

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par :

SERIDI Ines

**Thème : La valorisation de la boue des stations d'épuration dans
le domaine de génie civil**

Sous la direction de : **Dr. KHALDI. Nacera**

Juin 2024

Remerciements

*Avant tout, mes remerciements et ma gratitude à **ALLAH** le tout Puissant de m'avoir gardé en bonne santé et de m'avoir donné la force, le courage et la volonté d'accomplir ce modeste travail.*

J'adresse mes sincères remerciements à mes chers parents pour leur soutien moral et matériel, leurs encouragements dans les moments de faiblesse et leur soutien tout au long de mes études.

*Avec une profonde gratitude et un intérêt tout particulier, je remercie mon encadreur **Docteur KHALDI Nacera** pour son soutien, sa grande bienveillance, sa gentillesse, ses conseils et ses encouragements m'ont permis d'aboutir à ce travail, ses capacités techniques étaient d'un grand apport pour moi et sa présence tout au long de l'élaboration de ce mémoire.*

*Mes sincères remerciements également pour le **Docteur DORBANI Meriem** pour son aide et ses remarques constructives qui m'ont été très précieuses.*

*Je tiens à remercier aussi l'effectif de la **briqueterie ELRIAD de Bendjarah**, et spécialement **Mr HIMRI Ahmed , Ammar, Linda, Dounia, Halla, Ahlem** pour leurs aides lors de la fabrication de brique.*

*Je tiens à remercier aussi, **Pr NOUAOURIA Med Saleh**, directeur du laboratoire de génie civil et d'hydraulique LGCH, Guelma et **Dr BOUDJAHM Houcine** : chef de département d'architecture , pour leurs accueils au sein des laboratoires LGCH et d'architecture.*

*Je tiens à remercier **les membres du jury** d'avoir accepté de lire, présider et examiner mon travail.*

*Un grand merci à tous **les enseignants** qui ont contribué à assurer ma formation durant tout mon cycle universitaire et en particulier les enseignants et le personnel administratif du département de génie civil et hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'université 8 Mai 1945 de Guelma.*

Enfin mes remerciements vont pour tous mes Amis pour leurs encouragements et à toutes les personnes qui ont contribué de près ou loin dans l'aboutissement de ce mémoire.

Merci à toutes et à tous

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous qui me sont chère.

À Mes très chers parents, les premières personnes qui ont cru en moi, qui m'ont encouragé et soutenue le long de mon chemin. Merci pour vos sacrifices, dévouement et surtout de m'avoir fait autant de confiance, de n'avoir jamais douté de mes capacités et de m'avoir inculqué les valeurs justes de la vie, avec autant de sagesse.

*À Mes chères sœurs **Aya-Nouha-Ines** : témoins des étapes de ma vie, Dans ma joie et ma tristesse, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.*

*À Mon cher frère **Amine** pour son aide, encouragements et amour que dieu le protège.*

*À Mes chères amies **Dhikra et Manel**, vos soutiens sans faille et vos esprits libres ont toujours éclairé mon chemin. En écrivant ces lignes, je vous remercie de l'énergie positive que vous apportez dans mon existence.*

***Dhikra** ta présence dans mon cœur est un trésor précieux. Merci, pour ton amitié inépuisable.*

*À Mes encadreurs **Dr. KHALDI Nacera et Dr. DORBANI Meriem**
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible*

Merci d'être toujours là pour moi.

Sommaire :

Liste des figures

Liste des tableaux

Résumé

Chapitre 1: Généralités	1
I Partie 1 : Notions de base sur la brique.....	1
I.2 Historique	1
I.3 Définitions	2
I.4 Composantes de briques	2
I.4.1 Les argiles	2
I.4.2 Types d'argiles	3
I.4.2.1 Argiles plastiques grésantes	3
I.4.2.2 Argiles plastiques réfractaires	3
I.4.2.3 Argiles réfractaires	3
I.4.2.4 Argiles rouges	3
I.4.3 Types de briques.....	3
I.4.4 Procédés de fabrication de la brique.....	8
I.4.5 Caractéristiques des briques.....	10
I.4.6 Classes de briques	11
I.4.6.1 Briques de première classe.....	11
I.4.6.2 Briques de deuxième classe	12
I.4.6.3 Briques de troisième classe	12
I.4.6.4 Briques de quatrième classe	12
I.4.7 Les avantages et les inconvénients de la brique.....	13
Partie II : le mortier et le béton	15
II.1 Introduction	15

II.2 Les mortiers	15
II.2.1 Historique	15
II.2.2 Définition.....	15
II.2.3 Types de mortier	16
II.2.3.1 Le mortier-ciment.....	16
II.2.3.2 Le mortier-hydrofuge	16
II.2.3.3 Le mortier réfractaire.....	16
II.2.3.4 Le mortier de chaux.....	17
II.2.3.5 Le mortier-colle.....	17
II.2.3.6 Mortier bâtards	17
II.2.3.7 Mortier rapide	17
II.2.4 Caractéristiques des mortiers	18
II.2.4.1 La prise	17
II.2.4.2 Résistances mécaniques.....	18
II.2.4.3 Retraits et gonflement	19
II.2.5 Le rôle d'utilisation de mortier	19
II.2.6 Emplois des mortiers.....	19
II.3 Le béton	21
II.3.1 Histoire du béton	21
II.3.2 Définition.....	21
II.3.3 Types de béton	21
II.3.3.1 Les bétons légers	21
II.3.3.2 Les bétons lourds.....	22
II.3.3.3 Les bétons Hautes Performances (BHP)	22
II.3.3.4 Les bétons de fibres.....	22
II.3.3.5 Béton auto-plaçant (BAP)	22
II.3.3.6 Béton armé.....	22

II.3.3.7 Béton préfabriqué.....	22
II.3.4 Composants de béton	22
II.3.5 Béton ordinaire.....	23
II.3.5.1 Définition.....	23
II.3.5.2 Formulation du béton ordinaire	23
II.3.5.3 Les Caractéristiques du béton ordinaire	24
II.3.5.3.1 A l'état frais	24
II.3.5.3.2 A l'état durci	24
II.3.5.4 utilisation du béton.....	25
II.3.5.5 Les Avantages et les Inconvénients	25
II.3.5.5.1 Les Avantages	25
II.3.5.5.2 Les inconvénients.....	25
II.4 Conclusion.....	26
Chapitre II La valorisation des déchets dans le génie civil.....	27
II.1 Introduction	27
II.2 Les déchets	27
II.2.1 Différents types de déchets.....	27
II.3 Les boues issues des stations d'épuration.....	28
II.3.1 Définition.....	29
II.3.2 Type des boues	29
II.3.3 Les caractéristiques des boues.....	31
II.3.4 La composition de la boue.....	31
II 3.4.1 Matières organiques.....	32
II 3.4.2 Éléments fertilisants	32
II 3.4.3 Éléments traces métalliques.....	32
II 3.4.5 Composés organiques	32

II 3.4.5.1 Composés organiques non toxiques	32
II 3.4.5.2 Composés organiquetoxiques	33
II 3.4.5.3 Organismes pathogènes	33
II.3.5 Filières de traitement des boues.....	33
II.4 Situation du traitement des eaux usées en Algérie et production de boues	33
II.5 Règlementation nationale et gestion des boues	34
II.6 Principales filières de valorisation de la boue d'épuration en Algérie.....	35
II.7 Différentes filières de valorisation des boues	36
II.7.1 Utilisation en tant que matériau de recouvrement ou de revêtement dans les centres de stockage.....	36
II.7.2 Utilisations des boues en tant que produits ou additifs de traitement	37
II.7.3 Utilisation dans le domaine du traitement des effluents liquides	37
II.7.4 Valorisation des boues en tant que matières premières secondaires	37
II.8 Valorisation des boues d'épuration dans le domaine de la construction	38
II.9 Avantages d'utilisation de la boue d'épuration recyclée dans le domaine De la construction	38
II.9 .1 Avantages environnementaux.....	38
II.9.2 Avantages économiques	39
II.9.3 Avantages techniques	39
II.10 Conclusion	40
Chapitre III : Matériaux et procédures expérimentales	41
III.1 Introduction	41
Partie 1 : Caractérisation des matériaux	42
III.2.1 Matériaux de construction	42
III.2.1.1 Caractéristiques physiques des graviers	43
III.2.1.2 Caractéristiques mécaniques des graviers	43

III.2.1.3 Les caractéristiques chimiques des graviers.....	44
III.2.2 Les caractéristiques du sable	44
III.2.3 Les caractéristiques du ciment	45
III.2.4 Eau de Gachage	45
III.2.5 Les caractéristiques de l'adjuvant	46
III.2.6 Les caractéristiques de l'argile.....	46
III.2.2 Les caractéristiques de la boue d'épuration	47
III.2.7.1 Localisation de boues prélevées	47
III.2.7.2 Préparation de la boue	47
III.2.7.3 Caractéristiques chimiques.....	48
Partie II : Protocol expérimental	49
III.4 Programme expérimental	49
III.4.1. La Brique.....	49
III.4.1.1 Processus de fabrication de brique	50
III.4.1.1.1 la préparation de la matière première.....	50
III.4.1.1.2 Façonnage.....	51
III.4.1.1.3 Séchage.....	52
III.4.1.1.4 Cuisson	53
III.4.2 Mortier.....	53
III.4.2.1 Confection des éprouvettes de Mortier	54
III.4.3 Béton	56
III.5 Méthodologie des essais.....	58
III.5.1. Essais Physiques.....	58
III.5.1.1 Essai d'absorption	58
III.5.1.2 Essai de l'humidité.....	59

III.5.2 Essais Mécaniques.....	60
III.5.2.1 Essai mécaniques sur le béton et la brique	60
III.5.2.1.1 La résistance en compression	60
III.5.2.1.2 La résistance a la traction par felxion.....	61
III.5.2.2 Essai mécaniques sur le mortier	62
III.5.2.2.1 Essai de flexion trois points	62
III.5.2.2.2 La résistance de compresion	62
III.6 Conclusion.....	64
Chapitre IV : Analyse et interprétation des résultats.....	65
IV. 1 Introduction.....	65
IV.2 Essai de la capacité d'absorption d'eau (CAE).....	66
IV.3 Essai d'humidité.....	66
IV.4 Influence du taux de la boue sur la résistance.....	67
IV.4.1 Évolution de la résistance à la compression.....	67
IV.4.1.1 Le béton.....	67
IV.4.1.2 La brique	70
IV.4.1.3 Le mortier.....	71
IV.4.2 Évolution de la résistance à la flexion.....	73
IV.4.2.1 La brique	73
IV.4.2.2 Le mortier.....	75
IV.5 Conclusion.	78
Conclusion Générale	80
Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Partie 1 : Notations de base sur la brique

Figure 1.1: Argile réfractaire	Page 03
Figure 1.2: Argile rouge	Page 03
Figure 1.3: brique en terre crue	Page 04
Figure 1.4: La brique d'adobe	Page 04
Figure I. 5 : Construction d'un mur en pisé	Page 04
Figure I .6 : Blocs de terre comprimée	Page 06
Figure I.7 : Les briques creuses classiques.	Page 06
Figure. 1.8 : Brique alvéolaire	Page 07
Figure. I.9 : Briques réfractaires avec des différents couleurs	Page 07
Figure. I.10 : Quelques utilisations de la brique pleine.	Page 08
Figure I.11 : Produit en briques silico-calcaire	Page 08
Figure I.12: procédé général de fabrication de la brique.	Page 09

Partie II : Le mortier et le béton

Figure. II.1: Mortier.	Page 15
Figure. II.2 : Constituants des mortiers classiques.	Page 16
Figure II.3: Les différents types des mortiers.	Page 17
Figure II.4: Moule pour moulage des éprouvettes de mortier.	Page 18
Figure II.5: Dispositif de rupture en compression.	Page 18
Figure II.6: Joints de maçonnerie.	Page 19
Figure II.7 : Application d'enduit.	Page 20
Figure II.8: Calage d'un poteau en charpente métallique.	Page 20
Figure II.9 : Béton.	Page 21
Figure II.10 : Les constituants de béton.	Page 23

CHAPITRE II :

Figure. II.1 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration	Page 29
Figure. II.2 : La boue d'épuration	Page 29
Figure. II.3 : Schéma de types de boues selon les filières de traitement des eaux	Page 30
Figure. II.4: Techniques de traitement des boues et leurs destinations	Page 36

CHAPITRE III:

Partie 1 : Caractérisation des matériaux

Figure III.1: gravier 15/25	Page 42
Figure III.2 : gravier 5/15	Page 42
Figure III.3 : Ciment utilisé	Page 45
Figure III.4 : Adjuvant utilisé	Page 46
Figure III.5: l'argile utilisée	Page 47
Figure III.6 : la boue sèche	Page 48

Partie II : Protocol expérimental

Figure III.7 : les différentes briques testées	Page 50
Figure III.8 : Le broyeur utilisé	Page 51
Figure III.9 : les différentes étapes de façonnage	Page 51-52
Figure III.10 : le séchoir	Page 52
Figure III.11 : Le four utilisé	Page 53
Figure III.12 : Le processus de fabrication du mortier	Page 55
Figure III.13 : Essai d'étalement des mortiers	Page 56
Figure III.14 : Les différentes étapes de fabrication du béton	Page 57-58
Figure III.15 : Essai d'absorption d'eau	Page 59
Figure III.16 : Essai de l'humidité	Page 59
Figure III.17 : La presse utilisée	Page 60
Figure III.18 : Essai de la résistance à la traction par flexion de brique	Page 61
Figure III.19 : L'essai de flexion à l'état durci	Page 62
Figure III.20 : Essai de compression réalisé sur les éprouvettes (4 x 4 x 16) cm ³	Page 63

CHAPITRE IV:

Figure IV.1 : Mode de rupture des éprouvettes par la presse	Page 67
Figure IV.2 : Variation de la résistance en compression du béton en fonction du dosage la boue des stations d'épuration	Page 68
Figure IV.3 : Mode de rupture de la brique par la presse	Page 70
Figure IV.4 : Variation de la résistance en compression de la brique en fonction du dosage la boue des stations d'épuration	Page 70
Figure IV.5 : Mode de rupture des éprouvettes de mortier par la presse.	Page 71
Figure IV.6 : Variation de la résistance en compression des éprouvettes De mortier en fonction du dosage la boue des stations d'épuration	Page 72
Figure IV.7 : Mode de rupture en traction par flexion de la brique	Page 73
Figure IV.8 : Variation de la résistance à la flexion de la brique en fonction du dosage de la boue	Page 74
Figure IV.9 : Mode de rupture en traction par flexion des éprouvettes de mortier	Page 75
Figure IV.10 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la boue	Page 76

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I.1 : Composition chimique de l'argile	Page02
Tableau I.2 : les Caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, brique de terre comprimée)	Page10
Tableau I.3 : Caractéristiques des briques de terre cuite (briques creuses, ordinaires)	Page 10
Tableau I.4 : Propriétés de brique silico-calcaire	Page 11
Tableau I.5 : Les avantages de la brique	Page 13
Tableau I.6 : Les inconvénients de la brique	Page 14

CHAPITRE II :

Tableau II.1: Les caractéristiques des boues	Page 31
Tableau II.2: Stations d'épuration en Algérie.	Page 34
Tableau II.3: Teneurs en éléments traces métalliques pour les boues en Algérie selon la Norme NA 17671	Page 35

CHAPITRE III :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques des graviers	Page 43
Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des graviers	Page 43
Tableau III.3 : Compositions chimiques des graviers	Page 44
Tableau III.4 : Caractéristiques du sable	Page 44
Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du ciment	Page 45
Tableau III.6 : Analyse chimique de l'adjuvant.	Page 46
Tableau III.7 : Caractéristiques chimiques de la boue	Page 48
Tableau III.8 : Compositions des Briques (Kg/m ³).	Page 49
Tableau III.9 : Composition des éprouvettes de mortier	Page 54
Tableau III.10 : l'étalement des mortiers	Page 55
Tableau III.11: Composition des bétons testés	Page 57

CHAPITRE IV:

Tableau IV.1 Variation de CAE en fonction du dosage de la boue.	Page 66
Tableau IV.2 Variation du taux de l'humidité en fonction du dosage de la boue	Page66
Tableau IV.3 : Variation de la résistance en compression des bétons en onction du dosage la boue des stations d'épuration	Page68
Tableau IV.4 : Variation de la résistance en compression de la brique en fonction du Dosage de la boue	Page70
Tableau IV.5: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du Dosage de la boue	Page72
Tableau IV.6 : Variation de la résistance à la flexion de la brique en fonction du dosage de la boue	Page74
Tableau IV.5 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la boue	Page75

Résumé

Résumé :

La valorisation des boues d'épuration dans le béton, mortier et brique présente un potentiel intéressant pour réduire les déchets et valoriser ces ressources.

L'étude s'est concentrée sur l'incorporation directe des boues brutes dans différentes matrices cimentaires (béton, mortier) et argileuses (briques). Et d'ajuster précisément les dosages maximum admissibles ($\leq 20\%$ pour le béton/le mortier, 0-60% pour la brique).

Dans un premier temps, les essais de capacité d'absorption d'eau (CAE) et d'humidité interne ont mis en évidence des comportements contrastés selon le matériau et le dosage en boues.

