coût plus élevé [48].



Figure I.26 Brique réfractaire

I.2.6.3.5 Brique de verre :

La brique de verre séduit par son originalité et sa personnalisation. Disponible en de multiples dimensions et formes, la brique de verre s'impose dans toutes les pièces de la maison sous forme de cloisons.

Décorative et très pratique, la cloison en brique de verre préserve l'intimité d'une pièce, et créer des espaces originaux pouvant se décliner dans de nombreuses coloris et finitions. Satinée, translucide, opaque, ou texturée, il y en a pour tous les goûts et styles d'ambiances.

Au-delà de son design unique, ce type de brique profite d'une excellente isolation acoustique et thermique, d'une bonne résistance au feu, et se trouve être résistante au

défoncement. Que ce soit dans une salle de bains, une cuisine, ou une pièce à vivre, une cloison en brique de verre s'harmonise aisément avec l'ambiance instaurée [48].



Figure I.27 Brique de verre

I.2.6.3.6 Brique de pavage :

Ces briques contiennent une bonne quantité de fer. Le fer vitrifie les briques à basse température. Ils sont utilisés dans les sols des jardins, les trottoirs. Ces briques résistent à l'action abrasive de la circulation, ce qui rend le sol moins glissant [49].



Figure I.28 Brique de pavage

I.2.6.3.7 Propriété et caractéristique des briques de terre cuite

Les propriétés et les caractéristiques des briques de terre cuite sont indiquées dans les tableaux suivants :

Tableau I.4 Propriétés des briques pleins et perforés [50]

Poids spécifique (kg/m ³)		Environ 1800
Résistance Mécanique	Compression (MPA)	De 5 à 80
	Traction (MPA)	De 0 à 2
	Dilatation thermique (mm/m.k)	0.005
	Gonflement a l'humidité (mm/m)	0.1
	Retrait au durcissement (mm/m)	0.2 à 1.1
	Porosité (%)	5 à 18
Réaction au feu		Très élevé

La conductivité (w/m.°c)	1.15
--------------------------	------

Tableau I.5 La résistance thermique des briques pleins et perforés [51]

Pleins		Perforés	
Épaisseur (cm)	R (m ² . °C/W)	Épaisseur (cm)	R (m ² . °C/W)
5.5	0.05	20	0.52
10	0.09	30	1.00
22	0.20	35	1.21

Tableau I.6 Propriétés de la brique creuse [50]

Masse volumique (kg/m)	1750-2050
Résistance à la compression MPa	4-8
Dilatation conventionnelle à l'humidité mm/m	0.6-1.6
L'absorption d'eau %	≤15
Résistance au gel %	1
Isolation acoustique dB	41-58

Tableau I.7 La résistance thermique des Brique creuse [51]

E : Épaisseur en cm	5	10	20	25
R (m ² . °C/W)	0.1	0.1	0.39	0.55

Ses propriétés changent par rapport au type d'argile utilisé.

I.2.7 Les différents types de briques :

Les briques peuvent être de plusieurs types selon :

- Qualité
- Processus de construction
- Méthode de fabrication
- Matière première
- Utilisation de l'emplacement
- Capacité résistante aux intempéries
- But de l'utilisation
- Région

I.2.7.1 Classification des briques en fonction de la qualité

Sur la base de la qualité, les briques sont des types suivants :

1. **Brique de première classe** : La taille est standard. La couleur de ces briques est jaune ou rouge uniforme. Il est bien brûlé, de texture régulière, de forme uniforme. La capacité

d'absorption est inférieure à 10%, la résistance à l'écrasement est de 280 kg/cm² (moyenne) où elle est de 245 kg/cm² (minimum). Il n'a pas d'efflorescence. Il émet un son métallique lorsqu'il est frappé par un autre brique similaire ou frappé par un marteau. Il est assez difficile de résister à toute expression d'ongle sur la surface de la brique si l'on essaie de le faire avec une miniature. Il est exempt de cailloux, graviers ou matières organiques. Il est généralement utilisé

- Dans un bâtiment de longue durée, disons 100 ans
- Pour la construction d'expositions à un environnement corrosif ;
- Pour fabriquer des granulats grossiers de béton.

2. **Brique de deuxième classe** : La taille est standard, la couleur est jaune ou rouge uniforme. Il est bien brûlé, un peu trop brûlé est acceptable. Il a une forme régulière ; l'efflorescence n'est pas appréciable. La capacité d'absorption est supérieure à 10% mais inférieure à 15%. La résistance à l'écrasement est de 175 kg/cm² (moyenne) où le minimum est de 154 kg/cm². Il émet un son métallique lorsqu'il est frappé par une autre brique similaire ou frappée par un marteau. Il est assez difficile de résister à toute expression d'ongle sur la surface de la brique si l'on essaie de le faire avec une miniature. Il est utilisé pour la construction de bâtiments à un étage, abri temporaire lorsque la durabilité prévue n'est pas supérieure à 15 ans.
3. **Brique de troisième classe** : la forme et la taille ne sont pas régulières. La couleur est douce et de couleur rouge clair. Il est sous-brûlé, un peu trop brûlé est acceptable. Il a une efflorescence étendue. La texture n'est pas uniforme. La capacité d'absorption est supérieure à 15% mais inférieure à 20%. La résistance à l'écrasement est de 140 kg/cm² (moyenne) où la résistance minimale à l'écrasement est de 105 kg/cm². Il émet un son sourd ou émoussé lorsqu'il est frappé par une autre brique similaire ou frappée par un marteau. Il laisse l'expression des ongles lorsque l'on essaie de faire avec la vignette [49].

I.2.7.2 Classification des briques en fonction du processus de construction

Sur la base du processus de construction, les briques sont des types suivants :

1. **Briques non brûlées** : Ce sont des briques à moitié brûlées. La couleur est jaune. La force est faible. Ils sont utilisés comme surki dans les terrasses de chaux. Ils sont utilisés comme souillures sous la semelle RCC ou le sous-sol. Ces briques ne doivent pas être exposées à l'eau de pluie [33].
2. **Briques brûlées** : Les briques brûlées sont fabriquées en les brûlant dans le four. Les briques de première classe, de deuxième classe et de troisième classe sont des briques brûlées [33].
3. **Brique brûlée ou Jhama** : Elle est souvent connue sous le nom de brique vitrifiée car elle est cuite à haute température et pendant une période plus longue que les briques conventionnelles. En conséquence, la forme est déformée. La capacité d'absorption est élevée. La résistance est supérieure ou équivalente aux briques de première classe. Il est

utilisé comme béton de chaux pour la fondation . Il est également utilisé comme agrégat grossier dans le béton des dalles et poutres qui n'entreront pas en contact avec l'eau [49].

I.2.7.3 Classification des briques selon la méthode de fabrication

Sur la base de la méthode de fabrication, les briques sont des types suivants :

1. **Brique extrudée** : elle est créée en forçant l'argile et l'eau dans une matrice en acier , avec une forme et une taille très régulière, puis en coupant la colonne résultante en unités plus courtes avec des fils avant la cuisson. Il est utilisé dans les constructions à budget limité. Il possède trois ou quatre trous constituant jusqu'à 25% du volume de la brique [49].
2. **Brique moulée** : Elle est façonnée à la main dans des moules plutôt que dans la machine. Les briques moulées entre 50 et 65mm sont disponibles instantanément. D'autres tailles et formes sont disponibles dans les 6 à 8 semaines suivant la commande [49].
3. **Brique pressée à sec** : Ce sont les types traditionnels de briques qui sont fabriqués en comprimant l'argile dans des moules. Il a une grenouille profonde dans une surface de litière et une grenouille peu profonde dans une autre [49].

I.2.7.4 Classification des briques en fonction des matières premières

Sur la base des matières premières, les briques sont des types suivants :

1. **Brique d'argile brûlée** : Elle est obtenue en pressant l'argile dans des moules et frite et séchée dans des fours. Ce sont les briques les plus utilisées. Il nécessite un enduit lorsqu'il est utilisé dans les travaux de construction [49].
2. **Brique d'argile de cendres volantes** : Elle est fabriquée lorsque les cendres volantes et l'argile sont moulées à 1000 degrés Celsius. Il contient un volume élevé d'oxyde de calcium dans les cendres volantes. C'est pourquoi généralement décrit comme auto-cimentant. Il se dilate généralement au contact de l'humidité. Il est moins poreux que les briques d'argile. Il s'est avéré une surface lisse et n'a donc pas besoin d'être enduit [49].
3. **Brique de béton** : Elle est faite de béton. Ce sont les briques les moins utilisées. Il a une faible résistance à la compression et est de faible qualité. Ces briques sont utilisées au-dessus et au-dessous du parcours résistant à l'humidité. Ces briques peuvent être utilisées pour les façades, les clôtures et les briqueteries internes en raison de leurs réductions sonores et de leurs qualités de résistance à la chaleur. Il est également appelé brique de mortier . Il peut être de différentes couleurs si le pigment est ajouté lors de la fabrication. Il ne doit pas être utilisé sous terre [49].
4. **Brique silico-calcaire** : Le sable, les cendres volantes et la chaux sont mélangés et moulés sous pression. Pendant le mélange humide, une réaction chimique a lieu pour lier les mélanges. Ensuite, ils sont placés dans les moules. La couleur est grisâtre car elle offre quelque chose d'une vue esthétique. Il offre une finition plus lisse et un aspect

uniforme que les briques d'argile. En conséquence, il ne nécessite pas non plus de plâtrage. Il est utilisé comme éléments porteurs car il est extrêmement solide [49].

5. **Brique réfractaire** : Elle est également connue sous le nom de briques réfractaires. Il est fabriqué à partir d'une terre spécialement conçue. Après la combustion, il peut résister à des températures très élevées sans affecter sa forme, sa taille et sa résistance. Il est utilisé pour le revêtement de cheminées et de fours où la température habituelle devrait être très élevée [49].

I.2.7.5 Classification des briques basée sur l'utilisation de l'emplacement

Sur la base de l'utilisation des briques de localisation sont des types suivants :

1. **Brique de parement** : Le matériau de façade de tout bâtiment est appelé brique de parement. Les briques de parement sont de taille standard, plus résistantes que les autres briques et ont également une meilleure durabilité. La couleur est des nuances rouges ou brunes pour donner un aspect plus esthétique au bâtiment. Il existe de nombreux types de briques de parement qui utilisent différentes techniques et technologies. Les briques de parement doivent être résistantes aux intempéries car elles sont généralement utilisées sur le mur extérieur des bâtiments [49].
2. **Brique de soutien** : Ces types de briques n'ont pas de caractéristiques spéciales. Ils sont juste utilisés derrière les briques de parement pour fournir un support [49].

I.2.7.6 Classification des briques en fonction de la capacité de résistance aux intempéries :

Sur la base des capacités de résistance aux intempéries, les briques sont des types suivants :

1. **Niveau de temps violent** : Ces types de briques sont utilisés dans les pays qui sont couverts de neige la plupart du temps de l'année. Ces briques résistent à tout type de gel-dégel [49].
2. **Conditions météorologiques modérées** : ces types de briques sont utilisés dans les pays tropicaux. Ils peuvent résister à n'importe quelle température élevée [49].
3. **Aucune catégorie de temps** : Ces briques n'ont aucune capacité de résistance aux intempéries et utilisées sur les murs intérieurs [49].

I.2.7.7 Classification des briques en fonction de leur utilisation

Il existe de nombreuses utilisations des briques . Sur la base du but de leur utilisation, les briques sont des types suivants :

1. **Briques courantes** : ces briques sont les briques les plus utilisées. Ils n'ont pas de fonctionnalités ou d'exigences particulières. Ils ont une faible résistance, une faible

qualité et une faible résistance à la compression. Ils sont généralement utilisés sur les murs intérieurs [49].

2. **Briques d'ingénierie** : Ces briques sont connues pour de nombreuses raisons. Ils ont une résistance à la compression élevée et une faible capacité d'absorption. Ils sont très forts et denses. Ils ont une bonne capacité de charge, une résistance à l'humidité et des propriétés de résistance chimique. Ils ont une couleur rouge uniforme. Ils sont classés en classe A, classe B, classe C. La classe A est la plus résistante mais la classe B est la plus utilisée. Ils sont principalement utilisés pour les travaux de génie civil comme les égouts, les salles d'inspections, les travaux au sol, les murs de soutènement, les couches étanches à l'humidité, etc. [49].

I.2.7.8 Classification des briques selon la région

Sur la base de la région, les briques sont des types suivants :

1. **Cream City Bricks** : Ces briques proviennent de Milwaukee, Wisconsin.
2. **London Stock** : Ces briques sont utilisées à Londres.
3. **Néerlandais** : ce sont des Pays-Bas.
4. **Nanak Shahi Bricks** : Ce sont des indiens.
5. **Romain** : Ils sont utilisés dans les constructions romaines.
6. **Staffordshire Blue Brick** : Ils viennent d'Angleterre.

La brique pleine peut être laissée apparente ou être employée comme matériau de parement, alors que la brique creuse, qui présente l'avantage d'être plus légère et plus isolante, est le plus souvent enduite.

I.2.8 Dimensions des briques :

La brique a une forme caractéristique de parallépipède rectangle. Mais sa forme fluctue suivant son utilisation : plus ou moins épaisse si elle est utilisée dans un mur ou pour une toiture. Qui plus est, la taille de la brique est adaptée à une prise par une seule main, ni trop grosse et ni trop lourde, alors que l'autre main manipule le mortier. Une caractéristique principale est que «la longueur (la panneresse) soit deux fois identique à l'épaisseur (la boutisse), plus un joint » [52]. Selon les régions et les époques, les briques respectant les traditions ont des dimensions variables (sauf indication, les dimensions sont exprimées en cm dans l'ordre suivant : (Longueur x largeur x hauteur) :

- Brique de Ninive : 25*27*15
- Brique de Toulouse : 33*25*6
- Brique de Bourgogne : 22*11*6 (c'est un arrondi dans le dispositif métrique de 8*4*2 pouces)
- Brique de Paris : 21,5*11*5, 5 (c'est un arrondi dans le dispositif métrique de 8*4*2 pouces). Selon qu'on considère ou non l'épaisseur du joint, ces dimensions peuvent être 21,5*10,3*6,5 cm

- Brique Saint-Bernard : 33*16,26*8,13 (c'est un arrondi dans le dispositif métrique de 1*1/2*1/4 pieds)
- Brique de Leers : 22x10, 5x6 (ou 5 et 4).

Une brique d'un mur d'une épaisseur de 38 cm pèse à peu près 20 kg, et peut supporter 200 tonnes.

I.2.9 Innovations et évolutions récentes

Après s'être trouvé en perte de vitesse sur le marché de la construction, boudée au profit du bloc de béton face auquel la brique souffrait d'une image de matériau du pauvre, la brique retrouve depuis peu ses lettres de noblesse grâce à des innovations récentes. Ainsi, en 15 ans, la brique est passée de 4% à plus de 20% du marché des constructions neuves.

La principale innovation est la brique dite "à joint mince". Ces briques ont des dimensions particulièrement régulières (tolérance de l'ordre du mm) qui permettent de les monter particulièrement aisément. L'assemblage ne se fait plus avec du mortier, mais avec un simple joint d'une colle spéciale.

La brique creuse peut être caractérisée par son effet de résonateur qui sert à diminuer l'influence acoustique si cette dernière est proche de la fréquence de résonance elle-même. C'est-à-dire que le matériau vibre sous une gamme de fréquence acoustique bien définie d'où une perte d'énergie liée à ce mouvement. L'isolation acoustique est d'autant meilleure qu'on se trouve proche de la fréquence de résonance. Pour fabriquer un matériau résonateur, on construit ce dernier avec des caractéristiques géométriques spécifiques. On peut disposer perpendiculairement des cols à des briques pleines ou des briques ayant des cavités. Le principal intérêt de ce dispositif est le réglage assez simple de la fréquence de résonance puisque, pour le cas des briques percées, la fréquence de résonance est directement liée au diamètre ainsi qu'à la profondeur des canaux. De plus, avec un précisement correct, on peut balayer une gamme importante de fréquences pour isoler convenablement. En effet le principal problème de ces résonateurs est le spectre sonore réduit pour lequel il est destiné.

I.2.10 Économie :

Le métier de la fabrication de briques reste beaucoup local (compte tenu de son poids, le transport de la brique sur longue distance n'est pas rentable) et fréquemment artisanal.

Le leader mondial de la fabrication de briques est la société autrichienne Wienerberger, qui possédait en 2008 200 sites de production dans 26 pays [53].



Figure I.29 Route Pāwesin-Riewend pavée de briques, dans le Brandebourg, Allemagne [27]

I.2.11 Brique en fonction de ses propriétés

- La brique légère et isolante qui flotte sur l'eau (citée par Strabon, Pline et plusieurs autres auteurs anciens qui évoquent des terres légères exploitées à Pitane) et en Asie ou encore en Espagne (à Calento) ou des terres dites farines fossiles utilisées en Grèce et en Toscane. Le savant italien Fabroni a utilisé une terre silico-magnésienne sans consistance mais qui mélangée à un vingtième environ d'argile plastique produisait des briques aussi résistantes que des briques ordinaires, mais très poreuses, conduisant mal la chaleur ou le froid et flottant sur l'eau [54].
- La brique non gélive, brique qui ne se dégrade pas par l'effet du givre.
- La brique réfractaire, pour la construction des fours, chaudières, foyers, cheminées, etc.
- Les briques creuses à petits alvéoles verticaux (comme Monomur© [55]), désormais devenues le principal produit des briquetiers français, permettent, lorsque l'épaisseur du mur est suffisante, de se passer de toute isolation supplémentaire sous un climat tempéré européen. Elles font de plus bénéficier les occupants de l'habitation de leur forte inertie thermique (conservation de la fraîcheur en été, de la chaleur en hiver) et des qualités propres à la terre cuite (régulation d'humidité, absence de fibres ou de produits chimiques...). Et à l'encontre de l'idée reçue selon laquelle une brique est fragile, certaines briques modernes sont appropriées pour la construction aux normes antisismiques.

Des briques de formes variées permettent de construire une maison quasiment entièrement en briques. Murs, planchers, linteaux, cheminées, cloisons (coupe-feu, coupe-bruit...) peuvent être faits en brique, seules les fondations sont coulées et la toiture en bois et tuiles et les ouvertures en bois ou verre.

I.2.12 Composition des briques - fonction des ingrédients :

Les briques sont des unités rectangulaires de matériau de construction. Les briques sont utilisées dans la construction en maçonnerie, les murs et les trottoirs. Il est utilisé comme substitut de la pierre, où la pierre n'est pas facilement disponible. Les copeaux de brique sont souvent utilisés comme granulats grossiers dans le mélange de béton [56].



Figure I.30 Briques crues (vertes) [56]

I.2.12.1 Pourcentage de constituants de la brique (base de poids)

Il existe six principaux ingrédients de la brique. Le pourcentage général de ces ingrédients dans la brique est donné ci-dessous : [56]

Tableau I.8 Pourcentage des constituants de la brique (base de poids)

Ingrédient	Pourcentage en brique
Silice (SiO₂)	55%
Alumine (Al₂O₃)	30%
Oxyde de fer (Fe₂O₃)	8%
Magnésie (MgO)	5%
Chaux (CaO)	1%
Matière organique	1%

I.2.12.2 Principaux ingrédients de la brique et leurs fonctions

Silice (sable) et alumine (argile), ces deux sont les ingrédients les plus importants de l'argile de brique. Lorsqu'il est mélangé avec de l'eau dans des proportions appropriées, il gagne en plasticité. La masse plastique peut être facilement moulée et séchée. Il ne doit pas subir de fissuration, de rétrécissement ou de déformation [56].

I.2.12.2.1 Alumine

L'alumine est le principal constituant de l'argile. Il agit comme un matériau de cimentage dans la brique brute. L'argile de brique est en plastique en raison de la présence d'alumine. Cette plasticité garantit que les briques peuvent être moulées. Une quantité excessive d'alumine dans l'argile peut provoquer le rétrécissement, la déformation ou la fissuration des briques en séchant et en brûlant comme tout autre matériau de cimentation [56].



Figure I.31 Argile pour la formation de briques [56]

I.2.12.2.2 Silice

Les briques de bonne qualité contiennent 50 à 60% de silice. Il est présent sous forme gratuite et combinée. Comme il libère du sable, il reste mélangé mécaniquement avec de l'argile. Sous forme combinée, il réagit avec l'alumine pour former des aluminosilicates. La silice empêche les briques crues de se fissurer, de rétrécir et de se déformer. Plus la proportion de sable est élevée, plus la brique aura une texture galbée et uniforme. Cependant, un excès de silice détruit

la cohésion entre les particules d'argile de brique et rend la brique fragile et faible. La durabilité des briques dépend en grande partie de la bonne proportion de silice et d'alumine [56].



Figure I.32 Sable [56]

I.2.12.2.3 Chaux

Les briques doivent contenir une petite quantité de chaux finement en poudre. Il permet à la silice (d'une portion requise) de fondre à la température du four de 1650°C et de lier les particules de brique, ce qui donne des briques solides et durables. À environ 1100°C , la chaux agit comme catalyseur pour élever la température du four à 1650°C à laquelle la silice fond. Cette silice légèrement fondue fonctionne comme un solide matériau de cimentation. Un excès de chaux dans l'argile de brique provoquera la vitrification des briques. Il fait fondre les briques, car plus que la quantité requise de silice ne fondra. Les briques perdent alors leur forme et se défigurent [56].



Figure I.33 Chaux en poudre [56]

I.2.12.2.4 Oxyde de fer

Les briques contiennent une petite quantité d'oxyde de fer. L'oxyde de fer agit comme un flux de chaux, ce qui aide la silice à fondre à basse température. Il donne une couleur rouge aux briques lors de la combustion. Le fer augmente également la durabilité et l'imperméabilité des briques [56].



Figure I.34 Poudre d'oxyde de fer [56]

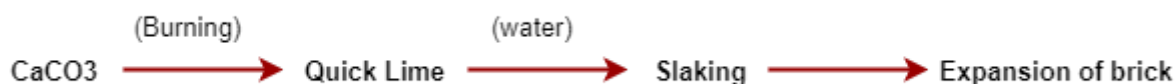
I.2.12.2.5 Magnésie

Une petite proportion de magnésium diminue le retrait et donne une teinte jaune aux briques. Une quantité excessive de celui-ci provoque la décomposition des briques [56].

I.2.12.3 Ingrédients nocifs de la brique :

I.2.12.3.1 Chaux

L'excès de chaux fait fondre les briques et les défigure. Si le CaCO_3 existe (sous sa forme la plus pure, c'est-à-dire s'il contient au moins 95% de CaO) en morceaux de chaux dans l'argile de brique, il se transforme en chaux vive lors de la combustion. Lorsque ces briques entrent en contact avec de l'eau, la chaux vive se dilate et se dilate. Et provoque la désintégration des briques [56].



I.2.12.3.2 Alcalis

Les alcalis sont principalement des sels de sodium (Na) et de potassium (K). Il agit comme un flux dans le four et provoque la fusion, la déformation et la torsion des briques. Les alcalis absorbent l'humidité de l'atmosphère et provoquent l'humidité et l'efflorescence des briques (en raison de la présence de sels hygroscopiques, par exemple, CaCl_2 , MgCl_2 , etc.) [56].

I.2.12.3.3 Cailloux, pierres et graviers

Leur présence ne permet pas un mélange complet de la terre, donc les briques produites sont plus faibles. Ces briques ne peuvent pas être cassées à la section souhaitée et elles se cassent de manière très irrégulière [56].



Figure I.35 Cailloux, pierres et graviers [56]

I.2.12.3.4 Pyrites de fer (FeS)

Les pyrites de fer provoquent la cristallisation et la désintégration des briques lors de la combustion. Il décolore les briques sous forme de scories noires [56].

I.2.12.3.5 Matière organique

La matière organique dans les briques rend les briques poreuses, ce qui entraîne une faible densité et des briques plus faibles [56].

I.3 Déchets industriels comme additif dans la fabrication des briques

Les matériaux conventionnels qui sont principalement utilisés dans le processus de construction, tels que les briques de type béton, les blocs de type creux, les blocs solides, les blocs de type chaussé et les carreaux de sol sont générés à partir des ressources naturellement disponibles déjà existantes. Cela entraîne une défragmentation de l'environnement due à une vaste exploration et qui conduit à l'épuisement des ressources naturelles existantes. De plus, différents types de substances nocives telles qu'une concentration élevée de monoxyde de carbone, d'oxydes de soufre et d'azote et de particules en suspension sont libérés en surplus dans l'atmosphère ouverte pendant la phase d'exploitation et la fabrication des matériaux. Ces émissions créent un impact toxique sur l'environnement et perturbent les expressions fonctionnelles de l'air ambiant, des ressources naturelles en eau, des sols extensifs, des grandes espèces de flore, des espèces de faune et de la vie aquatique, et se reflètent sur la santé humaine ainsi que sur leur niveau de vie. Par conséquent, diverses concentrations dans l'environnement peuvent entraîner une dégradation de l'atmosphère dominante. Améliorer la durabilité et la conservation de l'environnement et a gagné en importance dans notre société ces dernières années.

Une grande quantité de déchets est produite dans le monde entier en raison du métabolisme anthropique dans les pays développés et en développement par l'industrialisation, l'élévation du niveau de vie et l'urbanisation peuvent être réduites dans une plus grande mesure. Selon les statistiques de la Banque mondiale proposées à l'échelle mondiale sur le secteur de la gestion des déchets solides, les villes mondiales produisent actuellement environ 1,3 milliard de tonnes de déchets solides chaque année et cela continue de se reproduire. Ce volume devrait atteindre

des sommets de près de 2,2 milliards de tonnes d'ici 2025 et le taux d'accumulation des déchets est supposé à deux fois au cours des deux prochaines décennies. L'un des impacts environnementaux qui peuvent avoir un impact global en raison de la génération de déchets solides est l'émission continue de gaz méthane qui est considéré comme un gaz à effet de serre (GES) puissant et destructeur, et son impact sur l'environnement peut être ressenti dans un délai minimum de temps. Le recyclage des déchets respectueux de l'environnement s'est avéré l'une des meilleures méthodes de gestion pour réduire et réutiliser les déchets dans le domaine de la recherche pendant des décennies. La gestion des déchets réduit les impacts négatifs de leur élimination. De nombreuses expériences ont été réalisées pour incorporer des déchets dans la production de briques solides, y compris des particules de poussière de calcaire, des particules de sciure de bois, du caoutchouc.

La révolution industrielle a été une étape importante dans l'histoire de la civilisation humaine. Depuis l'aube des machines et de l'industrialisation de divers procédés de fabrication, il y a eu un essor rapide du développement et de l'urbanisation autour des centres industriels. Le niveau de vie de la société a commencé à augmenter mais le niveau du cadre de vie a commencé à baisser. Cela n'a été remarqué que lorsque cela a commencé à affecter directement les humains. Aujourd'hui, la gestion des déchets industriels est un sujet de préoccupation avec des tonnes de déchets générés chaque jour. Pour citer un exemple, selon l'autorité centrale de l'électricité de l'Inde, la production de cendres volantes (FA) en 2014-2015 était de 184,14 millions de tonnes [57]. Bien que l'utilisation de 102,54 millions de tonnes de FA en 2014-2015 ne représente que 55,69% de la production totale, elle est supérieure à l'utilisation de 100,37 millions de tonnes de FA (contre une génération de 163,56 millions de tonnes) en 2012-2013 [58]. Les différents modes d'utilisation de l'AF illustrés à la (figure I.36) révèlent que l'utilisation de l'AF dans les routes et le survol et la remise en état des zones basses représentent environ 14% de la réutilisation totale et la production des briques représente 11.72% de la réutilisation totale.

