

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique
Université de M'sila
Faculté de Technologie



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Techniques de production industrielle

Thème :

**Etude des performances Thermiques des briques en
terre cuite BRIQUETERIE DE L'Atlas**

Proposé et dirigé par :

Aissi Adel

Présenté :

Lalaoui Sifeddine

Kadri Ahmed

Devant le jury composé de :

- ✦ Président : Mr. DEBIH Ali
- ✦ Encadrant : Mr. AISSI ADEL
- ✦ Examineur : Mr. ZEGGANE Hauari

Année Universitaire : 2020 / 2021



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENTS

Premièrement, nous remercions Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné la patience de terminer ce travail, et deuxièmement, nous remercions chacun de nos parents pour le soutien et les sacrifices que Wilson a faits pour terminer notre éducation.

Nous tenons à remercier notre superviseur Dr Aissi A. pour son suivi, sa disponibilité, son soutien, sa patience et son leadership lors de la préparation de cet article ainsi que pour le temps qu'il a consacré à l'évaluation et à la critique.

Cet ouvrage et sa pleine présence au cours de cette modeste étude.

Mes sincères remerciements aux ingénieurs de laboratoire du Collège of Technologie.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Notre plus profonde gratitude à tous les enseignants du Département de génie mécanique, en particulier dans la majeure en génie civil. Remerciements particuliers aux étudiants du Département de Génie Civil et à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je remercie mes amis 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 veux remercier Dieu et remercier tout le monde avec moi pour ma tristesse et mes joies J'offre un dévouement pratique à mes parents, aux parents Ammar et à ma mère, Hourya, qui supervisait mon éducation et mes frères. Et pour tous les amis et la famille de près et de loin

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

Merci à tous

LALAOUI STFEDDINE

Dédicace

Je dédie mémoire à tous ceux qui me sont chers.

À mon père MOHAMED, pour tous ses sacrifices, son soutien moral et matériel.

À Ma mère SABAH, pour son amour et son soutien qui m'ont permis de finir mes études.

À Mes sœurs.

À Mes frères.

À Mes amis.

KADRI AHMED

Résumé

En raison de l'augmentation de la densité de population et de l'énorme demande pour l'industrie des matériaux de construction, en particulier ces dernières années, et du manque d'espaces verts, qui a provoqué le réchauffement climatique, l'idée d'isoler les maisons afin d'éviter l'entrée de chaleur a émergé. Le défi a été relevé par les ingénieurs civils dans le domaine de l'industrie de la brique, qui consiste à ajouter des matériaux auxiliaires qui peuvent être, par exemple, des matériaux nocifs pour l'environnement. Elle peut contribuer au manque de transfert de chaleur. Les matières auxiliaires peuvent être une alternative aux matières premières pour épuiser les ressources naturelles, ce qui signifie préserver les ressources non renouvelables ; Améliorer les préoccupations de santé et de sécurité publiques concernant les problèmes environnementaux (Briques écologiques) 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'effet de ces déchets sur les propriétés des briques, y compris les propriétés mécaniques et physiques, sera évalué. Dans notre étude, le matériau auxiliaire était des granulés de polystyrène, qui ont montré des résultats très remarquables en isolation thermique.

ملخص

بسبب زيادة الكثافة السكانية والطلب الكبير على صناعة مواد البناء، خاصة في السنوات الأخيرة، ونقص المساحات الخضراء، مما تسبب في ظاهرة الاحتباس الحراري، ظهرت فكرة عزل المنازل لمنع دخول الحرارة. لقد تم تبني التحدي من قبل المهندسين المدنيين في مجال صناعة الطوب، والذي يتمثل في إضافة مواد مساعدة قد تكون، على سبيل المثال، مواد ضارة بالبيئة. يمكن أن يساهم في عدم انتقال الحرارة. يمكن أن تكون المواد المساعدة بديلاً للمواد الخام لاستنفاد الموارد الطبيعية، مما يعني الحفاظ على الموارد غير المتجددة؛ تحسين مخاوف الصحة والسلامة العامة فيما يتعلق بالقضايا البيئية (الطوب الأخضر) 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 الخواص الميكانيكية والفيزيائية. في دراستنا، كانت المادة المساعدة عبارة عن حبيبات البولسترين، والتي أظهرت نتائج ملحوظة للغاية في العزل الحراري

Summary

Due to the increase in population density and the huge demand for the building materials industry, especially in recent years, and the lack of green spaces, which has caused global warming, the idea to insulate the houses in order to avoid the entry of heat emerged. The challenge has been taken up by civil engineers in the field of the brick industry, which consists in adding auxiliary materials which may be, for example, materials harmful to the environment. It can contribute to the lack of heat transfer. Auxiliary materials can be an alternative to raw materials to deplete natural resources, which means preserving non-renewable resources; Improve public health and safety concerns regarding environmental issues (Green Bricks) and reduce waste disposal costs. By examining the use of these wastes, this work evaluated the recycling of various industrial wastes in the production of bricks. The effect of this waste on the properties of bricks, including mechanical and physical properties, will be evaluated. In our study, the auxiliary material was polystyrene granules, which showed very remarkable results in thermal insulation.

TABLE DES Matières

Table des matières

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I: Synthèse bibliographique

I.1 Construction en terre crue	6
I.1.1 Introduction.....	6
I.1.2 Histoire.....	6
I.1.3 Technique de construction en terre	10
I.1.4 Avantages de la construction en terre crue	13
I.2 La brique	15
I.2.1 Introduction.....	15
I.2.2 Histoire de brique	15
I.2.3 Définition de la brique	17
I.2.4 Les briques de terre crues	17
I.2.4.1 Fabrication en terre crue.....	18
I.2.4.2 Adobe.....	19
I.2.4.2.1 Définition.....	19
I.2.4.2.2 La production.....	19
I.2.4.2.3 Méthode de production de l'adobe.....	20
I.2.4.2.4 Les produits.....	22
I.2.4.2.5 Les avantages de l'adobe.....	22
I.2.4.3 Les pisés.....	22
I.2.4.3.1 Définition.....	22
I.2.4.3.2: Technique de production.....	23
I.2.4.3.3 Les produits différents types de pisé.....	24
I.2.4.3.4 Les avantage de pisé.....	24

TABLE DES Matières

I.2.4.4 Les blocs de terre comprimée.....	25
I.2.4.4.1 Définition.....	25
I.2.4.4.2 Production des blocs de terre comprimée.....	26
I.2.4.4.3 Les avantages des blocs de terre comprimée.....	27
I.2.4.5 Bauge.....	27
I.2.4.6 Torchis.....	28
I.2.5 La stabilisation des briques.....	29
I.2.5.1 Définition de la stabilisation.....	29
I.2.5.2 Procédés de stabilisation.....	29
I.2.6 Les briques de terre cuite	33
I.2.6.1 Fabrication de la brique en terre cuite	33
I.2.6.2 La cuisson.....	35
I.2.6.3 Produits de brique en terre cuite	36
I.2.6.3.1 Brique ordinaires.....	36
I.2.6.3.2 Brique creuse de terre cuite à perforation horizontale.....	38
I.2.6.3.3 Brique de terre cuite à perforation verticales (blocs perforés).....	39
I.2.6.3.4 Brique réfractaire	39
I.2.6.3.5 Brique de verre.....	39
I.2.6.3.6 Brique de pavage.....	40
I.2.6.3.7 Propriété et caractéristique des briques de terre cuite.....	41
I.2.7 Les différents types de briques.....	42
I.2.7.1 Classification des briques en fonction de la qualité.....	43
I.2.7.2 Classification des briques en fonction du processus de construction.....	44
I.2.7.3 Classification des briques selon la méthode de fabrication.....	45
I.2.7.4 Classification des briques en fonction des matières premières.....	45
I.2.7.5 Classification des briques basée sur l'utilisation de l'emplacement.....	46
I.2.7.6 Classification des briques en fonction de la capacité de résistance aux intempéries.....	47
I.2.7.7 Classification des briques en fonction de leur utilisation.....	48

TABLE DES Matières

I.2.7.8 Classification des briques selon la région.....	48
I.2.8 Dimensions des briques	49
I.2.9 Innovations et évolutions récentes.....	50
I.2.10 Économie	51
I.2.11 Brique en fonction de ses propriétés	51
I.2.12 Composition des briques - fonction des ingrédients	52
I.2.12.1 Pourcentage de constituants de la brique (base de poids).....	53
I.2.12.2 Principaux ingrédients de la brique et leurs fonctions.....	53
I.2.12.2.1 Alumine.....	53
I.2.12.2.2 Silice.....	54
I.2.12.2.3 Chaux.....	54
I.2.12.2.4 Oxyde de fer.....	55
I.2.12.2.5 Magnésie.....	55
I.2.12.3 Ingrédients nocifs de la brique.....	55
I.2.12.3.1 Chaux.....	55
I.2.12.3.2 Alcalis.....	56
I.2.12.3.3 Cailloux, pierres et graviers.....	56
I.2.12.3.4 Pyrites de fer (FeS).....	56
I.2.12.3.5 Matière organique.....	56
I.3 Déchets industriels comme additif dans la fabrication des briques.....	57

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

II-1- briques.....	62
II-1-1 Introduction	62
II.2 Stratégie de traitement des déchets.....	63
II.3 Déchets & valorisation : identification & principe général d'analyse.....	65

TABLE DES Matières

II.3.1 Principales sources de production des déchets du secteur de la.....	65
II.4 Déchets & gestion : classement	66
II.5 Définitions.....	67
II.5.1 Déchet	67
II.5.2 Récupération.....	68
II.5.3 Recyclage.....	68
II.5.4 Compostage.....	68
II.5.5 Incinération.....	68
II.5.6 Valorisation.....	68
II.6 Pourquoi valoriser ?	68
II.7 Gestion des déchets en Algérie : Entre stockage et valorisation.....	69
II.7.1 Le gisement des déchets valorisables	62
II.7.1.1 Volume des déchets produits annuellement en Algérie.....	62
II.7.1.2 Typologie des déchets domestiques valorisables.....	63
II.7.2 Analyse de la politique nationale en matière de gestion des déchets	72
II.7.3 Identification des principales contraintes	74
II.8 Utilisation des déchets comme matière alternatives dans la fabrication des briques	75
II.8.1 Substituant d'argiles	77
II.9 Caractéristiques des matières premières secondaire recherchées pour la fabrication de briques.....	78
II.9.1 Composition chimique	78
II.9.2 Distribution granulométrique	80
II.10 Conditions de fabrications de briques cuites à base de déchets	81
II.11 Les propriétés des briques à base de déchets	82
II.11.1 Les propriétés technologiques et la durabilité des briques.....	83
II.12. Autres études	85
II.12.1 Discussion.....	87
II.13 Recommandation	88

TABLE DES Matières

Chapitre III : partie spécial étude expérimentale

III-1 Préparation des échantillons d'essai	91
III-1-1 Introduction.....	91
III-2-Préparer des échantillons de test	92
III-2-1- Principe.....	92
III-2-2- Matériel utilisé	92
III-2-3- La préparation des échantillons	93
III-2-4- Choix des adjuvants	95
III.2.5. Caractérisation des éprouvettes à l'échelle du laboratoire.....	96
III.2.5.1.Aspect.....	96
III-3-Les argiles.....	96
III-3-1 Définition et origine des argiles	96
III-3-2-ANALYSES.....	97
III-4-Essais mécaniques	98
III-5-Essais thermiques	99
III-6-Recommandation	101
Conclusion générale102
References	