Ensuite, des essais ont été menés pour évaluer l'impact de cette incorporation sur les propriétés mécaniques clés comme la résistance à la compression et à la flexion, essentielles pour la tenue structurelle et la durabilité.

La discussion et l'interprétation des résultats des essais mécaniques ont été réalisés sur différents matériaux de construction (béton, brique, mortier) incorporant des dosages variables de boues de station d'épuration.

Mots clés : Boues d'épuration, valorisation, éco- matériaux, résistances mécaniques, prétraitement boues, dosages optimisés.

ملخص:

تقدم عملية تثمين حمأة محطات المعالجة في الخرسانة، الملاط والطوب إمكانات واعدة لتقليل النفايات وتثمين هذه الموارد.

ركزت الدراسة على الإدماج المباشر للحمأة الخام في مصفوفات إسمنتية مختلفة (الخرسانة، الملاط) وطينية (الطوب). وضبط الجرعات القصوى المسموح بها بدقة ($\geq 20\%$ للخرسانة/الملاط، 0-60% للطوب).

في البداية، أظهرت اختبارات قدرة امتصاص الماء (CAE) والرطوبة الداخلية سلوكيات متباينة حسب المادة والجرعة من الحمأة.

ثم تم إجراء اختبارات لتقييم تأثير هذا الإدماج على الخصائص الميكانيكية الرئيسية مثل مقاومة الضغط والانثناء، اللتان تعتبران أساسيتين للمتانة الإنشائية والديمومة.

تمت مناقشة وتفسير نتائج الاختبارات الميكانيكية على مواد بناء مختلفة (الخرسانة، الطوب، الملاط) تحتوي على جرعات متغيرة من حمأة محطات المعالجة.

الكلمات المفتاحية: حمأة المعالجة، التثمين، مواد البناء الصديقة للبيئة، المقاومة الميكانيكية، المعالجة المسبقة للحمأة، الجرعات المثلى.

Abstract:

The valorization of sewage sludge in concrete, mortar, and brick presents an interesting potential for reducing waste and leveraging these resources.

The study focused on the direct incorporation of raw sludge into various cementitious matrices (concrete, mortar) and clay-based matrices (bricks). And precisely adjusting the maximum allowable dosages ($\leq 20\%$ for concrete/mortar, 0-60% for brick).

Initially, water absorption capacity (WAC) and internal moisture tests highlighted contrasting behaviors depending on the material and sludge dosage.

Then, tests were conducted to evaluate the impact of this incorporation on key mechanical properties such as compressive and flexural strengths, essential for structural integrity and durability.

The discussion and interpretation of the mechanical test results were carried out on different construction materials (concrete, brick, mortar) incorporating variable dosages of sewage sludge.

Keywords: Sewage sludge, valorization, eco-materials, mechanical strengths, sludge pretreatment, optimized dosages.

Introduction

Générale

Introduction générale

Dans un contexte de développement durable et d'économie circulaire, la valorisation des déchets et sous-produits industriels comme matières premières alternatives dans les matériaux de construction soulève un grand intérêt [Zhang, 2013, Morone et al, 2020]. Cependant, leur incorporation ne doit pas se faire au détriment des propriétés d'usage essentielles, notamment les performances mécaniques, garantes de la tenue structurelle et de la durabilité des ouvrages [Imbabi et al, 2012].

Cette étude s'intéresse à l'utilisation des boues issues des stations d'épuration comme substitut dans différentes matrices à base de liants hydrauliques : le béton, le mortier et la brique. Les boues, riches en matières organiques et minérales, représentent en effet un gisement de déchets abondant à valoriser [Tantawy et al, 2019, Pan et al, 2003]. Leur incorporation permettrait de réduire les impacts environnementaux tout en préservant les ressources naturelles.

L'objectif est d'évaluer l'influence de différents dosages de cette boue sur les résistances mécaniques clés en compression et en flexion. Ces propriétés conditionnent en grande partie la capacité portante et la durabilité des matériaux de construction [Amin et al, 2017, Yong Yuan et al, 2022]. Des essais normalisés ont été menés sur des éprouvettes avec des teneurs en boue allant jusqu'à 20% pour le béton et mortier, et 60% pour la brique.

Au-delà de la présentation détaillée des résultats expérimentaux, ce travail vise à analyser les mécanismes mis en jeu et les raisons des éventuelles dégradations ou améliorations de propriétés, en s'appuyant sur la littérature scientifique récente. Les différentes stratégies envisageables pour incorporer la boue de manière contrôlée et valorisante, tout en maintenant ou améliorant les résistances mécaniques, seront ensuite exposées [Bahurudeen et Santhanam, 2015, Tantawy et al 2015].

Objectif

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'impact de l'incorporation de boues de stations d'épuration sur les performances mécaniques clés que sont la résistance à la compression et la résistance à la flexion des matériaux de construction suivants : le béton, le mortier et la brique.

Plus spécifiquement, les objectifs détaillés sont :

1. Déterminer l'influence de différents dosages de boue (de 0% à 20% pour le béton et mortier, jusqu'à 60% pour la brique) sur la résistance en compression et en flexion de ces matériaux à différents âges (7, 14 et 28 jours).
2. Analyser et interpréter les résultats obtenus afin de comprendre les mécanismes mis en jeu et les raisons de la dégradation ou non des propriétés mécaniques en fonction du taux d'incorporation de boue.

3. En s'appuyant sur la littérature scientifique récente, expliquer les phénomènes observés comme les éventuels effets perturbateurs de la boue sur la formation des matrices cimentaires et argileuses, l'introduction de défauts microstructuraux, etc.
4. Identifier les dosages critiques au-delà desquels les pertes de résistances mécaniques deviennent trop importantes pour chaque type de matériau.
5. Présenter les différentes stratégies envisageables pour valoriser ces boues résiduelles dans les matériaux de construction tout en préservant, voire en améliorant, leurs performances mécaniques requises. Ces pistes incluent le traitement préalable de la boue, l'optimisation des dosages, son association à d'autres additions, l'ajustement des liants et conditions de cure.
6. Fournir des recommandations sur les conditions d'incorporation optimales de ces boues selon le matériau visé, en alliant valorisation des déchets et propriétés mécaniques satisfaisantes pour les applications en construction.

En somme, ce travail vise à déterminer la faisabilité et les conditions permettant de recycler ces boues d'épuration au sein des bétons, mortiers et briques d'un point de vue mécanique.

Chapitre I

Généralités sur : La brique, le béton et le mortier comme matériaux de construction

Chapitre 1

Généralités

I Partie 1 : Notions de base sur la brique

I.1 Introduction

C'est depuis l'apparition de forme urbaine de vie de civilisation que l'homme a découvert l'argile comme matériau de base pour la fabrication de matériaux pour la construction de son abri.

La brique comme matériaux de construction a été utilisée par l'homme depuis l'antiquité qui ne cesse d'être le matériau<<noble par excellence>> permettant au regroupement urbain un remplissage d'espace et de paysage à travers le monde.

Aujourd'hui, et malgré le développement industriel et technologique géant de l'humanité, l'utilisation de matériaux divers et une variété importante de procédés de construction. L'homme ne cesse de découvrir que la brique reste un matériau facile à obtenir, économique, écologique et façonner d'une manière irrésistible au paysage urbain.

I.2 Historique

L'origine de la brique remonterait à sept mille ans avant J-C, dans la région du tigre et de l'Euphrate : les premières maisons en briques ont été découvertes en IRAK et l'on estime que l'usage de la brique s'étendra rapidement en Mésopotamie jusqu'à tout le Moyen-Orient. Son utilisation s'est généralisée au 3^{emillénaire}, à l'ère de sédentarisation des populations humaines.

C'est le besoin de se protéger de façon durable des intempéries et des prédateurs qui impose à l'homme la nécessité de trouver des matériaux durs et résistants.

Lors de la révolution industrielle, les briqueteries se regroupent, et forment de véritables usines. Des fours à charbon permettent d'augmenter la capacité de production : des fours plus grands, plus efficaces (les fours HOFFMANN, où la production de briques se fait en continu, le four BULL. etc.). Et des grandes cheminées de briques deviennent les éléments caractéristiques de ces briqueteries [Lafhaj, 2008].

En 1830, AUGUSTE VIREBENT dépose le brevet d'invention d'un système de presse à briques. Ceci marque le début de l'industrialisation de la brique. L'après-guerre marque le remplacement progressif de la brique par le ciment et l'acier. Fin 20^{ème} siècle, les chocs pétroliers à répétition, la prise de conscience écologique consécutive au dérèglement climatique, conduisent l'industrie à briqueterie à des innovations majeures pour réduire la consommation énergétique et l'impact environnementale liés à la fabrication des produits.

Au niveau européen, l'énergie nécessaire à la fabrication des briques (1 m² de mur) a ainsi diminué de 39 % entre 1990 et 2007. Enfin, dans les pays industrialisés [Lin, 2001].

I.3 Définitions

Les briques sont les produits céramiques, dont la matière première est argile, avec ou sans additifs. La forme des briques est généralement parallélépipède rectangle. Elles sont couramment utilisées dans la construction des maisons individuelles, des bâtiments des travaux publics et le revêtement décoratif. Par rapport aux autres matériaux, c'est un des plus anciens matériaux de construction.

I.4 Composantes de briques

La brique se constitue d'argile, qui est un matériau très léger et constitué de plusieurs types de roches. L'argile n'est utilisable que si ses composantes varient entre des limites admissibles mentionnées sur le tableau suivant :

Tableau I.1 : Composition chimique de l'argile [Hakkoum, 2015]

Types de composants	Formulation	Tolérances %
Alumine	AL ₂ O ₃	9 / 25
Silice	SiO ₂	35 / 85
Chaux	CAO	0 / 25
Magnésie	Mg O	0 / 5
Oxydes alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	1 / 5
Sesquioxyde de fer	Fe ₂ O ₃	3/9
Oxyde de titane	TiO ₂	0.3/2
Anhydride sulfurique	SO ₃	0 / 3
Gaz carbonique	CO ₂	0/13
Eau de combinaison	H ₂ O	5 / 11

I.4.1 Les argiles

Les argiles sont des produits issus de la décomposition des roches siliceuses par désagrégation physique et mécanique puis par altération chimique. L'argile brute contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains n'excède pas 2µm.

Ces particules sont sous la forme cristalline (phase minérale pure), et sont responsables des propriétés telles que le gonflement, la plasticité, et des phénomènes d'adsorption.

Dans le milieu naturel, ces particules élémentaires sont le plus souvent liées entre elles par des ciments de nature très diverse (carbonates, composés organique, composés minéraux amorphes ou oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, quartz ...) pour former des agrégats de tailles beaucoup plus grandes. Les argiles sont constituées de minéraux dont les particules sont essentiellement des phyllo silicates empilés en feuillets bidimensionnels silicaté [Bouziane, 2007].

I.4.2 Types d'argiles [Boulouza, 2018]

I.4.2.1 Argiles plastiques grésantes

Colorées. Très fines particules de kaolinite, de matière organique, d'oxydes de fer et de Titane. Riche en silice
Produit : Ball Clay.

I.4.2.2 Argiles plastiques réfractaires

Riches en montmorillonites, en kaolinite et halloysite ($\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$).

I.4.2.3 Argiles réfractaires

Utilisées pour les très hautes températures, elles sont riches en alumine et très peu colorées.



Figure 1.1: Argile réfractaire

I.4.2.4 Argiles rouges

Ce sont des argiles contenant du kaolinite et l'illite, du sable, du mica et des oxydes de fer, des composés organiques et des composés riches en alcalins.



Figure 1.2: Argile rouge

I.4.3 Types de briques

En maçonnerie, il existe toute une variété de briques : la brique en terre crue, la brique pleine, la brique creuse, la brique réfractaire ou encore la brique de parement, dite brique de décoration. Chacun de ces types de briques possède des propriétés précises, destinées à un usage particulier. Certains de ces matériaux sont utilisés dans la confection de murs porteurs, alors que d'autres sont destinés à résister à de très hautes températures [Maage, 1984].

- **La Brique en terre crue**

De nos jours la construction en terre crue est de plus en plus abandonnée dans le monde. Matériau jugé antique et associé aux premiers âges des civilisations du Nil, du Tigre et de l'Euphrate, de l'Indus. Matériau majeur, il en est car la terre crue demeure encore de nos jours l'un des principaux matériaux de construction de l'homme pour édifier sa demeure et les édifices de la cité. Les strates du temps se sont accumulées sur des sites d'occupation humaine qui régénéraient sans cesse l'édification de leur cadre de vie bâti au quotidien. De construire de simples cabanes et modestes demeures [Djoughri, 2007].



Figure 1.3: brique en terre crue

- **L'adobe**

L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sol, d'eau et de chaume. Le sol utilisé doit contenir une proportion déterminée d'argile et de sable.

Les briques d'adobe sont fabriquées en mélangeant de la terre crue avec de l'eau et éventuellement des fibres végétales (le plus souvent de la paille). Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde. Les briques d'adobe sont coulées dans un cadre ouvert, un rectangle dont les dimensions est en général de 10x25x36 cm³ bien que l'on rencontre d'autres tailles.

Le moule est retiré, et la brique est mise à sécher quelques heures, puis elles sont tournées sur leur tranche pour terminer le séchage. Lors du séchage, les briques peuvent être placées à l'ombre pour éviter l'apparition de fissures [Mekhermeche, 2012].



Figure 1.4: La brique d'adobe

- **Les pisés**

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. Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». C'est à dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade. Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée [Chaib,2017].

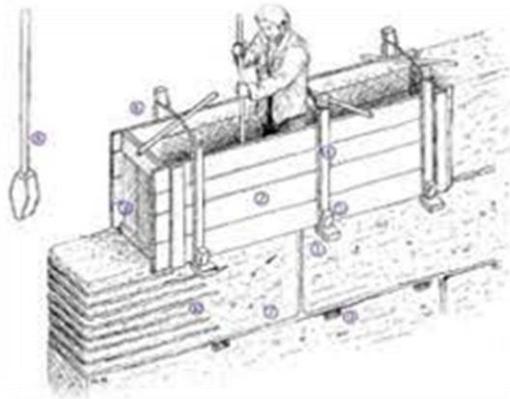


Figure I. 5 : Construction d'un mur en pisé [Djoughri, 2007].

- **Les blocs de terre comprimée**

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 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) 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, séchage) [Hakkoum, 2015].



Figure I.6 : Blocs de terre comprimée.

- **La 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) [Hakkoum, 2015].

Parmi les types il existe pour Briques de terre cuite :

- **La Brique creuse**

La brique creuse est une brique ayant des perforations verticales ou horizontales. On utilise ce type de briques pour monter des murs intérieurs ou extérieurs, porteurs ou non porteurs, pour un usage aussi bien industriel que domestique. C'est un matériau noble et pratique qui est très souvent utilisé en construction et bâtiments. On distingue deux types de briques creuses : les briques creuses classiques, et les briques alvéolaires, ou briques creuses Mono mur [Maage,1984]. La brique creuse classique, dont le principal atout est le prix, se distingue par des alvéoles taillées dans le sens de la profondeur de la brique. Elles sont généralement montées au mortier classique, créant des ponts thermiques. Autre mauvais point pour les briques creuses, elles ne se suffisent pas à elles même pour isoler votre maison. Elles se complètent donc par une isolation intérieure ou extérieure. De plus, la cuisson nécessaire à sa fabrication, dégageant du CO₂, lui confère un mauvais rendement écologique. Ces briques laissent petit à petit leurs places sur les chantiers aux briques alvéolaires [Menezes, 2005].



Figure I.7 : Les briques creuses classiques.

- **Briques 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 pleines. Selon la norme **NF P13-305** la brique plein ordinaire se compose en deux catégories pleines ou alvéolaires en terre cuite [Net 1, Net 2].

- **La brique alvéolaire**

Reconnaissables par leurs cannelures verticales, les briques alvéolaires sont plus chères que les briques creuses. Cela dit, un investissement vite rentabilisé puisqu'elles sont reconnues pour leurs excellentes propriétés isolantes naturelles, grâce à l'air emprisonné dans les alvéoles. Elles doivent être posées via une colle pour créer des joints fins afin de limiter les ponts thermiques, et améliorer encore l'isolation [NF EN ISO, 2000, Zami, 2010].



Figure. 1.8 : Brique alvéolaire

- **La brique réfractaire**

La brique réfractaire est un bloc de matériau en céramique réfractaire. La principale caractéristique de la brique réfractaire est sa résistance à la chaleur, contrairement aux briques classiques c'est pour cela qu'on la trouvera toujours dans les montages de cheminées, de plus elle est superbe et rustique et offre un design qui peut s'allier à de très nombreux environnements. Compte tenu de ses qualités, c'est un matériau assez cher pour des constructions courantes [Lindberg, 2002].



Figure. I.9 : Briques réfractaires avec des différents couleurs.

- **La brique pleine**

Une brique pleine est un matériau de construction écologique en argile. Il n'y a pas de vide dans sa structure. Très souvent, la brique corpulente est tournée pour l'érection de murs Internes et externes.