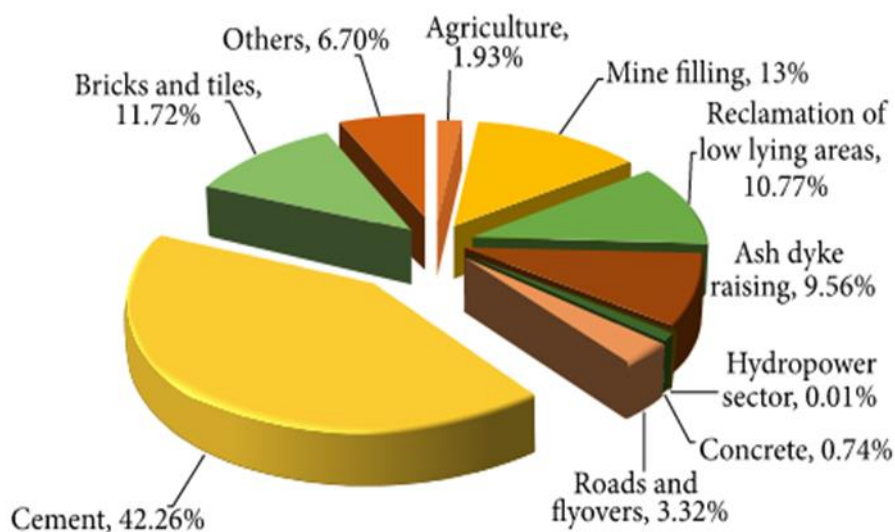


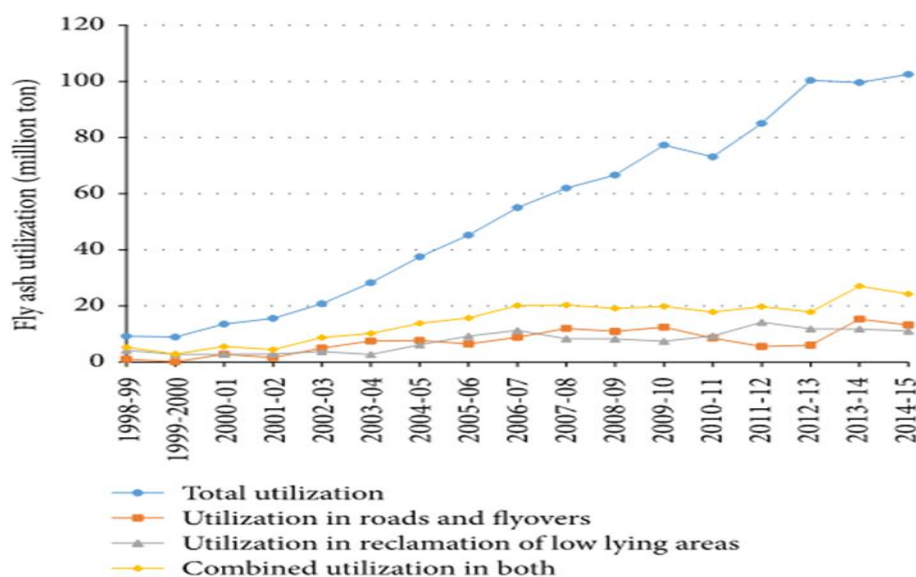
Figure I.36 Modes d'utilisations de l'AF en 2014-2015 [57]

La réutilisation de l'AF dans le domaine de la modification des briques et sols, y compris la remise en état, les routes et les travaux de remblai, est illustrée dans le (tableau I.10) et on peut comprendre que l'utilisation des déchets a augmenté régulièrement au fil des ans, en particulier dans la construction des briques.

Tableau I.9 Principaux déchets solides industriels générés en inde [57]

Nom des déchets solides	Production annuelle (en millions de tonnes)
FA	184,14
Scories de haute fourneau	10
Scories d'acier	12
Boue rouge	4,71
Boues de chaux	4,5
Scories plomb-zinc	0,5
Scories de four au phosphore	0,5
PG	11
Jarosit	0,6
Kimberlite	0,6
Mine rejetée	750

Tableau I.10 utilisations de l'AF dans l'ingénierie des sols [57]



Ainsi, la réutilisation des déchets industriels dans la stabilisation des briques et des sols est une voie relativement nouvelle pour une utilisation et une gestion efficace des déchets solides. Quelques auteurs antérieurs ont passé en revue l'utilisation de déchets solides dans l'amélioration des sols [59 - 60].

I.4 Conclusion

Cette étude bibliographique, nous a permis d'étudier les différents types des briques en terre existants dans le domaine de construction à savoir : les briques crues, les briques cuites et les briques stabilisée, ainsi que leurs développements dans l'histoire de la construction Sur la base :

Les différentes procédures de fabrication et de production : (brique de terre crue, brique de terre cuite et briques stabilisée).

- Les principales caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques de chaque type de ces briques.
- Les différents types de briques ainsi leurs modes de classifications.
- Les différents composants de briques en fonction de ces ingrédients

Plusieurs modes de stabilisation des briques sont présentés dans ce chapitre : compression, correction de texture, ajout de fibres, etc.

Nous avons constaté que la construction en terre comporte une palette très large d'avantages : propriété mécanique, propriété thermique avec une excellente isolation, hygiénique, respect de l'environnement. Donc la terre est le matériau écologique par excellence.

Dans ce travail, on a choisi d'étudier l'influence des déchets industriels sur la fabrication des briques. En ce qui suit, on va essayer de présenter l'effet et l'impact de ces ajouts sur les caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques sur les briques.

Chapitre II

Influence des déchets industriels sur la fabrication des briques

Introduction

Dans ce deuxième chapitre une étude sur la stratégie de traitement des déchets avec des explications sur la valorisation des déchets, la gestion des déchets en Algérie, puis l'utilisation des déchets comme matière alternative dans la fabrication des briques ont été faites. Et on a fini par parler sur l'effet de l'utilisation des déchets dans la fabrication des briques.

II *Chapitre II* : Influence des déchets industriels sur la fabrication des briques

II.1 Introduction

L'un des grands problèmes actuels, d'un point de vue économique et environnemental, est le traitement des volumes importants de déchets produits continuellement par les activités industrielles et urbaines. Il est estimé que les volumes de déchets produits à l'échelle mondiale peuvent aller jusqu'à des centaines de milliards de tonnes. La grande partie de ses déchets est produite par les industries des pays développés (États-Unis, Canada, Chine, pays de l'Union Européen, ...etc.). Ces quantités de déchets sont en augmentation continue et vont atteindre des niveaux supérieurs dans les prochaines années.

L'industrie en Algérie a une part de responsabilité majeure dans la pollution globale du pays, notamment l'industrie pétrochimique, chimique, métallurgique et de traitement des minerais.

Il faut signaler ici que notre pays, depuis la première conférence mondiale sur l'environnement organisée à Stockholm en 1972 a pris progressivement conscience de la nécessité à intégrer la dimension environnementale dans la démarche de planification du développement et d'utilisation durable des ressources naturelles du pays.[64].

Face aux nuisances causées par l'industrie sur l'environnement, l'inquiétude ne cesse de grandir; et notre domaine de génie civil est appelé à jouer un rôle important dans la protection de la nature et l'environnement par l'utilisation des déchets solides dans la fabrication des matériaux de construction (briques, liants et bétons) et dans la réalisation des structures (remblais et les assises de chaussées, ...) afin de limiter l'exploitation excessive des ressources naturelles et de diminuer la pollution atmosphérique (en remplacement du ciment portland par les ajouts).

L'ajout de déchets industriels et urbains aux matières premières de la brique a souvent des effets positifs sur les propriétés des articles semi-finis et des produits même si cela diminue les performances dans certains cas. Les effets concernant tout le déroulement de la fabrication (mise en forme, séchage et cuisson) et se répercutent sur les propriétés des produits finis, telles que le retrait, la porosité et la résistance mécanique. Enfin, dans de nombreux cas, il existe également des variantes de consommation d'énergie, qui peuvent être réduites en raison de l'apport calorifique apporté par de nombreux types de déchets.

La brique appartient à la grande famille des matériaux de construction car elle est principalement utilisée pour la construction de murs extérieurs et intérieurs dans les bâtiments. L'industrie de la brique est l'activité la plus technologique indiquée pour avaler les déchets solides en raison de la grande quantité de matière première utilisée par le secteur (Andreola et. Al, 2005). Des essais ont été faites pour incorporer divers déchets dans la production de briques tels que les fibres naturelles, les boues d'eaux usées de lessive textile, les boues d'épuration, les déchets de verre structurel, les cendres volantes, les cendres de bagasse de canne à sucre,

poussière d'acier, cendres de balle de riz, déchets de marbre et de granit, laitier de cendres volantes d'incinération solide municipale (Chee-Ming, 2011- Raut et al, 2011). Ce travail met en évidence les effets de différents déchets sur les propriétés des briques telles que les propriétés physiques et mécaniques ainsi que l'isolation thermique.

II.2 Stratégie de traitement des déchets

Malgré les grandes quantités des déchets dans notre pays qui atteignent actuellement environ 4.892.000 tonnes/an (dont 184.000 tonnes sont considérées dangereux et toxiques) une gestion des déchets solides n'est pas développée à l'heure actuelle. Quelquefois, la récupération de certaines matières valorisables est pratiquée, mais la qualité reste très insuffisante.[64]

La stratégie d'une bonne gestion des déchets se base sur deux grands principes :

- Il faut prendre en compte simultanément les notions de matière, d'énergie, d'environnement et d'économie.
- Lorsque ces stratégies ont pour objectif le retour des déchets dans le milieu naturel, il y a lieu de s'inspirer des disciplines qui régissent le fonctionnement de ce milieu.

Ces disciplines existent à travers les cycles biogéochimiques qui régissent la circulation des éléments chimiques. La gestion des déchets passe par cinq stratégies possibles et praticables qui sont représentés à la figure II.1 [64]

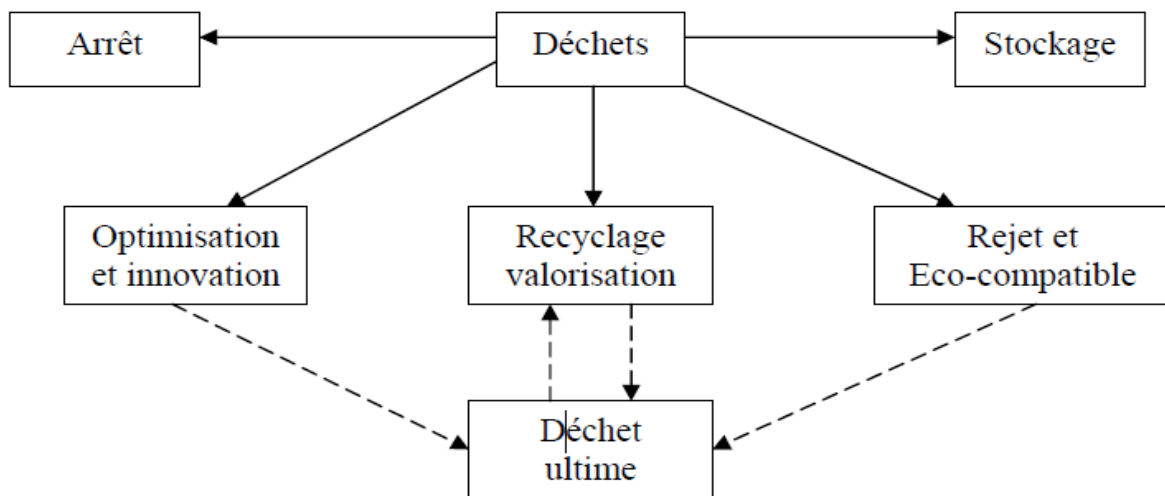


Figure II.1 Stratégies de traitement des déchets. [64]

Seules les stratégies de valorisation, de rejet éco-compatible et de stockage concernant directement la gestion des déchets. [64]

Leur mise en œuvre concrète passe par un certain nombre de filières techniques, elles articulent autour des objectifs généraux suivants :

- Valorisation énergétique.
- Valorisation en matière première organique et minérale.
- Valorisation en science des matériaux.
- Valorisation en agriculture.

- Valorisation en technique de l'environnement.
- Technique dite d'élimination.

Ces objectifs sont représentés à la figure II.2.

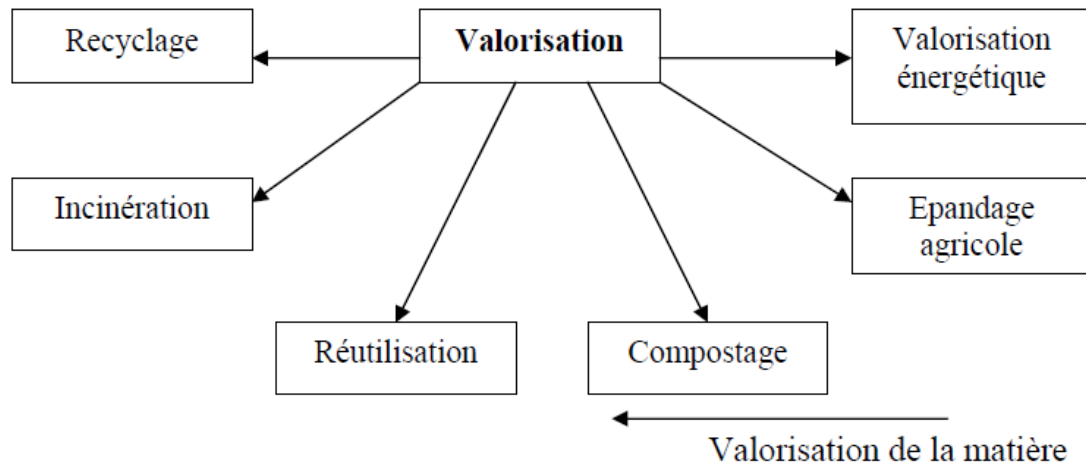


Figure II.2 Valorisation des déchets [64].

II.3 Déchets & valorisation : identification & principe général d'analyse

II.3.1 Principales sources de production des déchets du secteur de la construction

Les déchets du secteur de la construction ne proviennent pas uniquement des chantiers de construction. Sur l'ensemble de son cycle de vie, un bâtiment contribuera plusieurs fois à alimenter le flux des déchets du secteur :

- déchets de mise en œuvre initiale (en atelier ou sur chantier)
- déchets liés à rénovation / maintenance
- déchets liés à la démolition
- En outre il est utile de garder à l'esprit que le processus de fabrication des matériaux et composants de construction alimente aussi le flux des déchets (déchets en phase de production des produits de construction en industrie). Néanmoins une grande part de ces déchets sont réinjectés /réexploités dans les processus de fabrication.

La diversité des sources de production des déchets implique :

- Une grande variété dans la **typologie de déchets** (ex : inertes / dangereux /...) avec des caractéristiques très différentes (ex : propreté / pollution / effet de dégradation...)
- Une grande variété de **nouveaux produits** commercialisés sur le marché avec des spécificités de composition très variables (difficulté de catégorisation de ces produits)
- Une grande variation des **quantités de déchets** [113].

II.4 Déchets & gestion : classement

Le principe de classement ci-après se base sur le système de classement exploité en Belgique.

- Les déchets dangereux (ou déchets de CLASSE 1) : danger spécifique pour l'homme et/ou l'environnement. Ces déchets peuvent être brûlés dans une usine d'incinération (avec valorisation énergétique) sauf les déchets contenant de l'amiante qui nécessitent un traitement spécifique (vitrification puis stockage comme déchets dangereux) ;
- Les déchets non dangereux (ou déchets de CLASSE 2) : non classifiés dans les catégories dangereux ou inertes.
- Les déchets inertes (ou déchets de CLASSE 3) : qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique de manière susceptible à entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine [113].

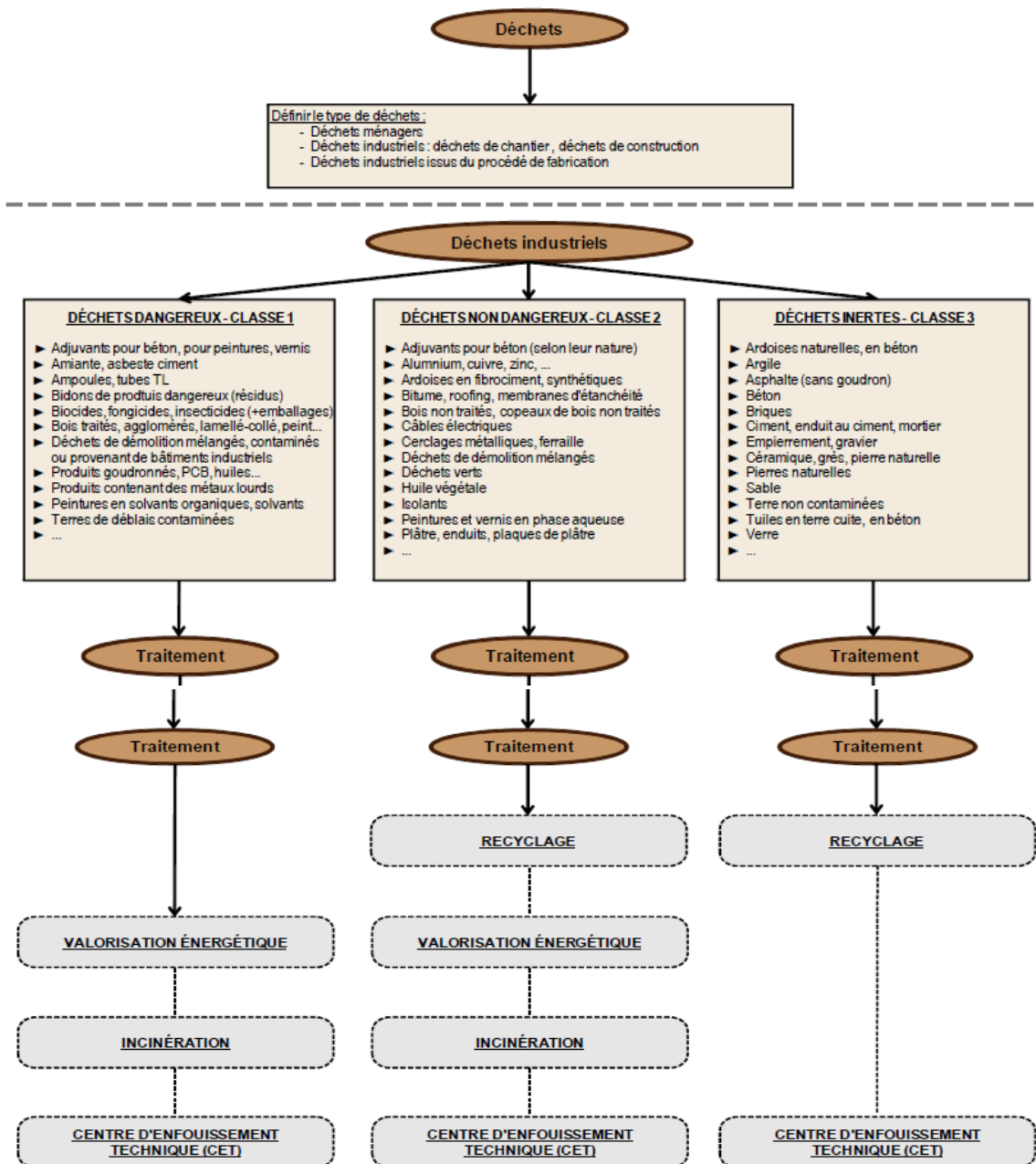


Figure II.3 Gestion et classement des déchets [113]

II.5 Définitions

II.5.1 Déchet

Tout résidu d'une production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit où plus généralement tout bien meuble abandonner.

II.5.2 Récupération

Séparation de certains produits ou matériaux des déchets à des fins de réemploi de réutilisation et de recyclage.

II.5.3 Recyclage

Réintroduction d'un matériau récupéré dans le cycle de production dont il est issu (même circuit de fabrication).

II.5.4 Compostage

Le procédé de traitement biologique de déchets et la transformation des constituants organiques d'un déchet en un produit stabilisé (compost).

II.5.5 Incinération

C'est un procédé thermique qui consiste à la destruction complète du déchet et sa transformation en éléments simples et inertes sous l'action d'une forte chaleur et de l'oxygène de l'air.

Il faut noter que les résidus solides de combustion (cendres, mâchefers...) représentent 25% à 30% du poids des déchets, ils sont valorisés entant qu'ajouts cimentaires.

II.5.6 Valorisation

Tout traitement où utilisation des déchets qui permet de leur trouver un débouché ayant une valeur économique positive. Le terme général valorisation englobe réemploi recyclage et réutilisation.

II.6 Pourquoi valoriser ?

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous-produits industriels est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. Les arguments peuvent être résumés en :

- Augmentation de la production.
- Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- Une législation de plus en plus sévère.
- Une meilleure gestion de la recherche.

II.7 Gestion des déchets en Algérie : Entre stockage et valorisation

L'incivisme écologique des gestionnaires des industries et le manque de stratégie nationale tant en matière de gestion durable des déchets qu'en protection de l'environnement font que les secteurs industriel et agricole continuent de polluer et semblent ignorer les dégâts causés à notre milieu. Certes, l'État consacre à ce volet des grands budgets mais l'effet reste insignifiant au

regard des résultats concrets sur terrain. La cause est, en plus d'une absence de politique efficace réaliste, une absence de suivi, de contrôle et de sanctions pour tous les contrevenants sans exception [65].

Face à ce constat, il urge de mettre en place une méthode de gestion viable et durable et écologique des différentes catégories de déchets ; les solutions techniques existent mais la volonté politique est totalement absente exception faite de la réglementation mais qui n'est pas appliquée dans son ensemble.

Faute d'avoir initié le développement des filières de gestion des déchets ménagers et assimilés, l'Algérie perd chaque année environ 350 à 400 milliards DA. L'industrie de la récupération et du recyclage ne représente actuellement que 2 à 5% au maximum des déchets produits chaque année. Alors que plus de 8,5 millions de tonnes sont collectés annuellement, dont un peu plus de 6 millions de tonnes sont à classer dans les déchets ménagers et assimilés [65].

A ce stade des déchets domestiques et assimilés, il y a lieu d'ajouter la production moyenne annuelle de 350.000 tonnes de déchets industriels spéciaux ; ils viennent s'ajouter aux 2.000.000 de tonnes stockées. Quatre secteurs génèrent plus de 86% des déchets industriels spéciaux, à savoir les hydrocarbures 34%, la chimie, le caoutchouc et le plastique 23%, la sidérurgie et la métallurgie 16%, les mines 13%, les textiles 4% et 2% issus des secteurs du papier et cellulose du ciment et dérivés, de l'agriculture et de la mécanique. En 1994, selon (German studies office), la quantité des déchets industriels dangereux produite en Algérie est estimée à 185000 tonnes, en 2002 c'est le double et vers l'horizon 2030 il faut s'attendre à un chiffre qui avoisinera les 500000 tonnes annuellement. Pas moins de 3876 installations industrielles à haut risque ont été recensées en Algérie en 2011, au milieu du tissu urbain et sur une surface réduite, selon les estimations du ministère de l'Environnement et de l'Aménagement du territoire [65].

En comparaison avec le secteur français de la valorisation industrielle des déchets qui a représenté en 2010 près de 12 milliards d'euros de chiffre d'affaires, soit 13% du chiffre d'affaires réalisé par cette industrie dans l'Union européenne ; la valorisation en Algérie reste très infime et ne dépasse pas les 50000 tonnes. De quoi encourager nos dirigeants et industriels à opter pour l'éco-industrie [65].

II.7.1 Quid de la valorisation des déchets ?

La valorisation des déchets ménagers est un procédé écologique et économique : dans les pays développés elle se traduit en moyenne par un recyclage de 40%, une incinération avec récupération d'énergie de 25% et seulement le reste est mis à la décharge. En Allemagne, en Autriche et en Belgique, le recyclage dépasse les 60%. Ce qui n'est pas le cas dans notre pays pour diverses raisons surtout d'ordre stratégiques et organisationnelles qui font totalement défaut [65].

La valorisation en rudologie est tout processus dont le principal résultat est d'utiliser les déchets à des fins utiles en remplaçant d'autres matériaux. C'est aussi la préparation des déchets pour être réutilisés et intégrés dans l'ensemble de l'économie. Il existe plusieurs concepts de valorisation, sous forme matière ou en vue d'une valorisation énergétique [65].

Le concept de valorisation des déchets est né de l'idée que l'entreprise doit considérer ses déchets comme une ressource à exploiter et non comme des rebuts dont il faut se débarrasser ! En effet beaucoup de matériaux sont réutilisables dans différents applications après leur fin de vie attribuée. On peut distinguer deux grandes familles de valorisation : la valorisation matière qui consiste à recycler le produit et la valorisation énergétique qui permet de dégager de l'énergie (chaleur, électricité) d'un déchet et le recyclage et la valorisation des déchets contribueront à améliorer la balance commerciale de l'Algérie en limitant les importations de matières premières. Une récupération et un semi-recyclage de déchets permettront également d'exporter l'excédentaire ou les matières dont on ne maîtrise pas encore la technique de recyclage et de valorisation [65].

Le développement de la filière « activités de recyclage et valorisation des déchets-ARVD » est une activité socioéconomique incontournable dans un monde dominé par la consommation [65].

II.7.2 Qu'en est-il en Algérie ?

Le tissu industriel en Algérie est composé en grande partie de PME et PMI qui ne sont pas préoccupées du risque que génèrent leurs activités industrielles sur l'environnement et leur répercussion sur la santé humaine. Alors que plus de 4000 établissements industriels sont classés très dangereux. Le souci de la majorité de nos industriels privés ou étatiques se freine à la production et à la commercialisation. Malgré la loi sur la gestion et l'élimination des déchets qui date de 2003 et ses exigences, la gestion des déchets industriels reste non développée tant du point de vue technique, organisationnel que réglementaire. L'absence de structures spécialisées devant recevoir les déchets nocifs et l'absence de contrôle et de suivi font que les déchets dangereux sont soit stockés, soit mis dans les CET, soit incinérés sans suivre les recommandations d'usage. Cette situation de non-maîtrise des déchets banals ou industriels il donne lieu à l'apparition de plusieurs pratiques à savoir : le brûlage de DSI en plein air ou dans des chaudières à bois ; le mélange des déchets de différentes catégories (DID /DIB) ; la mise en décharge sauvage ou le stockage non approprié [65].

Ces pratiques sont une menace, un risque avéré pour l'environnement et la santé des êtres vivants (hommes, animaux et végétaux) à travers les vecteurs que sont la pollution hydrique, atmosphérique, édaphique et donc de la chaîne alimentaire par la dispersion des polluants contenus dans les déchets [65].