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : (a) Arche De Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki ; (d) Cité Chanchan	6
Figure 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 Dépé au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala au Turkménistan	7
Figure 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	8
Figure 4 : Construction en terre dans le monde.....	9
Figure 5 : Techniques de construction enterrer.....	11
Figure 6 : Comalcalco, Mexique : pyramide de briques mayas Pyramide de briques mayas au site Archéologique de Comalcalco, Tabasco, Mexique.....	16
Figure 7 : Moulage et séchage de l'adobe.....	19
Figure 8 : Moule de l'adobe.....	21
Figure 9 : Coffrage utilisé dans la conception des murs en pisé.....	23
Figure 10 : Construction d'un mur en pisé.....	23
Figure 11 : Composition de pisé.....	24
Figure 12 : Brique de terre crue compressée réalisée à l'aide d'une presse manuelle.....	25
Figure 13 : À gauche, différents formats des BTC, à droite désignation des joints	26
Figure 14 : 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.....	26
Figure 15 : Technique de la construction avec le Bauge	27
Figure 16 : Technique de construction en Torchis	28
Figure 17 : Pile de briques modernes, faites d'argile et de sable	34
Figure 18 : Diagramme de Production de briques d'argile	36
Figure 19 : Brique pleines et perforées	37
Figure 20 : Brique pleines	37
Figure 21 : Briques perforées	38
Figure 22 Brique perforées	38
Figure 23 : Briques creuses de terre cuite à perforation horizontale	38
Figure 24: Briques creuses de terre cuite à perforation verticale type G	39
Figure 25 : Brique réfractaire	39

LISTE DES FIGURES

Figure 26 : Brique de verre	40
Figure 27 : Brique de pavage	40
Figure 28 : Route Pāwesin-Riewend pavée de briques, dans le Brandebourg, Allemagne	50
Figure 29 : Briques crues (vertes)	52
Figure 30 : Argile pour la formation de briques	53
Figure 31 : Sable	54
Figure 32 : Chaux en poudre	54
Figure 33 : Poudre d'oxyde de fer	55
Figure 34 : Cailloux, pierres et graviers	56
Figure 35 : Modes d'utilisations de l'AF en 2014-2015	58
Figure 36 : Stratégies de traitement des déchets	64
Figure 37 : Valorisation des déchets	65
Figure 38 : Gestion et classement des déchets	67
Figure 39 : Classification des types de déchets selon EWC (2002) et selon leur rôle potentiel dans la fabrication de briques cuites	78
Figure 40 : Diagramme ternaire illustrant les compositions chimiques des Argiles adéquates pour la fabrication des briques d'argile	79
Figure 41 : Diagramme de Winkler et Niesper	81
Figure 42 : utilisé pour la confection des éprouvettes	93
Figure 43 : Processus de fabrication des éprouvettes	94
Figure 44 : Billes de polystyrène	95
Figure 45 : échantillons sans adjuvant(A)et avec les billes de polystyrène(B)(C)et (D)	96
Figure 46 : Essais de compression	98
Figure 47 : Résistance à la compression des différentes éprouvettes	99
Figure 48 : Appareil de mesure conductivité thermique	99
figure 49: points de mesure échantillons	100
Figure 50 : Conductivité thermique des différentes éprouvettes	100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différentes techniques de construction en terre	11
Tableau 2 : Principales techniques de construction en terre crue	12
Tableau 3 : Les caractéristiques des briques de terre crue (Adobe, Pisé, BTC)	28
Tableau 4 : Propriétés des briques pleins et perforés	41
Tableau 5 : La résistance thermique des briques pleins et perforés	41
Tableau 6 : Propriétés de la brique creuse	41
Tableau 7 : La résistance thermique des Brique creuse.....	42
Tableau 8 : Pourcentage des constituants de la brique (base de poids)	53
Tableau 9 : Principaux déchets solides industriels générés en inde	59
Tableau 10 : utilisations de l'AF dans l'ingénierie des sols	60
Tableau 11 : Volume des déchets produits annuellement en Algérie	70
Tableau 12 : Typologie des déchets domestiques valorisables	71
Le tableau 13 : résume les propriétés physiques de cet adjuvant. Les résultats sont obtenus après une série de tests pour réduire les marges d'erreur	95
Le tableau 14 : Analyse granulométrique par voie humide	98

LISTE DES ABRÉVIATIONS

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)(OH8)(Al,Si)4O10)	Chlorite
Na2O et K2O	Les oxydes alcalins
Ca (OH)2	Hydroxide de calcium
NH3	Amoniac
Cu	Cuivre
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

LISTE DES ABRÉVIATIONS

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
Q	flux de chaleur
Λ	Conductivité thermiquir
S	surface de contact
Rc	La Résistance
F	La force
S	La surface

Introduction générale

Introduction Générale

Introduction générale

Face aux défis environnementaux actuels associés au changement climatique et à l'épuisement des ressources (PNUE, 2016), le secteur de la construction doit réorganiser les pratiques et méthodes de conception en tenant compte des normes économiques et sanitaires. Le Programme des Nations Unies pour les établissements humains (ONU-Habitat) estime que 3 milliards de personnes vivront mal d'ici 2030. Compte tenu de sa disponibilité, la terre brute est 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 déterminer les conditions de fabrication à l'échelle industrielle, les précautions de mise en œuvre et de maintenance. En effet, malgré de nombreux avantages environnementaux, thermiques et économiques, les sols bruts présentent les inconvénients d'une dégradation sous l'influence des conditions climatiques. Il est donc impératif de prendre des précautions pour augmenter sa durabilité.

Au cours des dernières décennies, les terres ont suscité un regain d'intérêt significatif en tant que matériau de construction durable. Ainsi, environ 15% des œuvres architecturales inscrites sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont construites à terre [3]. De nos jours, les biomatériaux sont une alternative prometteuse aux matériaux de construction traditionnels. La terre s'est avérée être un matériau qui répond aux exigences de protection de l'environnement et augmente considérablement l'énergie pour assurer le confort thermique de la maison. Pitt et al [4], à travers une étude comparative de différentes technologies de construction (sol, béton, brique et pierre), ont démontré les avantages économiques et environnementaux de ce matériau. Ils ont également indiqué que l'utilisation de l'adobe et du torchis comme matériaux de construction pour la maison a grandement contribué à réduire la consommation d'énergie et donc à réduire les émissions de dioxyde de carbone.

Contrairement au ciment, au béton ou à l'acier, la terre dans son état naturel peut être utilisée comme matériau de construction sans aucune dépense d'énergie. Il présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. Le terrain largement utilisé dans la construction de bâtiments est extrêmement sensible à l'eau. Par exemple, les

Introduction Générale

masses terrestres sont produites en compactant le sol brut dans une presse manuelle ou hydraulique. La terre est maintenue dans un moule ou comprimée entre deux plaques qui se rapprochent lentement. Cette pression réduit la taille des vides, réduisant ainsi leur sensibilité à l'eau et augmentant leur résistance à la pression.

Certaines propriétés des briques de terre (faible densité, faible conductivité thermique) justifient leur utilisation pour améliorer les propriétés physiques, mécaniques et thermiques telles que les briques en nid d'abeille et les briques creuses. Il est utile de trouver des matériaux locaux qui améliorent les résistances physiques, mécaniques et thermiques des bâtiments et dont le coût de production est faible.

La technologie de stabilisation des sols est connue depuis longtemps (Grande Muraille de Chine, voies romaines, etc.). Par exemple, en Belgique, la stabilisation des sols a été largement utilisée dans les années 1960, lors de grands programmes routiers. Actuellement, cette technologie connaît un regain d'intérêt majeur en raison du renforcement de la législation environnementale et de la pression accrue sur les matières premières.

Cette technologie offre une solution technique, économique et environnementale au problème des sols excavés, aussi bien pour les petits que pour les grands chantiers.

En Algérie, la construction en terre s'est répandue tout au long de sa longue histoire, en particulier dans les régions rurales et arides.

L'industrie de la brique en Amérique du Nord repose sur d'abondantes réserves naturelles d'argile et de schiste, qui sont extraites du sol et utilisées pour produire des briques avec une utilisation minimale d'additifs. Bien que cette méthode de production soit actuellement rentable, la disponibilité des matières premières et le coût de production sont devenus une préoccupation pour l'industrie. Un traitement possible consiste à utiliser des déchets, qui ont une formule chimique similaire à celle de l'argile naturelle ou du schiste, pour remplacer un pourcentage du minerai. Les bénéfices potentiels sont triples: les bénéfices économiques résultant de la réduction du volume de matières premières nécessaires par unité produite, ainsi que de l'abaissement de la température de cuisson requise; Avantages environnementaux résultant de la conversion des décharges de

Introduction Générale

déchets solides et du placement des déchets dans un environnement sain, inerte et bénéfique; Les avantages de résistance sont dus à la possibilité d'augmenter la résistance, la durabilité et l'isolation de la brique

Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique, dans le but de donner un aperçu des techniques de construction en sols bruts et en terre cuite, les différents matériaux utilisés en brique avec un passage historique, et les critères de sélection du sol à utiliser. Stabilisé, styles et moyens de stabilité différents. Ensuite, nous avons donné un aperçu de l'utilisation des déchets industriels comme additifs pour augmenter l'isolation et la dureté dans la fabrication de briques.

Le chapitre II est destiné 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.

Le chapitre III Ce chapitre présente l'étude menée sur l'effet des additifs (polystyrène) sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques cassées. Différents tests de caractérisation ont été réalisés sur des échantillons de test réalisés à l'échelle du laboratoire, afin de déterminer les pores permettant d'obtenir le bon compromis entre propriétés thermiques et mécaniques.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I.1 : Construction en terre crue

I.1.1 : Généralité

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'éco construction.

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).

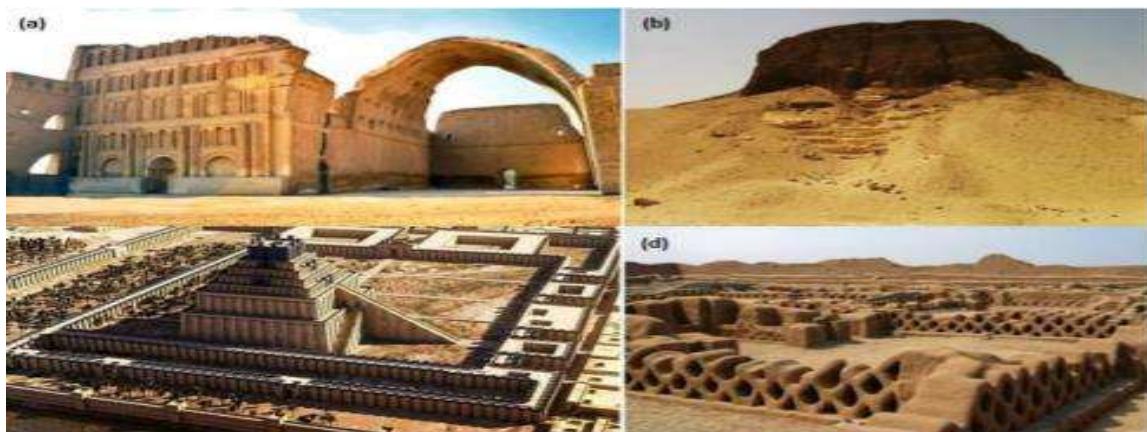


Figure 1 : (a) Arche De Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki ; (d) Cité Chan-Chan.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 Dêpé 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 2).



Figure 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 rira les 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 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 [8].

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 [13]. Ci-après, une figure présente le patrimoine mondial en terre crue.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [14].



Figure 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 [15].

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

l'impact du transport [16]. 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) [17]. A présenter 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) [18]. 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 [19]. 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 [20] [21].