Ce matériau est considéré comme universel. Il n'a pas peur des facteurs externes négatifs, tels que le feu, l'eau et les basses températures. La brique pleine est un élément de

construction traditionnel, la brique pleine possède des faces planes, sans relief. Elle permet de construire des murs porteurs ou des cloisons, et peut être utilisée comme matériau de parement ou être laissée apparente [Net 2].



Figure I.10 : Quelques utilisations de la brique pleine.

- **La brique silico-calcaire**

Les briques silico-calcaires sont essentiellement formés d'un mélange des matériaux siliceux finement broyés et de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$ appelées chaux grasse ou de ciment portland soumis généralement à un traitement à l'autoclave [Net 3].



Figure I.11 : Produit en briques silico-calcaire

I.4.4 Procédés de fabrication de la brique

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.

En général le processus de production de la terre cuite se compose de différentes étapes :

1- L'extraction des matières premières (argiles)

L'extraction peut se faire par des engins mécaniques : décapeuse, pelles chargeuses. La matière première extraite, acheminée à l'usine par camions, voies ferrée, bandes transporteuses.

2- La préparation de l'argile (mélangeage+ broyage)

Mélange d'une ou plusieurs terres argileuses, ou de limon, avec de l'eau et des éléments dits "dégraissants", comme le sable.

3- Le façonnage

Le façonnage des produits (pleins, perforés et creux), est réalisé par deux procédures : étirage et pressage.

4- Le séchage

Les produits sont façonnés avec une teneur en eau de 15 à 30% (les chiffres exprimés en pourcentage par rapport au poids sec). Il est nécessaire avant la cuisson d'éliminer la plus grande partie de cette eau, par des séchoirs bien réglés. L'énergie consommée varie de 3.5×10^6 à 4.10×10^6 J/Kg d'eau évacuée, le séchage d'une tonne de produit nécessite une consommation d'énergie électrique de 6 à 13 KWh.

5- La cuisson

C'est la dernière opération que doit subir le bloc d'argile façonné et séché pour devenir ensuite une brique de terre cuite. C'est donc une phase extrêmement importante qui doit se dérouler très progressivement, c'est-à-dire que la fournée est soumise à un échauffement régulièrement croissant jusqu'à la température de cuisson (comprise entre 850° et 1200°C selon l'espèce d'argile utilisée), ensuite elle doit refroidir aussi graduellement.

Le schéma suivant résume les étapes de fabrication de la brique :

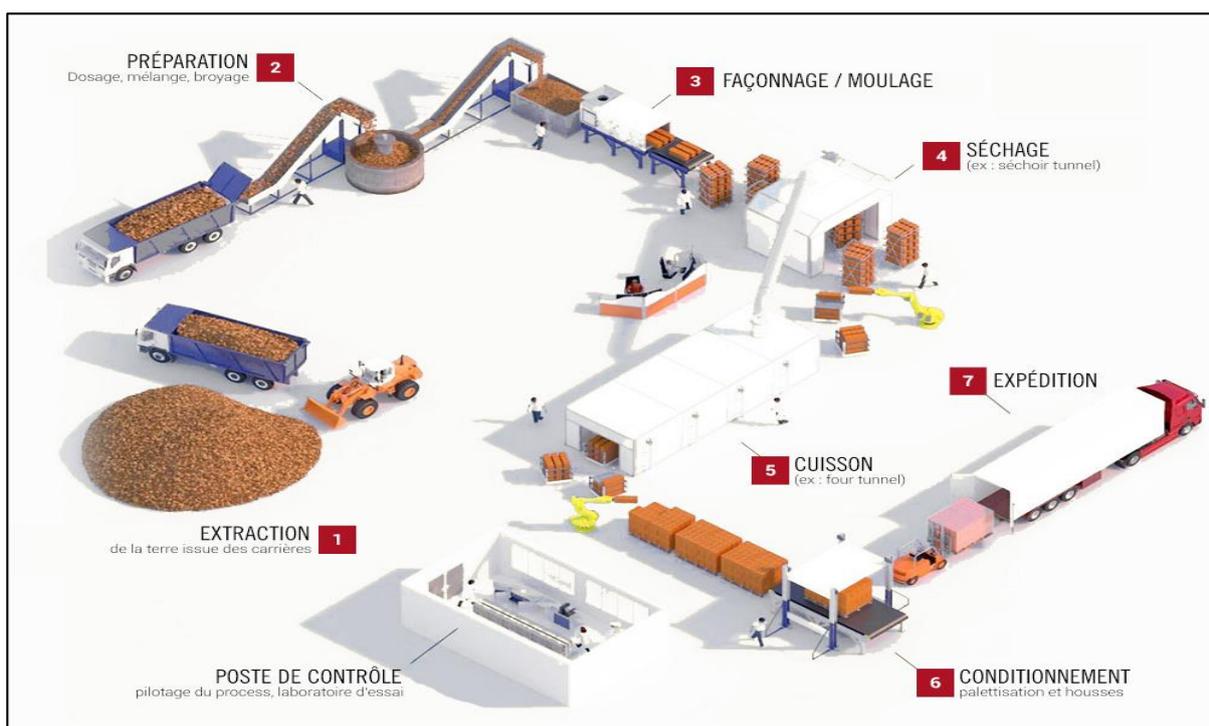


Figure I.12: procédé général de fabrication de la brique.

I.4.5 Caractéristiques des briques

- Les caractéristiques des briques de terre crue sont représentées dans le tableau suivant
Tableau I.2 : les Caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, brique de terre comprimée) [Chaib, 2017]

Caractéristique	Type de brique de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique K/m ³	1200 – 1700	1700-2200	1700 – 2200
Résistance à la compression MPa	2.10^{-3} - 5.10^{-3}	< 2.4	< 2.4
Conductibilité thermique λ (w/m. °c)	0.46 - 0.81	0.81 - 0.93	0.81 -1.04
Absorption d'eau %	5	10-20	10-20
Isolation acoustique Db	-	50Db pou40cm 40Dbpour20cm	50Db pour 40cm 40Db pour 20cm
Retrait au séchage mm/m	1	1-2	0.2-1

- Les propriétés et les caractéristiques des briques de terre cuite sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Caractéristiques des briques de terre cuite (briques creuses, ordinaires) [Chaib, 2017, Hakkoum ,2015].

Caractéristiques	Type de brique de terre cuite	
	Creuse	Ordinaire
Masse volumique K/m ³	1750-2050	1650-2000
Résistance à la compression MPa	4 - 8 MPA	12.5 - 40 MPA
Absorption d'eau %	< 15%	30-80%
Isolation acoustique Db	41 -58 Db	41 -58 Db
La Résistance thermique	0.05-0.20	0.52-1.21

- Les propriétés de brique silico-calcaire sont indiquées dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Propriétés de brique silico-calcaire [Djoughri, 2007]

Type de brique SC	Brique silico-calcaire dense	Brique silico calcaire léger
Masse volumique K/m ³	600 – 2200	300 – 800
Résistance à la compression MPa	6 – 60	1.5 – 7
Absorption d'eau %	4 à 8 %	-
Isolation acoustique Db	48 Db	-
Conductibilité thermique λ (w/m. °c)	1.16 -1.63 pour un masse volumique enter1700-2100 (Kg /m ³)	0.08 pour un masse volumique enter 300 (Kg /m ³)

I.4.6 Classes de briques [Bouhellal, 2021]

Comme tout matériau dans le monde, il y a plusieurs qualités disponibles de briques. Ceux-ci sont vendus en quatre classes.

I.4.6.1 Briques de première classe

- Ces briques sont brûlées très soigneusement et leurs couleurs vont du rouge foncé au cuivre et la cerise.
- L'extérieur doit être rectangulaire et lisse; les bords doivent être pointus et parallèles et les coins doivent être carrés avec tous les bords droits.
- Il ne devrait pas y avoir de défauts visibles tels que des fissures et/ou des pierres.
- La texture doit être cohérente.
- Les grumeaux ou la chaux ne doivent pas être présents sur l'extérieur fracturé de la brique.
- Lorsque vous frappez deux de ces briques ensemble, vous devriez entendre un son de sonnerie métallique.
- Il a une teneur en eau spécifique.
- L'absorption de l'eau doit être de 12-15% lorsqu'elles sont placées dans l'eau froide pendant vingt-quatre heures.
- La force de concassage ne devrait pas être inférieure à 10 N/mm², bien que cette limite varie selon les organisations gouvernementales de chaque pays.

I.4.6.2 Briques de deuxième classe

Devrait avoir les mêmes exigences que les briques de la première classe, sauf:

- De petites distorsions et fissures sont autorisées.
- L'absorption de l'eau d'environ 16-20 % de son poids sec est autorisée.
- La résistance au broyage ne doit pas être inférieure à 7,0 N/mm²
- l'utilisation: les briques de la deuxième classe sont recommandées pour les travaux de maçonnerie cachés.

I.4.6.3 Briques de troisième classe

- Sont sous brûlés.
- Elles sont de couleur claire et douce, produisant un son "terne" lorsqu'ils frappent les uns contre les autres.
- L'absorption de l'eau est d'environ 25 % du poids sec.
- L'utilisation : Les structures temporaires utilisent cette classe de briques.

I.4.6.4 Briques de quatrième classe

- Sont sur brûlés, les formes et les tailles ne sont pas cohérentes et sont fragiles dans la nature.
- L'utilisation : Les planchers et les fondations en béton chaux ainsi que le métal de route utiliseront cette classe de brique.

I.4.7 Les avantages et les inconvénients de la brique

❖ Les avantages

Tableau I.5 : Les avantages de la brique

Briques de terre crue	Briques de terre cuite	Briques silico-calcaires
<ul style="list-style-type: none"> - La terre absorbe et restitue l'humidité. - La terre régule la température. - La terre est un très bon isolant phonique - La terre utilise peu d'eau en phase de transformation. - La terre est une ressource locale abondante et renouvelable. - La construction en terre crue n'utilise que 3% de l'énergie employée dans une construction en béton. <p>[Mekhermeche, 2012].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Une bonne isolation : la brique en terre cuite est naturellement isolante. Associée à des isolants de qualité, elle offrira une maison très agréable à vivre. - Un matériau naturel : contrairement à d'autres briques, la brique en terre cuite est artisanale et écologique. Sa production est en effet très peu polluante Il s'agit d'ailleurs d'un matériau sain et respirant. - Une pose facile : monter un mur en briques est facile et rapide, et à la portée de n'importe quel bricoleur expérimenté. - Un matériau esthétique : enfin, la brique en terre cuite offre un côté naturel et très esthétique à n'importe quelle maison. Sans compter qu'elle n'a pas besoin d'enduit [Net 4]. - Régulateur hygrométrique le taux d'humidité dans la maison est constant. L'atmosphère est saine et confortable. - Un matériau incombustible, durable dans le temps <p>[Net 5].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Les briques calcaires ont généralement une bonne résistance au gel, et leur résistance au gel leur permettant de résister à des températures allant jusqu'à 550°C. - Les briques silico-calcaires et les briques cuites sont des constructions ininflammables. - L'utilisation des briques silico-calcaires est généralement la même que celle des briques en terre cuite, mais il existe certaines restrictions où l'utilisation de briques silico-calcaires est interdite pour la pose de fondations et plinthes car elles sont moins étanches que les briques d'argile. <p>[Djoughri, 2007].</p>

❖ Les inconvénients

Tableau I.6 : Les inconvénients de la brique

Briques de terre crue	Briques de terre cuite	Briques silico-calcaires
<ul style="list-style-type: none"> - La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler. - Il faut aussi bien avoir conscience que le financement de ce type de maison n'est pas conventionnel, en effet il vous sera difficile d'obtenir un prêt hypothécaire pour ce genre d'habitation [Mekhermeche, 2012]. 	<ul style="list-style-type: none"> - Les briques de terre cuite nécessitent beaucoup d'énergie pour leur fabrication. - Mise en œuvre délicate : la construction en mono mur implique des techniques particulières et fait appel à des maçons expérimentés dans le domaine [Net 6]. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le silico-calcaire est un bon conducteur de chaleur, ce qui signifie qu'il transmet facilement la chaleur d'un côté à l'autre. - Les briques silico-calcaires sont généralement plus chères que d'autres types de briques, comme les briques de terre cuite il est donc important de comparer les coûts et de prendre en compte les économies d'énergie potentielles.

Partie II : le mortier et le béton

II.1 Introduction

Le béton et le mortier sont des matériaux de construction essentiels, chacun avec des caractéristiques distinctes. Le béton, composé de ciment, granulats et eau, est extrêmement résistant à la compression, idéal pour les structures comme les bâtiments et les ponts. En revanche, le mortier, mélange de ciment, sable et eau, est utilisé pour lier des éléments de construction plus petits. Ces deux matériaux jouent des rôles cruciaux dans l'industrie de la construction, offrant solidité et durabilité aux ouvrages.

II.2 Les mortiers

II.2.1 Historique

L'histoire du mortier remonte à l'Antiquité et est intimement liée à celle de la chaux. Le mortier romain avait des proportions de chaux et de sable fin. La présence de la chaux et la carbonatation permettaient à ce mortier de durcir en vieillissant, lui conférant sa pérennité. Les Romains ont mis aussi au point le mortier de tuileau, un mélange de chaux et de fragments de briques ou tuiles et parfois de sable. En argile cuite, le tuileau agissait peu dans la prise du mortier.

II.2.2 Définition [Bouacida, 2022]

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux), des adjuvants et éventuellement des additions, et d'eau avec des proportions selon les réalisations. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.



Figure. II.1: Mortier

Les mortiers sont constitués par des mélanges de :

- Liant (ciment ou chaux)
- Eau
- Sable
- Adjuvants

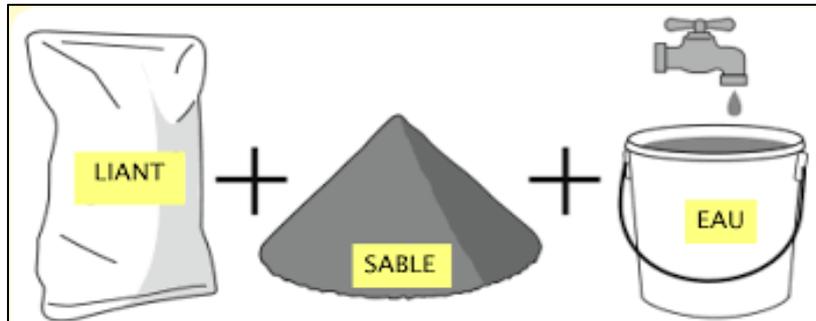


Figure. II.2 : Constituants des mortiers classiques.

II.2.3 Types de mortier [Sylver.P, 2006]

Il est bon de savoir qu'il existe de multiples types de mortiers, plus ou moins adaptés en fonction des usages. Voici les mortiers les plus fréquemment utilisés sur les chantiers. On peut classer les mortiers selon leurs origines fabriquées en usine ou sur chantier comme suit :

II.2.3.1 Le mortier-ciment

Le mortier-ciment est le produit le plus basique qui soit, indispensable pour construire un mur et lier les pierres ou briques entre elles. Il s'agit d'un mélange classique de ciment, de sable et d'eau.

Pour les jointements et les scellements, on peut envisager de se passer de sable. Ce matériau reste utile pour toutes les constructions classiques (murs, chapes, etc.) qui ne nécessitent pas l'usage d'un mortier spécifique. L'avantage du ciment est qu'il profite d'une excellente résistance à la compression. Il sèche également plus vite que la plupart des autres solutions.

II.2.3.2 Le mortier-hydrofuge

Comme son nom l'indique, le mortier hydrofuge est un mortier résistant à l'eau, qui permet d'éviter les problèmes d'humidité sur une surface. Il permet de :

- Boucher des fissures
- Enduire un mur
- Réaliser des chapes

On l'utilise avant tout dans les lieux humides (salle de bain, extérieur.) ou encore pour concevoir des réalisations étanches, comme un bassin de piscine.

II.2.3.3 Le mortier réfractaire

Le mortier réfractaire est un mortier résistant aux hautes températures. Selon les préparations, il peut généralement résister à des températures de 900° au moins. En toute logique, il est uniquement utilisé pour les constructions qui sont exposées à ce type de températures, à savoir pour le montage et le jointement des :

- Foyers de cheminée

- Des barbecues maçonnés, ce matériau protège ainsi les joints et la structure des constructions exposées aux flammes et à la chaleur.

II.2.3.4 Le mortier de chaux

La chaux est l'un des liants les plus utilisés dans les anciennes constructions. A tel point qu'on utilise encore fréquemment des mortiers à la chaux. Il faut dire que ce type de mortier permet au mur de mieux respirer et dispose également de capacités hydrofuges (idéales pour les pièces humides).

On trouve deux types de chaux :

- **La chaux aérienne** : elle a l'avantage de durcir lentement, et uniquement au contact de l'air
- **La chaux hydraulique** : elle durcit au contact de l'eau, puis de l'air. L'usage de chaux dans un mortier permet généralement une application plus facile, grâce à un temps de séchage un peu plus long. Ces mortiers sont cependant plus complexes à doser que le ciment.