II.7.3 Le gisement des déchets valorisables

Un gisement considérable de déchets industriels existe et ne demande qu'à être valorisé, il est estimé à un stock de plus de 2 millions de tonnes. Les quantités des déchets industriels pouvant être valorisés sont estimés annuellement, avec une marge de sécurité de l'ordre de 15%, à plus de 1.000.000 de tonnes [65].

II.7.3.1 Volume des déchets produits annuellement en Algérie

Tableau II.1 Volume des déchets produits annuellement en Algérie [65]

Nature de déchets	Quantités produites
Déchets d'origine minérale (DM)	80.000 T
Boues minérales (B.M)	30.000 T
Résidus de pétrochimie et de liquéfaction (R.P.L)	110.000 T
Boues polluées de Zinc (B.P.Z)	25.000 T
Solvants organiques, résidus de peinture (S.org)	15.000 T
Boues métalliques et électroniques (B.M.E.)	10.000 T
Résidus de fabrication (R.F.)	25.000 T
Huiles de vidanges (H.V.)	180.000 T
Déchets Organiques Industriels (D.O.I.)	100.000 T
Divers déchets Industriels (D.D.I.)	45.000 T
Produits pharmaceutiques (D.P.P.)	30.000 T
Déchets Organiques Boues des STEP	90.000 T
Déchets Ferreux Divers (D.F.D)	150.0 T
Déchets de verres industriels (D.V.I)	10.000 T
Produits Électroniques Divers (P.E.D)	10.000 T

II.7.3.2 Typologie des déchets domestiques valorisables

Tableau II.2 Typologie des déchets domestiques valorisables [65]

Types de déchets	Quantité valorisable
Matières organiques valorisables (M.O.V)	4.000.000 T
Papier Divers Types (P.D.T)	660.000 T
Plastique Facilement Recyclable (P.F.R)	360.000 T
Verre blanc recyclable (V.B.R.)	240.000 T
Métaux et Fer Réutilisable (M.F.R)	180.000 T

Les Algériens produisaient presque 13 millions de tonnes de déchets (toutes catégories) par année, générant aux collectivités locales des coûts exorbitants. Les coûts de la pollution de l'environnement qui englobe tous les types de déchets, y compris les déchets industriels, agricoles et hospitaliers. Les pertes engendrées par un manque de prise en charge de ces déchets

dans le cadre d'un programme de valorisation tous azimuts sont estimées entre 1,5 et 2 milliards de dollars en 2010, de quoi construire des dizaines de chaînes de tri qui constitueront le premier maillon de processus de recyclage, ce type d'unité ne coûte que 1,5 millions de dollars pour une capacité de 1000 tonnes/jour. Un centre de recyclage des déchets d'une valeur de 12 millions de dollars peut être facilement rentabilisé si la filière est développée dans le cadre d'un programme relevant d'une stratégie nationale [65].

Tous les infrastructures et les équipements installés n'ont pas eu l'effet escompté, puisque les déchets industriels entassés non traités sont évalués à près de 2,5 millions de tonnes [65].

II.7.4 Analyse de la politique nationale en matière de gestion des déchets

Entre 15 et 20 000 tonnes de déchets sont produites quotidiennement, auxquelles s'ajoutent entre 5 et 6 000 tonnes de déchets industriels dangereux. Les schémas directeurs de collecte et d'élimination de ces déchets qui ont été élaborés ces dernières années n'ont pas pu surmonter ce secteur. La raison principale est la qualité des études qui sont toutes identiques, qui n'ont pas permis de bien caractériser le gisement de déchets valorisables en les classant avec les technologies auxquelles ils sont adaptés. Tous les bureaux d'études se sont spécialisés dans la gestion des déchets alors que peu disposent de spécialistes en rudologie [65].

(PNAGDES) est un outil de gestion, de planification et d'aide à la décision. C'est un espace de concertation et de dialogue entre la direction, les producteurs de déchets, les prestataires de services et la société civile. Il visait à réduire les hotspots, définir des techniques de stockage économiques et environnementales, valoriser et professionnaliser les métiers des déchets et réhabiliter les sites pollués. Mais la situation reste désastreuse et la gestion des déchets reste une préoccupation majeure en Algérie. [65].

Toute la stratégie en matière de gestion et d'élimination des déchets reposait, au départ, sur la décharge. Créer un 60 ° C et en prévoir 40 autres ne semble pas être la solution la plus appropriée. Quelques initiatives à travers des programmes ciblés comme Eco-Jem, ANSEJ, la création du PROGDEM (Programme de Gestion des Déchets Domestiques) et l'institutionnalisation du Système National de Récupération et de Valorisation des Déchets d'Emballages Eco-Jem, Décret n ° 04-199 du 19/07/2004, qui en approuve le fonctionnement Sur les réseaux spécialisés dans les régions et les classes de matériaux, il n'a pas réussi à résoudre le problème des déchets [65].

La gestion des déchets solides urbains est avant tout une responsabilité publique. La loi n ° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets définit le cadre général de la gestion des déchets ainsi que toutes les activités connexes, à savoir la collecte, le transport, le tri, le traitement, la valorisation et l'élimination. Cette loi vise avant tout à renforcer le cadre législatif national afin d'assurer une meilleure gestion des différentes activités liées à la gestion des déchets et ainsi permettre aux collectivités locales de remplir au mieux leurs missions traditionnelles de « préservation de l'environnement ». « Hygiène et hygiène publique » prévue par la loi n ° 90-08 du 7 avril 1990 relative à la commune. Selon les

dispositions de la loi 19-01 (article 32), « La responsabilité de la gestion des déchets ménagers et autres incombe à la municipalité. Un plan de gestion des déchets municipaux a également été élaboré (article 29) ; ce système est basé sur un inventaire complet des conditions locales et régionales dans le secteur des déchets. Proposer un système de gestion capable de fonctionner sur le long terme et présenter dans ce contexte, en plus des options techniques, une stratégie de mise en œuvre accompagnée d'un calendrier provisoire La commune organise un service public sur son territoire (article 32) afin de répondre aux besoins collectifs de ses citoyens en matière de collecte, de tri ou de Transférer, reprendre ou éliminer ses déchets [65].

Pour régler les restrictions de gestion des déchets en Algérie, des responsables au niveau du ministère en charge de l'environnement ont choisi des schémas directeurs de gestion des déchets ménagers et industriels. Cela a conduit à la mise en place de 65 centres techniques d'enfouissement (CET) avec un objectif de cent et la mise en place d'unités de tri et la mise en place de centres régionaux spécialisés pour les déchets industriels. Il est à noter que le coût moyen du CET se situe entre 150 et 190 millions de dinars. Pour la seule période 2001-2005, les investissements à travers les différents mécanismes (FSDRS, FEDEP) en termes d'opérations d'enregistrement ont mobilisé environ 22 milliards de dinars, soit 220 millions d'euros. Les résultats restent inférieurs aux attentes, les déchets ménagers et industriels étant très mal collectés puis enfouis sans valorisation, et pour ces derniers, ils sont stockés à tous risques [65].

Les taxes constituent un autre obstacle à la gestion des déchets car il suffit de payer une taxe aux industriels et aux ménages pour qu'ils se sentent non responsables de leurs déchets. La taxe reste très incertaine et sous-estimée avec un taux de recouvrement très faible. Cette taxe ne couvre pas les frais encourus par les municipalités pour gérer leurs déchets. 1000 DA, soit 0,85 € par an, reste loin du coût réel de cette procédure. Pour la ville de Sidi Bel Abbes (une population de 200 000 habitants), le coût moyen de gestion d'une tonne de déchets est estimé à 9 500 dinars algériens [65].

II.7.5 Identification des principales contraintes

Force est de reconnaître que les schémas directeurs de gestion des déchets élaborés n'ont pas pu venir à bout de la gestion des déchets en Algérie pour les raisons évidentes, à savoir : une absence de volonté politique et économique pour valoriser les déchets à travers un investissement à moyen terme ; une mauvaise typologie des déchets tant dans ses aspects quantitatifs que qualitatifs entravant toute action d'investissement ; les études restent assez classiques et très éloignées de la réalité algérienne en matière de compréhension de ce domaine et assez éloignées des techniques de rudologie et leur projection sur 10 ans est dérisoire par rapport à leur amortissement ; les schémas directeurs proposés se ressemblent tous et sont exclusivement axés sur le découpage de l'espace urbain en secteurs en totale inadéquation avec la problématique ; l'absence de structures spécialisées devant prendre en charge les déchets industriels pour les valoriser ; l'absence de filière de gestion des différents types de déchets et de leurs supports techniques et économique ; le flux de déchets reste encore très peu maîtrisé dans le volet présentation et comportement du citoyen face aux déchets ménagers ; une

absence totale d'organisation dans le temps et dans l'espace du type de collecte et de l'itinéraire le plus fiable est à l'origine du dysfonctionnement global des services en charge des déchets ; les collectivités locales n'arrivent pas à faire face à leurs obligations en la matière à cause surtout de restriction budgétaire ne leur permettant pas d'employer un nombre suffisant d'éboueurs et enfin, des équipements en inadéquation avec le mode de collecte retenu par secteur souvent inapproprié dans le plan de localisation des bacs et de leur volume [65].

II.8 Utilisation des déchets comme matière alternatives dans la fabrication des briques

Dans le cadre du développement durable et de l'écologie industrielle, plusieurs déchets industriels deviennent de plus en plus utilisés dans l'industrie de fabrication de matériaux de construction (briques, bétons, mortier, etc.). Dans cette partie, un accent spécial sera accordé à l'utilisation de déchets dans la fabrication de briques. La fabrication de briques à base de déchets industriels présente un exemple concret de la symbiose industrielle [66 ;67].

Plusieurs revues de littérature sont disponibles sur les différentes qualités et sources de déchets industriels utilisés dans la fabrication des briques [68 ; 66 ;69 ; 70 ; 71 ; 72]. Une classification de déchets selon leurs propriétés et leur origine a été réalisée selon le catalogue européen de déchets [73] et selon leur rôle comme matière alternative pour la fabrication de briques [66]. En général, les déchets classés selon EWC [73] dans les catégories EWC ; codes 01, 10 et 19 sont les plus utilisés la fabrication de briques. Les déchets classés dans le code EWC 01 sont des déchets résultant de l'exploration, l'extraction ou le traitement physique et chimique des minéraux. Ces déchets proviennent généralement des procédés de transformation physique et chimique des roches ornementales, d'extraction et de production d'alumine. Les déchets appartenant au code EWC 10 sont des déchets provenant de procédés thermiques : les centrales électriques et d'autres installations de combustion utilisées pour la production d'aluminium, de fer et d'acier, de plomb et de zinc (pyrométallurgie). Dans cette catégorie sont inclus entre autres les cendres volantes des procédés de charbon ou de biomasse, les boues métalliques, les scories et les sables de fonderie. Les déchets classés dans le code EWC 19 sont des déchets provenant des installations de gestion de déchets, des usines de traitement des eaux usées et de la préparation de l'eau destinée à la consommation humaine et de l'eau à usage industriel tels que les boues d'épuration ou les cendres de l'incinération des boues d'épuration. En outre, une bonne partie des déchets utilisés dans la fabrication des produits céramiques provient du secteur de l'agriculture (EWC 02) et de la construction et de démolition.

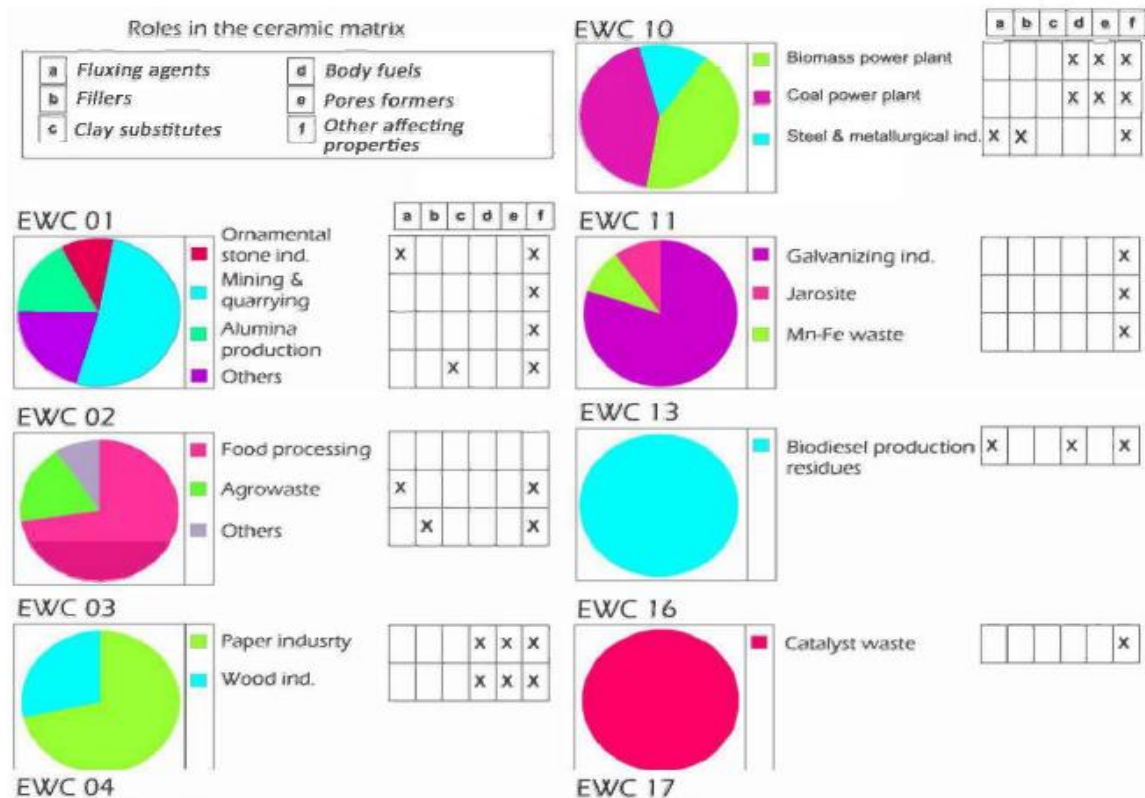
Une deuxième classification est réalisée également dans la littérature en présentant cette fois-ci le rôle que pourrait jouer chaque déchet une fois utilisé dans la fabrication des produits cuits en général [95]. En effet, selon ses propriétés physico-chimiques et minéralogiques, chaque type de déchet pourrait un rôle différent et peut être utilisé comme : substituant d'argile (clay substitutes), matériaux de charge (fillers), agent formateur de pores (pores formers), agent de fluxage (fluxing agent), agent combustible (body fuels), colorant ou comme ajouts spéciaux.

Une classification selon le rôle de chaque type de déchet et selon sa classification dans le catalogue EWC [73] est illustrée dans la Figure II.4 [74].

II.8.1 Substituant d'argiles

Les déchets substituants d'argiles sont généralement caractérisés par leur contenu en minéraux argileux qui peuvent améliorer la plasticité des mélanges de tesson pour la fabrication de briques. Par exemple les minéraux argileux recherchés pour la terre sont généralement : la kaolinite ($[Si_2O_5 Al_2(OH)_4]$ ou sous une autre forme $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$), l'illite $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10} [(OH)_2,(H_2O)]$, les smectites (ex. montmorillonite) ou les chlorites $(Mg_5(Al,Fe)(OH)_8(Al,Si)_4O_{10})$. Ces différents minéraux présentent des propriétés différentes et se comportent justement différemment une fois utilisés dans les mélanges de tesson. Les smectites par exemple possèdent une très grande plasticité et assurent une grande cohésion que les minéraux kaoliniques et illitiques peuvent assurer.

Cependant, il est à signaler que des difficultés de séchage de briques cuites sont généralement associées avec les minéraux argileux très plastiques. Plus de détails sur les propriétés des minéraux argileux et les difficultés associées à leurs utilisations dans les briques sont décrites dans le mémoire de thèse de Samara (2007) [75]. Une multitude de déchets sont déjà utilisés dans l'industrie et d'autres sont encore au niveau de recherche et de développements. Les résidus de traitement des eaux usées, les cendres d'incinération des déchets solides urbains et d'autres déchets sont utilisés [76 ; 77 ; 78]. Dans une autre étude, qui est d'ailleurs un exemple réel de valorisation de déchets industriels, celui de la fabrication de briques à partir des déchets de l'extraction de charbon en Pologne [79 ; 80]. Ces déchets sont constitués essentiellement de schistes carbonatés et sont utilisés pour la production de briques commercialisées en Pologne.



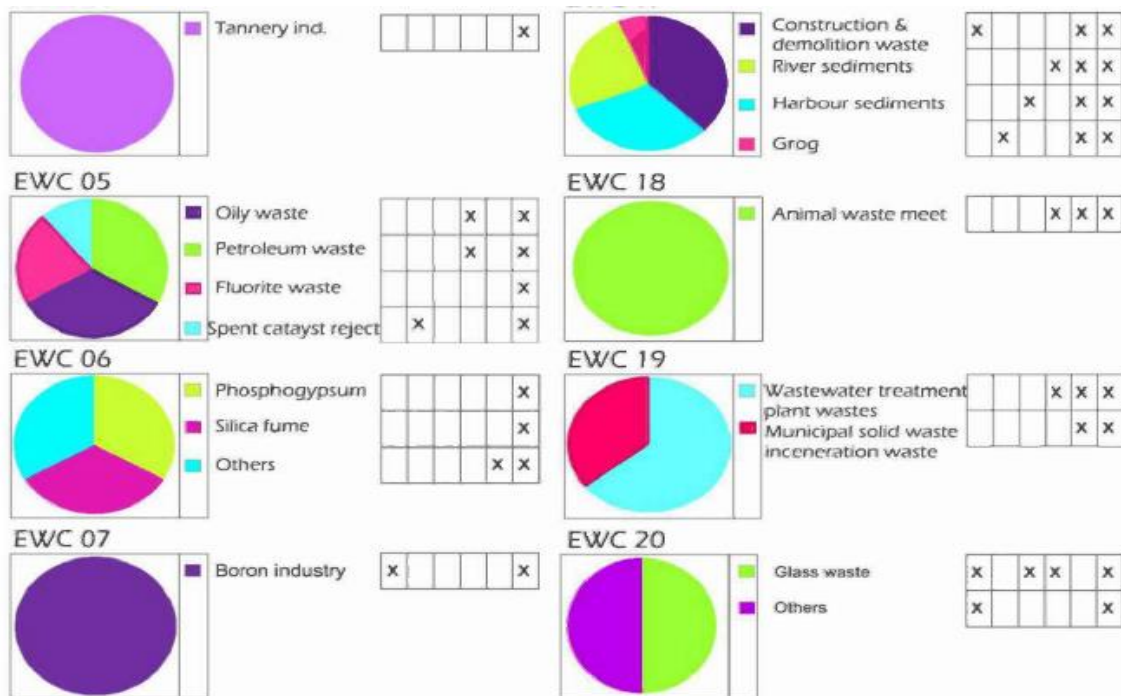


Figure II.4 Classification des types de déchets selon EWC (2002) et selon leur rôle potentiel dans la fabrication de briques cuites [74]

II.8.2 Matériaux de charge

Les matériaux de charge sont généralement utilisés dans la fabrication de briques pour réduire la forte plasticité de certaines argiles naturelles. Une forte plasticité entraîne des difficultés de fabrication de briques liées essentiellement à une humidité de façonnage importante, un séchage lent et un retrait de séchage important. C'est dans ce sens que les éléments de nature non plastique « matériaux de charge » sont utilisés pour remédier à ces problèmes de nature technique. L'utilisation des matériaux de charge permet en effet d'améliorer les rendements de séchage, de dégagements de gaz et d'oxydation à cœur des produits. Les sables et les roches broyées sont les matériaux de charge naturels les plus utilisés. En ce qui concerne les déchets industriels utilisés comme matières alternatives aux matériaux naturels, on distingue les cendres volantes [81 ;82 ;83], les sables de fonderie [84 ; 85], les sédiments de rivières [86 ; 87].

II.8.3 Agents formateurs de pores

Les industriels utilisent souvent ce qu'on appelle des agents formateurs de pores afin de réduire la conductivité thermique de la brique et par conséquent augmenter la résistance thermique des murs de briques. Récemment, l'utilisation de déchets riches en matières organiques comme agents formateurs de pores commence à prendre de l'ampleur. Les déchets de l'industrie de bois, de papeterie, de tabac, de canne à sucre et de biomasse sont de plus en plus utilisés [68 ; 88]. Par exemple, La décomposition de ces matières organiques au cours de la cuisson provoque un dégagement de CO₂ et permet une augmentation de la porosité et donc une amélioration des propriétés d'isolation thermique.

II.8.4 Agents fluxant

Certains déchets sont utilisés dans la fabrication de briques cuites grâce à leur teneur en oxydes alcalins particulièrement K_2O et Na_2O . Ces éléments sont appelés des agents fluxant ou des promoteurs de fusion et permettent de baisser les températures de cuisson et d'améliorer la formation de la phase liquide qui contribue à l'amélioration des mécanismes de frittage et de densification des produits cuits. Généralement, ces oxydes sont contenus les feldspaths et les micas naturels. Plusieurs types de déchets industriels sont connus pour leur teneur en éléments fluxant comme la poudre de verre recyclé [87 ; 89], résidus riches en bore [90 ; 91], les scories d'acier [92], les scories du procédé Waelz [85 ; 93 ; 94] et les cendres des procédés de gazéification de la biomasse et de charbon [81 ; 82].

II.8.5 Agents combustibles

Un type de déchet est considéré comme un agent combustible s'il contient des matières ayant un pouvoir calorifique important qui pourraient réduire la consommation d'énergie au cours de la cuisson. Les matières combustibles permettent généralement de réaliser des économies d'énergie importante. Parmi les déchets utilisés sont les résidus huileux, les boues de gaz des hauts-fourneaux, les boues de l'industrie de papier, les cendres ayant une teneur considérable en carbone [69 ; 95]. L'utilisation de ce type de déchet provoque comme c'est le cas des éléments formateurs de pores à une augmentation de la porosité et une diminution de la densité.

II.8.6 Agents colorants

Outre tous les agents évoqués précédemment, il est souvent nécessaire d'ajouter aux mélanges des agents colorants pour avoir des produits finis ayant une belle couleur qui soient vendables facilement. L'oxyde de titane est utilisé avec certaines argiles pour obtenir des briques ayant une couleur orangée, jaune ou crème. Le bioxyde de manganèse est utilisé donner aspect vieilli aux produits finis. La chaux permet un éclaircissement de la couleur de la brique finale. En effet, les déchets contenant du titane ou de la chaux, les résidus de plastiques, les mâchefers, les fines de charbon, les résidus de peintures et d'autres sont utilisés [96 ; 97].

II.9 Caractéristiques des matières premières secondaire recherchées pour la fabrication de briques

Les propriétés physiques et chimiques des argiles utilisées pour la fabrication de briques sont considérées dans un premier temps pour des fins de comparaison et d'orientation. Ces données sont primordiales et permettent de prédire le comportement de briques contenant des déchets à partir de leurs propriétés physico-chimiques.

II.9.1 Composition chimique

La Figure II.5 présente un diagramme ternaire réalisé à base d'une synthèse de littérature des compositions chimiques des argiles utilisées pour la fabrication des briques. Il permet de visualiser la différence de composition chimique entre un déchet et les argiles naturelles. C'est aussi un outil d'aide à la décision pour le choix de différents additifs à rajouter pour corriger les dosages de matières premières selon le manque en éléments chimiques. Il est présumé que les déchets qui peuvent être utilisés avec succès dans la fabrication de briques cuites sont les déchets ayant une composition chimique pas si loin de celle des argiles naturelles.

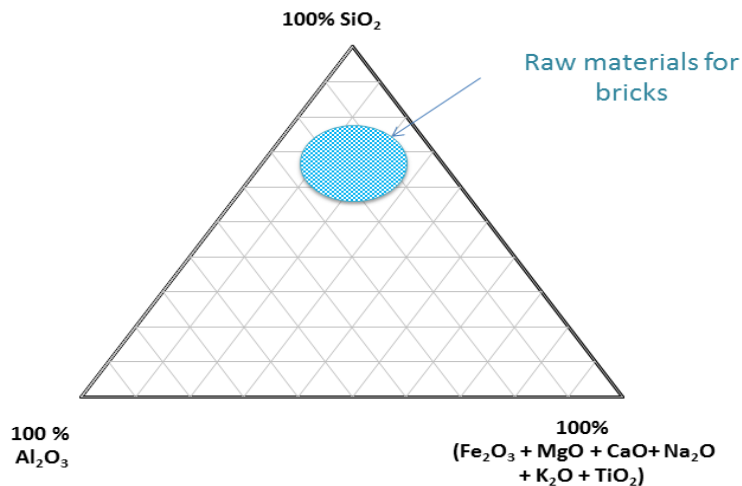


Figure II.5 Diagramme ternaire illustrant les compositions chimiques des Argiles adéquates pour la fabrication des briques d'argile [118].

Il est bien observé que les matières premières utilisées pour la fabrication de briques sont composées essentiellement, d'un point de vue chimique, de la SiO_2 (50- 80%) et d' Al_2O_3 (0-30%). Les autres oxydes présentent jusqu'à 30% de la masse totale des matières premières. C'est en effet la composition en ces éléments qui détermine les propriétés de ces matières. La silice, sous forme de quartz, joue généralement le rôle de matériaux de charge lorsqu'elle est grossière et présente le squelette de la brique. L'alumine quant à elle permet d'améliorer la plasticité des mélanges et d'obtenir des produits pressés à reliefs importants. Les oxydes et hydroxydes de fer agissent au cours de la cuisson comme fluxant (ou flux) au cours de la cuisson et permettent de communiquer une couleur rouge aux produits cuits. Par contre, il est à signaler que la couleur finale du produit fini dépend de la nature de l'oxyde de fer, l'hématite tend à donner un aspect rouge alors que la magnétite favorise plutôt une coloration grisâtre. Les oxydes de chaux et de magnésie, provenant des carbonates de chaux et de magnésie, sont également considérés comme des éléments fluxant et tendent à se combiner aux silicates au cours de la cuisson. Les oxydes alcalins (Na_2O et K_2O) peuvent jouer également le rôle de fluxant et contribuent aux réactions de grésage et de formation de la phase vitreuse qui sont responsable des propriétés finales de la brique (ex. résistance mécanique, porosité, etc.).

L'utilisation des diagrammes ternaires est aussi d'une importance primordiale dans le domaine des terres en général. Quand il est question d'utiliser un déchet donné dans la fabrication de briques, il est très important de localiser sa composition chimique dans le diagramme ternaire pour évaluer sa compatibilité avec les argiles naturelles.

II.9.2 Distribution granulométrique

La distribution granulométrique est un paramètre indispensable dans le procédé de fabrication des briques. Elle influe considérablement les caractéristiques physiques et mécaniques du produit final. Ceci est expliqué par l'influence de la distribution granulométrique sur la compacité des mélanges de matières premières. Une granulométrie serrée (toutes les particules ont pratiquement le même diamètre équivalent) ne permet pas d'obtenir une forte compacité [75]. Une granulométrie étalée permet une densification plus importante de l'empilement. En

effet, des diagrammes qui relient la granulométrie optimale et le type de produit ont été proposés par Winkler [98] et amélioré avec le temps (Figure II.6). On note que les très grandes concentrations de fines sont à écarter et que les granulométries moyennement grossières sont recherchées pour les briques.