I.1.3 : Technique de construction en terre :

A 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 [22]. Parmi celle-ci huit sont d'un usage courant et constituent les techniques principales :

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

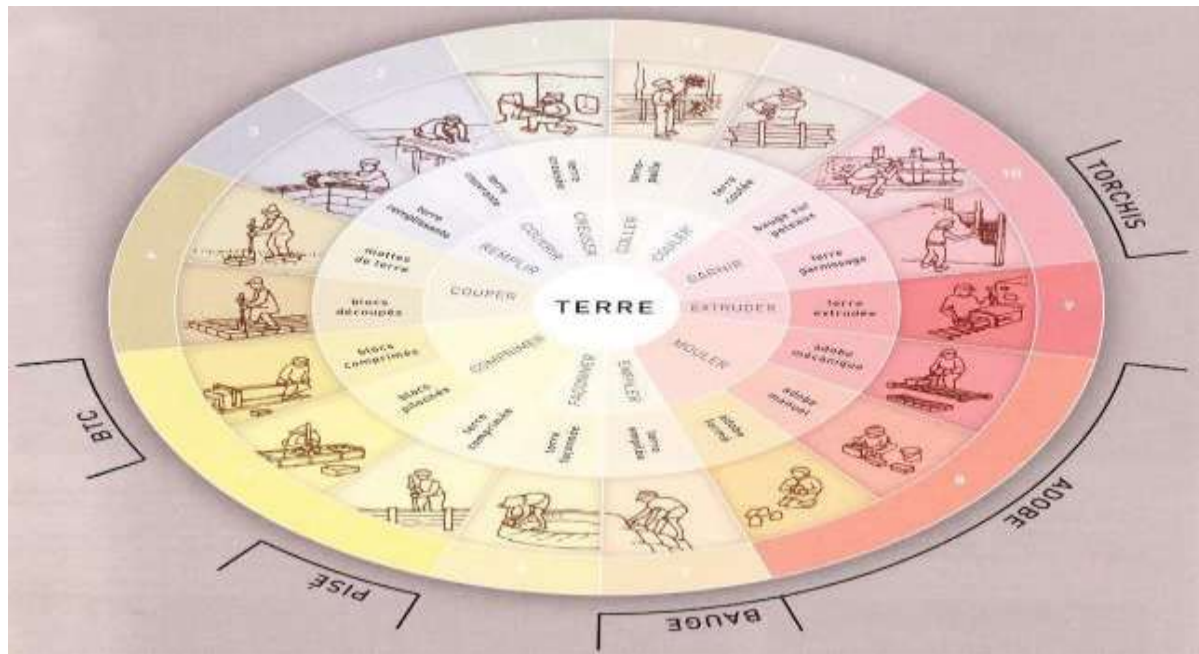


Figure 5 : Techniques de construction en terre [11].

Tableau 1 : Différentes techniques de construction en terre [23].

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Terre coulee	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

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 coulee	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 2 : Principales techniques de construction en terre crue.

Techniques Courantes	Pisé	Bauge	Torchis	Adobe brique crue	Ou Terre Comprimée
Description	Le pisé est un procédé de construction qui consiste à compacter de la terre disposée dans un coffrage en couches successives peu épaisses à l'aide d'un pilon [23]	La construction en bauge consiste à façonner des murs massifs et épais à l'aide d'une terre mise en œuvre à	Le torchis est une technique de Remplissage D'ossature Avec un Mélange de Terre fibrée (CRATERRE)	Les adobes sont des Briques de Terre crue Moulées Sans Compactage Et séchées au soleil. Leur Taille et leur forme varient selon	(BTC) est Une Évolution de L'adobe. La Terre, Généralement Stabilisée, est Compactée à L'aide de Presse manuelle où Mécanique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

		l'état plastique généralement sans l'aide de coffrage [23].	et al., 1979	Les moules Utilisés [23]	[23]
Terre Utilisé	La terre à pisé Est un mélange Hétérogène de Particules de Terre de Grosseurs variables allant De cailloux (< 6 cm) aux argiles (< 2µm) [23].	La terre à Bauge est généralement très argileuse, avec du Sable, des graviers, ainsi que des fibres végétales [23].	La terre limono-argileuses Une des Meilleures Terres pour la construction en torchis. Cependant, différentes recettes existent pour Fabriquer le torchis .	Les terres constituées de sable, de limon et d'argile seraient les plus aptes à la fabrication de l'adobe	La brique de terre comprimée est produite à partir de la même terre que le pisé, mais débarrassée par tamisage de grains > 2 cm [23].

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 [24].

❖ **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**

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [25].

Chapitre I : Synthèse bibliographique



Figure 6 : Comalcalco, Mexique : pyramide de briques mayas Pyramide de brique smayas au site archéologique de Comalcalco, Tabasco, Mexique [26].

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 [27]. 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 XVe 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

« 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 [28].

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 [26].

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 [29]. 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO2 exceptionnel [29].

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 [30].

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 [31].

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 de paille hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusqu'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 [17, 18,19]. 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 [32, 33,34].



Figure 7 : Moulage et séchage de l'adobe [32,33]

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 [35].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [35].



Figure 8 : Moule de l'adobe [35]

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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [35,36].

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 couteuse.
- N'entraîne pas la production de gaz .

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 [37]. 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 9) montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé.

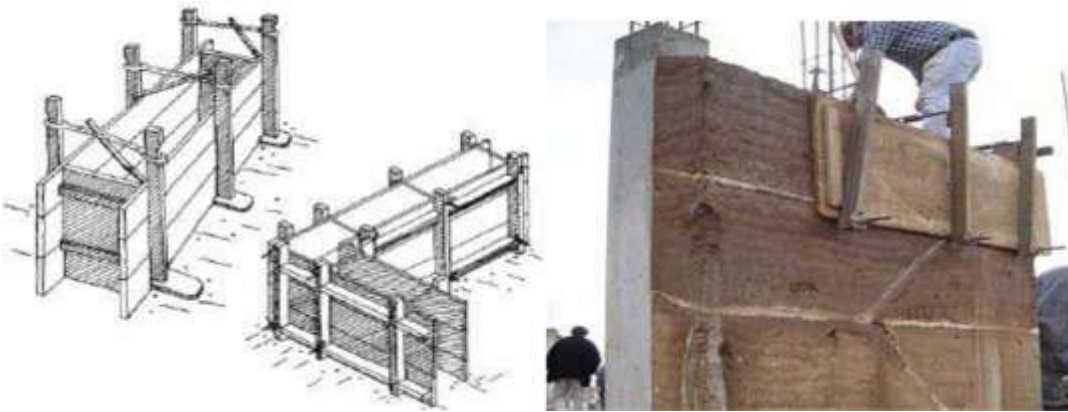


Figure 9 : Coffrage utilisé dans la conception des murs en pisé [37]

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 10) [37].

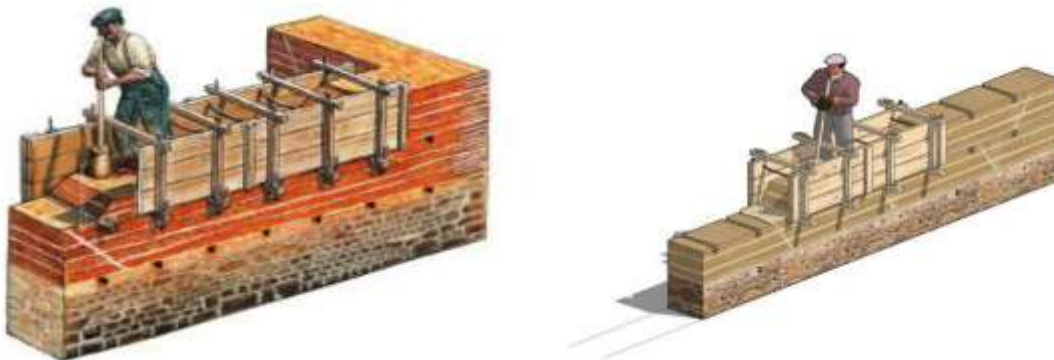


Figure 10 : Construction d'un mur en pisé [37]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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) .

Des « lits de chaux » ou « cordons de chaux » font souvent office de liant entre les différentes « banchées » (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 11) .



Figure 11 : Composition de pisé [37]

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) .

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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- 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 [37].

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 (12, 13, 14) 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) [38].



Figure 12 : Brique de terre crue comprimée réalisée à l'aide d'une presse manuelle [38]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

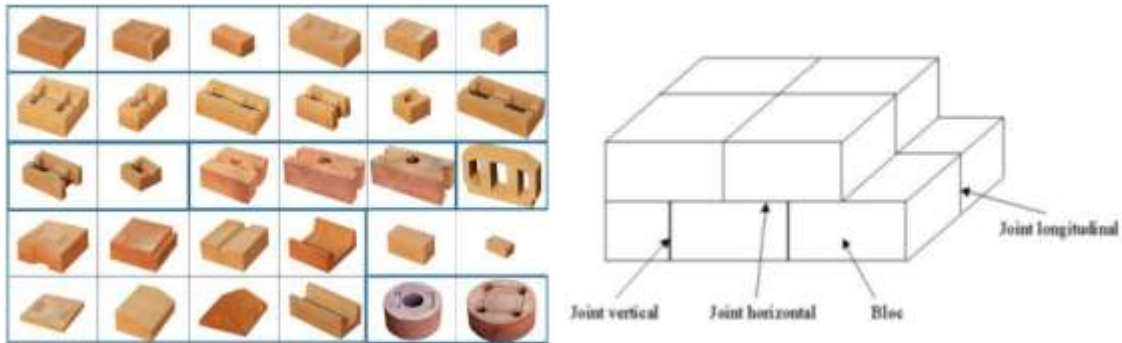


Figure 13 : À gauche, différents formats des BTC, à droite désignation des joints (P’Kla, 2002).



Figure 14 : 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 .

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [39].

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 [40].



Figure 15 : Technique de la construction avec le Bauge [40].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [40].



Figure 16 : Technique de construction en Torchis [40].

Tableau 3 : Les caractéristiques des briques de terre crue (Adobe, Pisé, BTC) [41]

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 dB pour		

Chapitre I : Synthèse bibliographique

				C				c			
				4	d	po	2	4	d	pou	2
				0	B	ur	0	0	B	r	0
				C				c			
				m				m			
Retrait au séchage (mm/m)		1		1				0.2-1			
				-							
				2							
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 :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 long terme augmentent. 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

telles que poils, crins ou bourre d'animaux et plus récemment des fibres de synthèse telles que cellophane, fibres d'acier ou de verre [42] [43].

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 .

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

[42] [43].

- 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 [42] [43].

-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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

a) Mécanisme :

- ✓ L'absorption d'eau : dans une terre humide, la chaux vive subie 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 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 [42] [43].

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% [42] [43].

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 .

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 [42] [43].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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) [44].

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 » [45].

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 identique se. La surface est identique Isée 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 [46].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- **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.



**Figure 17 : Pile de briques modernes,
Faites d'argile et de sable [26]**

- Extrusion au travers de filières correspondant à une forme donnée de brique
- Coup age
- 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).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 » [47].

- **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 ;

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- 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).

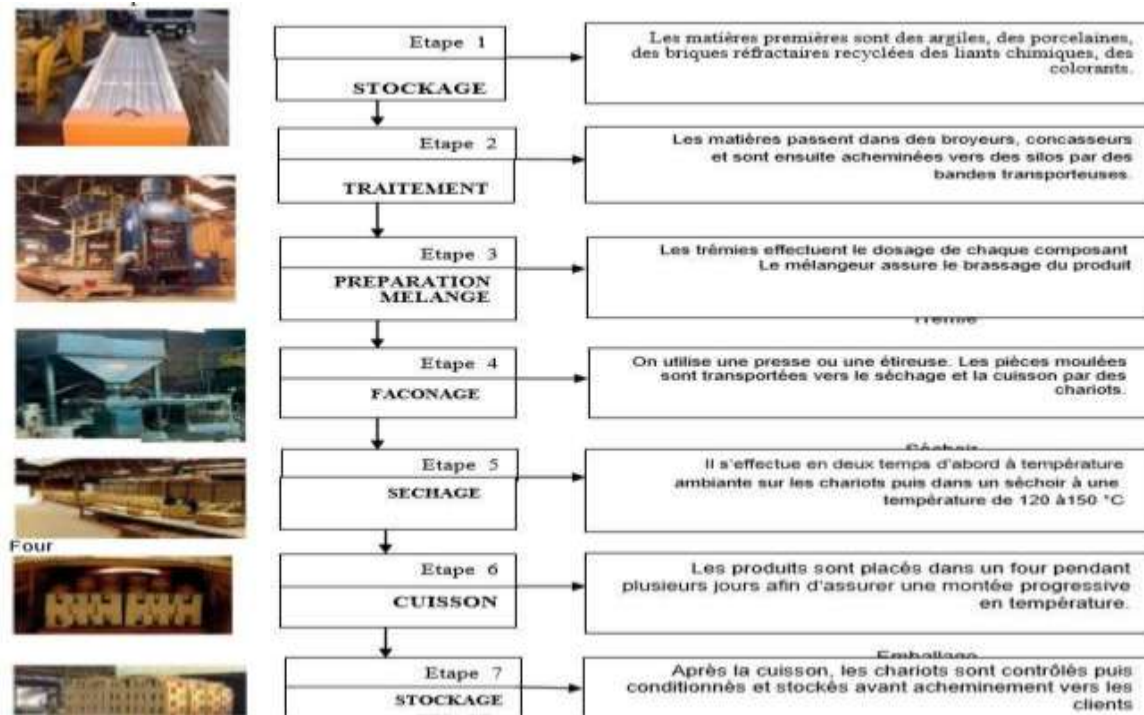


Figure 18 : Diagramme de Production de briques d'argiles [48]

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 19) [49,50].