II.2.3.5 Le mortier-colle

Il s'agit, comme son nom l'indique, d'un mortier adhésif, qui permet de coller un revêtement contre un mur ou un sol. Ce matériau est utilisé pour coller des plaquettes de parement, des carrelages muraux ou au sol, ou encore des dalles. Selon le mortier-colle choisi, l'utilisation peut se faire en intérieur et en extérieur.

II.2.3.6 Mortier bâtards

Ce sont les mortiers, dont le liant est le mélange de ciment et de chaux, avec des proportions. Suivant leur domaine d'utilisation éventuelle, les compositions de chaux et ciment peuvent être variées [Zerrouki, 2021].

II.2.3.7 Mortier rapide

Il est fabriqué avec du ciment prompt, il est rapide et résistant pour les scellements [Benchiheb, 2019].

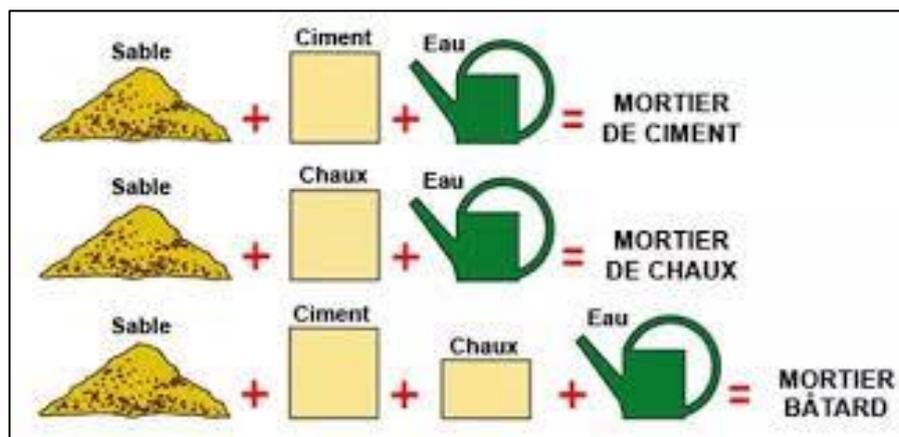


Figure II.3 : Les différents types des mortiers

II.2.4 Caractéristiques des mortiers [Haffaf,2019]

Les caractéristiques principales des mortiers sont :

II.2.4.1 La prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure du ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains du sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

II.2.4.2 Résistances mécaniques

Les essais sont souvent effectués sur les éprouvettes prismatiques de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conservés dans l'eau à 20°C . Les éprouvettes sont rompues en traction par flexion puis en compression.

Les résistances, aussi bien en traction par flexion qu'en compression, progressent à peu près comme logarithme du temps (entre 1 et 28 jours).

Les résistances des mortiers dépendent de très nombreux facteurs :

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport E/C.
- Granulométrie et nature du sable.
- Energie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection des premiers jours

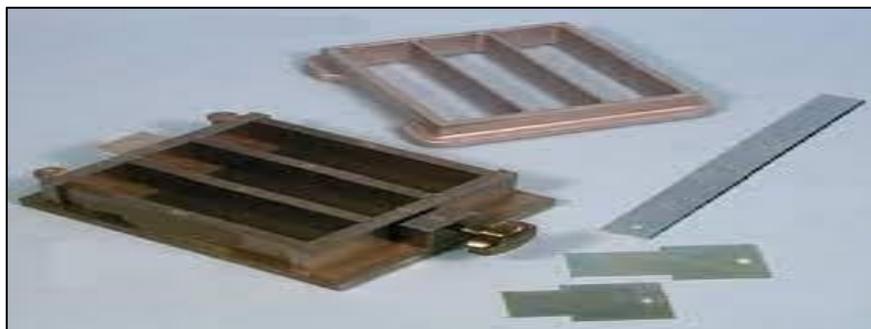


Figure II.4 : Moule pour moulage des éprouvettes de mortier

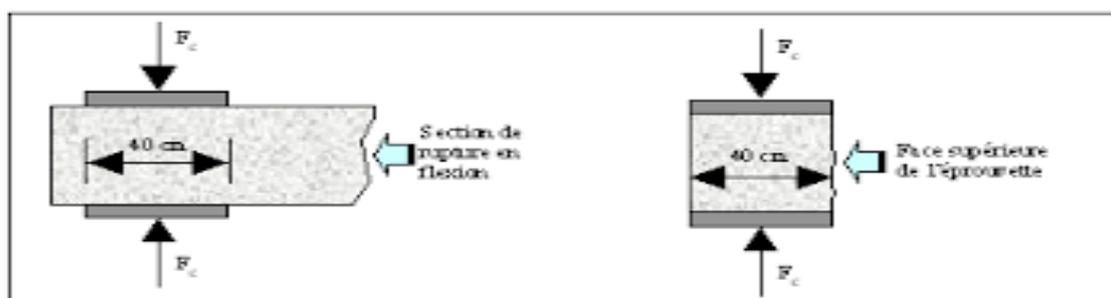


Figure II.5 : Dispositif de rupture en compression

II.2.4.3 Retraits et gonflement

- **Le Retrait**

Les retraits se mesurent sur des prismes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20°C et à 50% d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours. Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure.

Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

- **Le gonflement**

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ conservées dans l'eau à 20°C . Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10mm).

II.2.5 Le rôle d'utilisation de mortier

La pâte plastique obtenue peut jouer plusieurs rôles essentiels : **[Hemil]**

- Assurer la liaison, la cohésion des éléments de maçonnerie entre eux, c'est-à-dire la solidité de l'ouvrage, le rendre monolithique.
- Protéger les constructions contre l'humidité due aux intempéries ou remontant du sol.
- Sous forme d'enduits aériens.
- Sous forme d'écrans étanches.
- Constituer des chapes d'usure, pour dallages en béton.
- Devenir la matière première dans la fabrication de blocs manufacturés, carreaux, tuyaux et divers éléments moulés.
- Être le constituant essentiel du béton.
- Consolide certains sols de fondations sous forme d'injection.

II.2.6 Emplois des mortiers

- **Le hourdage de maçonnerie**

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierre de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche.



Figure II.6 : Joints de maçonnerie.

- **Les enduits**

Ce domaine d'application constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers. A côté des enduits traditionnels en trois couches, se développent aujourd'hui des enduits monocouches épais, ainsi que des enduits isolants.



Figure II.7 : Application d'enduit.

- **Les chapes :** Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol.
- **Les scellements et les calages :** La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, d'éléments de second œuvre, de mobiliers urbains, de regards de visite [BOUBEKEUR, 2017].



Figure II.8 : Calage d'un poteau en charpente métallique.

II.3 Le béton

II.3.1 Histoire du béton

Employé dès la haute antiquité, le béton romain était fabriqué avec une sorte de ciment et a laissé quelques édifices exemplaires toujours visibles aujourd'hui comme le Panthéon de Rome, édifice bâti au début du deuxième siècle de notre ère, qui supporte la plus grande coupole de toute l'Antiquité (43,3 m de diamètre à l'intérieur) et qui reste la plus grande du monde en béton non armé, le pont du Gard est tombé dans l'oubli ensuite, c'est en 1817 que le ciment moderne est inventé par Louis Vicat qui découvre le procédé et la composition du ciment Portland en cherchant à améliorer la résistance et une certaine durabilité des mortiers. Très vite, le béton devient le matériau révolutionnaire de la construction au vingtième siècle. François Coignet, François Hennebique, puis Auguste Perret et ses frères entrepreneurs sont les inventeurs du béton armé. Celui-ci compte parmi les piliers fondateurs dans cette voie révolutionnaire de l'art de construire et occupe une place incontournable dans l'histoire de l'architecte [Net 7].

II.3.2 Définition

Le béton est un matériau composite composé d'agrégats grossiers et d'agrégats fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. Le mélange entre le ciment et l'eau forme une pâte durcie. Le mortier est composé de coulis de ciment hydraté et de sable. Sa fonction est de se combiner avec de gros agrégats pour former une masse solide. Des adjuvants et additifs sont utilisés pour améliorer certaines propriétés du béton frais ou durci [Boeraeve, 1994].



Figure II.9: Béton

II.3.3 Types de béton

II.3.3.1 Les bétons légers

L'intérêt des bétons légers réside dans le gain important qu'on peut réaliser sur le poids propre de l'ouvrage. Les bétons légers présentent des masses volumiques qui vont de 300 à 1800 kg/m³, contre 2300 kg/m³ pour un béton classique. Cette qualité est également recherchée dans les bétons isolants thermiques, la conductivité variant dans le même sens que la densité. Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de granulats allégés (argile expansée, polystyrène expansé, liège). On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire [Alouache, 2010].

II.3.3.2 Les bétons lourds

A l'inverse, l'emploi de granulats très denses (barytine, magnétite) permet la réalisation de bétons de masse volumique dépassant 3000 kg/m³. Ces bétons sont utilisés dans la protection contre les radiations ou pour réaliser des culées, des contrepoids, etc. [Alouache, 2010].

II.3.3.3 Les bétons Hautes Performances (BHP)

Ces nouveaux bétons atteignent des résistances de plus de 100 Mpa, grâce à l'emploi de fines (essentiellement fumées de silice) et de super plastifiants. Résistances élevées, les privilégie pour les ouvrages très sollicités à court et à long terme ou en ambiance agressive [Alouache, 2010].

II.3.3.4 Les bétons de fibres

Les diverses fibres, sont utilisées dans des domaines variés: éléments rapportés en réhabilitation, pièces minces architectoniques, éléments décoratifs, dallages industriels, bardages, tuyaux.[Alouache, 2010].

II.3.3.5 Béton auto-plaçant (BAP)

Développé dans les années 80 par des chercheurs de l'université de Tokyo au Japon, le béton auto-plaçant est un béton fluide, très déformable, homogène et stable qui se met en place par gravitation et sans l'utilisation d'un moyen de vibration, ils se caractérisent en général par une formulation contenant au moins un adjuvant chimique et un ajout minéral en proportions bien précises pour satisfaire les exigences en matière de maniabilité et de stabilité [Baron,1982 , Chanvillard, 1999].

II.3.3.6 Béton armé

Le béton armé est un matériau de construction qui associe béton et barres d'acier. Il conjugue ainsi les qualités de compression du béton et la résistance à la traction de l'acier [Net 8].

II.3.3.7 Béton préfabriqué

Sert à la fabrication, généralement en usine et en milieu contrôlé, de diverses composantes allant de l'élément standardisé comme le bloc jusqu'aux éléments de structure ou des panneaux de façades multifonction.

II.3.4 Composants de béton

Le béton est composé de plusieurs constituants :

- **Le ciment**

Est un liant hydraulique constitué de poudre minérale. Il réagit avec l'eau en donnant des hydrates stables qui lui confèrent une résistance mécanique. Les réactions d'hydratation du ciment conduisent à la formation d'une pâte durcissant progressivement à l'air ou dans l'eau. [Govin ,2016]

La normalisation européenne retient cinq catégories de ciments utilisables dans des bétons de structure :

- Les ciments Portland purs (CPA – CEM I)
- Les ciments Portland composés (CPJ – CEM II/A ou B)
- Les ciments de haut-fourneau (CHF – CEM III/A, B ou C)

- Les ciments pouzzolaniques (CPZ – CEM IV/A ou B)
- Les ciments au laitier et aux cendres (CLC – CEM V/A ou B)

- **Les granulats**

Les granulats, d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. En tant que principaux composants du béton, ils lui transmettent certaines caractéristiques techniques et esthétiques, notamment sa résistance. Le choix du type de granulat utilisé ne doit donc pas être fait à la légère car il aura une influence sur la durabilité de votre béton. On distingue alors différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts [Net 9].

- **L'eau de gâchage**

D'après la norme NF EN 1008, il joue deux fonctions principales : confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment. Le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité [Baron,1982].

- **Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques que l'on utilise dans le cas des bétons. Ils modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment) [Vimane].

- **Sable**

Le sable est défini comme la fraction d'agrégats de pierre dont la granulométrie est comprise entre 80 μm et 05 μm ; c'est une définition globale, et sa limite varie d'une catégorie à l'autre. C'est un type qui a un diamètre maximum inférieur à 6,3 mm et ne passe pas à 80 μm . Plus de 30% du matériel. Le «sable» le plus courant fait référence aux éléments d'une taille de 0 à 5 mm [Kattab, 2007].

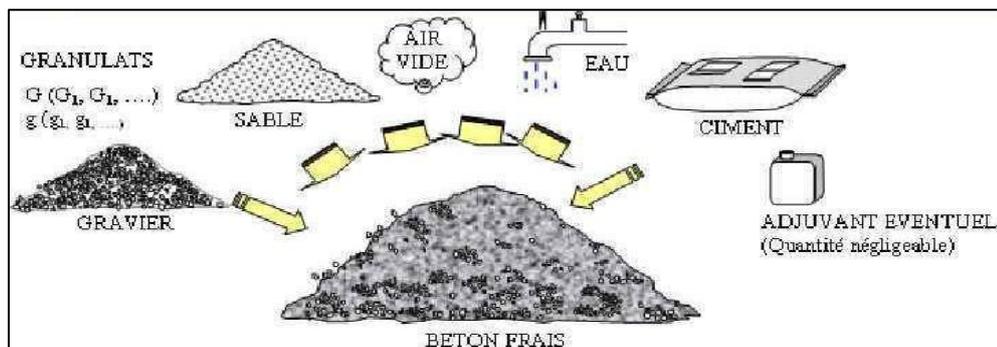


Figure II.10 : Les constituants de béton

II.3.5 Béton ordinaire [Boutouata,2019]

II.3.5.1 Définition

Pour le béton ordinaire, l'agrégat est constitué de pierres (sable, gravier, cailloux) et le liant est du ciment (généralement du ciment Portland), et ils se solidifient par hydratation. La réaction chimique qui permet au béton de prendre est lente (50% de la résistance finale est atteinte au bout de 7 jours). La valeur utilisée comme référence dans le calcul est la valeur obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale). Ce type de béton est utilisé dans un grand nombre de constructions et de travaux publics: fondations, structures, murs, ponts, etc.

Le béton ordinaire est un mélange de plusieurs composants (ciment, granulats, eau); il forme un tout hétérogène; leur densité est d'environ 2500 Kg / m³.

II.3.5.2 Formulation du béton ordinaire

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment.

- La méthode de Baron.
- La méthode de Bolomey.
- La méthode de Féret.
- La méthode de Faury.
- La méthode de Dreux-Gorisse.

II.3.5.3 Les Caractéristiques du béton ordinaire

II.3.5.3.1 A l'état frais

La principale propriété du béton à cet état est son ouvrabilité. En effet, le béton offre une facilité de remplissage du coffrage et du ferrailage lors de la mise en œuvre. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Cette ouvrabilité est influencée par le dosage et la qualité des composants, la forme, la granulométrie et le type de granulats, le volume d'air mais surtout par la quantité d'eau insérée dans le béton. Cependant, il faut faire très attention car au-delà d'une certaine quantité, on observera :

- Un ressuage qui est un phénomène de remontée d'une partie de l'eau de gâchage à la surface du béton frais
- L'augmentation de la porosité et du retrait (phénomène de raccourcissement accompagnant la prise du ciment suite à une baisse de température)
- Une diminution de la résistance et un risque de ségrégation des constituants (les granulats descendent tandis que les liants remontent à la surface).

II.3.5.3.2 A l'état durci

- **La porosité**

La porosité est une caractéristique extrêmement importante pour un béton. La réduction des vides est essentielle, notamment dans le but de faire face aux agents agressifs extérieurs et de lutter contre les risques de corrosion des armatures dans le cas d'un béton armé. Le choix du type de ciment à mettre en œuvre et l'augmentation du dosage permettent la réduction des vides et contribuent donc fortement à la durabilité de l'ouvrage.

- **Les résistances mécaniques**

La résistance varie en grande partie en fonction :

- Du dosage et du type de ciment employé
- Du volume d'air subsistant dans le béton ou la porosité
- Du dosage en eau. La résistance en compression du béton ordinaire à 28 jours d'âge est comprise entre 30 à 45 MPa. La résistance en traction du béton est comprise entre 8 et 12% de la résistance en compression. Par contre, la résistance en cisaillement du béton est d'environ 5% de la résistance en compression.

- **La résistance au cycle gel-dégel et écaillage**

La résistance au cycle gel-dégel du béton dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- Le rapport eau-liant.
- Le volume d'air entraîné.
- La durée de la période de séchage avant l'exposition au cycle pour y faire face, il est indispensable d'augmenter le volume d'air avec des adjuvants tels que les entraîneurs d'air. Leur teneur en air varie de 4 à 8% selon les conditions d'exposition. Ils ont une bonne capacité de résistance. Cette résistance est accrue pour les bétons à hautes performances.

- **Les retraits**

Un retrait hydraulique est observé avant et en cours de prise. Il peut être causé soit par évaporation, soit par absorption. Avant et en cours de prise, il peut atteindre un litre d'eau par mètre carré de surface de béton en seulement une heure. Même après le durcissement, il y a encore des retraits observés. Le retrait thermique est dû à la réduction rapide de la température. Ce retrait est de l'ordre de 200 à 300 $\mu\text{m}/\text{m}$. Le retrait diminue considérablement quand le durcissement se fait sous l'eau. C'est la raison pour laquelle on essaie toujours de rendre les pièces humides durant cette phase de durcissement en les arrosant.