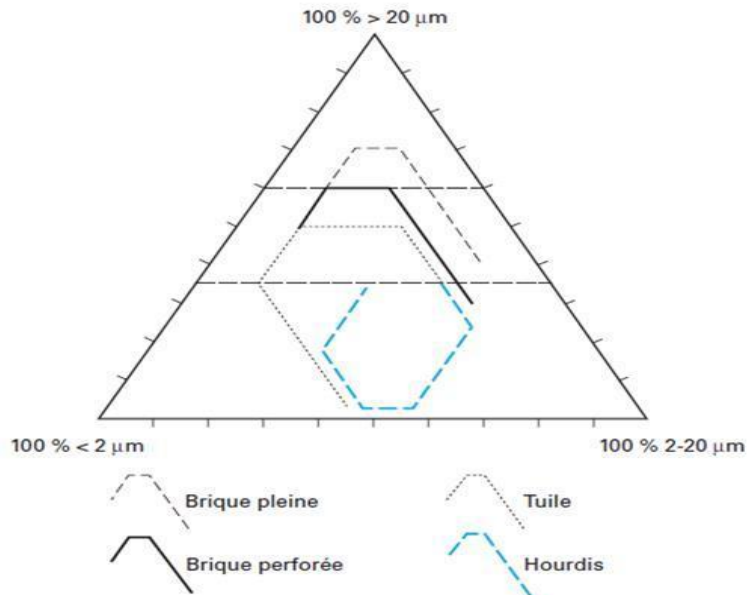


Figure II.6 Diagramme de Winkler et Niesper [117].

II.9.3 Plasticité et mélange

La plasticité est une propriété importante dans les procédés de fabrication de briques. La plasticité renseigne sur la variation de la consistance d'un sol en fonction de la teneur en eau. Elle dépend de plusieurs facteurs : teneur en eau, nature minéralogique de l'argile, finesse, forme des grains, surface et orientation des particules, agrégation des particules, présence en éléments inertes (Sable) et présence des sels. La plasticité dépend également des forces de cohésion et d'attraction entre les particules constituant un sol. La présence des charges électriques à la surface des particules d'argiles influe fortement sur les interactions entre ces particules et les molécules d'eau qui rendent plastique la pâte d'argile. Généralement, la fraction granulométrique <math>< 2\ \mu\text{m}</math> (fraction argileuse) influence fortement la plasticité des mélanges. Elle permet d'obtenir une plasticité importante et entraîne par contre une forte demande en eau de façonnage et des difficultés de séchage. On considère souvent qu'un sol est cohérent et facile à façonner que lorsqu'il comprend plus que 50% de la fraction argileuse. La (Figure II.7) montre les zones optimales pour la mise en forme des produits de terres en fonction de leurs caractéristiques de plasticité.

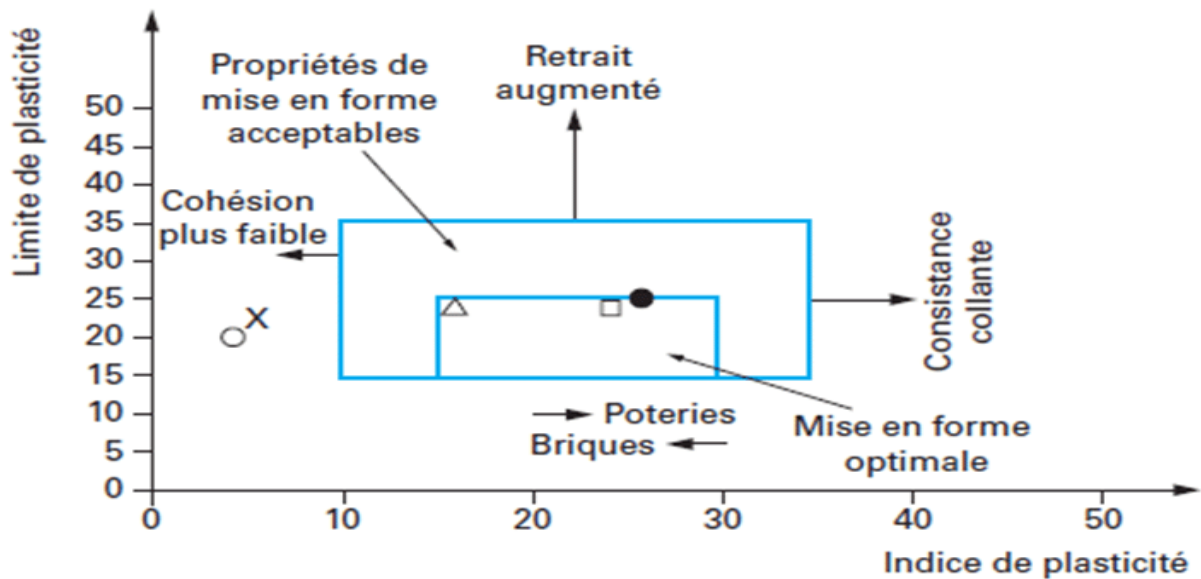


Figure II.7 Classification des sols argileux [118]

II.10 Conditions de fabrications de briques cuites à base de déchets

Le procédé de cuisson est une étape clé qui détermine les propriétés finales des briques cuites. Le développement de ces propriétés est lié essentiellement au comportement et transformations des composantes des matières premières au cours de la cuisson.

Plusieurs paramètres sont à considérer dans un procédé de cuisson : la température finale de cuisson, la vitesse de cuisson et la durée de cuisson. La nature physique, chimique et minéralogique des matières premières déterminent les conditions de cuisson. La formation de la phase liquide, responsable majeure des propriétés finales des briques cuites, ainsi que les mécanismes de vitrification commencent généralement aux alentours de 900°C et se terminent aux alentours de 1050°C. La présence des promoteurs de fusion (oxydes de fer, chaux, alcalins) provoque ainsi une fusion de la matrice à basses températures, une amélioration de la quantité de la phase liquide produite et des propriétés mécaniques des briques cuites.

Les propriétés de chaque type de déchet déterminent ainsi les conditions de cuisson optimales à adopter pour obtenir des produits finis qui répondent aux normes et exigences de la construction. La plupart des articles traitant la valorisation de déchets industriels dans la fabrication de briques cuites ont toujours la tradition de déterminer les conditions optimales de cuisson tout en cherchant à valoriser la quantité maximale du déchet étudié. Souvent, quand il est question de déchet contenant des fluxants, des basses températures de cuisson sont suffisantes pour atteindre les propriétés désirées. Par contre, quand des déchets contiennent des phases réfractaires, il est indispensable de monter vers des températures supérieures. Aussi, il est très important de donner plus d'attention à la vitesse de cuisson quand il est possible d'avoir des transformations d'ordre allotropiques peuvent avoir lieu : ex. transformation du quartz alpha en quartz beta aux environs de 573°C. Ces transformations sont généralement sévères et tendent à

détruire la résistance mécanique des produits finis. En effet, pour palier à ce problème, des chercheurs préfèrent passer par des paliers de cuisson avant d'atteindre la température finale. Les paliers de cuisson sont aussi utilisés pour faciliter les dégagements gazeux d'une manière à ce que leur pression ne provoque pas une chute des propriétés mécaniques.

II.11 Les propriétés des briques à base de déchets

L'évaluation de la faisabilité d'utilisation de déchets dans la fabrication de briques est étudiée dans la littérature en évaluant la totalité ou une partie des aspects suivants :

- Les propriétés physiques et mécaniques, appelées aussi technologiques, des briques à base de déchets industriels.
- Le comportement environnemental de ces briques : la lixiviation et la mobilité des contaminants (métaux lourds, métalloïdes, etc.).
- Les dégagements gazeux au cours de la cuisson en réalisant une quantification et une détermination des gaz dégagés.

En d'autres termes, il est important de noter qu'on ne peut pas parler d'une valorisation/recyclage d'un déchet industriel dans le domaine des matériaux de construction tant que le cycle de vie complet (fabrication, utilisation et démolition) du produit étudié n'est pas pris en considération. Aussi, il est indispensable que le produit fini contenant un déchet donné ne doive poser aucune menace ni à la santé des travailleurs lors des travaux de construction (contact, poussières, etc.) ni à l'environnement. Actuellement, le comité européen de normalisation (CEN) est en train de développer des normes techniques, en tenant en compte les exigences de santé, de sécurité et d'environnement, auxquelles tout produit de construction (contenant même des déchets) doit répondre.

II.11.1 Les propriétés technologiques et la durabilité des briques

La valorisation des déchets industriels dans la brique passe dans un premier lieu à une évaluation de leurs propriétés technologiques : résistance mécanique, porosité, absorption d'eau, retrait de séchage et de cuisson, densité, pertes au feu. La détermination de ces propriétés est évaluée selon les normes de construction en vigueur dans chaque pays. Le but final est de comparer les résultats obtenus avec les exigences sur le produit ou on cherche à valoriser le déchet étudié. La plupart des études rencontrées dans la littérature ont utilisé des normes européennes (CEN), américaines (ASTM) et d'autres normes [99].

- La résistance mécanique est parmi les indicateurs de qualité exigés par les normes de construction. La caractérisation mécanique comprend les essais de compression uni-axiale et de flexion sur les éprouvettes fabriquées et permet l'évaluation de l'aptitude d'un matériau à être utilisé dans le domaine de la construction.
- L'absorption d'eau est également une caractéristique primordiale qui renseigne sur la résistance de la brique à l'eau et sur sa durabilité. Une forte absorption d'eau pourra conduire à une pénétration d'eau à l'intérieur de la brique et donc à une accélération des dommages par les cycles de gel-dégel.
- L'analyse de la porosité est importante car elle influence grandement la résistance mécanique, l'absorption d'eau et la perméabilité de la brique. Elle dépend de la

température de cuisson et de la minéralogie des matières premières. Une température de cuisson élevée induit une structure assez vitreuse et une variation importante du volume (contraction) et de porosité.

- Le retrait de cuisson est un paramètre important qui influence les dimensions et la résistance mécanique de la brique. Un retrait important provoque une déformation facile de la brique et une grande variation de volume de produit fini.
- Les pertes au feu au cours de la cuisson, c'est aussi un paramètre important qui renseigne sur la porosité d'un produit qui affecte automatiquement les autres propriétés technologiques. Les pertes au feu dépendent essentiellement de la décomposition des matières organiques, des carbonates et des sulfures.
- La densité est l'un des critères qui qualifie une brique s'elle est légère ou lourde. La densité renseigne sur le degré de densification et de la vitrification.
- La durabilité des briques est évaluée pour prédire leur comportement à long terme. Le défi majeur de durabilité des briques est évalué par des tests d'efflorescence et de quantification des sels solubles. La présence des sels dans la structure des briques provoque, une fois en contact avec l'eau, une migration des sulfates à la surface des briques ou ils se déposent et forment d'un précipité blanc [100 ; 101]. C'est le phénomène d'efflorescence, il est considéré comme un élément pénalisant de la qualité des briques. La formation de ces dépôts blancs, souvent sous forme de sulfates, influence négativement la durabilité des briques et pourrait provoquer une destruction de la brique [102].

II.11.2 Le comportement environnemental

Il est connu que les déchets industriels peuvent contenir des contaminants (métaux, métalloïdes, etc.) et leur utilisation dans la fabrication des matériaux de construction peut engendrer des risques importants sur l'environnement, la santé et la sécurité de leurs utilisateurs. C'est dans ce sens qu'il est important d'évaluer le comportement environnemental des matériaux de construction à base de déchets industriels. Le comportement environnemental des matériaux de construction est évalué en analysant les facteurs qui peuvent influencer la lixiviation de contaminants. Les paramètres étudiés sont généralement ceux qui peuvent influencer la durabilité du produit comme la granulométrie du produit, la solution de lixiviation, le ratio solide-liquide, la masse du produit analysée et le PH de la solution de lixiviation. Dans ce sens, une multitude de tests sont utilisés à l'échelle mondiale. Aucune harmonisation de ces tests n'a encore pas vu le jour pour évaluer la performance environnementale des matériaux de construction. Les tests utilisés dans la littérature peuvent être retrouvés dans l'étude de Coronado [95]. Ces tests sont classifiés en deux catégories ; (i) des tests de lixiviation sur des blocs monolithiques et (ii) des tests de lixiviation sur des produits concassés ou broyés Le test de diffusion sur des blocs monolithiques NEN-7375 (2004) est souvent utilisé pour évaluer la lixiviation des contaminants durant la durée de vie du produit de construction étudié. Ce test est basé sur le transfert de masse du bloc étudié vers la solution de lixiviation dans laquelle est imprégné le produit étudié. Il permet également de donner des informations sur la cinétique de relargage de contaminants avant d'arriver aux conditions de stabilité du bloc monolithique. Les résultats de ce test sont comparés avec les limites fixées par « the Building Material Decree ».

D'autres tests sont utilisés pour simuler la lixiviation de contaminants à la fin de vie du matériau étudié. Ces tests sont généralement réalisés sur des produits concassés ou broyés. Les tests TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) et UNE-EN 12457 (Equilibrium batch leaching tests) sont les plus utilisés. Les résultats de ces tests sont comparés avec les limites fixées respectivement par l'agence de protection de l'environnement (US-EPA) et le conseil de décision européen (2003/03/EC). D'autres tests ont pour but de simuler la lixiviation de contaminants dans des solutions ayant des valeurs de pH différentes comme le cas de la méthode 1313 (EP A-1313, 20 12) et de la capacité de neutralisation acido-basique (EN 14997).

II.12 Effet de l'utilisation de divers déchets industriels dans les briques

II.12.1 Utilisation des boues comme matériaux de brique

En 2003, Weng et al. A exploré l'utilisation possible des boues déshydratées et séchées au four comme matériaux de brique. Ils sont arrivés à ces résultats :

II.12.1.1 Définition

Boues : Les boues (urbaines ou industrielles) sont le principal déchet produit par une station d'épuration à partir des effluents liquides. Ces sédiments résiduaux sont surtout constitués de matière organique (bactéries mortes) de matière organique animale, végétale et minérale humide. Une installation moyenne de gestion des eaux usées produit environ 40g de matière sèche par jour et par habitant.

II.12.1.2 Surface spécifique des mélanges argile-boue

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.3 les surfaces des boues et la surface spécifique est presque de même ordre de grandeur comme pour l'argile, 0.51 et 0.564 m²/g, respectivement. Comme la quantité de boue augmente, la surface spécifique de mélange augmente proportionnellement. Le plus spécifique la surface du mélange indique le besoin de plus l'eau utilisée dans les processus de moulage des briques. Lorsqu'une quantité assez élevée de boues est appliquée pour remplacer l'argile, les besoins en eau dans la fabrication de briques on s'attend à ce que le processus soit supérieur à celui de l'argile seule. [103].

Tableau II.3 Effet de la proportion de boues sur la surface spécifique et l'indice plastique des mélanges [113]

Effect of sludge proportion on the specific surface area and the plastic index of the mixtures

Sludge proportion (% by weight)	0	10	20	30	40	100
Specific surface area (m ² /g)	0.51	0.514	0.521	0.53	0.532	0.564
Optimum moisture content (%)	23	24	26	29	33	–
Liquid limit (%)	38	39	41	45	46	–
Plastic limit (%)	20	22	25	30	33	–
Plasticity index	18	17	16	15	13	–

II.12.1.3 Test de compactage et tests d'Atterberg sur l'argile - mélanges de boues

Weng et al ont utilisés un test de compactage standard AASHTO pour déterminer la OMC qui est un facteur affectant les propriétés des briques. L'OMC d'un mélange était basé sur le besoin

d'humidité dans lequel le maximum de liaison entre les particules du mélange est conservée. Les résultats de test montrent que le OMC est de 23% pour le mélange d'argile. L'augmentation des proportions de boues dans le mélange a entraîné une augmentation de l'OMC. L'effet de l'humidité sur le comportement plastique du matériau pulvérisé est démontré selon les limites d'Atterberg. Les résultats des tests Atterberg sur les boues -les mélanges d'argile indiquent que la valeur de la limite plastique est inversement proportionnelle à la quantité de boue dans la brique. Une valeur limite de plastique de 18 pour l'argile seule montre que l'argile peut être classée comme un matériau à faible plasticité. Les valeurs limites plastique présentées dans le tableau II.6 indiquent que jusqu'à 30% des boues peuvent être appliquées dans la brique sans perdre son comportement plastique. [103].

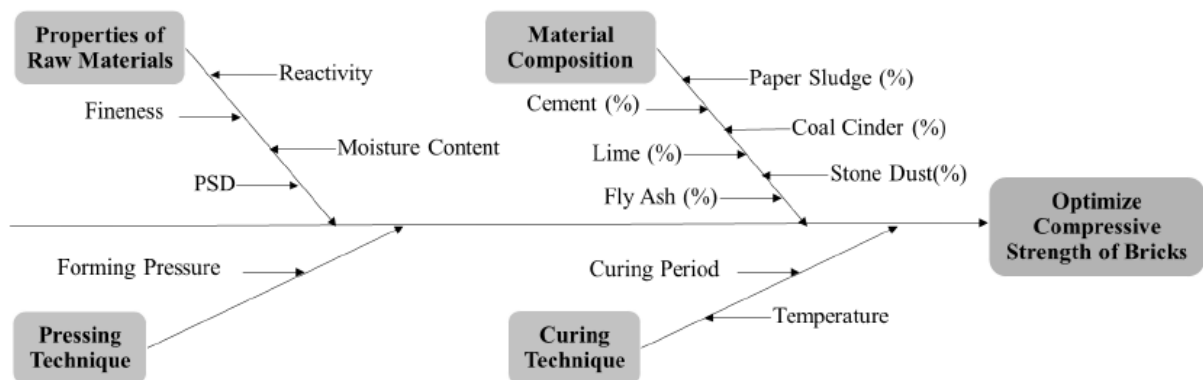


Figure II.8 Diagramme de cause à effet pour le traitement de la brique de cendres volantes [113]

II.12.1.4 Absorption d'eau

L'absorption d'eau est un facteur clé affectant la durabilité de la brique. Moins l'eau s'infiltré dans la brique, plus de durabilité de la brique et de résistance au naturel l'environnement est attendu. Ainsi, la structure interne de la brique doit être suffisamment intense pour éviter intrusion d'eau. La figure II.9 montre les résultats du test pour différents proportions de boues dans le mélange cuit à quatre températures. La figure II.9 montre que l'absorption d'eau pour les briques augmentent avec l'ajout de boues et diminution de la température de cuisson, diminuant ainsi sa résistance aux intempéries. [103].

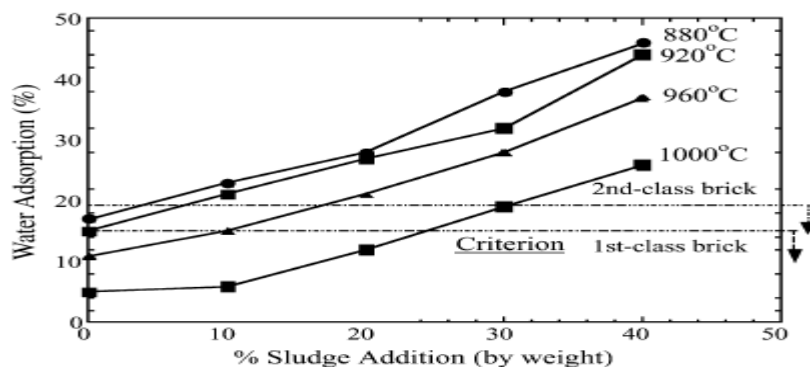


Figure II.9 L'absorption d'eau des briques [113].

II.12.1.5 Densité des briques

Les briques en argile ont normalement un volume densité de 1,8–2,0 g/cm³. Les mesures de densité de particules pour différentes proportions de boues cuites à quatre températures sont illustrées à la Figure II.10. Comme indiqué, la quantité de boue ajoutée dans le mélange. La constatation est étroitement liée à la quantité d'eau absorbé comme le montre la figure II.9. Lorsque le mélange absorbe plus d'eau, la brique présente une plus grande taille de pores. La température de cuisson peut également affecter la densité des particules des briques. Les résultats montrent que l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la densité des particules. [103].

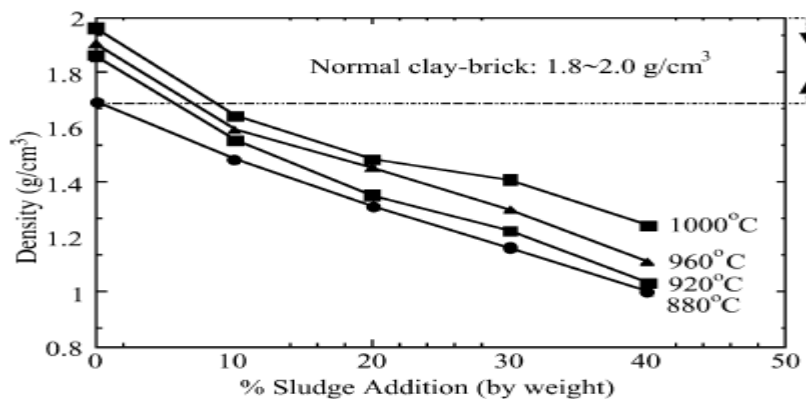


Figure II.10 La densité de particules des briques [113]

II.12.1.6 Résistance à la compression des briques

Le test de compression est le test le plus important pour assurer la qualité technique d'un matériau de construction. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure II.11. Les résultats indiquent que la résistance dépend fortement de la quantité de boue dans la brique et de la température de cuisson. Comme illustré, avec jusqu'à 10% de boues ajouté aux briques, la résistance obtenue à 1000 °C peut être aussi haut que les briques d'argile normales. [103].

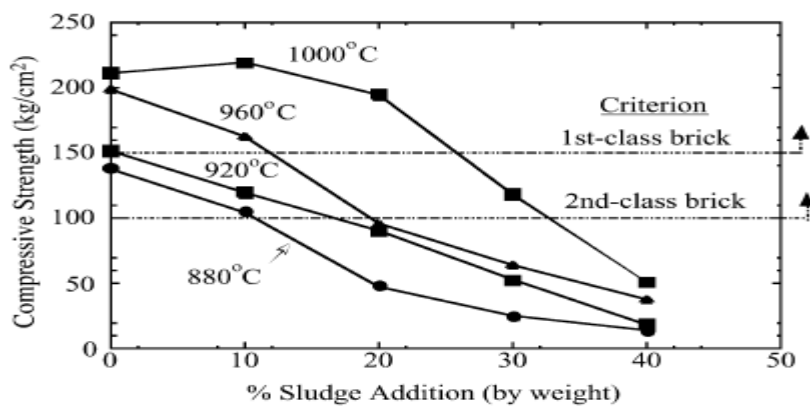


Figure II.11 La résistance à la compression des briques [113].

Discussion :

L'étude de **weng** et al, a démontré les conditions appropriées pour utilisées les boues séchées comme substitut d'argile pour produire des briques. La proportion de boues dans le mélange et la température de cuisson sont les deux facteurs clés affectant la qualité de la brique. En tout, le la proportion recommandée de boues dans la brique est de 10%, avec une teneur en humidité optimale de 24%, préparée dans les mélanges moulés et cuite entre 880 °C et 960 °C pour produire une brique de bonne qualité.

II.12.2 Utilisation de déchets de poudre de marbre dans l'industrie de la brique

En 2012, Bilgin et al. Expérimenté et analysé l'utilisation possible de déchets de poudre de marbre dans l'industrie de la brique. Les résultats obtenus sont les suivants :

II.12.2.1 Définitions

Poudre de marbre : la poudre de marbre est du calcaire ou carbonate de calcium très dur. Sa couleur est d'un blanc pur avec des brillances. Elle est utilisée comme charge dans les peintures et enduits traditionnels, suivant sa granulométrie, dans les enduits fins et les stucs.

II.12.2.2 Changements de taille et de poids après le processus de frittage

La taille et le poids des échantillons ont été mesurés avant et après procédés de frittage. Les changements de poids et de taille ont été calculés et les graphes sont donnés à la Fig. II.12 (a – d). La figure II.12 montre les tailles et les changements de poids des différents échantillons fritté à 900, 1000 et 1100 °C. Il a été observé que le marbre croissant le taux de déchets dans le mélange a provoqué l'expansion des échantillons. Normalement, le minéral argileux rétrécit après le processus de frittage. Les matières organiques brûlent et entraînent un rétrécissement du matériau, mais les déchets de poudre de marbre de rebut présentent un comportement opposé en particulier lorsqu'il contient une forte proportion de déchets de poudre de marbre. Malgré la diminution du poids, la taille augmente. La principale raison de l'augmentation de la taille est l'apparition de pores dans la structure due au rejet de CO_2 lors des processus de calcinations de CaCO_3 . [105].

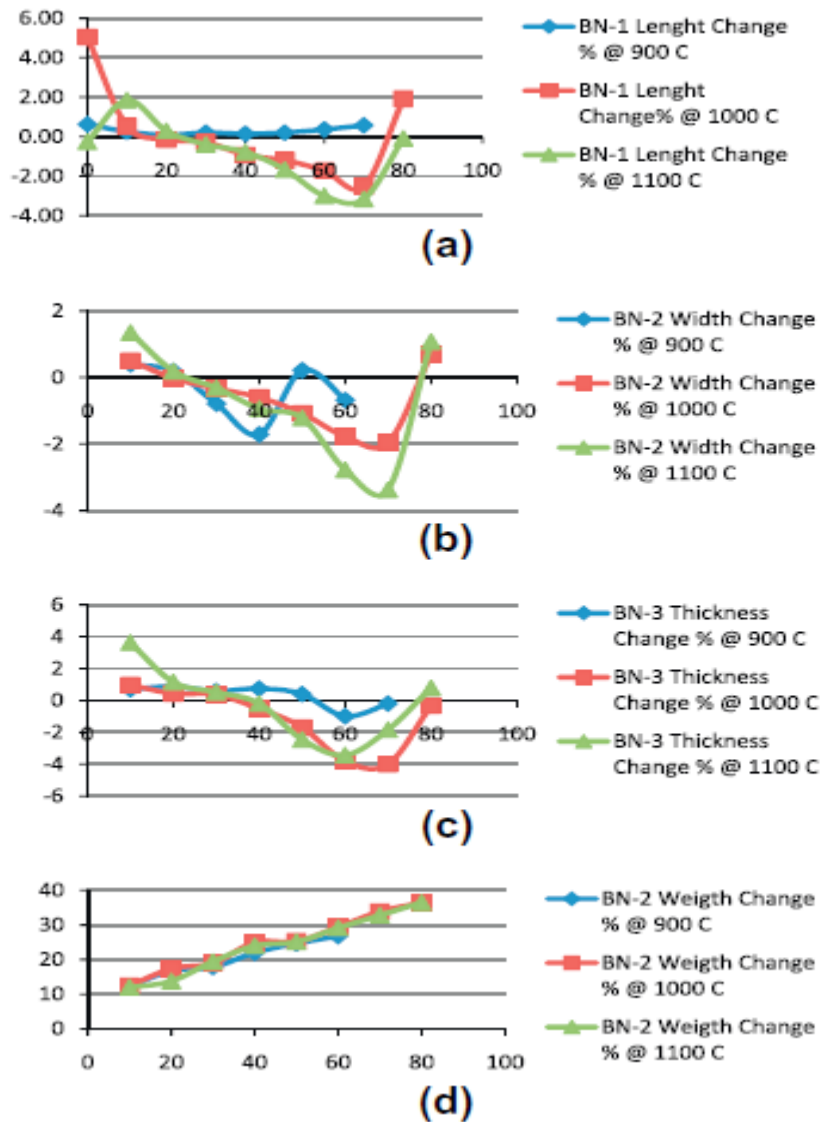


Figure II.12 Changements de taille et de poids avec l'augmentation du taux de déchets et l'évolution graphique de températures (a) longueur, (b) largeur, (c) épaisseur et (d) poids [105].