- **Brique pleine** : brique ne comprend aucune perforation et dont le format d'appellation

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Le plus courant est dimensions : 250*120*55 mm (figure 19 et 20)

- **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 (figure.21 figures.22)

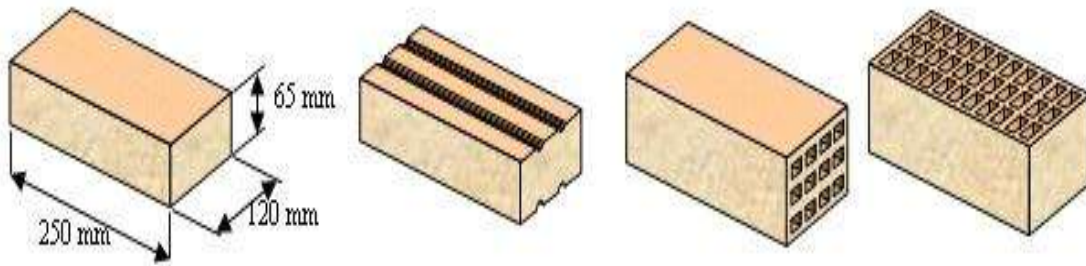


Figure 19 : Brique pleines et perforées



Figure 20 : Brique pleines

Chapitre I : Synthèse bibliographique

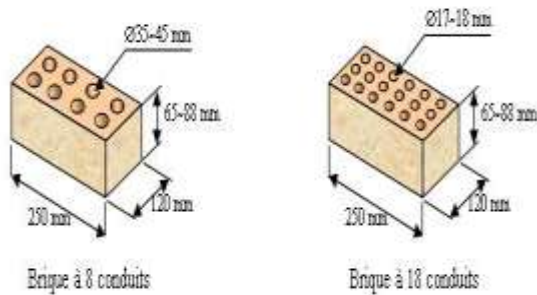


Figure 21 : Briques perforées

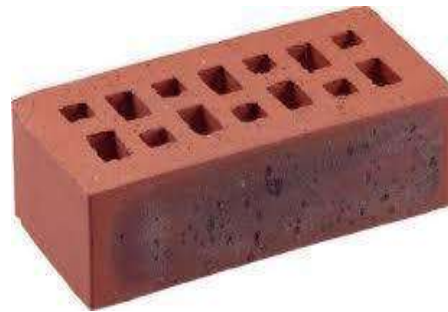


Figure 22 : Brique perforées

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 [49,50,51]. Briques plâtrières : d'épaisseur de 3.5 à 7.5 cm. Les briques creuses sont classées :

- ❖ D'après la forme :
- ❖ D'après la résistance :

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

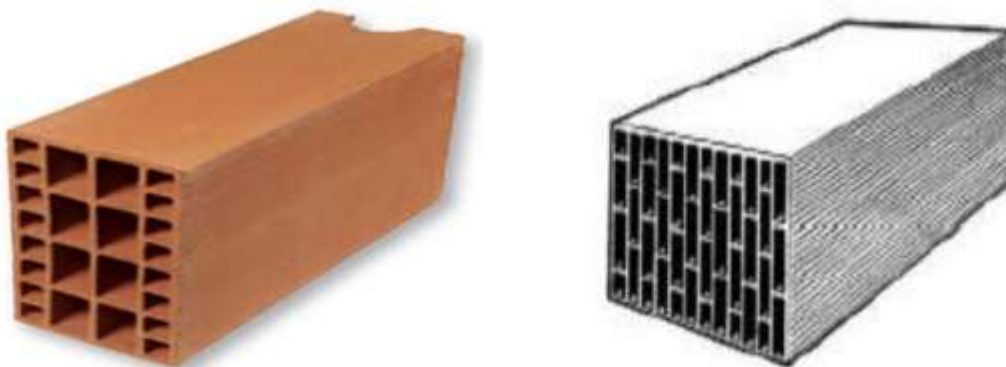


Figure 23 : Briques creuses de terre cuite à perforation horizontale

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 22) [44,49]



Figure 24 : 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 [52].



Figure 25 : 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [52].



Figure 26 : 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 [53].



Figure 27 : Brique de pavage

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 7 : La résistance thermique des Brique creuse [55]

<i>E : Épaisseur</i>	5	10	2	25
<i>en cm</i>				
<i>R (m². °C/W)</i>	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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [53].

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 [34].

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 [34].

3. Brique brûlée ou Jhama

Elle est souvent connue sous le nom de brique vitrifiée. 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 [53].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [53].
- 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 [53].
- 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 [53].

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 [53].
- 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

est moins poreux que les briques d'argile. Il s'est avéré une surface lisse et n'a donc pas besoin d'être enduit [53].

- 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 [53].

- 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 [53].

- 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 [53].

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 :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [53].
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 [53].

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 [53].
2. **Conditions météorologiques modérées** : ces types de briques sont utilisés dans les pays tropicaux. Ils peuvent résister à n'importe quelle température élevée [53].
3. **Aucune catégorie de temps** : Ces briques n'ont aucune capacité de résistance aux intempéries et utilisées sur les murs intérieurs [53].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 :

- **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 [53].
- 2. **Briques d'ingénierie** : Ces briques sont connues pour de nombreuses raisons. Ils ont une résistance à la compression élevée et un 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. [53].

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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 parallélépipède 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 » [54]. 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.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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.



Figure 28 : Route Pāwesin-Riewend pavée de briques, dans le Brandebourg, Allemagne [26]

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [56].

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 [57].
- 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© [58]), 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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [59].



Figure 29 : Briques crues (vertes) [59]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 : [59]

Tableau 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 [59].

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 [59].



Figure 30 : Argile pour la formation de briques [59]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 [59].



Figure 31 : Sable [59]

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 [59].



Figure 32 : Chaux en poudre [59]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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 33 : Poudre d'oxyde de fer [59]

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 [59].

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 [59].



Chapitre I : Synthèse bibliographique

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.) [59].

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 [59].



Figure 34 : Cailloux, pierres et graviers [59]

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 [59].

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 [59].

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

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. 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 [60].

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 [61]. Les différents modes d'utilisation de l'AF illustrés à la (figure 35) 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

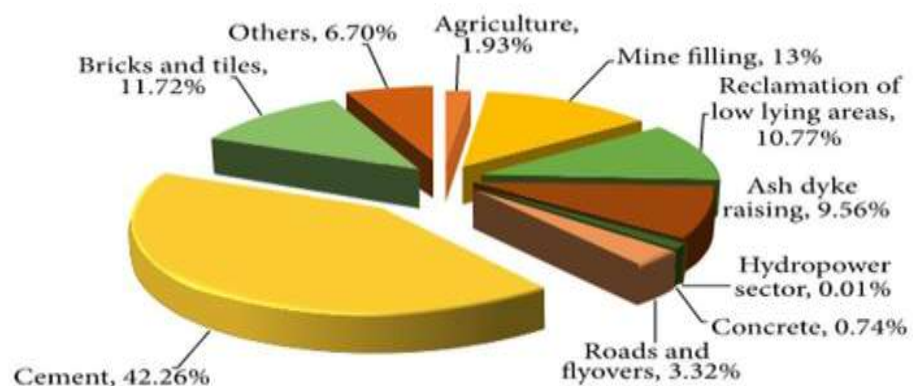


Figure 35 : Modes d'utilisations de l'AF en 2014-2015 [60]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

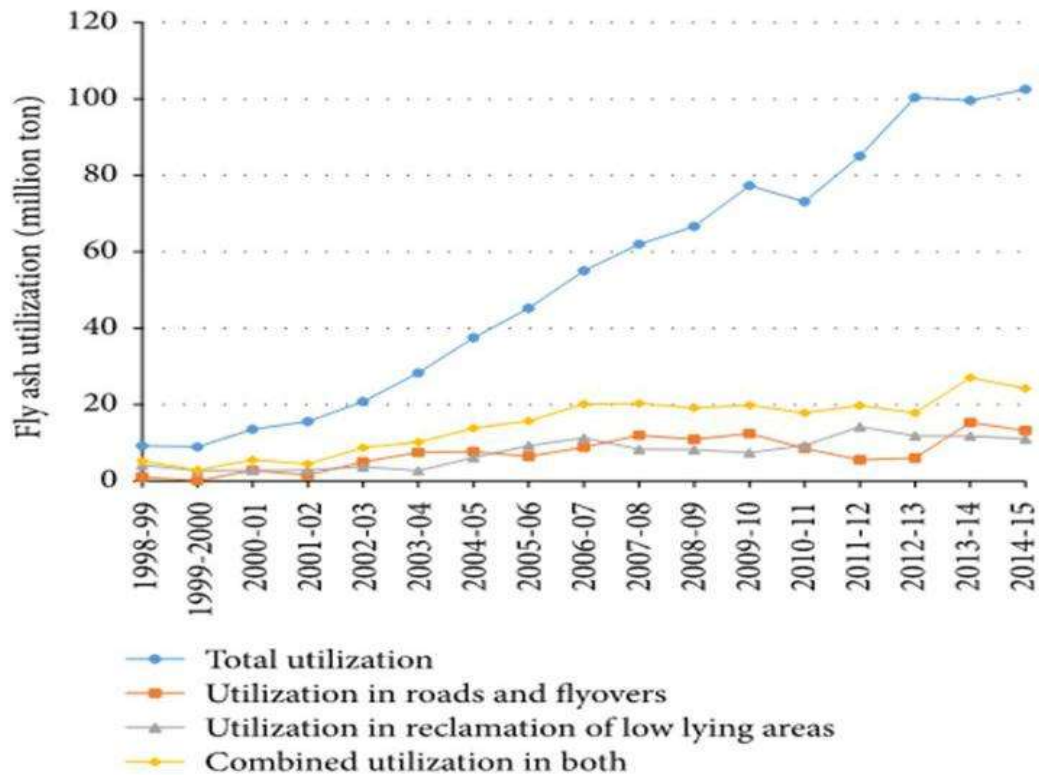
La réutilisation de l'AF dans le domaine de la modification des briques et sols, y compris la remise en état, les routes et les travaux de remblai, est illustrée dans le (tableau I.10) et on peut comprendre que l'utilisation des déchets a augmenté régulièrement au fil des ans, en particulier dans la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

Tableau 9 : Principaux déchets solides industriels générés en inde [60]

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau 10 : utilisations de l'AF dans l'ingénierie des sols [60]



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 [62 - 63].

**Chapitre II :Effets des adjuvants sur les propriétés
physiques, mécaniques et thermiques du tesson des
briques**

Chapitre II
Effets des adjuvants sur les
Propriétés physiques,
mécaniques et thermiques
du tesson des briques

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

II-1-briques

II-1-1 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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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.

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

- 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 36 [64]

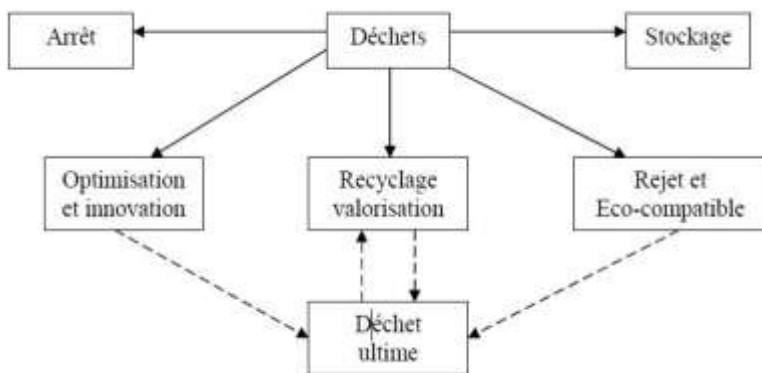


Figure 36 : Stratégies de traitement des déchets. [64]

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 37.