- **Module d'élasticité**

Sous l'action de charges instantanées, le béton a un comportement élastique. Plus la résistance du béton est élevée, plus le module d'élasticité est grand. Le module d'élasticité instantané est compris entre 30 000 et 35 000 MPa.

- **La perméabilité du béton**

Plus un béton est imperméable, plus il a une grande durabilité dans la mesure où les agents agressifs ne peuvent pas agir. Elle est donc liée à la porosité. L'imperméabilité du béton ordinaire est bonne.

- **Le fluage**

C'est un phénomène de déformation différée causé par l'effet d'une charge fixe indéfiniment appliquée. On estime qu'au bout d'un mois, 40 % de la déformation de fluage sont effectifs et au bout de six mois, ce sont les 80%. Cette déformation est généralement entre 4 à 5 % de la longueur de l'ouvrage en question.

II.3.5.4 Utilisation du béton

Les bétons, étant donné leurs propriétés et leurs caractéristiques, répondent aux exigences de tous les types d'ouvrages.

II.3.5.5 Les Avantages et les Inconvénients [Boutouata, 2019]

Les principaux avantages inconvénients de l'emploi du béton sont :

II.3.5.5.1 Les Avantages

- Résistance, durabilité, longévité et résilience sans égal.
- Efficacité énergétique maximisée grâce à sa masse thermique.
- Durabilité dans tout environnement.

II.3.5.5.2 Les inconvénients

- Faible résistance à la traction.
- Le placement d'un revêtement de façade lourd (brique, pierre naturelle) entraîne des coûts considérables, notamment pour les fondations les plus épaisses et les linteaux de fenêtre.

II.4 Conclusion

Ce chapitre a permis de dresser un panorama complet des trois grands matériaux de construction que sont la brique, le mortier et le béton. Malgré leur ancienneté, ces matériaux restent incontournables dans le secteur de la construction moderne grâce à leurs propriétés techniques avantageuses.

La brique, matériau ancestral issu de l'argile, a été décrite dans ses différents types, composants, procédés de fabrication, caractéristiques et classes. Ses avantages en termes de maniabilité, résistance, isolation et esthétique expliquent son utilisation toujours répandue.

Concernant le mortier et le béton, intimement liés par leur composition à base de liants hydrauliques, ce chapitre a détaillé leurs définitions, typologies, composants, formulations, propriétés à l'état frais et durci, ainsi que leurs domaines d'application respectifs. Le mortier, liant de maçonnerie, valorise sa maniabilité tandis que le béton tire sa force de sa très haute résistance mécanique en compression.

Une grande variété de bétons spéciaux (légers, lourds, hautes performances, fibres, auto-plaçants, armés, préfabriqués) a également été présentée, illustrant la versatilité de ce matériau composite clé dans la construction d'infrastructures modernes.

Bien que relativement anciennes, les connaissances sur ces matériaux ne cessent d'être approfondies, permettant leur amélioration et optimisation constantes. Ce chapitre aura permis de poser les bases théoriques indispensables à la compréhension de leurs propriétés, de leur élaboration et de leurs performances, développées dans les chapitres suivants.

Chapitre II

La valorisation des déchets dans le génie civil

Chapitre II

La valorisation des déchets dans le génie civil

II.1 Introduction

Le recyclage des déchets dans le génie civil est un secteur important car on veut obtenir des produits qui ne soient pas soumis à des normes de qualité trop strictes. Le recyclage des déchets a deux impacts très importants, l'impact environnemental et l'impact économique.

Ainsi, dans plusieurs pays du monde, différents déchets sont utilisés dans le secteur de la construction, notamment dans le ciment ou le béton sous forme de poudres, de fibres ou de granulats.

II.2 Les déchets

Selon le domaine d'étude et d'intérêt, les déchets peuvent parfois être définis différemment selon leur origine et leur état. La loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, article 3 du Journal Officiel de la République Algérienne n° 77 de 2001, définit comme déchet : tout résidu résultant de la production, de la transformation ou de l'utilisation, plus généralement tout produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur de la substance dispose, envisage de disposer, ou est obligé de disposer ou d'éliminer.

D'un point de vue économique, les déchets sont une marchandise sans valeur marchande inhérente. D'un point de vue sociologique, les déchets sont le témoignage d'une culture et de ses valeurs. Il reflète le niveau social de la population et les espaces dans lesquels elle évolue : zones rurales/urbaines, habitats collectifs/individuels.

II.2.1 Différents types de déchets

On distingue généralement diverses sortes de déchets dont :

- **Les déchets ménagers et assimilés**

Se composent principalement des ordures ménagères, des déchets municipaux (propres), des déchets verts et encombrants, doivent s'y ajouter les déchets des commerces, artisans et entrepreneurs, écoles et autres établissements d'enseignement et hôpitaux et autres établissements de santé.

- **Les déchets des collectivités locales**

Comprennent principalement les boues de station d'épuration, les déchets verts, nettoyage des rues et des marchés, déchets des administrations publiques (papier et autre documents).

- **Les déchets industriels**

On distingue généralement les déchets industriels banals (DIB), encore appelés non dangereux et les déchets industriels spéciaux (DIS) ou dangereux.

- **Déchets industriels non dangereux**

Ces déchets sont très proches des ordures ménagères dans la mesure où ils sont essentiellement composés de carton, papier, plastique, bois, métal, verre, textiles.

- **Déchets industriels dangereux**

Ceux-ci ne peuvent être jetés ou stockés que dans conditions particulières tous les déchets dangereux ne doivent pas être collectés, éliminés ou stockés dans des conditions optimales.

- **Les déchets inertes**

Tous les déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante, qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine.

- **Les déchets fermentescibles**

Sont des déchets biodégradables, c'est-à-dire se décomposant plus ou moins rapidement sous l'action de micro-organismes aérobies ou anaérobies (bactéries, moisissures). Les ordures ménagères contiennent une part importante de matières fermentescibles que l'on nomme la fraction fermentescible des ordures ménagères. Cette part peut être extrêmement réduite par le tri sélectif dès lors que l'on procède, quand on le peut, au compostage chez soi de cette fraction.

- **Les déchets ultimes**

Sont les déchets, résultant ou non du traitement des déchets, qui ne sont plus susceptibles d'être traités dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par la part valorisable ou par extraction de leur caractères polluants ou dangereux (loi du 15 juillet 1975).

- **Les déchets radioactifs**

Les hôpitaux et les autres établissements de soins sont à l'origine de nombreux déchets. Certains de ces déchets sont banals et s'apparentent le plus souvent à des ordures ménagères (déchets de bureaux, de cuisines, restes de repas, déchets liés à l'entretien des locaux. D'autres déchets sont particuliers. Il s'agit principalement de déchets radioactifs, de déchets à risques infectieux et de médicaments.

II.3 Les boues issues des stations d'épuration [N. Seghairi et al, 2017]

Le traitement des eaux usées entraîne la production de boues d'épuration. Les boues d'épuration sont les matières résiduelles semi-solides qui sont produites comme sous-produit lors du traitement des eaux usées industrielles ou municipales.

Lorsque des eaux usées fraîches rentrent dans un décanteur primaire, environ 50% des matières solides en suspension se déposent rapidement. Cette collection de solides est connue sous le nom de boues brutes ou solides primaires et est dite «fraîche». Le plus souvent, les boues fraîches sont extraites en continu du fond du décanteur en forme de trémie par des racleurs mécaniques et passées dans des réservoirs de digestion des boues séparées.

Le processus de traitement secondaire génère également des boues composées en grande partie de bactéries et de protozoaires avec des solides fins entraînés, qui sont éliminés par décantation dans des réservoirs de décantation secondaires. Les deux flux de boues sont généralement combinés et sont traités par un procédé de traitement anaérobie ou aérobie à haute température ou à température ambiante. Après une longue période de digestion, le résultat est appelé boue "digérée" et peut être éliminé par séchage puis mise en décharge.



Figure. II.1 : Schéma de fonctionnement d'une station d'épuration.

II.3.1 Définition

Les boues sont définies par le Comité Européen de Normalisation (CEN) comme «un mélange d'eau et de matières solides, séparé par des procédés naturels ou artificiels des divers types d'eau qui le contiennent». Les boues sont issues du traitement des eaux usées industrielles ou domestiques. L'épuration de ces eaux usées se réalise en différentes phases selon des techniques basées sur des lois de la physique, de la chimie et de la biologie. Il en résulte une eau épurée que l'on rejette dans le milieu naturel et un résidu principal s'appelle les boues. Ce résidu est constitué par différents composés (matières minérales inertes, d'azote, de phosphore et de matières organiques). [Emilie, 2012].



Figure. II.2: La boue d'épuration

II.3.2 Type des boues

Les principaux types de boues existantes selon la littérature sont cités ci-dessous :

- Boues brutes ou primaires
- Boues secondaires
- Boues tertiaires
- Boues mixtes

Le schéma suivant présente les différents types des boues d'épuration et leurs origines :

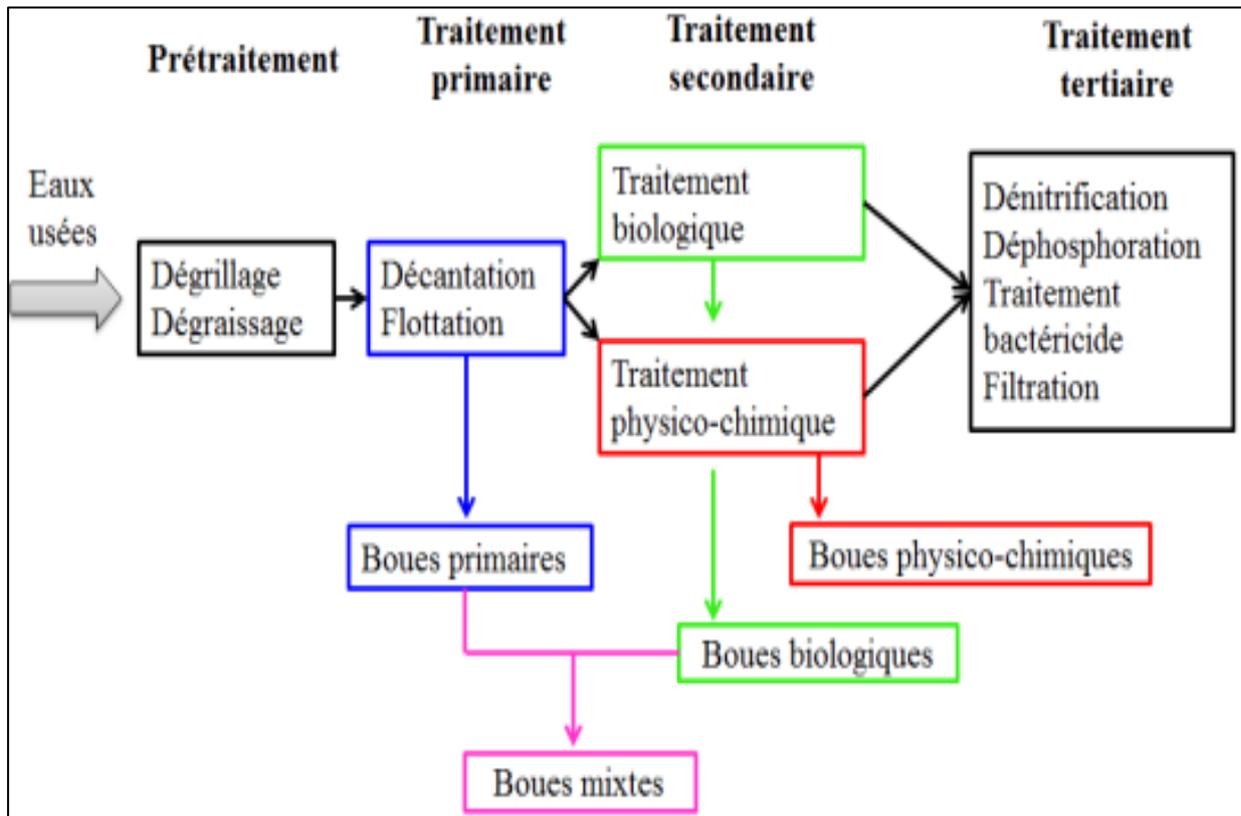


Figure. II.3: Schéma de types de boues selon les filières de traitement des eaux

II.3.3 Les caractéristiques des boues

Tableau II.1: Les caractéristiques des boues

Les caractéristiques des boues	
Physiques	Chimiques
<p style="text-align: center;"><u>Viscosité :</u></p> <p>Les boues ne sont pas des liquides newtoniens, on mesure leur viscosité en fonction de la contrainte de cisaillement, cette viscosité permet de définir leur caractère thixotrope qui est important pour leur transport. [Sedkia, 1995]</p> <p style="text-align: center;"><u>Masse volumique :</u></p> <p>Elle permet de calculer le volume de boue à convoier, en l'absence de mesure pour une boue liquide ou pâteuse, on peut considérer en première approximation la pondération suivante :</p> $r = 100 (1-S) + (900 FV + 2700 FM) S$ $FM = (1-FV)$ <p>[Ademe, 2001].</p> <p style="text-align: center;"><u>Pouvoir calorifique :</u></p> <p>Les teneurs en matières organique des boues leur donnent une aptitude à la combustion non négligeable qui permet de l'incinérer. [Afee, 1974].</p> <p style="text-align: center;"><u>Pouvoir calorifique inférieur :</u></p> <p>Son importance est primordiale en incinération, généralement exprime par rapport aux MV, il est relié au C, H, N, O, S, par écriture de la stœchiométrie de combustion [Slimani. K, 2007]</p>	<p style="text-align: center;"><u>Les Matières en suspension :</u></p> <p>Représentent la fraction constituée par l'ensemble des particules organiques ou minérales, non dissoutes de la pollution. Elles constituent un paramètre important qui marque le degré de pollution d'un effluent urbain ou même industriel. [Duguet J-P, 2006]</p> <p style="text-align: center;"><u>Les Matières volatiles sèches :</u></p> <p>Représentent la fraction organique des matières sèches et sont obtenus par calcination de ces matières sèches à 525 °C/2 h, la différence de poids entre les matières sèches à 105 °C et les matières sèches à 525 °C donne la (perte au feu) et correspondant à la teneur en matières volatiles sèches en (mg /l) d'une eau. [Duguet J-P, 2006]</p> <p style="text-align: center;"><u>Les matières minérales :</u></p> <p>Représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son (extrait sec) constituée à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates. Ce phénomène peut être accéléré par la présence d'une forte proportion de matières organiques consommatrices d'oxygène. [Duguet J-P, 2006]</p>

II.3.4 La composition de la boue

D'après plusieurs auteurs [Werther, 1999; Jard et al, 2003; Singh et al, 2004], la période de l'année, l'origine des eaux usées, le type de traitement adopté, et le conditionnement pratiqué au sein de la station d'épuration sont les principaux paramètres qui influencent la composition des boues résiduelles. Les boues d'épuration présentent un réservoir important de composés organiques, inorganiques (éléments fertilisants, éléments en traces métalliques) et d'agents pathogènes (microorganismes pathogènes, parasites). Cependant, à côté de ces composés toxiques en relation avec la nature des activités raccordées au réseau d'assainissement, la matière solide de ces résidus constitue une source importante d'éléments naturels valorisable.

II 3.4.1 Matières organiques

La proportion en matière organique peut varier de 30 à 80%. La matière organique des boues est composée de matières particulaires éliminées par gravité dans les boues primaires, des lipides (6 à 19% de la matière organique), des polysaccharides, des protéines et des acides aminés (jusqu'à 33% de la matière organique), et de la lignine, outre des produits de métabolisation et des corps microbiens résultant des traitements biologiques [Inoue et al, 1996, Admeme, 2001, Jarde et al, 2003, Amir, 2005]

II 3.4.2 Éléments fertilisants

Les composés inorganiques usuels se retrouvent en quantités importantes dans les boues telles que N, P, K, Ca et Mg. La concentration en azote varie entre 1 et 5% de la matière sèche. L'apport de ces composés au sol peut couvrir, en partie ou en totalité les besoins des cultures en azote, en phosphore, en magnésie, en calcium et en soufre [Zebarth et al, 2000, Su et al, 2004; Warman & Termeer, 2005; Jouraiphy, 2007; Carbonell et al, 2009].

Les éléments traces métalliques à savoir le cuivre et le zinc présents dans les boues sont aussi nécessaires au développement des communautés du sol. Cependant la valorisation de ce résidu nécessite une bonne connaissance de sa valeur agronomique afin de le comparer aux engrais minéraux classiquement employés par les agriculteurs.

II 3.4.3 Éléments traces métalliques

Des études récentes [Amir, 2005; Jouraiphy, 2007; El Fels, 2014; Milik et al, 2017] ont montré que la nature et la concentration des eaux usées en polluants sont très dépendantes des activités raccordées au réseau. La source principale des contaminations chimiques vient des effluents industriels et dans une moindre mesure des rejets domestiques (utilisation de solvants, déchets de bricolage, peinture...).