II.12.2.3 Résultats des tests de déplacement d'eau d'Archimède

Le rapport d'absorption d'eau des briques se réfère au poids d'humidité dans les pores par rapport au poids des éprouvettes pressées, c'est aussi un indice important pour la détermination de la qualité de la brique comme le carreau de marbre artificiel. À partir de la figure II.13, on peut voir que les valeurs de porosité des déchets de briques mélangées augmentent avec l'augmentation de déchet. L'une des raisons de ce résultat est le minéral CaO dans le marbre de rebut. Parce que CaO est très réactif et réagit avec l'eau, libérant de la chaleur et formant du Ca (OH)₂ [105].

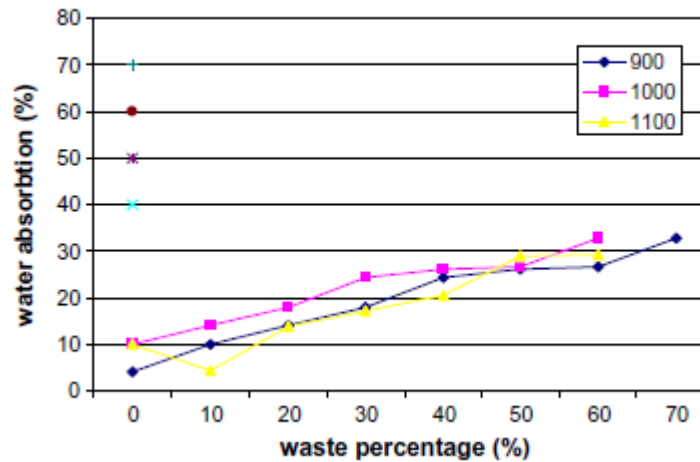


Figure II.13 Rapports d'absorption d'eau avec une quantité croissante d'additifs de rebut dans la composition de brique [105].

II.12.2.4 Résultats de résistance mécanique

La Fig.II.14 montre la résistance à la flexion des briques frittées à différentes températures (900, 1000 et 1100 °C) avec différents taux de déchets de marbre (0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80% en poids). On peut voir sur la figure II.13 que la température de frittage et le pourcentage de déchets ont des influences sur la résistance à la flexion des compositions. La porosité de la brique augmente en raison du dégagement de gaz CO_2 lors de calcinations qui entraîne des effets néfastes sur la résistance à la flexion. Les diminutions de la résistance à la flexion dans les briques ajoutées de marbre sont des résultats attendus depuis l'ajout de poudres de marbre dans l'industrie le mortier de brique a réduit les densités et augmenté les porosités. Dans les briques, les valeurs de résistance diminuent généralement avec l'augmentation des porosités [105].

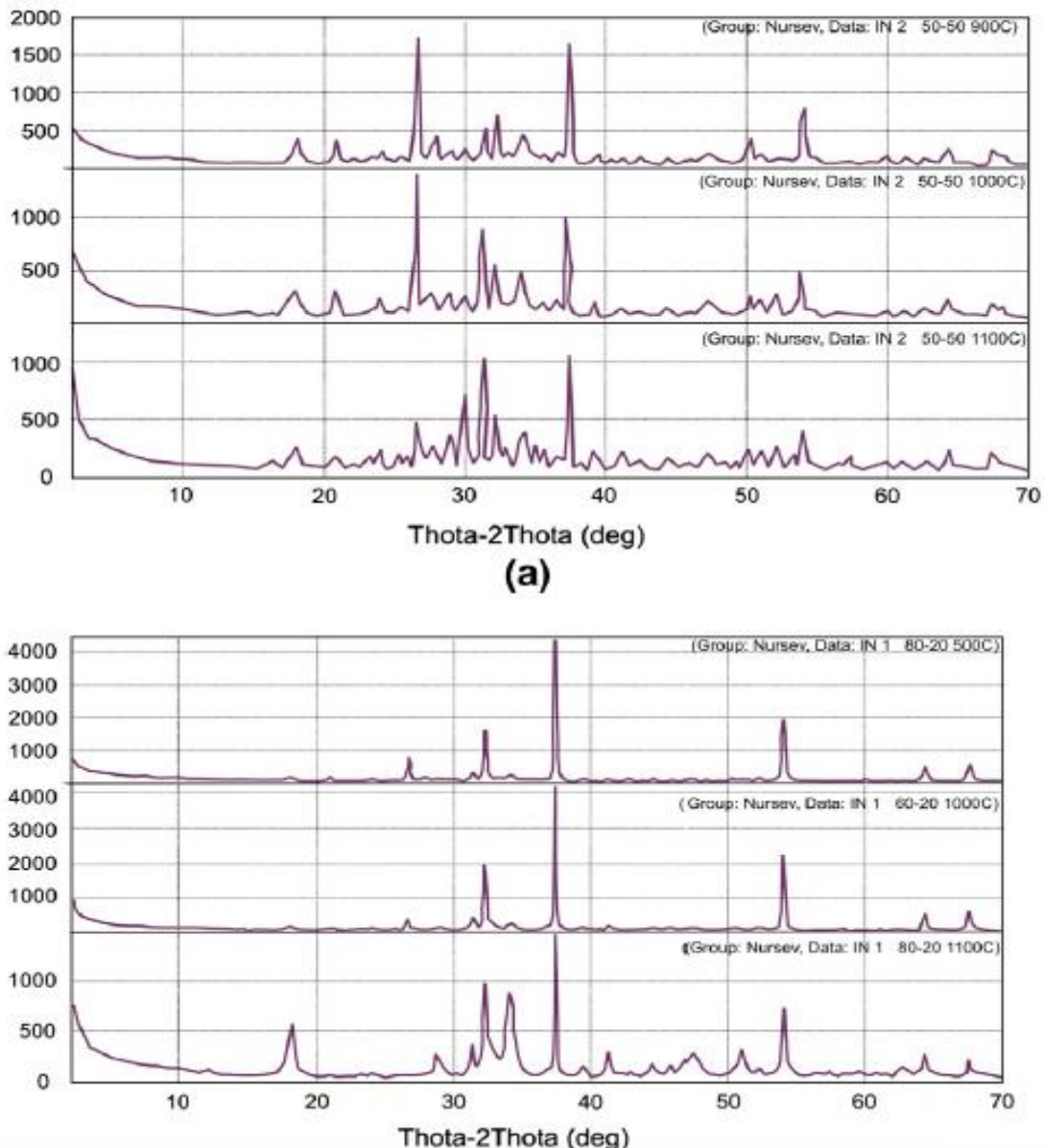


Figure II.14 Diagrammes de diffraction des rayons X pour 900, 1000 et 1100 °C (a) 20% de diagramme de diffraction des rayons X de marbre de rebut et (b) 50% de diagramme de diffraction de rayons X de marbre de rebut [105].

Discussion :

Bilgin et al., Ils ont découvert que l'ajout de poussière de marbre avait des effets positifs sur les résistances physiques, chimiques et mécaniques des briques industrielles produites. Des remplacements de poussière de marbre variant de 0 à 80% ont été essayés et des échantillons de prismes rectangulaires de (41*08*08) mm ont été coulés à une pression de formage de 15 MPa. Les résultats de cette étude montrent que 10% en poids de poudre de marbre peuvent être ajoutés sans sacrifier les propriétés techniques. Cependant, plus de 10% de poudre de marbre augmente la porosité, l'absorption d'eau et diminue les propriétés mécaniques.

II.12.3 Études expérimentales sur la brique de cendre d'étang

Diverses recherches ont été menées pour une utilisation efficace des cendres d'étang dans les briques. **Vidhya et al.** (2013) ont mené des études expérimentales sur l'utilisation des cendres d'étang et des briques de cendres volantes en utilisant de la chaux comme activateur, du sable pour réduire les fissures laminaires dans les briques et du gypse pour accélérer le processus de durcissement pour obtenir une résistance précoce.

II.12.3.1 Définitions

Cendre d'étang : Un bassin de cendres, également appelé bassin de cendres de charbon ou retenue de surface, est une structure technique utilisée dans les centrales à combustibles fossiles pour l'élimination de deux types de produits de combustion du charbon : les cendres résiduelles et les cendres volantes. L'étang est utilisé comme décharge pour éviter le rejet de cendres dans l'atmosphère. Bien que l'utilisation de bassins de cendres en combinaison avec des contrôles de la pollution de l'air (comme des épurateurs par voie humide) diminue la quantité de polluants atmosphériques, les structures présentent de graves risques pour la santé et l'environnement.

II.12.3.2 Résultats et discussions

Les propriétés des briques telles que la résistance à la compression, l'absorption d'eau, la densité de poids, le test d'efflorescence sont réalisés. Les résultats des tests de ces propriétés sont calculés et tabulés dans le tableau II.4. La résistance à la compression de la brique est le rapport entre les charges de rupture et la section transversale de la brique. La charge est appliquée axialement au taux uniforme de 14 N/mm² par minute pour le calcul de la résistance à la compression. La résistance moyenne à la compression des briques de 7^e à la 14^e est calculée à 28 jours. La valeur de la résistance à la compression varie de 7,6 à 9,2 N/mm² du mélange I à IV. Tous les mélanges doivent satisfaire à la désignation de classe 7.5. La valeur de résistance à la compression du mélange I est 18% supérieure à la désignation de classe 7.5. Les briques constituées de ces mélanges peuvent être utilisées pour des structures à ossature. La densité pondérale de la brique est définie comme le rapport entre le poids de la brique et le volume de la brique. La valeur de masse volumique des mélanges varie entre 14,53 kN/m³ et 15,73 kN/m³. Le mélange IV a une valeur de densité de poids inférieure à celle d'autres mélanges. Les valeurs de densité sont réduites avec l'augmentation de la teneur en cendres du bassin (Pond Ash). Le poids propre de la brique a été réduit avec l'augmentation de la teneur en cendres du bassin. Le test d'absorption d'eau est effectué en immergeant la brique pendant environ 24 heures dans l'eau, puis essuyée avec un chiffon propre pour éviter les gouttes d'eau, puis elle est pesée pour déterminer le changement du poids sec de la brique. L'absorption d'eau moyenne de la brique s'est avérée inférieure à 10%. La valeur d'absorption d'eau pour le mélange IV était 10% inférieure à celle du mélange I. Cela indique que la valeur d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres du bassin. Les sels solubles, s'ils sont présents dans les briques, provoqueront une efflorescence à la surface des briques. Pour découvrir la présence de sels solubles (Test d'efflorescence) dans une brique, il est immergé dans l'eau pendant 16 heures. Il est ensuite sorti et séché à l'ombre. L'absence de dépôts gris ou blancs à sa surface indique l'absence de sels solubles pour tous les mélanges. [106].

Tableau II.4 Résultat du test pour les propriétés de divers mélanges [106].

Mélange Matériaux	I	II	III	IV
Chaux	20	18	16	14
Sable	20	20	20	20
Cendre volante	35	35	35	35
Cendre de bassin (Pond Ash)	20	22	24	26
Gypse	5	5	5	5

Mixes Propriétés	I	II	III	IV
Compressive strength in N/mm ²	9.2	8.7	7.9	7.6
Weight density in kN/m ³	15.72	15.52	15.14	14.53
Water absorption in %	9.16	8.85	8.56	8.34

Discussion :

Sur la base de l'enquête expérimentale, les conclusions suivantes sont tirées.

1. À l'avenir, les besoins de cette brique seront plus importants parce que la quantité de cendres d'étang est disponible énormément dans les centrales thermiques gratuitement.
2. La résistance à la compression de la brique a augmenté avec l'augmentation de la teneur en chaux.
3. Densité de poids de la brique réduite avec l'augmentation du pourcentage de cendres de l'étang.
4. La valeur d'absorption d'eau de tous les mélanges est inférieure à 10%. La valeur d'absorption d'eau de la brique diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres du bassin.
5. Il n'y a pas d'observation de taches blanches dans toutes les briques.
6. Le coût est réduit jusqu'à 20% par rapport à la fabrication conventionnelle de briques d'argile.
7. L'utilisation de cendres d'étang et de cendres volantes dans la fabrication de briques peut réduire considérablement le besoin d'amortir les décharges.

II.12.4 Propriétés des briques fabriquées à partir de cendres volantes, de poussières de carrière et de billettes

L'utilisation de tartre à billettes, sous-produit de l'industrie sidérurgique, un oxyde de fer formé à la surface de l'acier lors de la coulée continue est éliminé par pulvérisation d'eau, a été proposée par **Shakir et al.** (2013), dans la production de briques avec cendres volantes, poussières de carrière et OPC comme liant. Ils ont proposé une méthode non conventionnelle de production de briques utilisant une nouvelle méthode fluide sans pressage ni cuisson. Ils ont étudié deux séries A et B.

II.12.4.1 Définitions

Cendres volantes : Les cendres volantes ou cendres de fumée, également connues sous le nom de cendres de combustible pulvérisées au Royaume-Uni, sont un produit de combustion du charbon composé de particules (fines particules de combustible brûlé) qui sont chassées des chaudières au charbon avec les gaz de combustion.

La poussière de carrière : La poussière de carrière est le sous-produit produit lors de la production d'agrégats grossiers. ... La poussière de carrière peut être définie comme un résidu, des résidus ou d'autres déchets non volubles après l'extraction et le traitement des roches pour former des particules fines de moins de 4,75 mm.

Tarte a billettes : La tartre de billette est un oxyde de fer formé sur la surface de l'acier pendant la coulée continue, le réchauffage et à chaud opérations de laminage de traitement de l'acier. L'échelle est supprimée par de l'eau pulvérisée puis éliminée par décharge. Il a été récemment utilisé comme remplacement des granulats fins dans le béton.

II.12.4.2 Résultats et discussions

Le rôle de la billette était plutôt un agrégat bon. La résistance à la compression maximale rapportée se situait entre 6.2 à 26.3 MPa pour une teneur en ciment de 15% à 10%. La résistance plus élevée a été attribuée au fait que les cendres volantes et la poussière de carrière agissaient comme un matériau pouzzolanique avec SiO_2 et Al_2O_3 réagissant avec $\text{Ca}(\text{OH})_2$ provenant de l'hydratation du ciment pour former CSH et CASH, ce qui les rend chimiquement stables et structurellement denses. Les cendres volantes réduisent également le nombre de micropores. Les résultats pour l'UPV, l'absorption d'eau, le module de rupture, l'attaque saline et l'attaque chlorure étaient prometteurs [107].

Discussion :

Les remarques suivantes sont tirées sur la base de l'enquête :

- (1) La densité fraîche a été fortement influencée par l'augmentation de la poussière de carrière et la teneur en échelle des billettes.
- (2) La résistance à la compression variait de (7,7 à 26,3) MPa pour les séries A et (6,2–16) MPa pour la série B. La résistance à la compression et le module de rupture ont augmenté avec FA + BS et QD + BS.

(3) L'absorption d'eau diminue avec l'augmentation de FA + BS et augmente avec l'augmentation de $W / (BS + QD)$.

(4) UPV augmenté avec une augmentation des cendres volantes, du ciment et de la poussière de carrière. D'autre part, l'ajout de FA + BS s'est avéré diminuer UPV.

(5) Le rapport optimal de la cendre volante et de l'échelle de billette, de la poussière de carrière et L'échelle de billette est 1 : 1 car elle a montré les meilleures performances en ce qui concerne les propriétés mécaniques.

(6) Fabrication de briques utilisant une combinaison de balance à billettes, la poussière de carrière et les cendres volantes sont possibles. La méthode de fabrication suggérée dans cette étude contribuera à la durabilité et la gestion des déchets. Les briques développées dans cette étude répondait aux exigences des seuils pertinents. Par conséquent, ils peuvent être utilisés comme alternative aux briques dans le secteur du bâtiment.

FA : cendres volantes

QD : poussière de carrière

BS : Billettes

II.12.5 Études expérimentales sur les briques cendres volantes-sable-chaux avec ajout de gypse

En 2013, **Banu et al.** A expérimenté le système de cendres volantes-sable-chaux avec l'ajout de gypse pour produire des briques structurelles légères non cuites, les résultats de cette étude sont les suivantes :

II.12.5.1 Définitions

Gypse : Roche sédimentaire, sulfate de calcium hydraté (appelé aussi pierre à plâtre).

II.12.5.2 L'effet du sable sur la force de compression

Les échantillons T1 - T4 (tableau II.5) ont été préparés pour déterminer l'effet de la quantité de sable sur la compression. La résistance à la compression pourrait être augmentée de 113,46 kg/cm² à 165,57 kg/cm² en augmentant la quantité de sable de 10 à 40% (figure II.15). La résistance maximale a été trouvée pour 40% de sable - 50% de cendres volantes - 10% de chaux avec 2% de gypse. L'optimum la quantité de sable a été prise à 30% qui a donné une résistance à la compression de 155,20 kg/cm². L'amélioration en résistance mécanique avec l'augmentation de la teneur en sable a été attribué dans une plus grande mesure par l'augmentation du montant de SiO₂ libre qui réagit plus facilement avec la chaux qu'avec les cendres volantes. [108].

Tableau II.5 teste de paramètres [108]

Bricks code	Sand wt %	Fly ash wt %	Lime wt %	Gypsum wt %	Forming Pressure (psi)	Curing process	Other parameters
T1	10	80	10	2	1000	In air*	14% moisture added Pressure applied for 15 sec Number of bricks for each type is at least 5
T2	20	70	10	2	1000	In air*	
T3	30	60	10	2	1000	In air*	
T4	40	50	10	2	1000	In air*	
T5	30	65	5	2	1000	In air*	
T6	30	62.5	7.5	2	1000	In air*	
T7	30	60	10	2	1000	In air*	
T8	30	57.5	12.5	2	1000	In air*	
T9	30	55	15	2	1000	In air*	
T10	30	55	15	2	1000	In air*	
T11	30	55	15	6	1000	In air*	
T12	30	55	15	10	1000	In air*	
T13	30	55	15	14	1000	In air*	
T14	30	55	15	14	1000	In air*	
T15	30	55	15	14	2000	In air*	
T16	30	55	15	14	3000	In air*	
T17	30	55	15	14	3000	In air*	
T18	30	55	15	14	3000	Under water spray*	
T19	30	55	15	14	3000	Under wet cloth*	
T20	30	55	15	14	3000	Under water*	
T21	30	55	15	14	1000	In air**	
T22	30	55	15	14	1000	In air and then water***	
T23	30	55	15	14	2000	In air**	
T24	30	55	15	14	2000	In air and then water***	
T25	30	55	15	14	3000	In air**	
T26	30	55	15	14	3000	In air and then water***	

*Curing period 7 days, **Curing period 5 weeks
 ***Cured 7 days in air and then 4 weeks in water

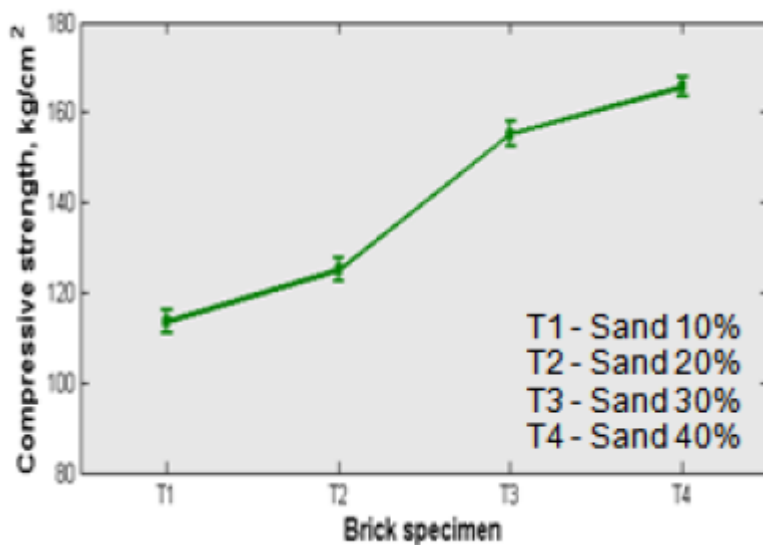


Figure II.15 Effet de l'ajout de sable sur la résistance à la compression [108]

II.12.5.3 La détermination de la chaux optimale et contenu de cendres volantes

Résultats des tests de résistance à la compression effectués sur les échantillons T5 - T9 ont montré qu'une résistance maximale pouvait être obtenu avec 15% de chaux et 55% de cendres volantes (Figure II.16). La résistance à la compression trouvée pour cette composition était 181,75 kg/cm². [108].

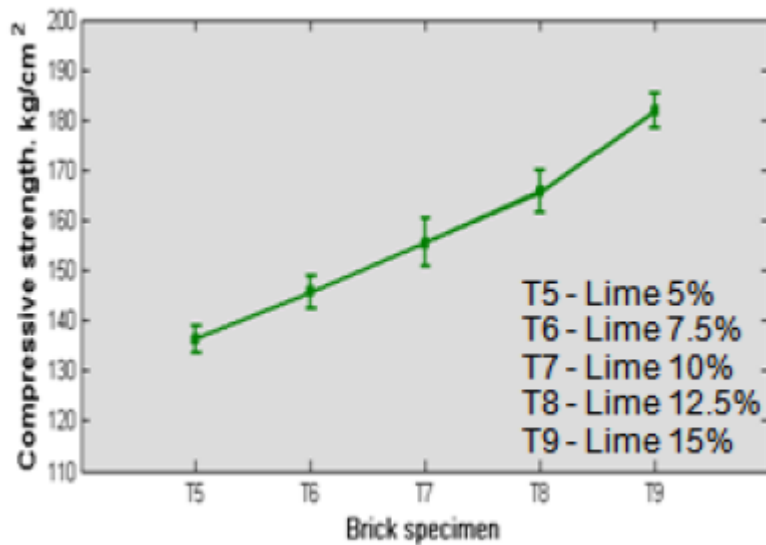


Figure II.16 Effet de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression [108]

II.12.5.4 Quantité optimale d'ajout de gypse

La variation des résistances à la compression des éprouvettes T10 - T13 contenant des quantités variables de gypse est illustré à la figure II.17. On peut voir que la résistance à la compression augmentée de 181,75 kg/cm² pour 2% de gypse à 287,78 kg/cm² pour une teneur en gypse optimale de 14%. [108].

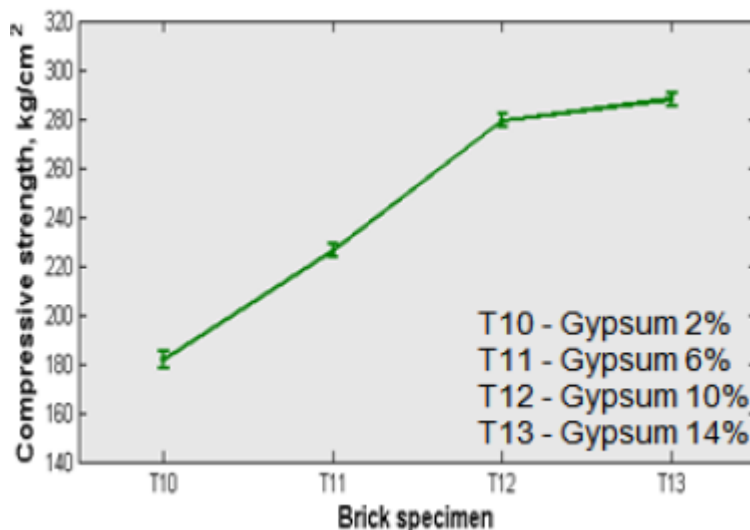


Figure II.17 Effet de l'ajout de gypse sur la résistance à la compression [108]

II.12.5.5 Effet du processus de durcissement

L'échantillon T17 a été durci à l'air calme. Les échantillons T18, T19 et T20 ont été durcis avec de l'eau pulvérisée deux fois par jour, en maintenant l'échantillon sous un chiffon humide et en maintenant l'échantillon immergé sous l'eau respectivement. Une résistance à la compression maximale de 442,96 kg/cm² a été trouvée pour l'échantillon T18 (figure II.18). [108].

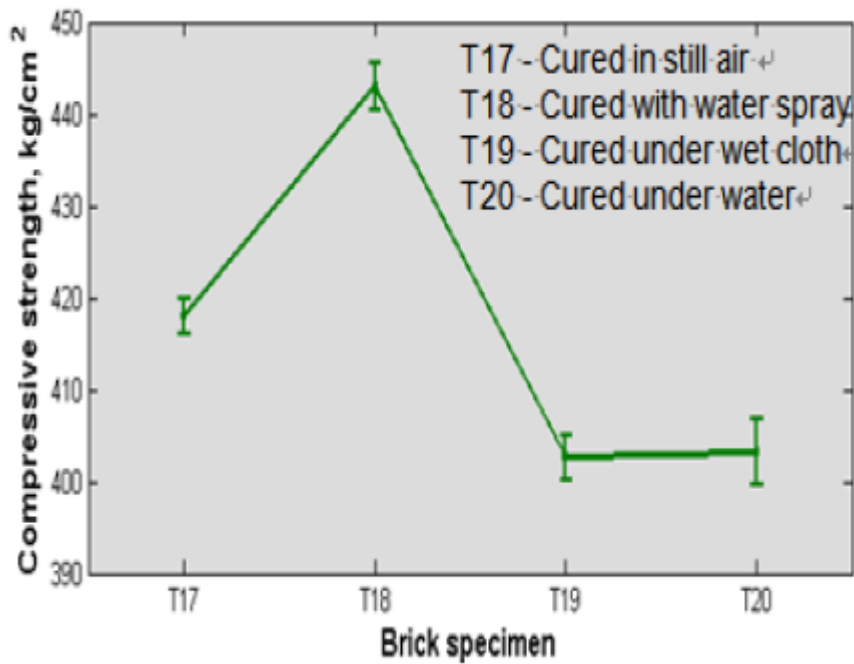


Figure II.18 Effet du processus de durcissement sur la résistance à la compression [108]

II.12.5.6 Effet de la période de durcissement

Un ensemble de briques a durci pendant sept jours à l'air ; un ensemble pour cinq semaines dans l'air et un autre ensemble pour les quatre premières semaines dans l'eau suivies d'une semaine dans l'air. Une résistance maximale de 877,36 kg/cm² a été trouvée pour les briques formées sous une pression de 3000 psi et durcies dans l'eau pendant quatre semaines suivies d'une semaine dans l'air. (Figure II.19) [108].