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

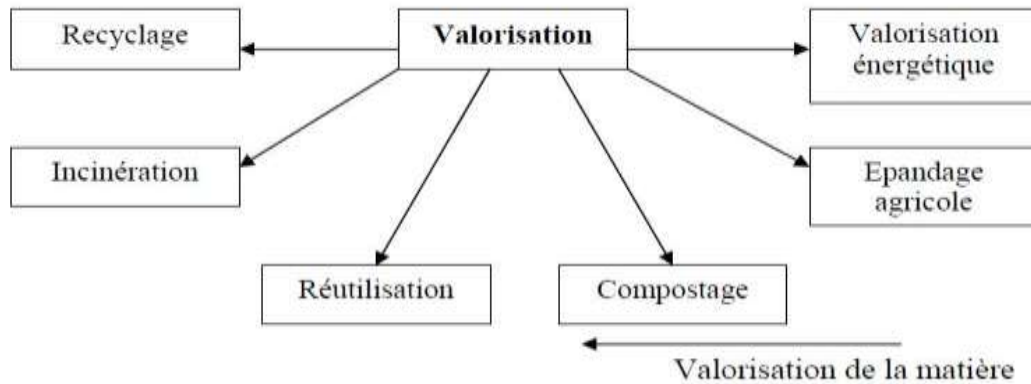


Figure 37 : Valorisation des déchets [64].

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...)

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

- 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 [65]**.

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 [65].

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

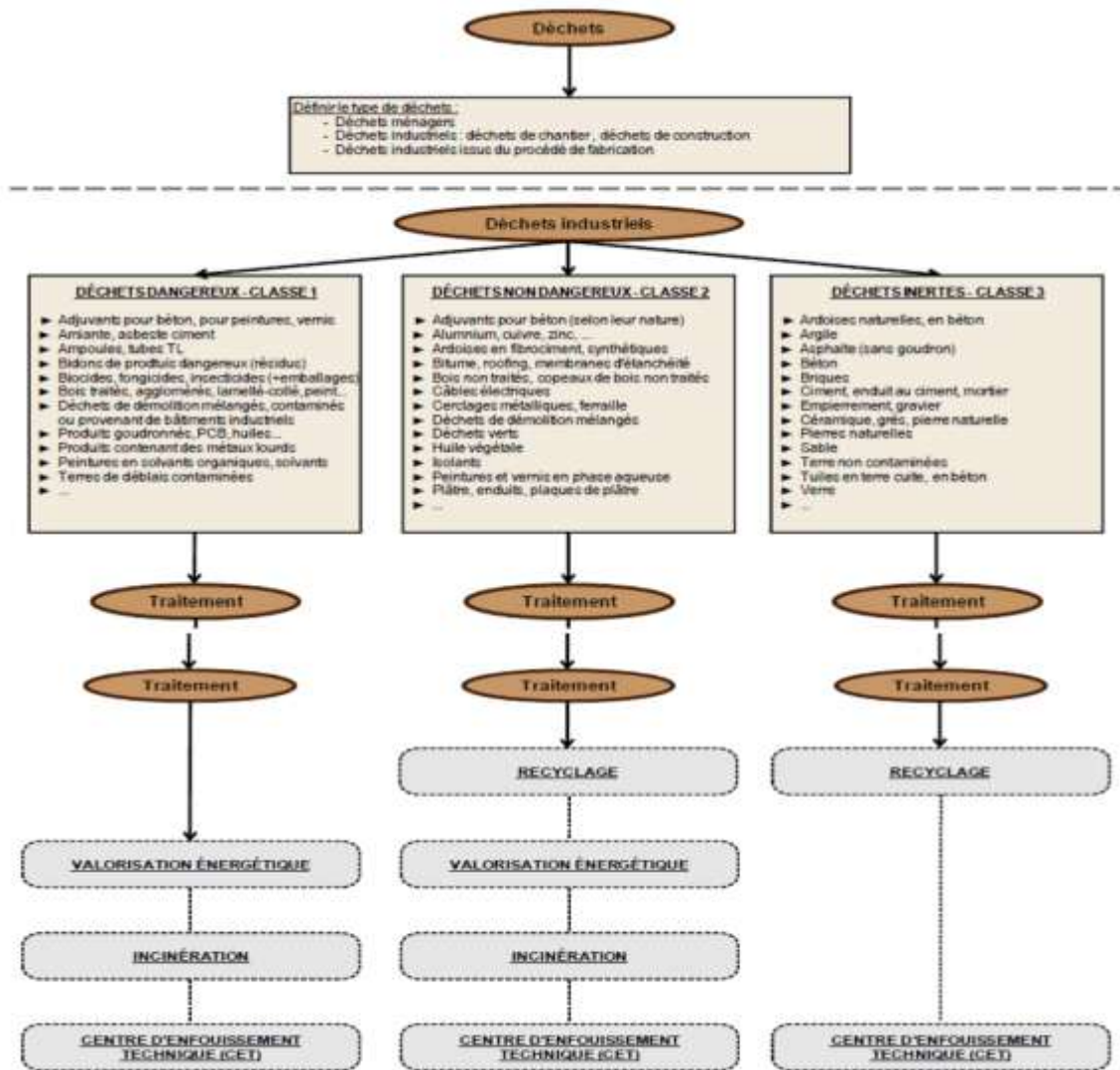


Figure 38 : Gestion et classement des déchets [65]

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.

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 tant 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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [66].

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 [66].

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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [66].

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 [66].

II.7.1 : 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 [66].

II.7.1.1 : Volume des déchets produits annuellement en Algérie

Tableau 11 : Volume des déchets produits annuellement en Algérie [66]

Déchets d'origine minérale (DM)	80.000 T
Boues minérales (B.M)	30.000 T
Résidus de pétrochimie et de	110.000 T

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

liquéfaction (R.P.L)			
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.7.1.2 : Typologie des déchets domestiques valorisables

Tableau 12 : Typologie des déchets domestiques valorisables [66]

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	

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [66].

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 [66].

II.7.2 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 [66].

(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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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. [66].

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 [66].

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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

répondre aux besoins collectifs de ses citoyens en matière de collecte, de tri ou de Transférer, reprendre ou éliminer ses déchets [66].

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 [66].

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 [66].

II.7. 3 : 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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [66].

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 [67 ;68].

Plusieurs revues de littérature sont disponibles sur les différentes qualités et sources de déchets industriels utilisés dans la fabrication des briques [69 ; 67 ;70 ; 71 ; 72 ; 73]. Une classification de déchets selon leurs propriétés et leur origine a été

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

réalisée selon le catalogue européen de déchets [74] et selon leur rôle comme matière alternative pour la fabrication de briques. En général, les déchets classés selon EWC [74] 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. 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 [74] est illustrée dans la Figure 39 [75].

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 ($[\text{Si}_2\text{O}_5 \text{ Al}_2(\text{OH})_4]$ ou sous une autre forme $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'illite $(\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10} [(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$, les smectites (ex. montmorillonite) ou les chlorites $(\text{Mg}_5(\text{Al}, \text{Fe})_2(\text{OH})_8)(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_{10}$). 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 kaolinitiques 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) [76]. 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 [77 ; 78 ; 79]. 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 [80 ; 81]. Ces déchets sont constitués essentiellement de schistes carbonatés et sont utilisés pour la production de briques commercialisées en Pologne.

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés

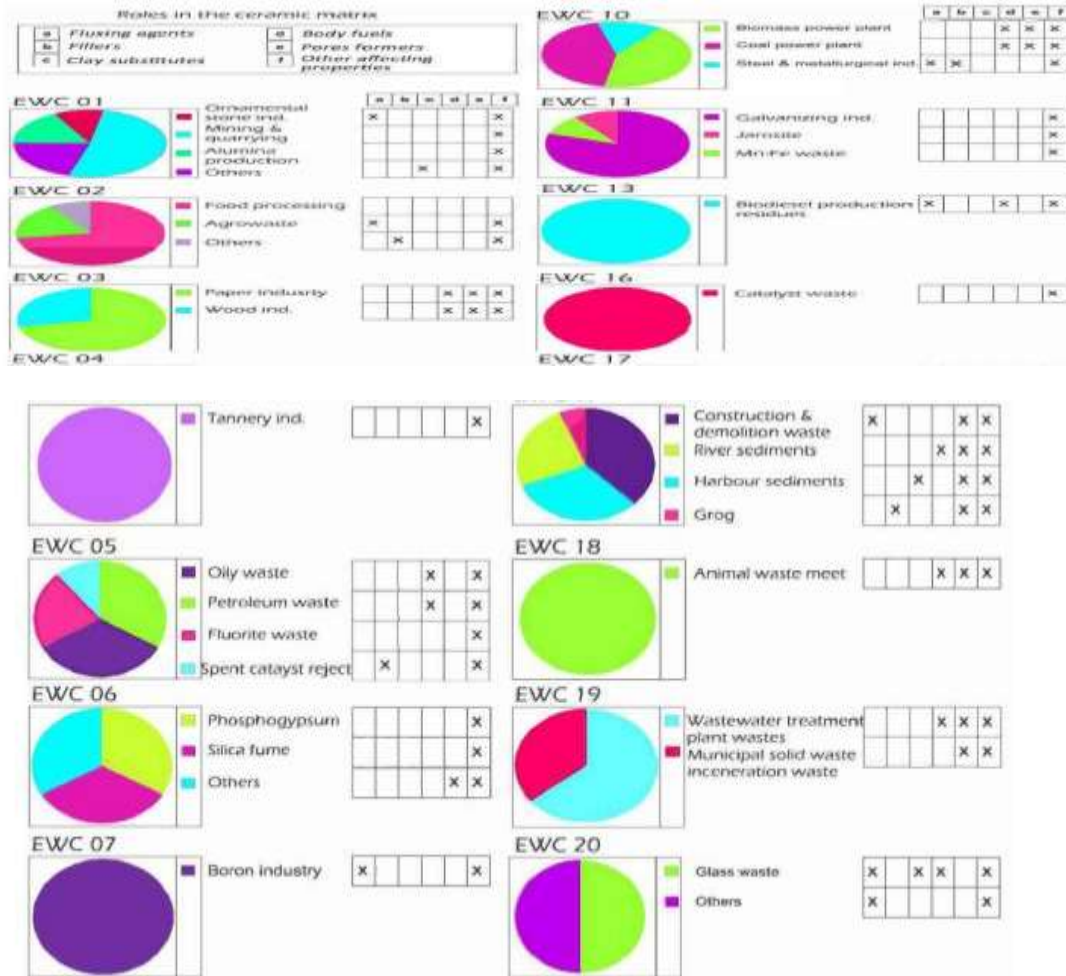


Figure 39 : Classification des types de déchets selon EWC (2002) et selon leur rôle potentiel dans la fabrication de briques cuites [75]

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.

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

II.9.1 : Composition chimique

La Figure 40 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.

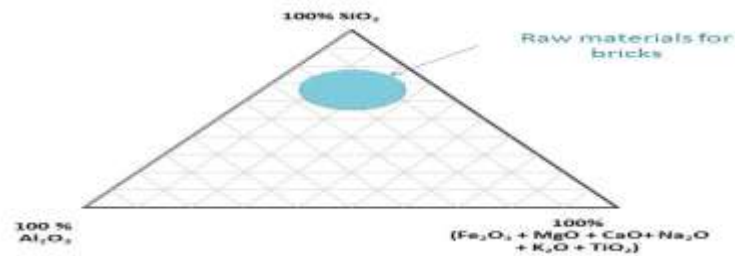


Figure 40 : Diagramme ternaire illustrant les compositions chimiques des Argiles adéquates pour la fabrication des briques d'argile [82].

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 SiO₂ (50-80%) et d'Al₂O₃ (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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 responsables 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.

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 [83] et améliorés avec le temps (Figure 41). On note que les très grandes concentrations de fines sont à écarter et que les granulométries moyennement grossières sont recherchées pour les briques.