Du fait de la décantation lors du traitement, ces contaminants chimiques se retrouvent dans les boues à de très grandes concentrations par rapport aux eaux usées. La présence des éléments traces métalliques (Al, As, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Pb et Se...) est variable dans une boue sous différentes formes chimiques. Ces composés sont toxiques à fortes doses, et sont non seulement non biodégradables, mais ils ont tendance à s'accumuler dans les chaînes d'assainissement [Mcbride, 2003].

En général, le Cd, le Pb, et le Cr sont des éléments toxiques potentiels. [Hsu & Lo (2001)], ont montré que la détermination de la teneur totale des métaux lourds ne fournit pas d'informations utiles sur les risques de la biodisponibilité, ainsi qu'à la capacité de leur remobilisation et leur comportement dans l'environnement. Par contre, les formes chimiques d'un métal ou spéciation permettent l'estimation de la biodisponibilité des métaux lourds, et leur force de liaison, soit sous forme ionique libre ou complexée par des matières organiques, ou incorporée dans la fraction minérale de l'échantillon.

II 3.4.5 Composés organiques

II 3.4.5.1 Composés organiques non toxiques

Les matières comprennent toute les substances présentes dans les matières fécales, ainsi que dans les rejets liquides ménagers, aussi les effluents industriels constituent la matière d'origine des boues, telle que les protéines, les acides aminés, les sucres et les graisses,

d'origine animale ou végétale et qui restent non toxiques est réduite par l'action des micro-organismes [Jouraiphy, 2007; El Fels, 2014; Amritphale et al, 2017].

II 3.4.5.2 Composés organiques toxiques

Les composés organiques toxiques constituent la plus grande proportion de boues D'épuration ces polluants d'origine industrielle et agricole ont été réglementés et plusieurs études ont été réalisées pour évaluer leurs effets [Langford & Lester, 2003; Scrimshaw & Lester, 2003; Chang et al, 2004; Abad et al, 2005; Barnabé et al, 2009]. Une multitude de ces polluants peuvent être contenus dans les boues; hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs), pesticides principalement les organochlorés, composés aliphatiques halogènes, chlorobenzènes, composés organiques volatils (COV), phénols, dioxines. Les substances dont les concentrations sont supérieures à 10 et même à 100mg/kg dans les boues stabilisées sont les phtalates, les surfactants (surtout des nonylphénols et des alkybenzènes). La forte concentration en surfactants s'explique par leur utilisation dans les lessives, ce qui peut justifier leur présence en concentrations en général de l'ordre de $\mu\text{g}/\text{kg}$ de MS dans les boues [Pérez et al., 2001; Amir, 2005; Som, 2006].

II 3.4.5.3 Organismes pathogènes

Les boues d'épuration contiennent de nombreux micro-organismes ayant un potentiel Pathogène plus ou moins élevé, ce sont surtout des bactéries, des parasites, des virus, des Champignons et helminthes, et proviennent en majorité des excréments humains ou animaux [Sahlström, et al, 2004; Bagge, et al, 2005; Su, et al, 2017]. La concentration d'une eau usée en germes pathogènes dépend de plusieurs facteurs : secteur d'activité et d'origine : les eaux provenant d'abattoirs ou de toute industrie traitant de produits d'animaux sont très largement contaminées [Jouraiphy, 2007; Zaim, et al, 2007]. D'une façon générale, les boues doivent subir un prétraitement avant leur utilisation en agriculture [Garrec, et al, 2003].

II.3.5 Filières de traitement des boues

Le traitement des boues comprend les principales étapes suivantes :

- L'épaississement
- La stabilisation
- La déshydratation
- Le séchage

II.4 Situation du traitement des eaux usées en Algérie et production de boues

Dans une optique de protection des ressources hydriques et du littoral par une législation de plus en plus ambitieuse, quant à la qualité des eaux usées déversées dans le milieu naturel, l'Algérie compte actuellement 154 unités de traitement implantées sur le territoire national. L'ensemble de ces installations traite annuellement environ 900 millions de mètre cube d'eaux usées et produit plus de 400 000 tonnes de matière sèche de boues.

Cette production est appelée à augmenter avec les futurs projets de mise en place de nouvelles installations de traitement des eaux usées. C'est pourquoi le recyclage des boues,

longtemps considéré comme un aspect secondaire du traitement des eaux usées, révèle maintenant toute son importance et doit être pris en considération [Benoudjit, 2016].

Tableau II.2: Stations d'épuration en Algérie

Stations d'épuration	Nombre
Boues activées	67
Lagunage naturel	59
Lagunage aéré	20
Filtre à sable	4
Filtre planté de roseaux	1
Jardin filtrant	1
Oxydation alternée	1
Réacteur séquentiel discontinu	1
Totale	154

II.5 Règlementation nationale et gestion des boues

Les boues produites par les unités de traitement des eaux usées en Algérie sont évacuées vers les destinations suivantes :

- Décharge publique.
- Centre d'enfouissement technique (CET).
- Aires de stockage.
- Agriculture et forêts.

À noter qu'aucun traitement des boues résiduelles par incinération n'a encore été effectué en Algérie. La législation a toute son importance dans une politique de gestion des déchets dans une optique de développement durable et de préservation de l'environnement et de la santé de l'homme. A l'heure actuelle l'Algérie ne dispose pas de textes règlementaires concernant la gestion des boues résiduelles. Cependant une norme algérienne a été établie en 2010. C'est la norme NA 17671 relative aux boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaine subtilisées comme matières fertilisantes dont l'objectif est de fixer les dénominations et spécifications des boues des ouvrages de traitement des eaux usées urbaines et les conditions de leur mise en œuvre ainsi que les restrictions de leur emploi en présence de métaux lourds. La norme NA 17671 fixe de ce fait des limites quant à la concentration maximale en éléments traces métalliques. Cependant cette norme n'aborde pas les teneurs limites admissibles en micropolluants organiques (composés traces organiques) qui sont également toxiques et peuvent s'accumuler dans le sol.

La norme algérienne NA 17671 a été livrée aux unités de traitement, notamment à l'Office National d'Assainissement (ONA) qui est le gestionnaire de la plupart des stations d'épuration implantées sur le territoire national [Benoudjit,2016].

Tableau II.3: Teneurs en éléments traces métalliques pour les boues en Algérie selon la Norme NA 17671.

Éléments	Teneurs (mg/kg de MS)
Cd	20
Cr	1000
Cu	1000
Hg	10
Ni	200
Pb	800
Se	100
Zn	3000
Cr +Cu +Ni +Zn	4000

II.6 Principales filières de valorisation de la boue d'épuration en Algérie

En Algérie, plusieurs filières de valorisation de la boue d'épuration sont mises en œuvre ou en cours de développement

- **Valorisation agricole**

La boue d'épuration, après traitement et stabilisation, peut être utilisée comme amendement organique pour l'agriculture. Elle apporte aux sols des éléments nutritifs tels que l'azote, le phosphore et le potassium, et améliore la structure et la fertilité des sols.

- **Valorisation énergétique**

La boue d'épuration peut être séchée et incinérée pour produire de l'énergie. La valorisation énergétique permet de réduire le volume de boues à éliminer et de valoriser une partie de leur contenu énergétique.

- **Valorisation industrielle**

La boue d'épuration peut être utilisée comme matière première dans certains procédés industriels, tels que la fabrication de briques ou de mortier.

Le schéma ci-dessous (figure 4) présente une vue globale des techniques de traitement sur STEP et les destinations des boues traitées

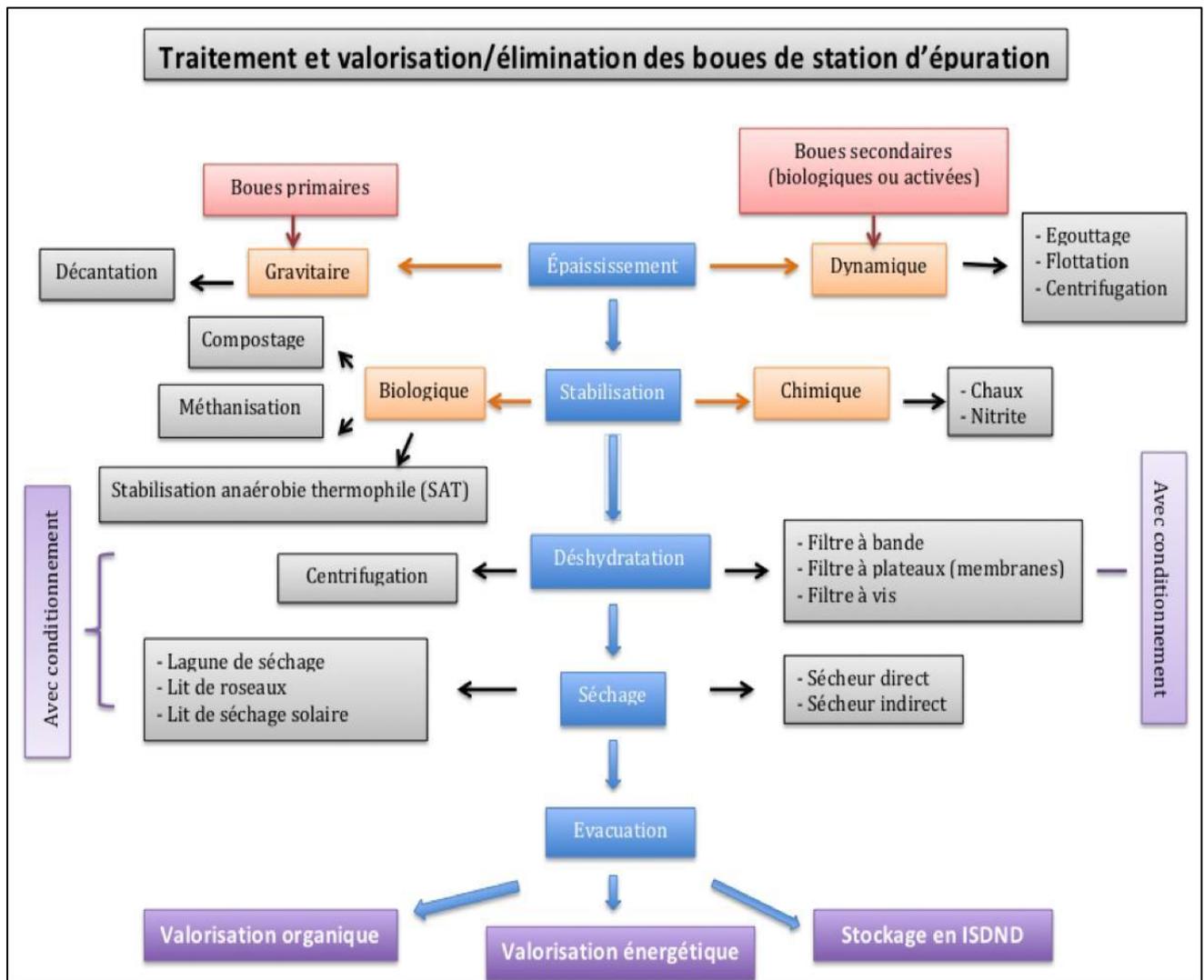


Figure. II.4: Techniques de traitement des boues et leurs destinations

II.7 Différentes filières de valorisation des boues [Adraoui,2020]

Les filières de valorisation présentées dans cette partie ont en commun l'utilisation des boues en tant que matériau secondaire. Elles peuvent être classées en plusieurs groupes, selon la propriété physique, chimique ou minérale recherchée. On peut distinguer les différentes filières de valorisation présentées ci-après

II.7.1 Utilisation en tant que matériau de revêtement ou de revêtement dans les centres de stockage

Les matériaux de revêtement ou de recouvrement d'une décharge sont employés pour boucher les transferts liquides (lixiviation) et gazeux (biogaz) à partir d'un centre de stockage. Les matériaux employés classiquement sont les argiles, sensibles à la dessiccation. La formation de fissures est par conséquent possible, ce qui peut se traduire par l'apparition de voies d'écoulement. En effet, les boues compactées en une masse dense peuvent être examinées comme agent possible d'étanchéité de la décharge.

II.7.2 Utilisations des boues en tant que produits ou additifs de traitement

Les boues d'épuration présentent également un caractère pouzzolanique. De plus, les boues d'épuration et la chaux hydratée peuvent être utilisées pour évaluer des propriétés et la résistance du sol de fondation cohésive souple [Chen & Lin, 2009]. Dans ce sens, il est recommandé par Chen & Lin (2009), de les utiliser en mélange avec du ciment selon un rapport fixe boues : ciment de 4:1. La résistance à la compression non confinée des éprouvettes de sol avec l'ajout de boues/ciment est d'environ 3 à 7 fois supérieures à celle du sol non traité. De même, le gonflement est également réduit dans une fourchette de 10 à 60%.

II.7.3 Utilisation dans le domaine du traitement des effluents liquides

En plus, de leur abondance en silicium et en aluminium, les boues d'épuration présentent des propriétés intéressantes en termes de surface spécifique et d'échange ionique. Il a été montré qu'elles ont la capacité à éliminer les métaux lourds, et notamment le cuivre des eaux usées. Les fondamentaux mécanismes d'élimination du cuivre par les boues d'épuration sont l'attraction électrostatique, la formation de surface complexe à la surface d'échange et l'échange de cations. Aussi, la précipitation de l'hydroxyde de cuivre offre une possibilité d'élimination supplémentaire. Celle-ci a lieu si le dosage des boues d'épuration et le pH d'équilibre des eaux usées sont à un niveau élevé (30 à 40g.L⁻¹ et plus de 6, 02 respectivement).

II.7.4 Valorisation des boues en tant que matières premières secondaires

Ces voies ont fait l'objet d'études focalisées sur les aspects techniques. Dans tous les cas, la faisabilité technique a été démontrée. Dans la plupart des études, l'évaluation environnementale rarement a été mise en œuvre. Cette étape serait indispensable avant tout développement à l'échelle industrielle.

- **Valorisation des boues dans les produits céramiques**

La céramique peut être préparée à partir des boues seules ou en mélange avec des additifs comme kaolin, montmorillonite, illites et poudre de verre plat auxquelles on applique un traitement thermique dans la fabrication des produits céramiques contenant les boues d'épuration, la procédure la plus importante est le traitement thermique.

- **Fabrication de tuiles et de briques**

Plusieurs auteurs dans la littérature ont montré que les boues d'épuration peuvent être additionnées à l'argile pour manufacturer des tuiles et/ou briques. Dans le procédé de fabrication, parmi les paramètres importants est la température atteinte au cours du traitement thermique. De plus, quand la température de frittage passe de 1050°C à 1100°C, la densité apparente et la quantité de quartz diminuent, ce qui n'est pas souhaitable pour la bonne qualité du produit fini. Dans ce cadre, il a été rapporté qu'un taux de remplacement d'argile par les boues de 20% permet de satisfaire les exigences de la norme nationale chinoise pour les briques secondaires. Toutefois, il faut noter que le remplacement des boues monte l'absorption de l'eau des tuiles, la susceptibilité à l'abrasion et la porosité.

- **Valorisation des boues en granulats de faible densité**

La manufacture de granulats légers signifie une filière de valorisation particulièrement intéressante pour les boues d'épuration. En raison, les granulats de faible densité ont pour quelques applications plus de valeur que des agrégats de densité normale. Les granulats

naturels ont généralement des densités de particules comprises entre 2,4 et 2,8g/cm³ ; tandis que les densités de granulats légers sont comprises entre 0,8 et 2,0g/cm³ selon les résultats de [Chen, 2012]. Les granulats légers sont, par conséquent, utilisés pour produire du béton léger et d'autres produits de construction légers. Ils sont également utilisés dans d'autres applications telles que l'ingénierie des sols, le remplissage géotechnique léger, les produits d'isolation, l'hydro culture, le drainage et les filtres. La faible densité offre également des avantages supplémentaires tels qu'une meilleure isolation thermique et une bonne inertie thermique. En outre, certains travaux montrent la possibilité d'employer les boues d'épuration pour la fabrication de granulats de faible densité, en utilisant un traitement relativement simple et un frittage à faible température.

- **Fabrication de matériaux légers à base de boues d'épuration**

Les boues résiduelles peuvent être employées dans des matériaux d'isolation thermique. En raison, de leur texture poreuse avec des particules généralement irrégulières, ce qui approuve d'obtenir des matériaux à faible conductivité thermique.

II.8 Valorisation des boues d'épuration dans le domaine de la construction

Plusieurs résidus comme les boues d'épuration et sédiment du barrage ainsi que les déchets des combustions tels que les boues et les déchets solides municipaux ont été utilisés avec succès dans le domaine de la construction. L'intégration des boues d'épuration en remplacement du ciment ou du sable dans les matériaux cimentaires est également remarquable dans certaines études récentes est couramment admis que d'un point de vue économique et technique, les matériaux de substitution tels que les boues et sédiments du barrage peuvent être utilisés comme substituts du ciment traditionnel et/ou des granulats dans les formulations de béton.

II.9 Avantages d'utilisation de la boue d'épuration recyclée dans le domaine De la construction

L'utilisation de la boue d'épuration recyclée dans le domaine de la construction présente plusieurs avantages environnementaux, économiques et techniques :

II.9 .1 Avantages environnementaux

- **Réduction des déchets**

La boue d'épuration représente environ 10 à 15% du volume d'eaux usées traitées. En la recyclant, on réduit considérablement la quantité de déchets à éliminer dans les décharges, ce qui contribue à préserver les sols et les ressources naturelles.