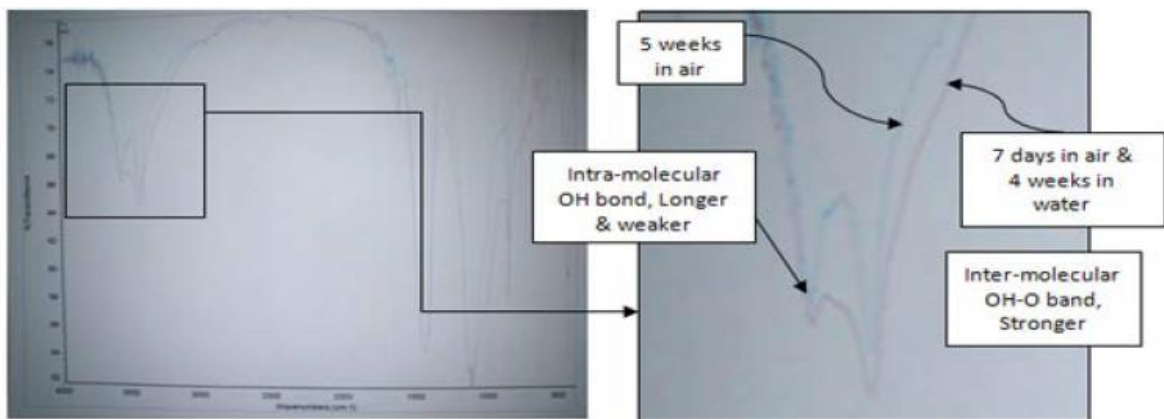


Figure II.19 Analyse FTIR des briques durcies sous différentes conditions de durcissement [108]

Discussion :

Le mélange optimal est de 55% de cendres volantes, 30% de sable et 15% de chaux hydratée avec 14% de gypse. Des efforts ont également été faits pour optimiser d'autres variables de processus comme la pression de formage et les conditions de durcissement. La pression de formage optimale devait être de 3000 psi. L'importance de la condition de durcissement a également été démontrée, car pour une composition optimale et la pression des briques durcies pendant quatre semaines sous l'eau suivies d'une semaine dans l'air ont abouti à une résistance maximale de 877,36 kg/cm² par rapport à la résistance à la compression maximale de 442,96 kg/cm² lorsque guéri sous pulvérisation d'eau deux fois par jour pendant 5 semaines

II.12.6 Résistance à la compression de la brique de cendres volantes avec ajout de chaux, de gypse et de poussière de carrière

En 2014, **Sumathi et Mohan** ont mené une enquête expérimentale pour obtenir le pourcentage de mélange optimal de briques liantes utilisant des cendres volantes avec l'ajout de chaux, de gypse et de poussière de carrière en utilisant la moindre quantité de liant pour obtenir une résistance à la compression maximale. Les résultats de cette étude sont les suivants :

II.12.6.1 Test de résistance à la compression

La résistance à la compression de la brique de cendre volante est trois fois supérieure à celle de la brique d'argile normale. La résistance à la compression minimale de la brique d'argile est de 3,5 N/mm², de sorte que la brique de cendre volante a une résistance à la compression de 10-12 N/mm². Les briques à utiliser pour différents travaux ne doivent pas avoir une résistance à la compression inférieure à celle mentionnée ci-dessus. La machine d'essai universelle est utilisée pour tester la résistance à la compression des briques. [109].

Une fois la période de séchage terminée, les briques sont conservées pour les tests. Pour tester les éprouvettes, les briques sont placées dans la machine d'essai de compression calibrée d'une capacité de 3000 kN appliquée à une charge uniforme au taux de 2,9 kN/min. [109].

II.12.6.2 Absorption de l'eau

Les briques de cendres volantes ne doivent pas absorber plus de 12% d'eau. Les briques à tester doivent être séchées dans un four à une température de 105 à 115 ° C jusqu'à ce qu'elles atteignent un poids constant et refroidissent les briques à température et poids ambiants (W1). Immerger la brique W1 complètement séchée et pesée dans de l'eau propre pendant 24 heures à une température de 27 ± 20 degrés Celsius. Retirez les briques et essuyez toute trace d'eau et pesez immédiatement (W2). [109].

Absorption d'eau en% en poids = $(W2 - W1 / W1) \times 100$

Les briques tester par sumathi et mohan n'absorbent que 9.114% d'eau.

II.12.6.3 Efflorescence

Pour ce test, la brique a été placée verticalement dans l'eau avec une extrémité immergée. La profondeur d'immersion dans l'eau étant de 2,5 cm, tout cet arrangement doit être conservé à une température ambiante chaude et bien ventilée de 20 à 30 °C jusqu'à ce que tout s'évapore. Lorsque l'eau du plat est absorbée par la brique et que le surplus d'eau s'évapore. Lorsque l'eau

est complètement absorbée et évaporée, placez une quantité similaire d'eau dans le plat et lui permet d'absorber et de s'évaporer comme auparavant. Examinez la brique après cela et découvrez le pourcentage de taches blanches sur la surface de la brique. Si une différence est observée en raison de la présence d'un gisement de sel, la note est signalée comme « efflorescent ». Si aucune différence n'est notée, la note est signalée comme « non efflorescent ». Pourcentage de tache blanche dans la brique = néant [109].

II.12.6.4 Pourcentage de mélange optimal

Tableau II.6 Valeurs moyennes de la résistance à la compression (N/mm²) [109]

Proportions	Cendres volantes (Kg)	Chaux (Kg)	Gypse (Kg)	Poussier de carrière (Kg)
I	0.525	1.050	0.2	1.855
II	0.700	0.875	0.2	1.855
III	0.700	1.050	0.2	1.855
IV	0.875	0.700	0.2	1.855
V	1.050	0.525	0.2	1.855
VI	1.225	0.325	0.2	1.855
VII	1.400	0.175	0.2	1.855
VIII	1.400	0.350	0.2	1.680
IX	1.750	0.875	0.2	0.805

Proportions	Cendres volantes (%)	Chaux (%)	Gypse (%)	Poussière de carrière (%)
I	15	30	2	53
II	20	25	2	53
III	20	30	2	48
IV	25	20	2	53
V	30	15	2	53
VI	35	10	2	53
VII	40	5	2	53

VIII	40	10	2	48
IX	50	25	2	23

Proportions	7 days (N/mm ²)	14days (N/mm ²)	21days (N/mm ²)
I	1.98	3.95	7.91
II	1.68	3.36	6.78
III	1.81	3.43	6.97
IV	1.44	3.08	5.98
V	1.22	2.43	5.34
VI	1.03	1.97	5.04
VII	1.12	2.23	5.14
VIII	1.21	2.67	5.28
IX	1.34	2.62	5.45

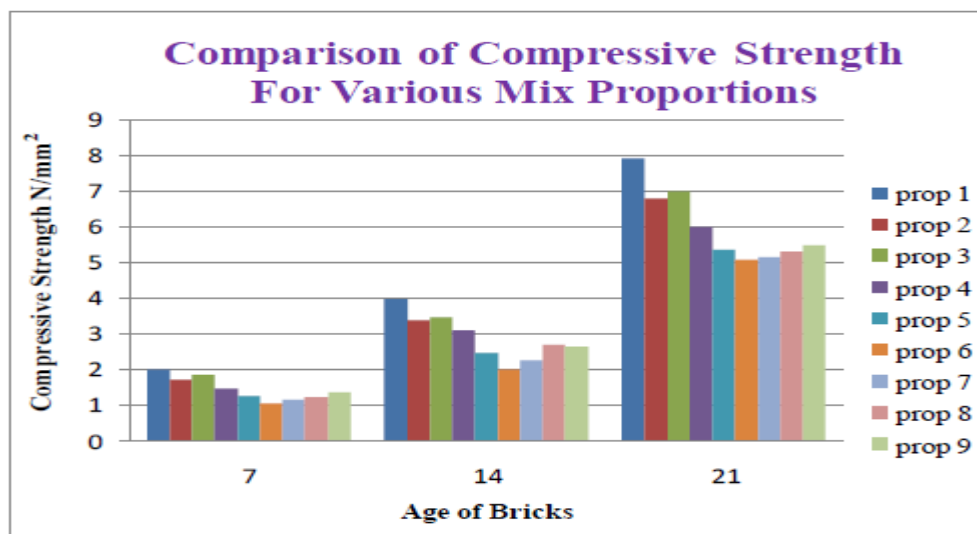


Figure II.20 Résistance à la compression pour différentes proportions à 7, 14, 21 jours de séchage [109]

D'après les résultats obtenus par Sumathi et Mohan, la proportion-1 montre la valeur maximale de la résistance à la compression. Ainsi, la proportion-1 a été prise comme un pourcentage optimal de mélange de briques de cendres volantes (Cendres volantes-15% Chaux-30% Gypse-2% Poussières de carrière-53%). [109].

Remarque :

La figure suivante montre que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes.

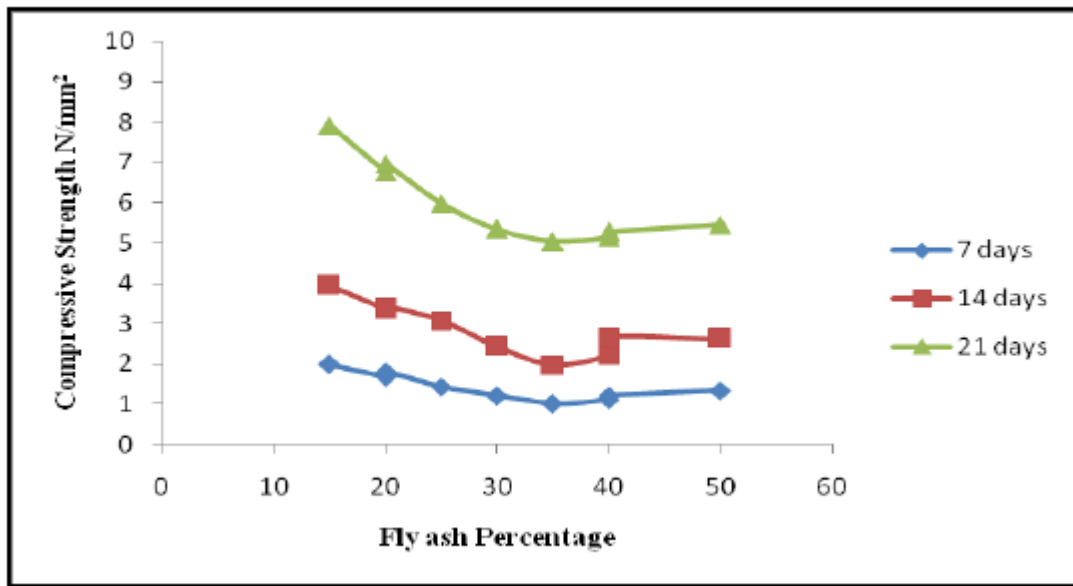


Figure II.21 Variation de la résistance à la compression avec augmentation des cendres volantes [109]

Tableau II.7 Calcul de la valeur d'absorption d'eau (%) [109]

Proportions	W1 (kg)	W2 (kg)	(W2-W1)	$\frac{(W2-W1)}{W1}$	$\frac{(W2-W1)}{W1} \times 100$ %
I	3.75	4.16	0.41	0.109	10.9
II	3.69	4.15	0.46	0.124	12.4
III	3.71	4.18	0.47	0.126	12.6
IV	3.75	4.25	0.50	0.133	13.3
V	3.69	4.25	0.56	0.151	15.1
VI	3.71	4.29	0.58	0.156	15.6
VII	3.75	4.34	0.59	0.157	15.7
VIII	3.69	4.29	0.60	0.162	16.2
IX	3.73	4.36	0.63	0.168	16.8

Discussion :

Cette étude a été menée pour trouver le pourcentage optimal de mélange des cendres volantes dans les briques. Cependant, le spécimen de brique de taille (230*110*90) mm a été coulé pour différents pourcentages de mélange de cendres volante (15 à 50%), de gypse (2%), de chaux (5 à 30%) et de poussière de carrière (45 à 55%). Cependant, les échantillons ont été testés pour sept proportions de mélange. Les propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression ont été étudiées pour différentes proportions de mélange, à différents âges de durcissement. D'après les résultats, il a été déduit que, parmi les sept proportions, la résistance

à la compression optimisée maximale est obtenue pour un pourcentage de mélange optimal de cendres volantes-15% Chaux-30% Gypse-2% Poussière de carrière-53% à 7,91 N/mm².

II.12.7 Utilisation des déchets de papeterie pour la fabrication de briques

En 2017, **Raju Sarkar et all.** ont étudié la possibilité de remplacer dans une certaine mesure le sol naturel utilisé dans la fabrication de briques par des déchets industriels, c'est-à-dire de la boue de chaux, obtenue à partir de déchets de papeterie. Ils ont étudié deux types de briques les briques brûler et les briques non brûler Les résultats obtenus dans cette étude sont les suivants :

II.12.7.1 Définitions

Déchets de papeterie : Les boues de papeterie (désencrage et épuration) ne sont ainsi pas des déchets dangereux. Elles ont une siccité comprise entre 20 et 50 % de matière sèche et peuvent présenter un intérêt agronomique en raison de la teneur en matière organique et ou minérale.

II.12.7.2 Brique brûlées

La figure II.22 et la figure II.23 montre les résultats de cette enquête. La figure II.22 montre la variation de la résistance à la compression avec le pourcentage de boue de chaux. On a constaté qu'avec l'augmentation du pourcentage de boue de chaux dans le mélange de boue de sol-chaux pour la fabrication de briques, la résistance à la compression des briques augmente également. La résistance à la compression est de 1.18, 1.22, 1.30, 1.38, 1.41, 1.53 et 1.61 N/mm² lorsque le pourcentage de boue de chaux dans le mélange est de 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40%, respectivement [119].

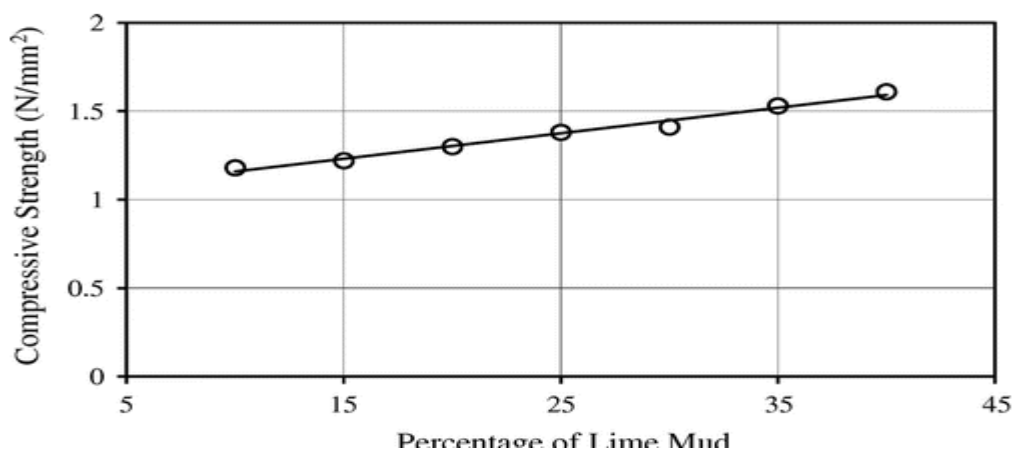


Figure II.22 Variation de la résistance à la compression avec le pourcentage de boue de chaux [119].

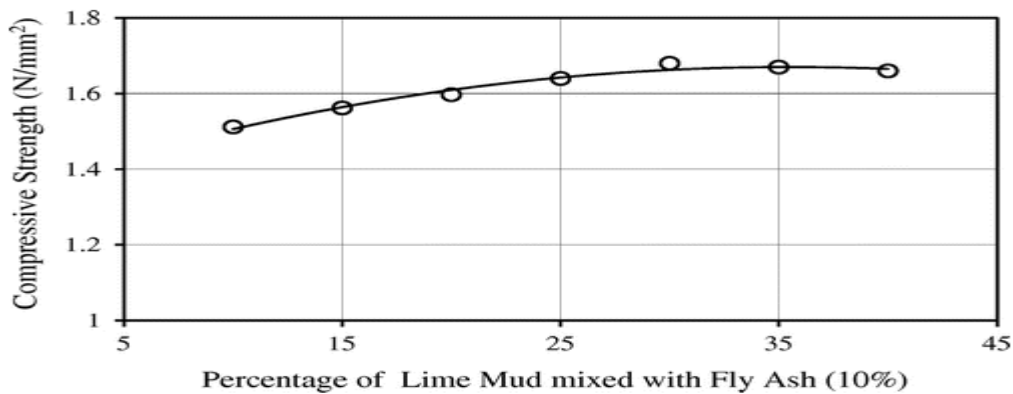


Figure II.23 Variation de la résistance à la compression avec le pourcentage de boue de chaux mélangée à des cendres volantes (10%) [119].

De même, la figure II.23 montre la variation de la résistance à la compression avec le pourcentage de boue de chaux mélangée à des cendres volantes (10%). On a également observé qu'avec l'augmentation du pourcentage de boue de chaux dans le mélange sol-boue de chaux-cendres volantes (10%), la résistance à la compression des briques augmente jusqu'à 30% et diminue par la suite. La résistance à la compression est de 1.51, 1.56, 1.60, 1.64, 1.68, 1.67 et 1.66 N/mm² lorsque le pourcentage de la boue de chaux dans le mélange est de 10, 15, 20, 25, 30, 35 et 40 %, respectivement [119].

II.12.7.3 Briques brûlées

II.12.7.3.1 Résistance à la compression

La résistance à la compression est de 3.61, 3.57, 3.54, 3.52, 3.46 et 3.33 N/mm² lorsque le pourcentage de la boue de chaux dans le mélange est de 0, 5, 10, 15, 20 et 25%, respectivement. La résistance à la compression des briques coulées avec 30% de boue de chaux n'a pas pu être déterminée, car diverses fissures ont été observées à la surface des briques. Comme illustré dans la figure II.24 [119]

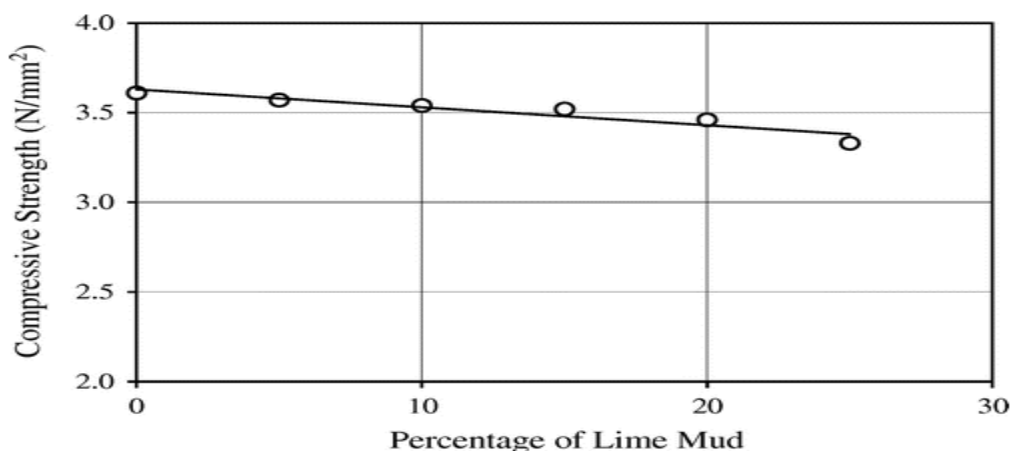


Figure II.24 Variation de la résistance à la compression de la brique brûlée avec le pourcentage de boue de chaux [119]

D'après la figure II.24 il est noté qu'avec l'augmentation du pourcentage de boue de chaux dans le mélange de boue de sol-chaux pour la fabrication de briques, la résistance à la compression des briques brûlées diminue. Il est établi que lors de la cuisson, les briques reçoivent leur force. En présence de chaleur élevée, les alcalis de l'argile ainsi que de petites quantités d'oxydes de fer et d'autres métaux sont réunis en union chimique avec l'alumine et la silice de l'argile pour former une masse dense et durable. Comme mentionné ci-dessus, lorsque la chaux est utilisée pour la stabilisation du sol, la chaux réagit avec les minéraux argileux, créant un gel de silicate de calcium qui est insoluble dans l'eau et liant les particules du sol ensemble. Mais pendant le processus de chauffage des briques, le gel perd peut-être sa résistance et diminue ainsi la résistance à la compression des briques.

II.12.7.3.2 Absorption de l'eau

Dans cette étude, la plage d'absorption d'eau des briques se situe entre 22 et 27% dans toute la composition des briques de terre-chaux en terre crue [119].

Discussion :

- La boue de chaux est un matériau riche en carbonate de calcium à faible coût qui peut être utilisé comme liant et comme matériau de remplissage inerte pour améliorer le tassement et la densification des briques à base de sol.
- Étant donné que la boue de chaux est un déchet et peut être utilisée gratuitement pour la fabrication de briques, la fabrication de briques en l'utilisant est économique, bénéfique pour la société et respectueuse de l'environnement.
- La résistance à la compression des briques non brûlées augmente avec la proportion de boue de chaux.
- La résistance à la compression des briques augmente jusqu'à une certaine limite (= 30%) avec l'ajout de boue de chaux dans les cendres volantes (10%) - mélange de sol.

II.12.8 Autres études

- En 2015, **Hwang et Huynh** ont démontré avec succès la production de briques de construction non cuites (UBB) en utilisant des cendres de balle de riz non moulues (URHA) comme remplacement partiel des agrégats (10-20%) ainsi que des cendres volantes et du ciment (10-15%) comme liant avec application de mélange densifié algorithmique de conception (DMDA). La pression de formage appliquée était de 35 MPa. Ils ont réussi à atteindre une résistance à la compression passable de 16,0 à 22,1 MPa, une résistance à la flexion de 2,8 à 3,5 MPa et une absorption d'eau de 9,5 à 14,8% correspondant de 10 à 20% d'URHA [110].

- **Naganathan et all.** (2015) ont étudié la performance des briques fabriquées en utilisant des cendres volantes et des mâchefers. Les briques ont été coulées en utilisant un mélange autocompactant de cendres volantes, de cendres résiduelles et de ciment, éliminant à la fois la

cuisson et le pressage. La résistance à la compression variait de 7 à 17 MPa et la résistance augmentait avec l'augmentation des cendres volantes. La valeur maximale de la résistance a été atteinte pour le mélange avec un rapport des cendres résiduelles aux cendres volantes de 1 : 1,25 et avec un rapport des cendres résiduelles au ciment de 0,45. Le mélange optimal pour BA : FA : C s'est avéré être 1 : 1,25 : 0,45. Les valeurs UPV allaient de 2,20 à 2,96 km/s, l'absorption d'eau variait de 12,6% à 29,2%, le taux d'aspiration initial (IRS) variait de 0,83 à 1,82 kg / mm². Toutes les briques développées dans cette enquête ont montré une résistance au feu accrue de l'ordre de 30% et la durabilité en termes de résistance à la corrosion et d'augmentation de poids était meilleure par rapport aux briques d'argile conventionnelles [111].

- En 2012, **Rajput et al.** ont produit les briques à base des déchets en réutilisant du coton (1-5%) et des déchets de papeterie recyclée (89-85%) avec du ciment (10%). Les briques fabriquées étaient un peu légères (la moitié de celles de la brique d'argile conventionnelle) en raison de la présence de minuscules poches d'air à l'intérieur attribuées aux déchets de papier. Ils ont également conçu et fabriqué un homogénéisateur et une presse hydraulique manuelle. Ils ont proposé l'opération de presse à double étage pour préserver la douceur de la surface au séchage. Le mécanisme de développement de la force était une réaction pouzzolanique habituelle. Bien qu'une forte absorption d'eau ait également été signalée en raison de la nature cellulosique des déchets de coton [104].

- (**Chee Ming**, 2011) ont examiné les propriétés mécaniques de la brique d'argile fabriquée en ajoutant deux fibres naturelles comme le fruit de palmier à huile (OF) et les avant-toits d'ananas (PF) à un mélange d'argile-eau dans des conditions cuites et non cuites. La résistance à la compression, l'absorption d'eau et l'efflorescence ont été effectuées conformément à la norme britannique BS3921 : 1985 et aux normes malaisiennes MS 76: 1972. Les résultats ont indiqué que la résistance à la compression des briques répondait à l'exigence minimale de BS3921 : 1985 pour la résistance à la compression qui est de 5,2 MPa pour les briques conventionnelles. L'efflorescence n'était possible que pour les échantillons cuits au four car les échantillons non cuits se détérioraient gravement pendant les tests. L'avantage prédominant de l'inclusion de fibres était plus avantageux pour les échantillons cuits au four où la résistance dépassait celle des échantillons non cuits ajoutés uniquement [112].

- (**Paki et al.** 2012) ont étudié l'utilisation potentielle de la combinaison caoutchouc-béton en miettes pour produire une brique composite à faible coût et légère avec une résistance thermique améliorée. La résistance à la compression, la résistance à la flexion, la résistance à la fissuration, la résistance au gel – dégel, le poids unitaire et les valeurs d'absorption d'eau sont conformes aux normes internationales pertinentes. Les observations expérimentales révèlent que le remplacement de haut niveau du caoutchouc granulé par un agrégat de sable conventionnel ne présente pas de fracture cassante soudaine même au-delà des charges de rupture, indique une capacité d'absorption d'énergie élevée, réduit considérablement le poids unitaire et introduit une surface plus lisse par rapport aux briques de béton actuelles dans le marché. Les performances d'isolation thermique sont améliorées en introduisant diverses quantités de caoutchouc granulé dans les mélanges de ciment ordinaires [112].