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

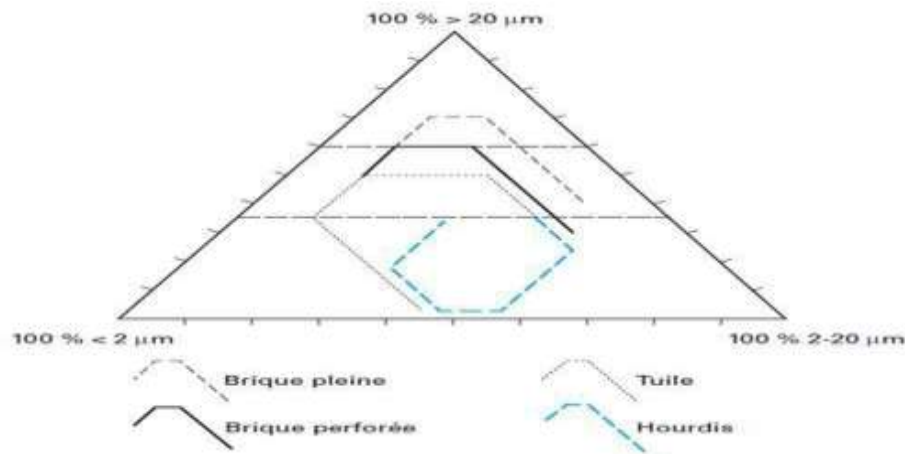


Figure 41 : Diagramme de Winkler et Niesper [83].

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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [84].

- 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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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,

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

une migration des sulfates à la surface des briques ou ils se déposent et forment d'un précipité blanc [85 ; 86]. 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 [87].

II.12. 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 [88].

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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [89].

- 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 [90].

-(**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 [91].

-(**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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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 [91].

-(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 [91].

II.12.1 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

Chapitre II : Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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

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,

Chapitre II :Effets des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du tesson des briques

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.

Chapitre III
Partie spécial étude
expérimentale

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

III-1 : Préparation des échantillons d'essai

III-1-1 : Introduction

L'incorporation des adjuvants dans le mélange de base des matériaux de construction est une solution prometteuse pour répondre aux contraintes économiques et environnementales d'aujourd'hui. En effet, l'ajout des adjuvants permet d'une part l'amélioration du pouvoir d'isolation thermique des briques, et d'autre part il présente l'une des voies de valorisation de plusieurs déchets. De nombreux additifs ont été étudiés dans les matériaux de construction. Le choix de ces adjuvants s'intègre dans une démarche de développement durable. Tel est le cas de l'étude menée par Sutcu (2009) sur l'utilisation des résidus du processus de recyclage des papiers dans la production des briques, dont le but est la valorisation de ces déchets dans un matériau durable. Elle montre que la conductivité thermique des échantillons a diminué de près de 50% pour un taux des résidus de 30%.

Demir (2008) a présenté le potentiel d'utilisation de plusieurs résidus organiques (sciure de bois, résidus de tabac et herbe) dans des briques en terre cuite. Ces résidus riches en fibres de cellulose, permettent d'augmenter la porosité des corps d'argile cuits à 900°C, et par la suite améliorent la résistance thermique. Un autre type de déchet a été valorisé par Chiang (2009) dans les briques de construction. Il s'agit de la paille de riz, un déchet agricole, de haute teneur en silice (plus de 90%) et de propriété isolante élevée, qui a été mélangé avec des boues issues du traitement d'eau potable, pour produire des matériaux de construction avec des porosités différentes, en fonction de la température de cuisson.

Topçu (2007) a étudié l'effet des proportions perlite - argile, sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques produites de ces mélanges. Ils ont montré que la conductivité thermique passe de 0.4 W/m.K pour une brique d'argile standard à 0.185 W/m.K pour une brique contenant 30% de perlite. De même, Veiseh (2003) a travaillé sur l'ajout du polystyrène, comme matériau porogène, à l'argile pour produire des briques légères de performance thermique optimale, en tenant compte de la résistance mécanique de ces produits.

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

Cette étude bibliographique a permis de définir et d'évaluer les potentialités d'amélioration thermique des matériaux de construction. Un des plus grands problèmes d'incorporer des adjuvants est l'augmentation de l'absorption d'humidité et la diminution de la résistance mécanique. Plusieurs adjuvants ont été étudiés en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, les contraintes économiques et techniques (possibilité de l'intégration dans la chaîne de production), et leurs disponibilités. adjuvant ont été retenus pour cette étude : billes de polystyrène.

III-2 : Préparer des échantillons de test

III-2-1 : Principe

Le principe est de mélanger 80% de l'argile, 20% de sable et 20% d'eau avec un poids de 78 g dans le bloc unitaire à incorporer dans les granulés de polystyrène en modifiant le rapport dans chaque groupe (1,25%, 1,5 %, 3% et 5%) dans cette brique, à soumettre après Il s'agit d'un ensemble de tests et de protocoles expérimentaux visant à déterminer et à évaluer l'effet de ces additifs sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de cet échantillon.

III-2-2 : Matériel utilisé

- 1 . Broyeur.
- 2 Malaxeur mélangeur.
3. Moule Cylindrique de (36×35 mm)
4. Presse hydraulique.
- 5.séchoir
6. Four.

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale



Figure 42 : Matériel utilisé pour la confection des éprouvettes.

III-2-3 : La préparation des échantillons

Les matières premières utilisées dans la fabrication des éprouvettes sont extraites de la carrière de BRIMATEC Factory. La composition du mélange est la même que celle des briques produites dans l'usine BRIMATEC. Il est principalement composé de 80% de matières premières et 20% de sable.

Le but de ce travail est de caractériser le comportement des briques produites en fonction du taux d'additif ; Pour cela j'ai fait différents mélanges. Les quantités d'échantillons de primates et de sable ont été déterminées pour tous les mélanges, et seule la proportion d'adjuvants variait. Ainsi, le mélange se compose d'argile broyée, de sable et de matériaux auxiliaires. La quantité d'eau à ajouter dans la préforme dépend de la nature du matériau auxiliaire, la teneur en eau est généralement d'environ 20 %. Agitation homogène du mélange.

La formation des échantillons est obtenue à l'aide du compresseur testé, comme le montre la figure 43. Ce dernier est prévu pour chasser l'air du mélange et améliorer sa cohésion.

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale



Figure 43 : Processus de fabrication des éprouvettes

Après mise en forme, l'étape de séchage est nécessaire pour éliminer l'eau résiduelle dans les produits. C'est très délicat et très important pour la qualité finale. Pour cela, il a été décidé de réaliser ce procédé dans le laboratoire de la Faculté de Technologie, Université de Mohamed Boudiaf M'Sila, à l'aide de séchoirs industriels, après le cycle de séchage illustré à la Figure 43.

Les échantillons ont été libérés dans le four tunnel. Le programme de cuisson utilisé est illustré à la Fig. 43. En effet, la température de combustion augmente de 80 °C à 573 °C, à une vitesse linéaire de 0,5 °C/min, puis augmente jusqu'à une température maximale de 800 °C, puisque les échantillons sont maintenus à cette température pendant 4h30. Ensuite, la température descend à 80 degrés Celsius.

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

Après cuisson, les faces des éprouvettes souffrent d'un manque de planéité et de parallélisme. La correction des échantillons est une étape essentielle et indispensable avant de procéder aux tests de caractérisation.

III-2-4 : Choix des adjuvants

Après l'étude bibliographique et compte tenu des contraintes économiques, un matériau auxiliaire a été sélectionné pour être inclus dans le mélange de base pour la fabrication des briques : les billes de polystyrène (voir Figure 44). Le choix de cet adjuvant s'est principalement justifié par sa disponibilité dans chaque région. En fait, il est facilement accessible. C'est un produit local qui est disponible en grande quantité dans la région.



Figure 44 : Billes de polystyrène

Le tableau 13 : résume les propriétés physiques de cet adjuvant. Les résultats sont obtenus après une série de tests pour réduire les marges d'erreur.

Adjuvants	Billes de polystyrène
Masse volumique apparente (g/cm ³)	0.054
Masse volumique absolue (g/cm ³)	0.232
Granulométrie	Entre 0.63mm et 2 mm : 50.1% > 2 mm : 49.9%

Les résultats ont également montré que la granulométrie du polystyrène est comparable à la fraction granulaire du sable, de l'ordre du limon et de l'argile. Cette substance auxiliaire a été ajoutée au mélange de base, dans différentes proportions massiques : - Polystyrène : 1,25%, 1,5%, 3%, 5%. Le choix des ratios est déterminé après une étude bibliographique et après concertation entre notre équipe de recherche, les ratios suivants ont été retenus : 1,25%, 3%, 5% En fonction des différentes proportions

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

d'additifs, une campagne expérimentale a été menée pour étudier l'effet de ces additifs sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques du placage de brique.

III.2.5. Caractérisation des éprouvettes à l'échelle du laboratoire

III.2.5.1. Aspect

Après correction de l'échantillon, les éprouvettes avec des billes de polystyrène présentent un état de surface acceptable, bien que de nombreux pores macroscopiques apparaissent à la surface Figure 45. Un examen de l'état des surfaces et de l'aspect général des différents échantillons a été réalisé. Echantillons contenant 1,25%, 3% et 5% de polystyrène, quelques fissures apparaissent sur les deux faces planes, ce qui n'est pas le cas pour les éprouvettes sans additifs (cas brique classique). En effet, ces fissures sont apparues après l'étape de cuisson, du fait de la taille des fines particules des granulés de polystyrène.



Figure 45 : échantillons sans adjuvant(A)et avec les billes de polystyrène(B)(C) et (D)

III-3 : Les argiles

III-3-1 : Définition et origine des argiles

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

Le mot « argile » englobe deux connotations, l'une liée à la taille des grains [92] et l'autre à la minéralogie [93]. En effet l'appellation argile diffère en fonction des disciplines et des domaines d'étude. Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique. Ainsi en géotechnique, où l'on s'intéresse avant tout au comportement mécanique des sols, on désigne par argile les matériaux de granulométrie inférieure à 2 μ m. Par contre dans le domaine de l'ingénierie où l'intérêt se porte sur la propriété plastique de l'argile le terme est utilisé pour décrire les phyllosilicates et plus particulièrement les minéraux argileux. Quelle que soit la discipline, la structure cristalline des argiles est importante, car elle est responsable des propriétés spécifiques du minéral.

De manière générale, les argiles sont des matériaux sédimentaires issus de la couche superficielle de l'écorce terrestre. Ces matériaux sont issus de la dégradation physique ou chimique des minéraux de roches telles que le granite ou le basalte par l'action des eaux surfaciques. Ils vont ensuite être déplacés par différents moyens (eau, vent) pour se déposer dans des bassins de sédimentation [93]. Leur structure résultante dépend du climat (température et humidité), de l'altitude, des minéraux présents dans leur environnement et de plusieurs facteurs géologiques (éruption volcanique, présence d'eau et des sels, etc.). En climat froid : l'altération est faible, les minéraux argileux sont identiques ou peu différents des minéraux de la roche (illite et chlorite), ils sont hérités de la roche d'origine. En climat chaud et humide, l'hydrolyse est poussée, la kaolinite se forme en milieu drainé, les smectites en milieu confiné. En fonction des roches-mères et du climat, les minéraux argileux résultants sont différents [94].

III-3-2-ANALYSES

Les essais ont été réalisés sur deux (2) échantions d'argiles codifiés AR 14 03884 et 03886,

Conformément à l'ordre de service N°00946 du 02/06/2014.

3 Analyse granulométrique par voie humide (fractions grossières)

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

Le tableau 14 : Analyse granulométrique par voie humide

Codes Echantillons	5.00 Mm	2.00 mm	1.00 Mm	0.63 Mm	0.200 mm	Cumul sur tamis 0.200 mm
AR 14 03884	0.20	0.10	0.03	0.07	0.07	0.47
AR 14 03886	4.60	2.80	0.33	0.20	0.10	8.03

Commentaire : Les refus cumulés sur tamis 0.200 mm, sont constitués d'argiles moyennement carbonatée avec présence de gypse dans l'argile 03884 et prédominant dans l'argile 03886.