- **Diminution de l'empreinte carbone**

La production de matériaux de construction traditionnels comme le ciment et les briques est énergivore et génère des émissions importantes de gaz à effet de serre. L'utilisation de la boue d'épuration recyclée permet de réduire l'impact environnemental de la construction.

- **Amélioration de la qualité des sols**

La boue d'épuration recyclée peut être utilisée comme amendement pour enrichir les sols pauvres en nutriments. Elle apporte des éléments essentiels à la croissance des plantes, tels que l'azote, le phosphore et le potassium.

II.9.2 Avantages économiques

- **Réduction des coûts de construction**

La boue d'épuration recyclée est un matériau de construction peu coûteux par rapport aux matériaux traditionnels. Son utilisation permet de réduire les coûts de construction, ce qui est particulièrement intéressant pour les projets de logements sociaux ou d'infrastructures publiques.

- **Création d'emplois**

Le développement de la filière de recyclage de la boue d'épuration crée des emplois dans les domaines de la collecte, du traitement et de la valorisation des boues.

- **Stimulation de l'innovation**

L'utilisation de la boue d'épuration recyclée dans la construction encourage la recherche et le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de construction.

II.9.3 Avantages techniques

- **Propriétés mécaniques**

La boue d'épuration recyclée peut être utilisée pour fabriquer des matériaux de construction aux propriétés mécaniques intéressantes, tels que des briques, des blocs de béton et des bétons légers.

- **Durabilité**

Les matériaux de construction fabriqués à partir de boue d'épuration recyclée sont durables et résistants à l'eau, au gel et aux agressions chimiques.

- **Isolation thermique et acoustique**

La boue d'épuration recyclée est un bon isolant thermique et acoustique. Elle permet de construire des bâtiments plus confortables et plus économes en énergie.

II.10 Conclusion

La valorisation des boues d'épuration dans le domaine de la construction représente une voie prometteuse pour le recyclage de ces déchets. Leur incorporation dans les matériaux de construction tels que les briques, les bétons, les tuiles ou les granulats légers a été démontrée techniquement faisable par de nombreuses études.

Cette solution de valorisation présente de multiples avantages environnementaux, économiques et techniques. Elle permet de réduire les quantités de déchets à éliminer, de diminuer l'empreinte carbone de la construction, d'enrichir les sols pauvres et de créer de nouveaux débouchés économiques. L'utilisation des boues d'épuration recyclées dans les matériaux de construction offre également des propriétés intéressantes en termes de résistance mécanique, de durabilité, d'isolation thermique et acoustique.

Bien que certains aspects environnementaux restent à approfondir, le recyclage des boues dans la construction apparaît comme une filière de valorisation pertinente d'un point de vue technique, économique et écologique. Son développement contribuerait à la transition vers une économie plus circulaire dans le secteur de la construction.

Chapitre III

Matériaux et procédures expérimentales

Chapitre III

Matériaux et procédures expérimentales

III.1 Introduction

Cette partie d'étude a pour objectif de présenter les différents matériaux qui seront utilisés dans le cadre de cette étude expérimentale, ainsi que les procédures et méthodes d'essais mises en œuvre.

Dans un premier temps, les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques des matériaux de base comme les granulats (sable, graviers), le ciment, l'eau de gâchage, l'adjuvant et l'argile seront détaillées. Les propriétés de la boue d'épuration, matériau d'intérêt principal de cette étude, feront également l'objet d'une caractérisation approfondie.

Dans un second temps, le programme expérimental sera exposé. Celui-ci porte sur la fabrication de trois types de matériaux de construction incorporant les boues d'épuration à différents taux de substitution : les briques, les mortiers et les bétons. Les compositions des différents mélanges, ainsi que les procédés de fabrication seront explicités.

Enfin, les essais physiques (absorption d'eau, teneur en humidité) et mécaniques (résistances à la compression, à la flexion) qui seront réalisés sur ces matériaux seront décrits, fournissant les méthodes d'analyses permettant d'évaluer l'influence de l'incorporation des boues d'épuration sur leurs propriétés.

Cette présentation des matériaux, du programme expérimental et des méthodes d'essais est indispensable pour comprendre et interpréter les résultats qui seront exposés et discutés dans le chapitre suivant.

Partie 1 : Caractérisation des matériaux

III.2 Matériaux de construction

Nous avons utilisé pour les essais des matériaux disponibles et très utilisés localement dont les caractéristiques ont été déterminées expérimentalement au laboratoire de génie civil et d'hydraulique (LGCH) de l'université de 8 Mai 1945 Guelma.

Les différents matériaux utilisés dans cette étude sont :

- ❖ Sable de dune de la région de Tebessa,
- ❖ Deux types de graviers concassés (5/15 et 15/25) provenant de la carrière SARL SAPAM de la carrière Bendjerah Guelma,
- ❖ Ciment CPJ –CEM II-A 42.5 de la cimenterie de Hdjar Essoud (Skikda)
- ❖ Eau de gâchage du robinet.
- ❖ La boue de la station d'épuration de Guelma
- ❖ Argile de la carrière de Bendjerah Guelma

III.2.1 Caractéristiques du gravier

On appelle « gravier » les matériaux inertes, autres que le sable, qui entrent dans la Composition des bétons forment leurs squelettes, tandis que le ciment joue le rôle du lient qui Lie les grains de gravier en particulier et granulats en général pour former un corps solide (béton).



Figure III.1: gravier 15/25



Figure III.2 : gravier 5/15

III.2.1.1 Caractéristiques physiques des graviers

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Caractéristiques physiques des graviers

Désignation	5/15	15/25
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2.57	2.58
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.58	1.57
Impureté (%)	1	1.32

III.2.1.2 Caractéristiques mécaniques des graviers

Les graviers utilisés dans l'étude du béton, ont été soumis à deux essais mécaniques en laboratoire

- **Essai de résistance au choc (Essai Los Angeles)**

L'essai consiste à mesurer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de gravier [NF18-573, 90].

- **Essai de résistance à l'usure (Essai MD)**

L'essai consiste à mesurer [NF P18-572, 90] la quantité d'éléments inférieurs à 1.6mm, en soumettant le matériau à l'usure de boulets normalisés dans la machine de MICRO- DEVAL

(MD). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Caractéristiques mécaniques des graviers

Caractéristiques	5/15	15/25
Coefficient de Los Angeles	24%	29%
Coefficient Micro- Deval « MD »	20%	22%

Selon le mode opératoire défini par la norme [NF P18-573, 90] pour le coefficient de Los Angeles, le seuil est fixé à 40 %. Pour les deux graviers utilisés, on constate que le coefficient, nous pouvons conclure qu'ils sont utilisables pour le béton hydraulique.

Selon la norme [NF P18-572,90] le seuil est fixé à 35%. Si le coefficient ce qui est le cas pour les deux graviers testés, Il en résulte que le gravier est acceptable pour le béton.

III.2.1.3 Les caractéristiques chimiques des graviers

Les résultats de l'analyse chimique du gravier ont été fournis par la SARL SAPAM.

Tableau III.3 : Compositions chimiques des graviers

Désignation	%	%	Observations
	Insolubles	Carbonates	
5/15	09.10	88.62	Calcaires marneux
15/25	10.40	84.80	Calcaires marneux

III.2.2 Caractéristiques du sable

On appelle sable, les matériaux de petites dimensions issus de désagrégation des Roches, le sable est l'élément qui assure au béton et au mortier, selon ses qualités, une influence prépondérante, il participe à la résistance, il donne la cohésion du mélange. Il provient des roches, ils sont chimiquement inertes [Kouici, 2016].

Tableau III.4 : Caractéristiques du sable

Caractéristiques	Equivalent de sable		Compacité	Masse	Volumique
	ESV (%)	ES (%)	C (%)	Apparente	Absolue
				(g/cm ³)	(g/cm ³)
	80.43	77.08	64.51	1,54	2,70

Le sable est propre $75\% \leq \text{ESV} < 85\%$, et $70\% \leq \text{ES} < 80\%$: [NF-P 08.501]

III.2.3 Caractéristiques du ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé de classe 42.5, qui provient de la cimenterie de Hdjar Essoud (Wilaya de SKIKDA). Les différentes caractéristiques sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Caractéristiques physiques du ciment

Caractéristiques	Ciment
	CPJ-CEM II-A 42.5
Masse volumique absolue	3.1
Masse volumique apparente	1.12
Surface spécifique	3702



Figure III.3 : Ciment utilisé

III.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est une eau potable disponible au niveau du laboratoire de génie civil et d'hydraulique de l'université de Guelma.

III.2.5 Caractéristiques de l'adjuvant [Younes, 2021]

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant haut réducteur d'eau dit «SIKAPLASTE 40PRO» conforme à la norme [NF EN934-2], fabriqué par SIKKA. Sont parmi les super plastifiant haut réducteurs d'eau. Ils ont été développés pour optimiser la production du béton prêt à l'emploi où qualité, durabilité, performance, ouvrabilité, faible viscosité et robustesse sont requises. Ils se différencient des super plastifiants traditionnels par leurs facilités d'utilisations notamment pour les bétons fluides et auto-plaçant, même avec des dosages très faibles. Ces faibles viscosités alliées à une grande robustesse de béton permettent au SIKKA VISCO CRETETEMPO 12 d'améliorer considérablement le comportement dynamique et ainsi la mise en œuvre des bétons, tout en optimisant le dosage en liant du béton.

Tableau III.6 : Analyse chimique de l'adjuvant.

Paramètres	Résultat	Unité	Observation
Densité	1.06±0.01	l/m ³	/
PH	4.5±1	--	
Extrait sec	29±1.5	%	
Equivalent oxide sodium	≤1	%	
Teneur en ions chlorure	≤0.1	%	



Figure III.4 : Adjuvant utilisé

III.2.6 Caractéristiques de l'argile

Les argiles utilisées dans ce travail sont obtenues à partir du gisement de la briqueterie EL RIAD– Bendjerrah qui se situe à côté de la briqueterie à environ 9 Km au sud-ouest de la ville de Guelma.



Figure III.5: l'argile utilisée

III.2.7 Caractéristiques de la boue d'épuration

III.2.7.1 Localisation de boues prélevées

La boue d'épuration utilisée pour cette étude a été échantillonnée à partir de la station d'épuration de la ville de Guelma qui est située à Héliopolis près d'oued Seybouse. Elle se situe à 1 km environ au Nord de la ville sur le flanc droit de la vallée développée par l'Oued Seybouse. Elle Fonctionne depuis le 18 Février 2008 à raison de traiter d'environ : 32000 m³ /jour au temps sec et 43000 m³ / jour au temps pluie. La station est implantée sur un terrain agricole de 7.8 Hectares avec une capacité 200 000 équivalent / habitant .elle utilise le procédé de culture libre « boue activée » comme procédé d'épuration.

III.2.7.2 Préparation de la boue

- Étalage de la boue fraîche à l'air libre pour le séchage, environ 2 à 3 jours.
- Broyage de la boue sèche.
- Tamisage de la boue broyé.

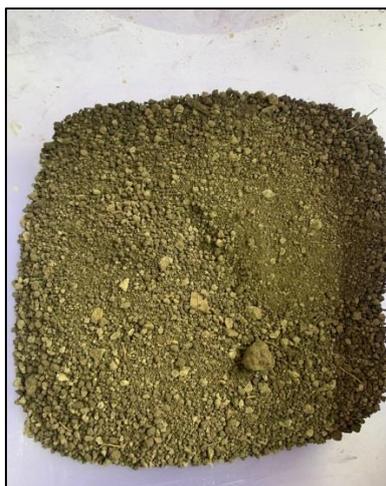


Figure III.6 : la boue sèche

III.2.7.3 Caractéristiques chimiques

Les résultats de l'analyse chimique de boue ont été fournis par la station d'épuration de Guelma.

Tableau III.7 : Caractéristiques chimiques de la boue.

Paramètres	Méthodes	Résultats	Unités
Cadmium	ISO 8288	7,5	Mg/kg
Chrome	NF EN 1233	30	Mg/kg
Cuivre	ISO 8288	102	Mg/kg
Nickel	ISO 8288	36	Mg/kg
Zinc	ISO 8288	395	Mg/kg

Partie II : Protocol expérimental

III.4 Programme expérimental

III.4.1 La brique

Dans le cadre de cette étude, des briques en terre cuite ont été fabriquées en incorporant différents taux de boues d'épuration en substitution partielle de l'argile. L'objectif est d'évaluer la faisabilité technique de valoriser ces boues résiduaires dans la fabrication de briques, ainsi que d'analyser l'influence de cet substitut sur les propriétés des briques.

Cinq formulations de briques ont été préparées, avec des taux de substitution massique de l'argile par les boues de 0% (brique de référence), 10%, 20% et 60%. Les mélanges argile/boues ont été réalisés selon le procédé traditionnel de briqueterie.

Le processus de fabrication comprend les étapes suivantes : préparation de la matière première par broyage et malaxage, façonnage par extrusion de la pâte, séchage naturel pendant 2 jours, puis cuisson dans un four tunnel à une température maximale de 900°C à 1200°C pendant 12 heures.

Sur les briques cuites, différents essais ont été réalisés afin de caractériser leurs propriétés physiques et mécaniques :

- Essais physiques : absorption d'eau .
- Essais mécaniques : résistance à la compression et résistance à la traction par flexion

Les méthodes normalisées utilisées pour ces essais seront détaillées.

Cette étape expérimentale est essentielle pour déterminer les performances des briques incorporant les boues d'épuration et évaluer la viabilité technique de cette solution de valorisation, en vue d'applications dans le secteur de la construction.

Tableau III.8 : Compositions des Briques (Kg/m³).

N	Notation	Argile (kg)	Boue (kg)	E (Kg)
1	Br0%	410	--	46
2	Br10%	355	45	46
3	Br20%	310	90	46
4	Br60%	90	310	46

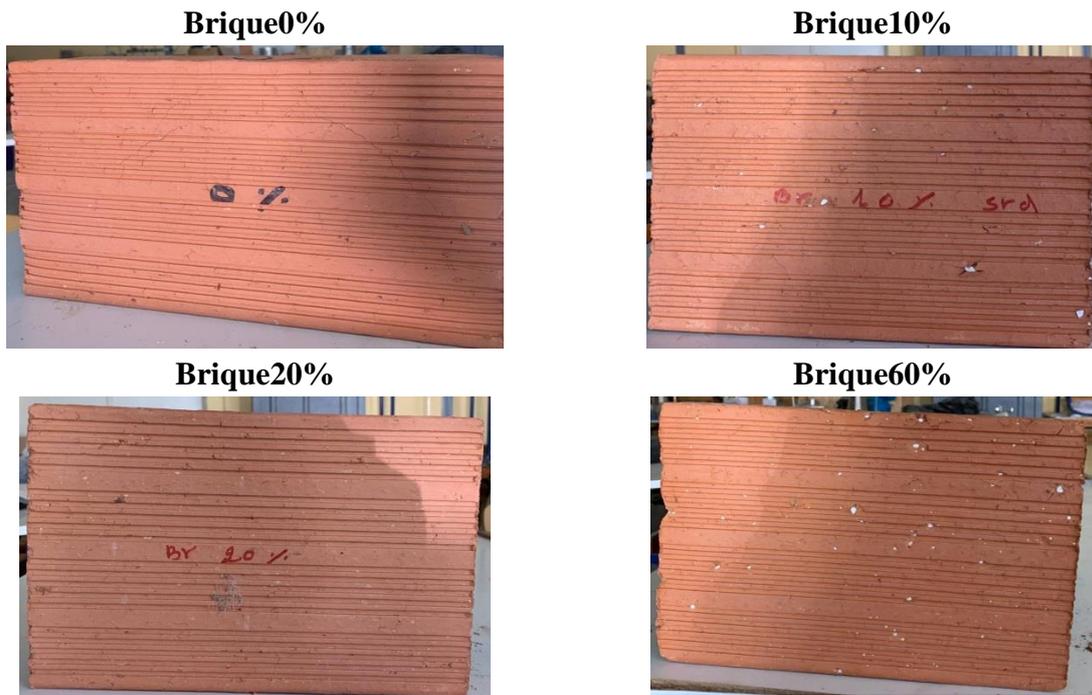


Figure III.7 : les différentes briques testées

III.4.1.1 Processus de fabrication de brique

Le processus de fabrication de brique est effectué au niveau de la briqueterie El Riad-Bendjerrah. Il se fait selon les étapes suivantes :

- La préparation
- Le façonnage.
- Le séchage.
- La cuisson

III.4.1.1.1 La Préparation de la matière première

La préparation de matière première comprend deux opérations principales : le broyage et le malaxage, ces opérations ont pour but de rendre la masse d'Argile homogène et de lui conférer la plasticité nécessaire au moulage des briques. L'Argile provenant du gisement situé à côté de la briqueterie .



Figure III.8 : Le broyeur utilisé

III.4.1.1.2 Façonnage

On a préparé environ 310 kg d'Argile, et 46 kg d'eau et respectivement (0, 45, 90,310) kg de boues pour le dosage de 0%, 10%, 20%, et 60%. On a mélangé la quantité d'argile broyée à laquelle on a ajouté de l'eau et la matière organique (Boue) , jusqu'à obtenir une pâte apte au façonnage (qui ne colle pas aux doigts).