- (**Luciana C.S et al.**, 2012), a proposé de mélanger des boues d'eaux usées de lessive textile avec de l'argile pour produire des briques pour la construction civile. Toutes les briques ont été fabriquées par un procédé d'extrusion, séchées à 100 ° C puis cuites à 900 ° C. Les propriétés mécaniques des céramiques telles que la résistance à la flexion et l'absorption d'eau étaient satisfaisantes dans la législation brésilienne. Les résultats obtenus ont montré que les boues peuvent être incorporées des briques jusqu'à une concentration de 20% (en masse) produisant des briques appropriées en termes de propriétés mécaniques. En outre, les briques produites sont sûres et inertes selon les tests de lixiviation et de solubilisation appliqués [112].
- (**Hanifi et al.** 2005) ont présenté un matériau antisismique à haute résistance à la compression. Il a élaboré la résistance à la compression des briques de boue renforcées de fibres faites d'argile, de ciment, de pierre ponce basaltique, de chaux et de gypse en utilisant de la fibre plastique, de la paille et du polystyrène comme ingrédients fibreux, chacun à la fois. Il a été démontré que la brique de boue renforcée de fibres répond aux exigences de résistance à la compression des codes turcs, ce qui réduit le poids et les coûts de manutention des matériaux pour le logement. De plus, il peut stocker plus d'énergie élastique que l'autre type de brique de boue, ce qui le rend plus résistant aux tremblements de terre [112].
- (**Alonso et al.** 2012) ont développé une étude comparative pour produire des briques en céramique à partir d'argile avec deux types de sable de fonderie (sable vert et sable de noyau). Les briques d'argile / sable vert avec 35% de noyau vert et 25% de sable vert cuits à 1050 ° C ont les meilleures valeurs de propriétés physiques, tandis que la minéralogie n'est pas significativement affectée. Il a été démontré que le sable de fonderie est recommandé comme matière première dans la fabrication de produits céramiques, ce qui permet de réduire les coûts de production de briques [112].
- (**Romualdo et al.** 2005) ont étudié les possibilités d'utiliser les déchets de sciage de granit comme matières premières céramiques alternatives dans la production de briques et de carreaux en céramique. Les échantillons ont été pressés de manière unie axialement puis cuits à 850 ° C. Les résultats des essais sur les compositions céramiques ont montré que les échantillons contenant (10-30) % de déchets de granit ont des caractéristiques physiques et minéralogiques similaires à celles des matières premières céramiques conventionnelles. Les compositions céramiques avec l'ajout de ces déchets ont produit une absorption d'eau inférieure à 3%, il a été prouvé que le recyclage des boues dans la production de briques et de carreaux céramiques était faisable [112].
- (**Kay et Volker**, 2002) ont mené une expérience pilote à grande échelle dans le recyclage des sédiments du port mélangés à des déchets de brique et d'argile. Les briques ont été produites selon les normes industrielles allemandes. Le lessivage des briques n'était pas dangereux pour le sol ou les eaux souterraines ni par leur utilisation par exemple, dans la maçonnerie, ni par la suite, lorsqu'elles seront déposées sous forme de masse de démolition minérale [112].
- (**Lker et al.** 2007) avaient étudié la production de briques à haute résistance à la conductivité thermique à partir de perlite et d'argile, certains liants tels que le ciment, le gypse, la chaux, le bitume et l'argile étant utilisés pour la fabrication de briques de perlite. Les échantillons ont été

séchés à 200 ° C puis cuits à 950 ° C. Il a été démontré que la résistance à la compression des briques était diminuée, le retrait et la résistance à la conductivité thermique augmentaient avec l'augmentation de la dose de perlite. Il a été prouvé que la brique de perlite est un bon isolant selon les normes des briques et la meilleure teneur en mélange a été déterminée comme contenant 30% de perlite [112].

- **Faria et al.** (2014) ont recyclé les déchets de cendres de bagasse de canne à sucre en remplaçant l'argile naturelle, des échantillons ont été préparés par pressage uni axial à 21 MPa, séchés à 110 ° C puis cuits à 1000 ° C. Les résultats du microscope électronique à balayage (SEM) ont montré que les déchets de cendres de bagasse de canne à sucre sont principalement composés de particules de silice cristalline et qu'ils pourraient être utilisés comme charge dans les briques d'argile, augmentant ainsi la possibilité de les recycler de manière sûre et durable. Le recyclage des cendres de bagasse de canne à sucre dans la brique d'argile a montré des résultats très positifs en termes de protection de l'environnement, de gestion des déchets et d'économie de matière première [112].

- (**Taner, 2006**) ont étudié la faisabilité de l'utilisation des déchets d'argile (CW) et des déchets fins de bore (FW) comme fondant dans la production de briques de boue rouge (RM). Les briques ont été séchées à température ambiante puis cuites à 1000 ° C. Les tests minéralogiques et mécaniques ont confirmé la possibilité de recycler les déchets de bore comme fondant dans la production de briques RM [112].

- (**J.A. Cusido et al.** 2003) ont développé des briques d'argile plus légères, plus isolantes thermiques et acoustiques, comparées aux briques d'argile conventionnelles en mélangeant de l'argile avec des boues d'épuration et des débris forestiers. Les briques ont été séchées à 100 ° C puis cuites à 1000 ° C. Il a été démontré que le niveau des émissions de gaz à effet de serre était 20 fois plus élevé que la cuisson céramique conventionnelle, même si elles sont encore légalement autorisées dans la limite des recommandations Environmental Protection Agency [112].

- (**Carretero, 2003**) ont produit des briques d'argile à partir d'argile très différente, calcaire et non calcaire. Des échantillons ont été obtenus par trois procédés de pressage, d'extrusion et de cuisson à 110 ° C. La résistance mécanique, la distribution de la taille des pores et le diamètre critique des pores ne reflétaient pas clairement l'influence des techniques de mise en forme [112].

- (**Vorrada et al.**, 2009) ont recyclé les verres gaspillés des parois en verre structural en mélanges d'argile. La compression des briques était aussi élevée que (26–41) MPa et l'absorption d'eau aussi faible que (2–3) % a été obtenue pour les briques contenant (15–30) % en poids de verre et cuites à 1100 ° C. Lorsque la teneur en déchets de verre était de 45% en poids, la porosité apparente et l'absorption d'eau étaient rapidement augmentées [112].

- (**Martínez et al.**, 2012) ont remplacé l'argile dans un corps en céramique avec différentes proportions de boues. Les résultats pour les propriétés mécaniques comme l'absorption d'eau,

la résistance à la compression et l'aspiration d'eau ont montré que les briques incorporant 5% de boues présentaient de bonnes propriétés mécaniques [112].

- (**Michele et al., 2010**) ont étudié l'utilisation potentielle du tionite comme colorant dans les briques d'argile. Les échantillons ont été séchés à 100 ° C puis cuits à 1000 ° C. Des ajouts de plus de 5% de tionite ont induit des variations importantes, telles qu'une augmentation de l'humidité de travail et de l'absorption d'eau, une diminution de la densité apparente et de la résistance à la flexion. Par conséquent, la proportion optimale de tionite s'est avérée être de 3% [112].

- (**Dondi et al. 2009**) ont étudié l'utilisation d'entonnoir et de verre à panneaux de déchets de verre TV et PC mélangés à de l'argile, l'échantillon a été séché à 100 ° C puis cuit à 900 ° C. Il a été démontré que l'ajout de 2% de déchets de verre au corps en argile n'entraîne pas de changements significatifs dans les performances technologiques des briques cuites. Cependant, l'ajout de plus de 5% des déchets peut avoir des effets néfastes sur les propriétés mécaniques et l'efflorescence. Résultats du test de lixiviation démontrés aucune émission significative de polluants environnementaux [112].

- (**Kae Long, 2006**) ont étudié l'ajout de scories de cendres volantes d'incinération de déchets solides municipaux (MSWI) sur des briques en terre cuite, les briques ont été cuites à 1000 ° C. Les résultats du test de lixiviats ont atteint les seuils actuels. Les résultats pour les propriétés mécaniques ont satisfait à la norme nationale chinoise (CNS) pour les exigences de construction pour la brique de deuxième classe. Il a été montré que l'augmentation du MSWI diminuait l'absorption d'eau et augmentait la résistance à la compression des briques frittées [112].

- (**Eliche et al. 2006**) divers déchets industriels recyclés tels que les boues d'épuration urbaines, la bagasse et les boues de l'industrie brassicole, les eaux usées de mil d'olive et les résidus de café moulu ont été mélangés à de l'argile pour produire des briques. Il a été montré que la résistance à la compression augmentait avec l'augmentation de la température de frittage. L'incorporation de marc de café et d'eaux usées de moulins à huile d'argile était plus avantageuse, les valeurs de résistance à la compression étaient similaires à celles des briques sans déchets et avec une amélioration de 19% de la conductivité thermique ; les briques répondaient aux spécifications requises pour l'absorption d'eau et la résistance à la compression [112].

- (**Ismail et al., 2003**) ont étudié l'ajout de matériaux de rebut aux briques d'argile. Les résultats ont montré que la réutilisation de ce matériau dans l'industrie de la brique contribuerait à la protection des terres agricoles et de l'environnement [112].

- (**Pai-Haung et al., 2004**) fabriquaient des briques à partir d'argile et de laitier d'acier. Les résultats ont montré que lorsque la température de cuisson était supérieure à 1050 ° C et l'ajout de laitier inférieur à 10%, les briques répondaient aux normes nationales chinoises pour les briques de troisième classe pour les constructeurs [112].

- (**Eduardo et al., 1996**) ont testé l'utilisation d'argile dans la formulation de poussières d'acier incorporées dans un corps en céramique. Les briques répondaient aux réglementations

commerciales standard étant inertes aux tests de lixiviation et le procédé céramique avait la loi d'émission de gaz dangereux. L'ajout de poussière d'acier a réduit la température de cuisson du procédé céramique dans lequel le recyclage des exigences de l'Agence de protection de l'environnement pour l'élimination des déchets dangereux [112].

- (**Abdul et al. 2004**) ont recyclé les boues d'épuration comme matière première dans la fabrication de briques d'argile. Les résultats concernant les propriétés physiques et mécaniques des briques ont pu répondre aux normes techniques pertinentes. Cependant, l'utilisation de briques contenant plus de 30% de boues n'a pas été recommandée car elles étaient cassantes et facilement cassantes même lorsqu'elles étaient manipulées doucement. Par conséquent, les briques de boue de cette nature ne convenaient que pour être utilisées comme briques en céramique qui ne sont normalement pas exposées à la vue en raison d'une mauvaise finition de surface [112].

- (**Acosta et al. 2002**) ont développé des briques de terre rouge en mélangeant un dépôt d'argile stérile avec du laitier IGCC. Les résultats de cette expérimentation suggèrent que l'IGCC peut être appliqué au procédé céramique. De plus, il avait présenté d'autres avantages tels que des économies d'eau et des améliorations des propriétés des produits finaux. Dans le produit fini, le laitier IGCC augmente l'absorption d'eau ainsi que la résistance au gel et le son vitreux. Les briques fabriquées à partir de laitier IGCC peuvent être classées comme étant robustes et vue de face [112].

- (**Geiza et al. 2004**) ont recyclé les déchets solides générés par la sidérurgie au Brésil pour fabriquer des produits structuraux à base d'argile. Les résultats des tests de propriétés mécaniques et de lixiviation ont indiqué que le solide produit par les aciéries peut être utilisé dans les matériaux de construction, réutilisant ainsi ces déchets de manière écologique [112].

- (**Chihpin et al., 2005**) ont réalisé une étude sur le recyclage du résidu de traitement des eaux (WTR) et du sol excavé, les corps céramiques ont été préparés et frittés pour être formulés en briques de construction et agrégats artificiels. L'exigence de température de frittage par WTR était plus élevée que ce qui est normalement pratiqué dans les briqueteries en raison de la teneur plus élevée en Al_2O_3 et en SiO_2 plus faible. Les résultats des tests de gravité spécifique, d'absorption d'eau et de résistance à la compression des corps en céramique ont confirmé son applicabilité dans la construction [112]

- (**Rania et al. 2011**) ont recyclé des déchets de marbre et de granit de différentes tailles dans la fabrication de briques de béton, avec le remplacement complet des agrégats conventionnels grossiers et fins par des déchets de marbre et de la poudre de boue. Les résultats sur les propriétés physiques et mécaniques des briques les qualifiaient pour être utilisées dans le secteur du bâtiment comme matériaux de construction non porteurs, où tous les échantillons de briques de ciment testés dans cette étude étaient conformes aux exigences du code égyptien pour les briques structurelles [112].

- (**Chin et al. 1998**) ont développé une technologie de réutilisation des boues de papier et des cendres de cogénération générées par l'industrie papetière dans la production de briques, les

briques étant cuites à 1000 ° C. Les briques de construction fabriquées à partir de cendres de cogénération et d'autres matières premières avaient un taux d'absorption d'eau inférieur à 15% et une résistance à la compression supérieure à 150 kg / cm², conformes aux spécifications pertinentes et les briques peuvent être utilisées comme construction d'espacement non porteuse Matériel [112].

- (**Quintilio et al. 2011**) ont produit une brique de terre à partir de fibres de paille et de sable grossier par compactage manuel. Les propriétés mécaniques ont été étudiées par une approche expérimentale et théorique combinée. Les résultats étaient discordants en raison du manque de données plus pertinentes sur le plan statistique [112].

- (**Cheng et al. 2006**) ont étudié les propriétés de briques perméables à l'eau constituées de boues de traitement de l'eau et de mâchefers (BA) sans impliquer une étape d'agrégat artificiel. Les propriétés mécaniques des briques frittées ont été examinées par rapport aux normes pertinentes. Il a été constaté qu'une teneur en poids de 20% en cendres résiduelles dans des conditions de frittage de 1150 ° C pouvait générer une brique avec une résistance à la compression de 256 kg/cm², un taux d'absorption d'eau de 2,78% et une perméabilité de 0,016 cm/s. Les briques développées dans cette étude pourraient être utilisées comme produit perméable à l'eau et respectueux de l'environnement comme brique de chaussée dans une zone urbaine [112].

- (**Chiang et al. 2000**) ont produit de nouvelles briques légères en frittant des mélanges de boues de station d'épuration séchées et de déchets agricoles avec des cendres de balle de riz. Les briques contenant 40% en poids de balle de riz frittée à 1100 ° C produisaient une faible densité apparente et une résistance relativement élevée qui étaient conformes aux normes taiwanaises pertinentes pour une utilisation comme briques légères dans les futurs bâtiments écologiques. Résultats pour la concentration de la procédure de lixiviation caractéristique toxique (TCLP) ont indiqué que les concentrations de TCLP de Cu, Zn, Cr, Cd et Pb dans les produits frittés étaient inférieures aux seuils réglementaires [112].

- (**Kidsarin et al. 2001**) ont développé une nouvelle approche pour fabriquer des briques à partir de cendres volantes 100% lignite. Les briques de cendres volantes développées dans cette étude ont montré une résistance mécanique supérieure, en particulier une résistance à la compression, par rapport aux briques d'argile cuites au rouge, aux briques de parement et à d'autres types de briques de cendres volantes [112].

- (**Badr et al. 2012**) ont étudié la substitution complète de la brique d'argile par de la boue mélangée à de la cendre de balle de riz (RHA) et de la fumée de silice (SF). Les briques ont été cuites à 1000 ° C. Les briques contenaient 25% de SF et 50% de boues présentaient des propriétés mécaniques supérieures par rapport aux briques conventionnelles et à celles disponibles dans le code égyptien [112].

- (**Malhotra et Tehri, 1996**) ont développé des briques à partir de laitier granulé de haut fourneau. L'étude a révélé que des briques de bonne qualité peuvent être produites à partir d'un mélange de laitier-chaux et de sable en pressant le mélange à une pression de 50 kg/cm². La

résistance à la compression des produits finaux variait de (80 à 150) kg / cm², il a été mis en évidence que le laitier consomme moins d'énergie par rapport à l'argile brûlée ou à la brique de silicate de calcium conventionnelle [112].

- (**Oti et al.**, 2009) ont produit des briques d'argile non cuites en recyclant un laitier de haut fourneau granulé broyé (GGBS) activé avec une chaux alcaline et du ciment Portland combinés à un sol argileux. Les matériaux mélangés ont été pressés manuellement à 140 bars. Les propriétés mécaniques et l'évaluation de la durabilité étaient toutes conformes aux normes d'ingénierie acceptables pour les éléments de maçonnerie en argile [112].

- (**Yin sung**, 2003) a produit des briques à partir de sédiments du havre de réservoir mélangés à des cendres volantes. Les matériaux mélangés ont été pressés à 15000 psi [112].

- (**Sivakumar et al.**, 2012) ont fabriqué des briques à partir de cendres résiduelles de centrales thermiques, de cendres volantes mélangées à de l'eau et du ciment. Les briques ont été produites en faisant un mélange fluide avec un haut w/c compris entre (1,5-5,5). Les résultats pour la résistance à la compression variaient en (5-10) MPa, l'absorption d'eau variait de 7 à 14%, la vitesse des impulsions ultrasonores était comprise entre (2,556-2,819) km/s. Contrairement à la méthode conventionnelle de production de briques, la nouvelle procédure n'utilisait ni argile ni schiste ni ne nécessitait une cuisson au four à haute température, présentant des avantages environnementaux et écologiques significatifs [112].

- (**Saeed et Lianyang**, 2012) ont étudié la faisabilité d'utiliser les résidus miniers de cuivre pour produire des briques écologiques basées sur la technologie de géo polymérisation. Le matériau mélangé a été placé dans un moule cylindrique de compactage miniature avec un compactage mineur. Les échantillons compactés ont ensuite été compressés avec une machine de compression Géo-test à différents taux de chargement allant de (0,5-30) MPa. Les propriétés physiques et mécaniques des briques géopolymères à base de résidus miniers de cuivre ont été étudiées à l'aide d'essais d'absorption d'eau et de compression non confinée. Les résultats ont montré que les résidus miniers de cuivre peuvent être utilisés pour produire des briques écologiques basées sur la technologie de géo polymérisation pour répondre aux exigences de l'American Society Testing Material (ASTM) [112].

- (**Raut et al.**, 2011) ont mené une étude de synthèse sur le développement de briques à partir de divers déchets industriels et agricoles tels que les résidus de papier traité, les mégots cigarettes, les cendres volantes - gypse à la chaux, les déchets de coton, les déchets de poudre de calcaire, l'usine de traitement des effluents textiles, les résidus organiques, les résidus de pâte kraft, les boues des usines de traitement des effluents pétroliers et les flux de soudage des boues recyclées. L'absorption d'eau et la résistance à la compression des briques développées à partir de ces déchets ont été examinées. Il a été conclu que les briques développées à partir des résidus de traitement du papier et des déchets de pâte à papier présentaient la résistance à la compression la plus élevée, plus de 12 fois supérieure au minimum recommandé par la norme indienne IS1007 : 1992 [112].



Versions «crues» et «tranchées» des briques Aubergine, Caramel, Champignon et Nougat (cliquez pour agrandir)

Figure II.25 Versions « crues » et « tranchées » des briques Aubergine, Caramel, Champignon et Nougat [120]



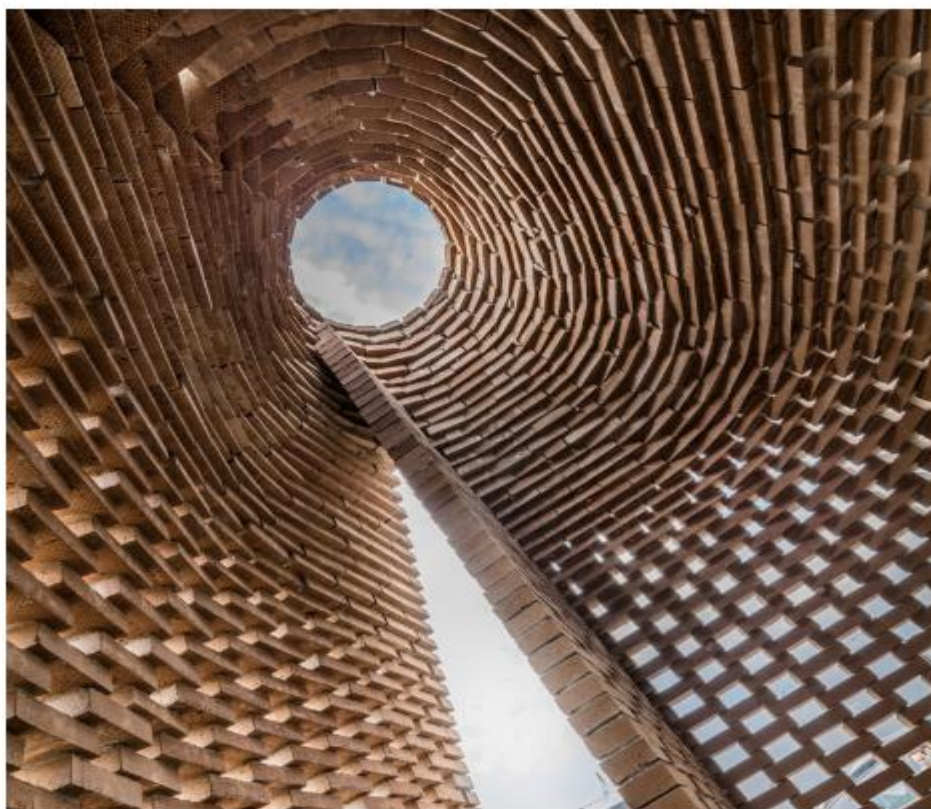
Versions «crues» et «tranchées» des briques Salami et Truffle

Figure II.26 Versions « crues » et « tranchées » des briques Salami et Truffle [120]



Murs composites faits de WasteBasedBricks

Figure II.27 Murs composites en briques à base de déchets [120]



Studioninedots' «The TrueTalker» made with StoneCycling's WasteBasedBricks (photo by Peter Cuypers)

Figure II.28 « The TrueTalker » de Studioninedots fabriqué avec des briques à base de déchets de pierre [120]

II.12.9 Discussion

Il a été démontré que les études antérieures recyclaient diverses sortes de déchets dans la fabrication de briques. Différents tests ont été réalisés sur les briques fabriquées à partir de déchets. Les propriétés des briques telles que les propriétés physiques et mécaniques ont été positivement influencées par l'ajout de déchets. De plus, l'utilisation des déchets dans la fabrication de briques peut contribuer à la conservation des ressources naturelles, à la protection de l'environnement et à l'économie de terrains pour la construction. En outre, il y aura des économies d'énergie qui autrement seront consacrées à l'extraction, à la manipulation et à la récupération des ressources vierges sous forme d'argile ou de schiste dans la production de briques. Il a été démontré que des recherches comme Weng, Vidhya, Biligin...etc. Ont réussi à produire des briques non cuites à partir de déchets. Cette option serait plus économique en tenant compte de la consommation importante de ressources énergétiques sous forme d'électricité ou de combustible fossile lors de la cuisson des briques du four. En outre, les gaz polluants comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de carbone (CO₂), l'ammoniac (NH₃) et dans certains cas le chlore et le fluor qui sont des gaz dangereux qui sont généralement émis par la cuisson des briques seront considérablement réduits dans les briques non cuites, d'où la durabilité sera atteinte. Les travaux futurs devraient contenir plus d'études dans la production des briques par une approche économique et environnementale sans consommer d'énergie ni émettre de gaz polluants. En ce qui concerne la cuisson du four à briques, le carburant alternatif doit être considéré comme du méthane gazeux ou du robinet de pétrole dans lequel la protection de l'environnement sera évaluée.

II.13 Recommandation et Conclusion

Pour résumer, la production de déchets industriels à grande échelle a commencé avec la révolution industrielle conduisant à une amélioration et augmentation du niveau de vie mais à un environnement dégradant et impur. Des proportions alarmantes de déchets générés ont demandé beaucoup de temps pour être réalisées, ce qui a conduit à la gestion des déchets comme une discipline préoccupante. Mais elle a rapidement généré une implication suffisante fondée sur le souci de l'environnement, entraînant une recherche active sur le terrain. La stabilisation des briques est récemment devenue un domaine de gestion efficace des déchets. Cependant, l'utilisation des déchets dans la stabilisation des briques peut être soit comme stabilisants eux-mêmes, soit comme additifs auxiliaires aux stabilisants primaires classiques comme la chaux, gypse et le ciment. Cette étude passe en revue les différents travaux réalisés à partir de différents déchets industriels tels que les cendres volantes, paille, poudre de marbre, coton, poussière de carrière et quelques autres déchets moins connus / adoptés dans la stabilisation des briques. Sur la base de l'examen de la littérature sur l'utilisation des déchets industriels comme additifs pour la stabilisation des briques, les conclusions suivantes peuvent être tirées et des recommandations appropriées sont avancées.

II.13.1 Conclusion

Il existe un réel potentiel de recyclage et de valorisation des déchets de la construction. Le marché est en pleine évolution, les filières de recyclage et de valorisation se développent de

manière considérable, la notion de recyclage s'intègre de plus en plus dans la réflexion architecturale et dans les applications concrètes de la préparation et de la gestion de chantier. Sous l'impulsion des autorités et l'augmentation des exigences réglementaires, la gestion des déchets et le recyclage trouvent peu à peu leur place sur le marché.

Au niveau économique, il est nécessaire de valoriser les déchets à leurs avantages. Il ne faut donc pas les détruire sans valorisation. Le traitement des déchets est donc un véritable enjeu économique et écologique.

Les différents déchets qui sont actuellement recyclés dans la fabrication de briques ont été revus. Les effets de ces déchets sur les propriétés des briques sont passés en revue. Améliorer les performances en termes de rendre plus écologique et une brique économique ne consomme pas de ressources énergétiques ni n'émet de gaz polluants donne une option économique pour concevoir le bâtiment écologique. Certaines briques sont produites sans cuisson ce qui est un avantage par rapport aux autres fabrications de briques en termes de matériau à faible énergie intrinsèque. L'étude est à son tour utile pour diverses personnes ressources impliquées dans l'utilisation de déchets industriels ou agricoles pour développer des matériaux de construction durables.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Il était question dans cette étude de répondre à plusieurs questions en relation avec la valorisation des déchets industriels dans le domaine des matériaux et de construction. Ces objectifs ont été développés et atteints en se basant sur une revue de littérature, vérifiés par des procédures expérimentales et analyse des résultats expérimentaux de plusieurs chercheurs dans le domaine et les exigences en termes des propriétés physiques, mécaniques et environnementales. Tous ces aspects ont été analysés pour sortir avec des conclusions générales. Ci-après sont présentées les différents acquis et remarques.

Le but essentiel de toute recherche bibliographique est de fournir un contexte scientifique et technique pour n'importe quel travail de recherche, le **premier chapitre** de ce travail est composé en trois titre essentiels à savoir : la construction en terre, la brique et les déchets industriels comme additifs dans la fabrication des briques.

Le deuxième chapitre est consacré pour : l'étude de l'influence des déchets industriels dans la fabrication des briques,

Quelques conclusions tirées dans cette enquête sont présentées comme suit :

Premièrement, Évaluation du comportement environnemental (lixiviation des polluants)

Le comportement environnemental des briques à base des déchets industriels a été évalué en se basant sur différents tests de lixiviation de différents chercheurs. Le principe était d'évaluer la lixiviation des polluants durant les différentes étapes de cycle de vie d'une brique : durant sa durée de vie (utilisation dans la construction) et à la fin de sa vie (déchet de construction). Ces tests ont été réalisés sur les briques représentant les recettes optimales. Les résultats des tests de lixiviation ont été comparés avec les exigences législatives de l'environnement. Les résultats ont montré que les teneurs des polluants ont été au-dessous des seuils fixés par les organisations internationales de normalisation. À partir de là, des briques écologiques peuvent être construites.

Deuxièmement, Évaluation des propriétés physiques et mécaniques des briques fabriquées, en fonction de la température de cuisson et du taux de substitution des argiles par les déchets industriels sur les propriétés des briques.

L'ensemble des propriétés physiques et mécaniques (à savoir le retrait de cuisson, la densité, l'absorption d'eau, la porosité, les pertes au feu, la résistance à la compression et/ou à la flexion) des briques cuites à base des déchets industriels ont été évaluées par plusieurs chercheurs pour étudier l'influence de substitution des argiles par les déchets industriels. Les résultats des caractérisations ont été comparés avec les exigences des différentes normes de construction. En fonction des résultats obtenus, il était possible de déterminer le taux de substitution optimal pour chaque déchet industriel. la plupart des recherches ont conclu que des briques a base des déchets industriels peuvent être fabriquées à base de déchets industriels

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'utilisation des déchets industriels pour la production de briques d'argile présente plusieurs avantages d'ordre scientifique, environnemental, économique et social.