III-4 : Essais mécaniques

Les essais de compression ont été réalisés au moyen d'une presse mécanique, comme le montre la figure 46. Les éprouvettes sont posées et centrées sur le plateau de cette machine. Elles sont de diamètre de 25 mm et de hauteur de 37 mm Les normes n'ont pas été respectées pour ces essais, qui imposent une hauteur minimale correspondant à deux fois la valeur du diamètre. En effet, le choix de la faible hauteur des échantillons a été fait pour minimiser les défauts internes dus à la fabrication artisanale des éprouvettes. L'utilité de ces essais est de pouvoir comparer les résultats et de voir l'influence des adjuvants sur les propriétés mécaniques.

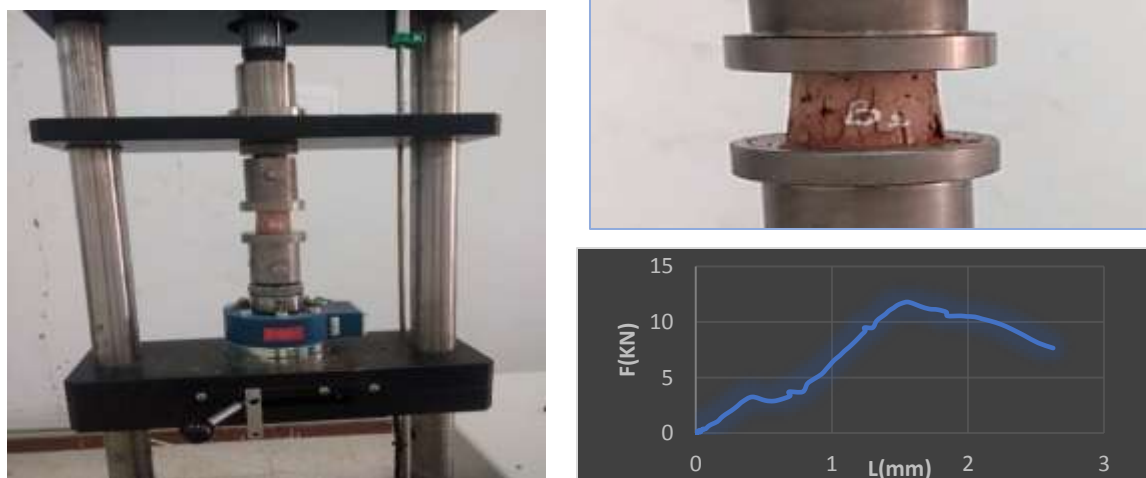


Figure 46 : Essais de compression

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

Les résultats des tests sont résumés à la figure 47. La résistance à la compression des éprouvettes sans mélange est en moyenne de 13,14 MPa. L'incorporation d'adjuvants a entraîné une diminution significative de la pression de compression maximale, atteignant une diminution de 51 % lorsque 5 % de polystyrène ont été ajoutés, par rapport à l'échantillon d'essai sans adjuvant.

$$R_c = F/S \Rightarrow S = r^2 \cdot \pi$$

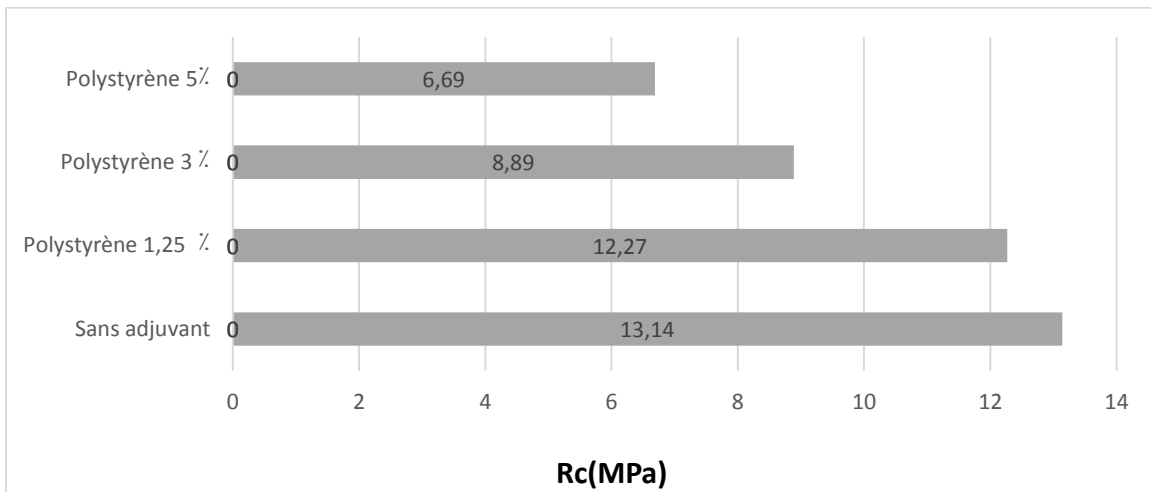


Figure 47 : Résistance à la compression des différentes éprouvettes

III-5-Essais thermiques

Le but principal de cette conductivité thermique est d'étudier l'effet de ces matériaux auxiliaires sur Conductivité thermique du ruban, améliorant ainsi la résistance Briques thermiques. Les mesures de conductivité thermique ont été déterminées dans l'un des équipements de laboratoire,



Figure 48 : Appareil de mesure conductivité thermique

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

Figure 48. Il s'agit de mesurer le flux de chaleur à travers l'échantillon, à l'aide de deux débitmètres placés en face de l'échantillon. Ces capteurs sont activés Également pour mesurer la différence de température à travers l'échantillon. La figure 49 présente les résultats de chacun de la conductivité thermique des différents échantillons d'essai, et La figure 50 montre les résultats de chacune des résistances thermiques des différents échantillons d'essai.

$$Q = -\lambda s \frac{\partial T}{\partial x} \Rightarrow \lambda = \frac{Q}{s} \cdot \frac{\partial x}{\partial T}$$

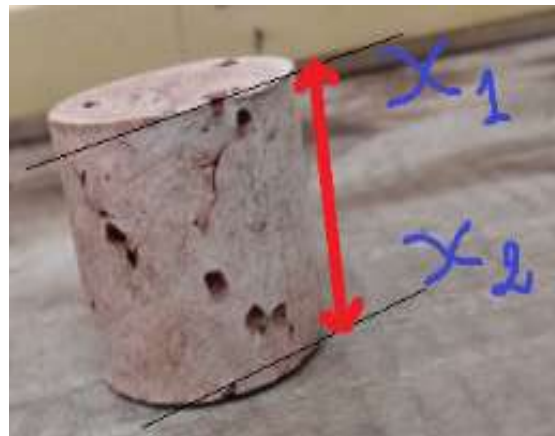


Figure 49 : points de mesure échantillons

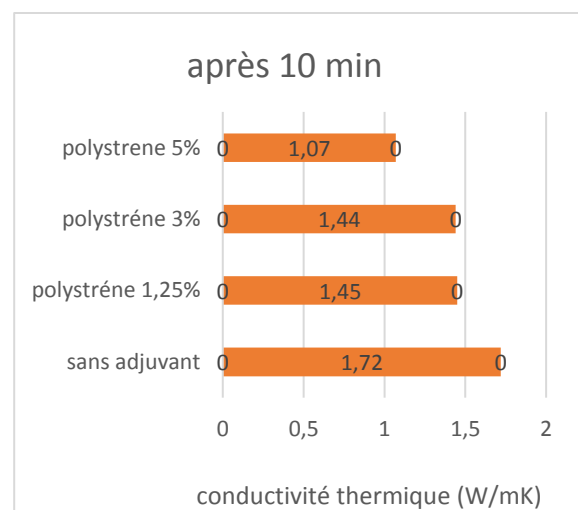
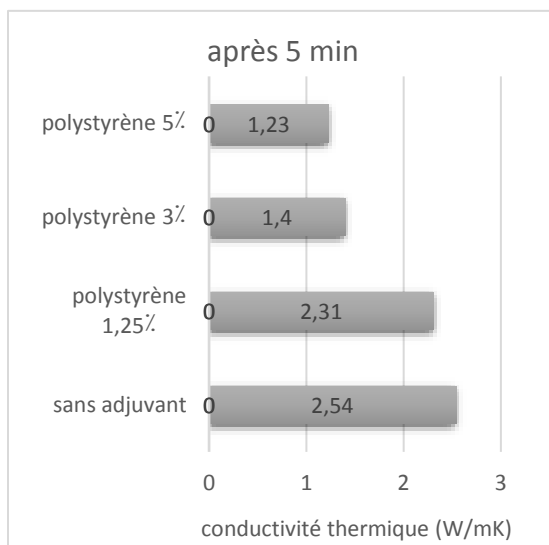


Figure 50 : Conductivité thermique des différentes éprouvettes.

Chapitre III : Partie spécial étude expérimentale

III-6-Recommandation

Bref, la production industrielle de masse a commencé avec la révolution industrielle qui a conduit à l'amélioration et à l'élévation du niveau de vie mais à un environnement dégradant et impur. Entraînant la pollution et le réchauffement climatique, entraînant la gestion du climat comme un système préoccupant. Mais il a rapidement suscité une participation suffisante basée sur le souci de l'environnement, ce qui a conduit à une recherche active sur le terrain. L'installation de briques est récemment devenue un domaine de gestion efficace des déchets. Cependant, l'utilisation de déchets dans la fixation des briques peut être soit en tant qu'attaches seules, soit en tant qu'additifs auxiliaires aux fixateurs primaires traditionnels tels que la chaux, le gypse et le ciment. Cette étude passe en revue les différents travaux réalisés à partir de différents déchets industriels tels que les cendres volantes, la paille, la poudre de marbre, le coton, les poussières de carrière et quelques autres déchets moins connus/approuvés pour la fixation des briques. Sur la base de la revue de la littérature sur l'utilisation des déchets industriels comme additif pour la fixation des briques, les conclusions suivantes peuvent être tirées et des recommandations appropriées formulées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude visait à atteindre les objectifs d'économie d'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de la construction, ce qui implique principalement l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Ainsi, l'intensification des exigences des nouvelles réglementations thermiques et conduit à des évolutions technologiques et industrielles dans les domaines de la construction. Ainsi, le mode constructif et le choix des matériaux de construction ont un impact fondamental sur la qualité environnementale et l'efficacité énergétique pour répondre à plusieurs questions liées à la valorisation des déchets industriels dans le domaine des matériaux et de la construction. Ces objectifs ont été développés et atteints sur la base d'une revue de la littérature, vérifiée par des procédures expérimentales et l'analyse des résultats expérimentaux de plusieurs chercheurs dans le domaine et des exigences en termes de propriétés physiques, mécaniques et environnementales. Tous ces aspects ont été analysés pour tirer des conclusions générales. Voici les différents résultats et observations.

L'objectif premier de toute recherche bibliographique est de fournir un contexte scientifique et technique à tout travail de recherche. Le premier chapitre de cet ouvrage comprend trois grandes rubriques : les terrassements, les briques et l'effet des additifs sur les propriétés physiques et thermiques des briques. Le deuxième chapitre est : Étudier l'effet des additifs sur les propriétés physiques et thermiques dans l'industrie de la brique.

Certaines des conclusions tirées de cette enquête sont présentées comme suit :

Premièrement, l'évaluation du comportement environnemental

Le comportement environnemental des briques constituées d'additifs a été évalué sur la base de différents tests de filtration par différents chercheurs. Le principe était d'évaluer la lixiviation des polluants au cours des différentes phases du cycle de vie de la brique : pendant sa vie (utilisation en construction) et en fin de vie (déchets de construction). Ces tests ont été réalisés sur des briques représentant les meilleures recettes. Les résultats des tests de lixiviation ont été comparés aux exigences législatives de l'environnement. Les résultats ont montré que les niveaux de polluants étaient

Conclusion générale

inférieurs aux seuils fixés par les organisations internationales de normalisation. À partir de là, des briques écologiques peuvent être construites.

Deuxièmement, l'évaluation des propriétés physiques et mécaniques des briques produites en fonction de la température de combustion et du taux d'additifs dans l'argile sur les propriétés des briques.

Toutes les propriétés physiques et mécaniques (telles que l'isolation thermique, l'absorption d'eau, la porosité, les pertes au feu, la résistance à la compression et/ou à la flexion) des briques cuites. La base des additifs a été évaluée par plusieurs chercheurs pour étudier l'effet des additifs. Les résultats des caractérisations ont été comparés aux exigences des différentes normes de construction. Sur la base des résultats obtenus, il a été possible de déterminer le taux de remplacement optimal pour chaque additif, et la plupart des recherches ont conclu que les briques faites d'additifs peuvent être fabriquées à partir de déchets industriels, et la production de briques en terre cuite a de nombreux aspects scientifiques, environnementaux, économiques et avantages sociaux.

- [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. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 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. *Eco materials 4, Paths towards, Sustainability conference*, November 2009, Bayamo, Cuba
- [5] Pesson, P. (1971). *La vie dans les sols*. Paris : Gauthier-Villars
- [6] Soltner, D. (1992). *Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol*. Sainte Gemmes sur Loire : Collection Sciences et Techniques Agricoles
- [7] Anger, R. (2011). *Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction* (Thèse de doctorat). Lyon, INSA, Lyon.
- [8] Moriset, S. 2018. 11 000 ans d'architecture de terre. Unpublished document
- [9] Casel, T. (2000). *Maisons d'argile en Midi-Pyrénées*. Toulouse : Privat
- [10] CRA terre [Centre de recherche et d'application pour la construction en terre], Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S. & Vitoux, F. (1979). *Construire en terre*. Paris : Alternatives et Parallèles.
- [11] Anger, R. & Fontaine, L., (2009). *Bâtir en terre, du grain de sable à l'architecture*. Paris : Belin
- [12] Ecoconsomo (2017). *L'argile dans la maison*. <http://www.ecoconso.be/fr/L-argile-dans-la-maison-du-sol-au-derniere-visite> le 11 avril 2017

- [13]Houben, H., Guillaud, H. 1994. Earth construction, Intermediate Technology publications1994, London
- [14]Delgado, M.C.J., Guerrero, I.C. The selection of soils for unstabilised earth building: Anormative review. Construction and Building Materials 21 (2007) 237–251.
- [15]Fathy, H. Architecture for the poor: An experiment in Rural Egypt. The University ofChicago. United States of America. 1973.
- [16]Morel, J.C., Mesbah, A., Oggero, M., Walker, P. Building houses with local materials:means to drastically reduce the environmental impact of construction. Building andEnvironment 36 (2001): 1119–1126.
- [17]Dethier, J., Eaton, R. For a Sustainable New Contract between Nature and Builders. Paris:Centre Pompidou. 2002
- [18]Pittet, D., Kotak T. Environmental impact of building technologies, a comparative study inKutch District, Gujarat State, India. Ecomateriales 4, Paths towards Sustainabilityconference, November 2009, Bayamo, Cuba.
- [19]Shukla, A., Tiwari, G.N., Sodha, M.S. Embodied energy analysis of adobe house.Renewable Energy 34 (2009): 755–761
- [20]Zami, M.S., Lee, A. Economic benefits of contemporary earth construction in low-costurban housing – State-of-the-art review. Journal of Building Appraisal, 5 (2010): 259-271.
- [21]Chel, A., Tiwari, G.N. Thermal performance and embodied energy analysis of a passivehouse: Case study of vault roof mud-house in India. Applied Energ, 86 (2009) 1956-1969
- [22]Houben H, G. H. (2006). *Traité de construction en terre*, CRATerre, éditions parenthèses.(France, Ed.) (Edition Pa).
- [23]CRATerre, H. HOUBEN et H. GUILLAUD, *Traité de Construction en Terre*,EditionParenthèses, Marseille, 1989

[24] Kaddour B A & Benchenna. (2017). Valorisation des tufs pour la fabrication des briques enterrées comprimées. Moulay Tahar saida.

[25] Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, La brique, l'or rouge du Midi Toulousain, Tourisme Médias Éditions, juin 2004, (ISBN 2-915188-04-1), p. 12-13

[26] Brique matériau,
Wikipédia([https://fr.wikipedia.org/wiki/Brique_\(mat%C3%A9riau\)#cite_note-fermeture_Wanlin-9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Brique_(mat%C3%A9riau)#cite_note-fermeture_Wanlin-9))

[27] Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, La brique, l'or rouge du Midi Toulousain, p. 53

[28] La briqueterie de Virebent, Mairie de Launaguet. Consulter le 30/09/2007

[29] Matériaux de construction « Cours en ligne matériaux de construction », « www.la.refer.org ».

[30] A. Sénac et J. J. Jung, Bulletin des sciences agricoles et économiques, quatrième section du Bulletin universel des sciences et de l'industrie, vol. 3 1825.

[31] Fermeture d'une briqueterie sur le site « Belgique : la briqueterie Wienerberger de Wanlinferme » [archive], lesarchivesdelaterrecuite.blogspot.com (consulté le 24 mai 2019).

[32] RICHARD P., « Adobe », mémoire Maître en environnement, Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010.

[33] MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie Compiègne, 2010

[34] CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production.

[35] DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla, 2007.

[36] CORPUS « Mur de briques en terre crue » Architecteur traditionnelle méditerranéenne, 2006

[37] RHONE A., « Le pisé » www.ageden.org, Edition Décembre 2010

- [38]CRA Terre « Blocs de terre comprimée normes » Série Technologies
- [39]LIVERT S., « Bâtir un mur en briques de terre compressée », Février2011.
- [40] C. E. (Charles E. Weaver, *Clays, muds, and shales*, vol. 44. Elsevier, 1989.
- [41]Fiche technique matériaux http://oci.cstb.fr/simulation/choix_proc.asp
- [42]CRATERre Centre International pour la Construction en Terre, H. GUILAUD, Ecole d'Architecte de Grenoble, Encyclopédie de Bâtiment Tome 2 Edition Wake 1997.
- [43]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
- [44]AVLISET I., « Matériaux de terre cuite » Technique de l'ingénieur, 1994.
- [45]Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, La brique, l'or rouge du Midi Toulousain, p.48-50
- [46]Sandrine Banessy et Jean-Jacques Germain, La brique, l'or rouge du Midi Toulousain, p. 52
- [47]Fédération Belge De La Brique, « Fabrication de brique », www.brique.be.
- [48]CONSULTING A., « Production De Briques D'argiles », Lagnane. Sénégal.
- [49]Collection mémento technique « Tuiles et briques de terre cuite » édition le moniteur, Paris1998
- [50]Matériaux de construction « Cours en ligne matériaux de construction », « www.la.refer.org».
- [51]Fédération Belge De La Brique « La brique de terre cuite », Juin2006.
- [52]QUELS SONT LES DIFFÉRENTS TYPES DE BRIQUES ?
<https://www.guide-artisan.fr/actualites/macon/les-differents-types-de-briques>
- [53]Types of Bricks – Detail Classification of Bricks <https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/191-types-of-bricks>

- [54]GIOVANNI P., « La brique fabrication et tradition constructives », édition EYROLLES, Octobre 2004
- [55]DELEBECQUE R., « Éléments de Construction Bâtiment », Edition Delagrave 1990
- [56]Echos, 13 novembre 2008, page 21
- [57]Bulletin de la Société de l'industrie minérale [archive], Dunod, juillet-septembre 1856(consulté le 24 mai 2019).
- [58]Marque déposée de la Fédération française des tuiles et briques.
- [59]Composition des briques – Fonction des ingrédients (<https://civiltoday.com/civil-engineering-materials/brick/132-brick-composition-ingredients-with-functions>)
- [60]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
- [61]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
- [62]AK Sabat et S. Pati, «Une revue de la littérature sur la stabilisation des sols expansifs à l'aide de déchets solides», Electronic Journal of Geotechnical Engineering , vol. 19, pp.6251–6267, 2014. Afficher sur: Google Scholar
- [63]M. Singh et A. Mittal, « Revue sur la stabilisation des sols avec des déchets », International Journal of Engineering Research and Applications, no. 2, pp. 11-16, 2014
- [64]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.

[65]Leila Zeghichi, etude des betons basiques a base des differents granulats, thesede doctorat, universite mohammed khider – biskra ,2006, p 7.

[66]K. Benabdeli, Gestion des déchets en Algérie : Entre stockage et valorisation, [en ligne],30/10/2019, consulté le 27/07/2020

[67]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, in: Pacheco-Torgal, F., Labrincha, P.B.L.A., Chindapasirt, S.K. (Eds.), Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks. Woodhead Publishing, Oxford, pp. 129-188

[68]Quijoma, N., Andrés, A., 2013. Incorporación de escoria Waelz al sector cerámico al sector cerámico: ejemplo de ecología industrial (Ph.D. thesis). Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica. Universidad de Cantabria.

[69]Bories, C., Borredon, M.-E., Vedrenne, E., Vilarem, G., 2014. Development of ecofriendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. Journal of Environmental Management 143, 186-196.

[70]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.

[71]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. Construction and Building Materials 63, 97-107.

[72]Phonphuak, N., Chindapasirt, 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., Chindapasirt, S.K. (Eds.), Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks. Woodhead Publishing, Oxford, pp. 103-127.

[73]Zhang, L., 2013. Production of bricks from waste materials- A review. Construction and Building Materials 47, 643-655

- [74]EWC, 2002. The European waste catalogue. Environmental protection agency. Informationon <http://www.epa.ie>
- [75]Coronado, M., 2014. Foundry wastes as new resources in ceramic processes- Anaylisis andmodelling of technological & environmental properties. Thesis Dissertation, University of Cantabria (Spain).
- [76]Samara, M., 2007. Valorisation des sédiments fluviaux pollués après inertage dans la briquecuite. Thèse de doctorat en génie civil, Ecole Centrale de Lille.
- [77]Cusido, J.A., Cremades, L.V., Gonzalez, M., 2003. Gaseous emissions from ceramicsmanufactured with urban sewage sludge during firing processes. *Waste Management* 23,273-280.
- [78]Cusido, J.A., Soriano, C., 2011. Valorization of pellets from municipal WWTP sludge inlightweight clay ceramics. *Waste Management* 31, 1372-1380
- [79]Lin, K.L., 2006. Feasibility study of using brick made from municipal solid wasteincinerator fly ash slag. *Journal of hazardous materials* 137, 1810-1816.
- [80]Ciesielczuk, J., 2015. Chapter 16 - Coal Mining and Combustion in the Coal Waste Dumps of Poland, in: Sokol, G.B.S.P.V. (Ed.), *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Elsevier,Boston, pp. 463-473.
- [81] Ryncarz, A., Bialas, J., 1995. Coal mining waste suitability for red ceramic production.Processing waste testing for usability in ceramic red products 7, 25-28.
- [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. *Fuel*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., Dondi, M., 2011. Technological behaviour and recycling potential of spent foundry sands in clay bricks. *Journal of Environmental Management* 92, 994-1002.

[85] 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. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio* 36, 619-629.

[86] 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. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 136, Part B, 1195-1203.

[87] Shahidzadeh-Bonn, N., Desarnaud, J., Bertrand, F., Chateau, X., Bonn, D., 2010. Damage in porous media due to salt crystallization. *Physical Review E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 81.

[88] 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." *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 752, pp. 588-592.

[89] Naganathan, S., Mohamed, A. Y. O., Mustapha, K. N. (2015) "Performance of bricks made using fly ash and bottom ash." *Construction and Building Materials*, Vol. 96, pp. 576-580.

[90] 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." *Construction and Building Materials*, Vol. 34, pp. 470-475.

[91] Alaa.A. Shakir, Sivakumar Naganathan, Kamal Nasharuddin Bin Mustapha. (2013). "Development of Bricks from Waste Material" *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(8): 812-818, 2013, ISSN 1991-8178

[92] Dr. Guettouche Amar, "Identification et classification des sols," p. 31.

[93] Banu, T., Billah, M. M., and Gulshan, F. (2013). "Experimental studies on fly ash-sand-lime bricks with gypsum addition." *American Journal of Material Engineering and Technology*, Vol.1, No. 3, pp. 35-40.

[94] M. E. Tucker, Sedimentary petrology : an introduction to the origin of sedimentary rocks. Blackwell Science, 2001.