Apports scientifiques

Plusieurs résultats de caractérisation des déchets industriels dans leur état brut, leur comportement lors de la cuisson, le comportement des briques à base de ces déchets lors de leur durée de vie et à la fin de leur vie ont été évalués dans le cadre de cette étude. L'ensemble de ces résultats présentent une base de données importante qui contribuera à la compréhension des mécanismes de stabilisation et de fixation des éléments toxiques des déchets solides. En effet, il sera possible de comprendre les risques environnementaux associés à l'utilisation des déchets industriels dans la brique (lixiviation des polluants) ainsi que le procédé de cuisson (émanations gazeuses).

Apports environnementaux

Cette étude présente plusieurs solutions quant à la résolution du problème de devenir d'une grande variété des déchets industriels. Les résultats de cette étude pourront nourrir les études cherchant à améliorer la gestion des grandes quantités de déchets industriels stockées à la surface ayant un risque potentiel sur l'environnement. En plus, la réutilisation des déchets dans le domaine des matériaux de construction permettra de diminuer la consommation exhaustive des ressources naturelles non renouvelables ayant une grande importance dans le maintien des équilibres écosystémiques.

Apports économiques et sociaux

Cette étude se positionnant comme une étude exploratoire, d'un point de vue économique, l'incorporation des déchets industriels dans des briques permettra :

(i) aux industriels de diminuer les coûts de stockage des déchets, vu qu'une grande quantité sera consommée par les industriels de fabrication de briques ;

(ii) aux consommateurs de réduire le coût d'achat des briques qui est en augmentation continue. Dans le cas où l'étude de faisabilité l'affirme et que les lois gouvernementales l'autorisent, l'installation d'une usine de fabrication de briques à base des déchets pourra créer des emplois et réduire les taux de chômage dans le pays.

Perspectives :

L'étude de faisabilité de fabrication de briques à base des déchets industriels, effectuée au laboratoire par plusieurs chercheurs, a permis de spécifier les mélanges optimaux ainsi que les conditions optimales pour la fabrication des briques pour chaque type de déchet industriel. Or, des études à une échelle industrielle devraient être réalisées pour vérifier la reproductibilité des résultats atteints au laboratoire. Une évaluation des propriétés en se basant sur des normes de construction et des normes législatives en matière d'environnement devront également être réalisées. Par la suite, il sera question d'étudier le comportement environnemental des briques dans des conditions réelles

CONCLUSION GÉNÉRALE

Selon le climat de la région en question. Aussi, la construction d'une maison permettra de réaliser un suivi in situ de la qualité de l'air à l'intérieur, de la qualité des eaux lixiviables à partir des murs et de la durabilité des briques dans les conditions locales où elles seront utilisées. Un autre défi pourrait être pris en réalisant une étude d'évaluation du cycle de vie général en termes de l'utilisation des déchets industriels dans la fabrication des briques. Cela en prenant en considération les différents aspects d'ordre énergétique, économique, environnemental et social.

LES RÉFÉRENCES

Les références	
[1]	Magniont, C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco matériau de construction à base d'agro ressources (Thèse de doctorat). Université de Toulouse, Toulouse.
[2]	Niroumand, H., Barcelo, J. A., Kibert, C. J. & Saaly, M. (2017). Evaluation of Earth Building Tools in Construction (EBTC) in earth architecture and earth buildings. <i>Renewable and Sustainable Energy Reviews</i> , 70, 861-866. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.267 .
[3]	Gandru, D, Delboy, L, sous la direction de Joffroy T., morisetterre-ENSAG 010. Patrimoine mondial, Inventaire et situation des biens construits en terre, UNESCO/CPM, Paris, 2010.
[4]	Pittet, D., Kotak T. Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District, Gujarat State, India. <i>Eco materials 4</i> , Paths towards, Sustainability conference, November 2009, Bayamo, Cuba
[5]	Pesson, P. (1971). <i>La vie dans les sols</i> . Paris : Gauthier-Villars
[6]	Soltner, D. (1992). <i>Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol</i> . Sainte Gemmes sur Loire : Collection Sciences et Techniques Agricoles
[7]	Anger, R. (2011). <i>Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction</i> (Thèse de doctorat). Lyon, INSA, Lyon.
[8]	Moriset, S. 2018. 11 000 ans d'architecture de terre. Unpublished document
[9]	Casel, T. (2000). <i>Maisons d'argile en Midi-Pyrénées</i> . Toulouse : Privat
[10]	CRAterre [Centre de recherche et d'application pour la construction en terre], Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S. & Vitoux, F. (1979). <i>Construire en terre</i> . Paris : Alternatives et Parallèles.
[11]	Anger, R. & Fontaine, L., (2009). <i>Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture</i> . Paris : Belin
[12]	Ecoconsomo (2017). <i>L'argile dans la maison</i> . http://www.ecoconso.be/fr/L-argile-dans-la-maison-du-sol-au-derniere-visite-le-11-avril-2017
[13]	Houben H, G. H. (2006). <i>Traité de construction en terre</i> , CRAterre, éditions parenthèses. (France, Ed.) (Edition Pa).
[14]	Kaddour B A & Benchenna. (2017). <i>Valorisation des tufs pour la fabrication des briques en terre comprimées</i> . Moulay Tahar saida.
[15]	Houben, H., Guillaud, H. 1994. <i>Earth construction</i> , Intermediate Technology publications 1994, London
[16]	Delgado, M.C.J., Guerrero, I.C. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. <i>Construction and Building Materials</i> 21 (2007) 237–251.
[17]	Fathy, H. <i>Architecture for the poor: An experiment in Rural Egypt</i> . The University of Chicago. United States of America. 1973.
[18]	Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., Walker, P. Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction. <i>Building and Environment</i> 36 (2001): 1119–1126.
[19]	Dethier, J., Eaton, R. <i>For a Sustainable New Contract between Nature and Builders</i> . Paris: Centre Pompidou. 2002
[20]	Pittet, D., Kotak T. Environmental impact of building technologies, a comparative study in Kutch District, Gujarat State, India. <i>Ecomateriales 4</i> , Paths towards Sustainability conference, November 2009, Bayamo, Cuba.
[21]	Shukla, A., Tiwari, G.N., Sodha, M.S. Embodied energy analysis of adobe house. <i>Renewable Energy</i> 34 (2009): 755–761

LES RÉFÉRENCES

[22]	Zami, M.S., Lee, A. Economic benefits of contemporary earth construction in low-cost urban housing – State-of-the-art review. <i>Journal of Building Appraisal</i> , 5 (2010): 259-271.
[23]	Chel, A., Tiwari, G.N. Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house: Case study of vault roof mud-house in India. <i>Applied Energy</i> , 86 (2009) 1956-1969
[24]	Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, <i>La brique, l'or rouge du Midi Toulousain</i> , Tourisme Médias Éditions, juin 2004, (ISBN 2-915188-04-1), p. 12-13
[25]	Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, <i>La brique, l'or rouge du Midi Toulousain</i> , p. 53
[26]	La briqueterie de Virebent, Mairie de Launaguet. Consulter le 30/09/2007
[27]	Brique matériau, Wikipédia (https://fr.wikipedia.org/wiki/Brique_(mat%C3%A9riau)#cite_note-fermeture_Wanlin-9)
[28]	Matériaux de construction « Cours en ligne matériaux de construction », « www.la.refer.org ».
[29]	A. Sénac et J. J. Jung, <i>Bulletin des sciences agricoles et économiques, quatrième section du Bulletin universel des sciences et de l'industrie</i> , vol. 3 1825.
[30]	Fermeture d'une briqueterie sur le site « Belgique : la briqueterie Wienerberger de Wanlin ferme » [archive], lesarchivesdelaterrecuite.blogspot.com (consulté le 24 mai 2019).
[31]	RICHARD P., « Adobe », mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.
[32]	MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie Compiègne, 2010
[33]	CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production.
[34]	DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla, 2007.
[35]	CORPUS « Mur de briques en terre crue » Architecteur traditionnelle méditerranéenne, 2006
[36]	RHONE A., « Le pisé » www.ageden.org , Edition Décembre 2010
[37]	CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies
[38]	LIVERT S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février 2011.
[39]	Fiche technique matériaux http://oci.cstb.fr/simulation/choix_proc.asp
[40]	AVLISSET I., « Matériaux de terre cuite » Technique de l'ingénieur, 1994.
[41]	Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, <i>La brique, l'or rouge du Midi Toulousain</i> , p. 48-50
[42]	Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, <i>La brique, l'or rouge du Midi Toulousain</i> , p. 52
[43]	Fédération Belge De La Brique, « Fabrication de brique », www.brique.be .
[44]	CONSULTING A., « Production De Briques D'argiles », Lagnane. Sénégal.
[45]	Collection mémento technique « Tuiles et briques de terre cuite » édition le moniteur, Paris 1998
[46]	Matériaux de construction « Cours en ligne matériaux de construction », « www.la.refer.org ».
[47]	Fédération Belge De La Brique « La brique de terre cuite », Juin 2006.
[48]	QUELS SONT LES DIFFÉRENTS TYPES DE BRIQUES ? https://www.guide-artisan.fr/actualites/macon/les-differents-types-de-briques
[49]	Types of Bricks – Detail Classification of Bricks https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/191-types-of-bricks

LES RÉFÉRENCES

[50]	GIOVANNI P., « La brique fabrication et tradition constructives », édition EYROLLES, Octobre 2004
[51]	DELEBECQUE R., « Éléments de Construction Bâtiment », Edition Delagrave 1990.
[52]	Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, La brique, l'or rouge du Midi Toulousain, p. 51
[53]	Echos, 13 novembre 2008, page 21
[54]	Bulletin de la Société de l'industrie minérale [archive], Dunod, juillet-septembre 1856 (consulté le 24 mai 2019).
[55]	Marque déposée de la Fédération française des tuiles et briques.
[56]	Composition des briques – Fonction des ingrédients (https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/132-brick-composition-ingredients-with-functions)
[57]	Central Electricity Authority, Rapport sur la production de cendres volantes dans les centrales thermiques à base de charbon / lignite et son utilisation dans le pays pour l'année 2014-15, Central Electricity Authority, New Delhi, Inde, 2015
[58]	Central Electricity Authority, Rapport sur la production de cendres volantes dans les centrales thermiques à base de charbon / lignite et son utilisation dans le pays pour les années 2011-12 et 2012-13, Central Electricity Authority, New Delhi, Inde, 2014
[59]	AK Sabat et S. Pati, «Une revue de la littérature sur la stabilisation des sols expansifs à l'aide de déchets solides», <i>Electronic Journal of Geotechnical Engineering</i> , vol. 19, pp. 6251–6267, 2014. Afficher sur: Google Scholar
[60]	M. Singh et A. Mittal, « Revue sur la stabilisation des sols avec des déchets », <i>International Journal of Engineering Research and Applications</i> , no. 2, pp. 11-16, 2014.
[61]	Ottou J. M. A. (1987), contribution à l'étude de la stabilisation des sols latéritiques par association compactage dynamique liant hydraulique en vue de l'élaboration de blocs pour la construction. Mémoire fin d'étude, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Yaoundé.
[62]	CRATerre Centre International pour la Construction en Terre, H. GUILAUD, Ecole d'Architecte de Grenoble, Encyclopédie de Bâtiment Tome 2 Edition Wake 1997.
[63]	CRATerre, H. HOUBEN et H. GUILLAUD, <i>Traité de Construction en Terre</i> , Edition Parenthèses, Marseille, 1989
[64]	Leila Zeghichi, <i>étude des betons basiques a base des differents granulats</i> , these de doctorat, universite mohammed khider – biskra ,2006, p 7.
[65]	K. Benabdeli, <i>Gestion des déchets en Algérie : Entre stockage et valorisation</i> , [en ligne],30/10/2019, consulté le 27/07/2020
[66]	Coronado, M., Blanco, T., Quijoma, N., Alonso-Santurde, R., Andrés, A., 2015. 7- Types of waste, properties and durability of toxic waste-based fired masonry bricks, m: Pacheco-Torgal, F., Labrincha, P.B.L.A., Chindaprasirt, S.K. (Eds.), <i>Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks</i> . Woodhead Publishing, Oxford, pp. 129-188
[67]	Quijoma, N., Andrés, A., 2013. Incorporacion de escoria Waelz al sector ceramico al sector ceramico: ejemplo de ecologîa industrial (Ph.D. thesis). Departamento de Ingeniería Química y Química Inorganica. Universidad de Cantabria.
[68]	Bories, C., Borredon, M.-E., Vedrenne, E., Vilarem, G., 2014. Development of ecofriendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. <i>Journal of Environmental Management</i> 143, 186-196.
[69]	Moedinger, F., 2010. Advances in the utilization of waste materials and alternative sources of energy in clay brick making. A South Tyrolean case study investigating environmental and financial impacts. Thesis at Staffordshire University, Doctor of Philosophy, UK.

LES RÉFÉRENCES

[70]	Mufioz Velasco, P., Morales Ortiz, M.P., Mendivil Girô, M.A., Mufioz Velasco, L., 2014. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material- A review. <i>Construction and Building Materials</i> 63, 97-107.
[71]	Phonphuak, N., Chindaprasirt, P., 2015. 6- Types of waste, properties, and durability of pore-forming waste-based fired masonry bricks, in: Pacheco-Torgal,F., Labrincha, P.B.L.A., Chindaprasirt, S.K. (Eds.), <i>Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks</i> . Woodhead Publishing, Oxford, pp. 103-127.
[72]	Zhang, L., 2013. Production of bricks from waste materials- A review. <i>Construction and Building Materials</i> 47, 643-655
[73]	EWC, 2002. The European waste catalogue. Environmental protection agency. Information on http://www.epa.ie
[74]	Coronado, M., 2014. Foundry wastes as new resources in ceramic processes- Anaylisis and modelling of technological & environmental properties. Thesis Dissertation, University of Cantabria (Spain).
[75]	Samara, M., 2007. Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la brique cuite. Thèse de doctorat en génie civil, Ecole Centrale de Lille.
[76]	Cusido, J.A., Cremades, L.V., Gonzalez, M., 2003. Gaseous emissions from ceramics manufactured with urban sewage sludge during firing processes. <i>Waste Management</i> 23, 273-280.
[77]	Cusido, J.A., Soriano, C., 2011. Valorization of pellets from municipal WWTP sludge in lightweight clay ceramics. <i>Waste Management</i> 31, 1372-1380
[78]	Lin, K.L., 2006. Feasibility study of using brick made from municipal solid waste incinerator fly ash slag. <i>Journal of hazardous materials</i> 137, 1810-1816.
[79]	Ciesielczuk, J., 2015. Chapter 16 - Coal Mining and Combustion in the Coal Waste Dumps of Poland, in: Sokol, G.B.S.P.V. (Ed.), <i>Coal and Peat Fires: A Global Perspective</i> . Elsevier, Boston, pp. 463-473.
[80]	Ryncarz, A., Bialas, J., 1995. Coal mining waste suitability for red ceramic production. <i>Processing waste testing for usability in ceramic red products</i> 7, 25-28.
[81]	Chou, M., Chou, I., Patel, V., Pickering, M., Stucki, J., 2004. Manufacturing fired bricks with class F fly ash from Illinois basin coals. Final Reports to the Illinois Clean Coal Institute 2006
[82]	Fernandez-Pereira, C., de la Casa, J.A., Gómez-Barea, A., Arroyo, F., Leiva, C., Luna, Y., 2011 b. Application of biomass gasification fly ash for brick manufacturing. <i>Fuel</i> 90, 220-232.
[83]	Liu, H., 2009. Environmental properties of fly ash bricks. World of Coal Ash (WOCA) Conference, May 4-7, 2009 in Lexington, KY, USA.
[84]	Alonso-Santurde, R., Andrés, A., Viguri, J.R., Raimondo, M., Guarini, G., Zanelli, C., Don di, M., 2011. Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. <i>Journal of Environmental Management</i> 92, 994-1002.
[85]	Quijoma, N., Coz, A., Andres, A., Cheeseman, C., 2012. Recycling of Waelz slag and waste foundry sand in red clay bricks. <i>Resources, Conservation and Recycling</i> 65, 1-10.
[86]	Lafhaj, Z., Samara, M., Agostini, F., Boucard, L., Skoczylas, F., Depelsenaire, G., 2008. Polluted river sediments from the North region of France: Treatment with Novosol® process and valorization in clay bricks. <i>Construction and Building Materials</i> 22, 755-762.
[87]	Samara, M., Lafhaj, Z., Chapiseau, C., 2009. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: factory scale experiment. <i>Journal of hazardous materials</i> 163, 701-710.

LES RÉFÉRENCES

[88]	Sutcu, M., Akkurt, S., 2009. The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity. <i>Ceramics International</i> 35, 2625-2631.
[89]	Loryuenyong, V., Panyachai, T., Kaewsimork, K., Siritai, C., 2009. Effects of recycled glass substitution on the physical and mechanical properties of clay bricks. <i>Waste Management</i> 29, 2717-2721.
[90]	Kavas, T., 2006. Use of boron waste as a fluxing agent in production of red mud brick. <i>Building and Environment</i> 41, 1779-1783.
[91]	Kavas, T., Christogerou, A., Pontikes, Y., Angelopoulos, G.N., 2011b. Valorisation of different types of boron-containing wastes for the production of lightweight aggregates. <i>Journal of hazardous materials</i> 185, 1381-1389.
[92]	Shih, P.-H., Wu, Z.-Z., Chiang, H.-L., 2004. Characteristics of bricks made from waste steel slag. <i>Waste Management</i> 24, 1043-1047.
[93]	Quijoma, N., de Pedro, M., Romero, M., Andrés, A., 2014. Characterisation of the sintering behaviour of Waelz slag from electric arc furnace (EAF) dust recycling for use in the clay ceramics industry. <i>Journal of Environmental Management</i> 132, 278-286.
[94]	Quijoma, N., Miguel, G.S., Andrés, A., 2011. Incorporation of Waelz Slag into Commercial Ceramic Bricks: A Practical Example of Industrial Ecology. <i>Industrial & Engineering Chemistry Research</i> 50, 5806-5814.
[95]	Schilderman, T., Mason, K., 2009. Using residues as fuel in small-scale brickmaking. <i>Proceedings of the 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009)</i> 6-9 September 2009, Bath, UK.
[96]	Kreimeyer, R., 1987. Some notes on the firing colour of clay bricks. <i>Applied Clay Science</i> 2, 175-183.
[97]	Petavratzi, E., Barton, J., 2007. Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing technologies - Integrated waste management for the production of construction material. School of civil engineering. University of Leeds.
[98]	Winkler, H.G.F., 1954. Bedeutung der Korngrößenverteilung und des Mineralbestandes von Tonen für die Herstellung grobkeramischer Erzeugnisse. <i>Ber. Dtsch. Keram. Ges.</i> 31,337-343.
[99]	Munoz Velasco, P., Morales Ortiz, M.P., Mendivil Girô, M.A., Mufioz Velasco, L., 2014. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material- A review. <i>Construction and Building Materials</i> 63, 97-107.
[100]	Dondi, M., Fabbri, B., Guarini, G., Marsigli, M., Mingazzini, C., 1997. Soluble salts and efflorescence in structural clay products: a scheme to predict the risk of efflorescence. <i>Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio</i> 36, 619-629.
[101]	Morillas, H., Maguregui, M., Trebolazabala, J., Madariaga, J.M., 2015. Nature and origin of white efflorescence on bricks, artificial stones, and joint mortars of modern houses evaluated by portable Raman spectroscopy and laboratory analyses. <i>Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy</i> 136, Part B, 1195-1203.
[102]	Shahidzadeh-Bonn, N., Desarnaud, J., Bertrand, F., Chateau, X., Bonn, D., 2010. Damage in porous media due to salt crystallization. <i>Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics</i> 81.
[103]	Weng, C. H., Lin, D. F., and Chiang, P. C. (2003). "Utilization of sludge as brick materials." <i>Advances in Engineering Research</i> , Vol.7, pp. 679-685.

LES RÉFÉRENCES

[104]	Rajput, D., Bhagade, S. S., Raut, S. P., Ralegaonkar, R. V., and Mandavgane, S. A. (2012). "Reuse of cotton and recycled paper mill waste as a building material." <i>Construction and Building Materials</i> , Vol. 34, pp. 470-475.
[105]	Bilgin, N., Yeprem, H. A., Arslan, S., Bilgin, A., Günay. E., and Marsoglu, M. (2012). "Use of waste marble powder in brick industry." <i>Construction and Building Materials</i> , Vol. 29, pp. 449-457.
[106]	Vidhya, K., Kandasamy, S., Malaimangal, U. S., Karthikeyan, S. R., Basha, G. S., and Junaid, H. T. (2013). "Experimental studies on pond ash brick." <i>International Journal of Engineering Research and Development</i> , Vol. 6, No. 5, pp. 06-11.
[107]	Shakir, A. A., Naganathan, S., and Mustapha, K. N. (2013). "Properties of bricks made using fly ash, quarry dust, and billet scale." <i>Construction and Building Materials</i> , Vol. 41, pp. 131-138.
[108]	Banu, T., Billah, M. M., and Gulshan, F. (2013). "Experimental studies on fly ash-sand-lime bricks with gypsum addition." <i>American Journal of Material Engineering and Technology</i> , Vol.1, No. 3, pp. 35-40.
[109]	Sumathi, A., and Rajamohan K. S. (2014). "Compressive strength of fly ash brick with the addition of lime, gypsum, and quarry dust." <i>International Journal of ChemTech Research</i> , Vol. 7, No. 1, pp. 28-36.
[110]	Hwang, C. L., and Huynh, T. P. (2015). "Investigation on the use of fly ash and residual rice husk ash for producing unfired building bricks." <i>Applied Mechanics and Materials</i> , Vol. 752, pp. 588-592.
[111]	Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., Mustapha, K. N. (2015) "Performance of bricks made using fly ash and bottom ash." <i>Construction and Building Materials</i> , Vol. 96, pp. 576-580.
[112]	Alaa.A. Shakir, Sivakumar Naganathan, Kamal Nasharuddin Bin Mustapha. (2013). "Development of Bricks from Waste Material" <i>Australian Journal of Basic and Applied Sciences</i> , 7(8): 812-818, 2013, ISSN 1991-8178
[113]	J.-P. Hannequart & E. Schamp, rapport technique "bâtiments exemplaires, fiche 4.3: la gestion des déchets du secteur de la construction – février 2011
[114]	ARIOUA Ahmed et TAHMI Lakhdar, caractérisation de durabilité de la brique de terre comprimée et stabilisée (BTC) sous l'effet des actions cycliques de mouillage- séchage, mémoire de fin d'études, université de Mohamed Boudiaf-Msila, 2019.
[115]	TerraLyon. (2016). Actes du XIIe congrès mondial sur les architectures de terre, 11-14 juillet. Lyon, France.
[116]	Babylas, N., Boxus, I., Jannes, L, Pirard, F. & Institut du patrimoine wallon. (2012). <i>Travaux de gros-oeuvre : Maçonnerie traditionnelle, terre crue</i> . Namur : Institut du patrimoine wallon.
[117]	Kommann, M., 2009. <i>Matériaux de terre cuite, Matières de base et fabrication</i> . Éditions Techniques de l'Ingénieur-C 905v2-20.
[118]	Yassine Taha, valorisation des rejets miniers dans la fabrication de briques cuites : évaluations technique et environnement ale, université du Québec en Abitibi Témiscamingue, thèse du doctorat, 2017.
[119]	Raju Sarkar and all, (2017) <i>Utilisation des déchets de papeterie pour la fabrication de briques</i> , <i>Cogent Engineering</i> , 4 : 1, DOI : 10.1080 / 23311916.2017.1405768
[120]	Claire Von, <i>Building with Bricks Made from Industrial Waste</i> , Article en ligne,2016, https://hyperallergic.com/302824/building-with-bricks-made-from-industrial-waste/

RÉSUMÉ

Résumé :

En raison de l'énorme demande pour l'industrie des matériaux de construction, en particulier au cours de dernières années, du fait de l'augmentation de la population dense causant une pénurie majeure de matériaux de construction, les ingénieurs en génie civil ont été confrontés au défi de réformer les déchets industriels en matériaux de construction salubre. Le recyclage et la valorisation et l'utilisation des déchets comme alternatives aux matières premières peuvent contribuer à l'épuisement des ressources naturelles, ce qui signifie, Préservation des ressources non renouvelables ; Améliorer la santé de la population et les préoccupations en matière de sécurité concernant les problèmes environnementaux et réduire les coûts d'élimination des déchets. En examinant l'utilisation de ces déchets, ce travail a évalué le recyclage de divers déchets industriels dans la production de briques. L'impact de ces déchets sur les propriétés des briques, y compris les propriétés mécaniques et physique, seront évalués et des recommandations pour de futures recherches seront formées à l'issue de ce travail. Cette approche révisée de la fabrication de briques à partir de déchets industriels est avantageuse pour fournir une solution potentielle et durable .

Mots clés : briques, déchets, valorisation, propriétés des briques

Abstract:

Due to the huge demand for the building materials industry, especially in recent years, due to the increase of the dense population causing a major shortage of building materials, the civil engineers have been faced with the challenge of reforming industrial waste into useful construction materials. Recycling and recovery and use of waste as alternatives to raw materials can contribute to the depletion of natural resources, which means, Preservation of non-renewable resources; Improve public health and safety concerns about environmental issues and reduce waste disposal costs. By examining the use of these wastes, this work evaluated the recycling of various industrial wastes in brick production. The impact of this waste on the properties of bricks, including mechanical and physical properties, will be assessed and recommendations for future research will be formed as a result of this work. This revised approach to making bricks from industrial waste is advantageous in providing a potential and lasting solution.

Keywords: bricks, waste material, valorization, bricks properties

ملخص :

نظرًا للطلب الهائل على صناعة مواد البناء خاصة في السنوات الأخيرة ونظرًا لزيادة الكثافة السكانية مما تسبب في نقص كبير في مواد البناء، فقد تم مواجهة التحدي من طرف المهندسين المدنيين المتمثل في تحويل النفايات الصناعية إلى مواد بناء مفيدة. يمكن أن تساهم إعادة التدوير والاستعادة واستخدام النفايات كبديل للمواد الخام في استنفاد الموارد الطبيعية، مما يعني الحفاظ على الموارد غير المتجددة؛ تحسين الصحة العامة ومخاوف السلامة بشأن القضايا البيئية وتقليل تكاليف التخلص من النفايات. من خلال فحص استخدام هذه النفايات، قام هذا العمل بتقييم إعادة تدوير النفايات الصناعية المختلفة في إنتاج الطوب. سيتم تقييم تأثير هذه النفايات على خصائص الطوب، بما في ذلك الخصائص الميكانيكية والفيزيائية، وسيتم تشكيل توصيات للبحث في المستقبل نتيجة لهذا العمل. هذا النهج المنقح لصنع الطوب من النفايات الصناعية مفيد في توفير حل محتمل ودائم.

كلمات مفتاحية : الطوب، مواد النفايات، استعادة النفايات، خصائص الطوب.