Le façonnage de la pâte consiste à l'extruder à l'aide d'extrudeuse mono-vis. Pour obtenir ainsi des briques qui vont par la suite être coupées, séchées et frittées.



Laminoir Finisseur



Mélangeur



Un boudin d'échantillon à la sortie de l'Étireuse



Pré-coupeur

Figure III.9 : les différentes étapes de façonnage

III.4.1.1.3 Séchage

Le séchage est une phase nécessaire dans le processus de fabrication des briques, il a pour but d'éliminer une grande partie d'eau utilisée lors du façonnage, cette quantité peut atteindre jusqu'à 30% par rapport à la masse sèche. Cette phase est délicate et doit être minutieusement contrôlée pour éviter des fissurations, des retraits importants et des distorsions des produits finis en terre cuite. Les produits subissent un séchage naturel durant 2 jours



Figure III.10 : le séchoir

III.4.1.1.4 Cuisson

C'est la dernière étape que doit subir la brique d'argile façonnée et séchée. La cuisson se fait en trois phases :

- Le préchauffage
- La cuisson proprement dite
- Le refroidissement

Un cycle de cuisson dure de 12h. La cuisson des briques nécessite une température du four de 900°C à 1200°C. Le matériau a atteint alors ses propriétés de résistance mécanique, porosité, résistance au gel, absorption d'eau, elle se fait dans un four tunnel qui permet une production en continue, sa longueur est de 106 m, le combustible utilisé est le gaz naturel, source énergétique très peu polluante.



Figure III.11 : Le four utilisé

III.4.2 Mortier [Benoudjit, 2016]

Dans le cadre de cette étude, des mortiers ont été formulés en substituant partiellement le ciment par des quantités variables de boues d'épuration séchées. L'objectif est d'évaluer la faisabilité technique d'incorporer ces boues résiduelles dans la composition des mortiers, ainsi que d'analyser les effets de cette substitution sur les propriétés mécaniques.

Cinq formulations de mortier ont été préparées, avec des taux de substitution massique du ciment par les boues de 0% (mortier de référence), 5%, 10%, 15% et 20%. Le sable, le liant (ciment + boues) et l'eau ont été mélangés selon la procédure normalisée [NF EN 196-1].

Des éprouvettes prismatiques de dimensions 4x4x16 cm³ ont été confectionnées pour chaque formulation. Après un démoulage à 24h, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre jusqu'aux échéances de 7, 14 et 28 jours avant d'être testées.

Aux différentes échéances, les propriétés mécaniques des mortiers ont été caractérisées au moyen de deux essais normalisés :

- Essai de résistance en flexion trois points
- Essai de résistance en compression sur les demi-épreuves issues de l'essai de flexion.

Les méthodes d'essais, les calculs des résistances et l'exploitation des résultats pour évaluer les taux de résistance résiduelle par rapport au mortier de référence seront explicités.

Cette campagne expérimentale permettra de déterminer les performances mécaniques des mortiers incorporant les boues d'épuration et d'évaluer jusqu'à quel taux de substitution cette valorisation reste viable techniquement.

La composition des éprouvettes testées de mortier est reportée sur le Tableau III.9 ci-dessous.

Tableau III.9 : Composition des éprouvettes de mortier

Nominations des mortiers	Taux de substitution du ciment (%)	Boue (Kg /m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Adjuvant (kg/m ³)	Eau (kg/m ³)
M0	0%	0	450	1350	11,3	247,5
M5	5%	22,5	427,5	1350	11,3	270
M10	10%	45	405	1350	11,3	270
M15	15%	67,5	382,5	1350	11,3	270
M20	20%	90	360	1350	11,3	270

III.4.2.1 Confection des éprouvettes de mortiers

La procédure de fabrication des mortiers s'est faite selon la norme [NF EN 196-1] relative aux mortiers normalisés. Le gâchage est effectué dans un malaxeur CONTROLAB.

Une fois le malaxage achevé, le mortier est coulé dans des moules en acier en deux couches égales, chacune étant suivie de 60 coups à la table à chocs (marque : CONTROLAB) pour favoriser l'évacuation des bulles d'air. Les éprouvettes de mortier sont démoulées vingt-quatre (24) heures. Les éprouvettes de mortier ont été stockées à température ambiante. Afin de pouvoir étudier l'influence de la substitution du ciment à différentes proportions par les boues sur la résistance des mortiers. Ces dernières seront testées à 7 jours, 14 jours et à 28 jours.

Les quantités des différents constituants pour chaque formulation de mortier, reportées sur le tableau III.7, permettent l'élaboration d'une série de trois (03) éprouvettes de dimension (4x4x16) cm³ Chaque formulation a été répétée cinq (05) fois afin d'obtenir quinze (15) éprouvettes pour chaque substitution, soit quatre (04) éprouvettes pour chaque âge (7 jours, 14 jours et 28 jours) [Benoudjit,2016] .

Le processus de fabrication du mortier se déroule comme suit :

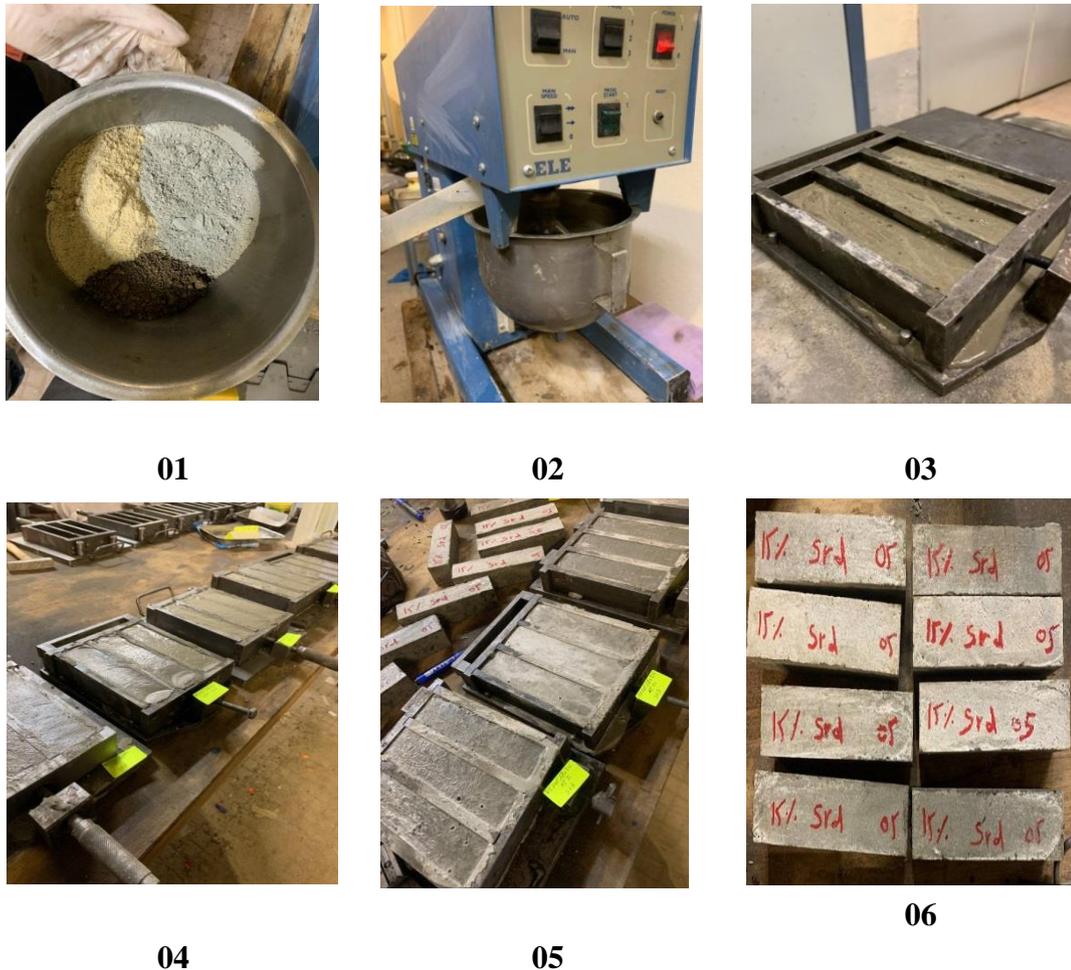


Figure III.12 : Le processus de fabrication du mortier

Tableau III.10 : l'étalement des mortiers

Consistance d'utilisation	Valeurs d'étalement
Mortier raide	< 14 cm
Mortier plastique	Entre 14 cm et 20 cm
Mortier fluide	> 20 cm

- Les valeurs de l'essai d'étalement du mortier variée entre 13,5 cm et 19,5, donc notre mortier est plastique.



Figure III.13: Essai d'étalement des mortiers

III.4.3 Béton

L'objectif de cette partie de l'étude est d'évaluer la faisabilité technique d'incorporer les boues d'épuration séchées en substitution partielle du ciment dans la formulation de bétons ordinaires. Cinq compositions de béton ont été préparées en faisant varier les taux de substitution massique du ciment par les boues (0%, 5%, 10%, 15% et 20%).

La formulation de référence (0% de boues) a été réalisée avec un ciment Portland classique. Pour les quatre autres formulations, le liant était constitué d'un mélange de ciment et de boues séchées aux taux définis. Les autres composants (granulats, sable, eau,) sont restés inchangés.

Le malaxage des bétons a été effectué selon la norme [NF P 18-404] avec introduction successive des différents constituants secs puis ajout de l'eau. Après malaxage, le béton frais a été coulé dans des moules cubiques $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ puis vibré. Après un démoulage à 24h, les éprouvettes ont été conservées à l'air libre jusqu'aux échéances d'essais.

Aux âges de 7, 14 et 28 jours, les propriétés mécaniques des bétons ont été caractérisées par :

- L'essai de résistance à la compression selon la norme [NF EN 12390-3]

Cette série d'essais permettra d'évaluer l'évolution dans le temps des résistances mécaniques des bétons en fonction des taux d'incorporation des boues d'épuration, et ainsi de déterminer les seuils acceptables pour cette solution de valorisation.

Tableau III.11: Composition des bétons testés.

Composition (kg/m ³)	Sable	Gravier 5/15	Gravier 15/25	Ciment	Eau	boue
B0	900	337,5	1012,5	450	225	-
B5	900	337,5	1012,5	427,5	225	22,5
B10	900	337,5	1012,5	405	225	45
B15	900	337,5	1012,5	382,5	225	67,5
B20	900	337,5	1012,5	360	225	90

Le malaxage du béton est effectué selon la norme [NF P 18-102]. Les constituants sont introduits dans la cuve dans l'ordre suivant :

- Placer les gros graviers, liant (ciment + la boue) et le sable.
- Malaxer à sec pendant 1mn.
- Ajouter l'eau d'une façon uniforme et malaxer pendant 2mn
- Directement après le malaxage on remplit les moules à raison de deux couches, la vibration est effectuée à l'aide d'un vibreur
- Enfin araser et lisser la surface du béton à l'aide d'une truelle.
- Les éprouvettes sont ensuite maintenues dans le moule pendant 24 heures.
- Après démoulage, les éprouvettes sont pesées et conservées à l'air libre jusqu'à la date d'essai.



A



B



C



Figure III.15 : Essai d'absorption d'eau

III.5.1.2 Essai de l'humidité

L'essai de l'humidité mesure la teneur en eau totale d'un échantillon de matériau, y compris l'eau libre et l'eau liée présente dans le matériau. Cette méthode permet d'évaluer la quantité d'eau présente dans le matériau après un séchage à une température spécifiée, ce qui peut influencer les propriétés mécaniques et le comportement du matériau.

- **Procédure d'essai**

- Peser l'échantillon frais.
- Sécher l'échantillon à une température spécifiée jusqu'à obtention d'un poids constant.
- Peser à nouveau l'échantillon pour déterminer le poids sec
- Calculer la teneur en eau en pourcentage par rapport au poids sec de l'échantillon.

Teneur en Eau (%) = (Poids frais de l'échantillon - Poids sec de l'échantillon / Poids sec de l'échantillon) × 100



Figure III.16 : Essai de l'humidité

III.5.2 Essais mécaniques

III.5.2.1 Essai mécaniques sur le béton et la brique

III.5.2.1.1 La résistance en compression

Pour déterminer la résistance à la compression des éprouvettes, l'essai est réalisé par une presse d'une capacité maximale de 3000 kN, conformément à la norme [NF EN 12390-3]. Les éprouvettes sont positionnées entre les plateaux de la presse, en veillant à ce que leur axe de compression soit aligné avec la rotule du plateau supérieur. La charge est alors appliquée de manière progressive, avec une vitesse de montée en charge maintenue constante entre 0,3 et 0,7 MPa par seconde, comme spécifié par la norme. Cette vitesse de chargement contrôlée permet d'assurer des conditions d'essai reproductibles. L'essai se poursuit jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette sous l'effet de la charge de compression croissante. [Gorisse, 1978] et on mentionne le résultat d'essai d'écrasement selon la norme [Kedjour, 2003].



Figure III.17 : La presse utilisée.

Avant l'exécution de l'essai, on doit s'assurer de la planéité de surface de contact supérieure ainsi que de l'orthogonalité du cylindre. On a déposé entre les plateaux et les faces des éprouvettes du carton. Ceci dans le but de diminuer l'effet du frottement.

III.5.2.1.2 La résistance à la traction par flexion [NF EN 772-6]

L'essai de résistance à la flexion sur les briques est réalisé sur des éprouvettes parallélépipédiques de dimensions 10x20x30 cm³. Durant l'essai, une charge est appliquée sur la longueur de l'éprouvette au moyen de deux rouleaux, l'un supérieur et l'autre inférieur.

Cette charge augmente progressivement jusqu'à provoquer la rupture par flexion de l'éprouvette de brique. La valeur maximale de la charge appliquée juste avant la rupture est alors relevée. À partir de cette charge maximale et des dimensions de l'éprouvette, la résistance à la traction par flexion de la brique peut être calculée selon la formule normalisée suivante :

$$R = \frac{3 PL}{2 bh^2}$$

R: la résistance en traction par flexion (MPa) ou (N/mm²).

P : la charge maximale (N).

L : écartement entre les appuis (mm).

b: épaisseur de l'éprouvette (mm).



Figure III.18 : Essai de la résistance à la traction par flexion de brique

III.5.2.2 Essai mécaniques sur le mortier [Benoudjit, 2016]

Afin de caractériser les propriétés mécaniques des mortiers aux différents âges de 7, 14 et 28 jours, deux essais ont été réalisés :

III.5.2.2.1 Essai de flexion trois points NF EN 1015-11

Le premier essai porte sur la résistance à la flexion trois points. Il est effectué sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm, à l'aide d'une presse CONTROLS équipée d'un dispositif de flexion conforme à la norme [NF EN 1015-11]. Ce dispositif comprend deux rouleaux d'appui inférieurs en acier de 10 mm de diamètre espacés de 100 mm, ainsi qu'un rouleau supérieur de même diamètre placé à mi-distance des deux autres pour l'application de la charge. La longueur des rouleaux est comprise entre 45 et 50 mm. L'essai consiste à appliquer une charge croissante à vitesse constante sur le rouleau supérieur jusqu'à la rupture par flexion de l'éprouvette.



Figure III.19 : L'essai de flexion à l'état durci.

III.5.2.2.2 La résistance de compression[NF EN 196-1]

Le deuxième essai est un essai de compression (avec une surface de contact de 4cm²) sur les demi-échantillons issues de l'essai de flexion. Il est réalisé à une vitesse de chargement constante sur une presse de type CONTROLS, ayant une capacité maximale de 3000 kN. L'objectif de cet essai est de déterminer la résistance à la compression. Chaque demi-échantillon, obtenue par flexion, est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. Les résultats des essais de résistance à la compression sont exprimés en (MPa). Une fois les

résistances en flexion et en compression obtenues, les taux de résistance résiduelle en flexion et en compression sont calculés.

Ces taux sont définis comme les rapports des résistances des éprouvettes modifiées par rapport aux résistances des éprouvettes non modifiées (témoins) du même âge.



Figure III.20: Essai de compression réalisé sur les éprouvettes (4 x 4 x 16) cm³

III.6 Conclusion

Ce chapitre a détaillé les différents matériaux utilisés dans l'étude (sable, graviers, ciment, eau, adjuvant, argile, boues d'épuration) ainsi que leurs caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques.

Ensuite, le programme expérimental mené sur trois types de matériaux (briques, mortiers, bétons) a été décrit précisément. Les compositions des différents mélanges intégrant des taux variables de substitution du ciment ou de l'argile par les boues d'épuration ont été présentées. Les procédés de fabrication des briques, des mortiers et des bétons ont également été expliqués étape par étape.

Enfin, les essais physiques (absorption d'eau, teneur en humidité) et mécaniques (résistance à la compression, résistance à la flexion) réalisés sur les différents matériaux ont été décrits, fournissant les méthodes d'analyse permettant d'évaluer les propriétés des mélanges incorporant les boues d'épuration.

Cette partie matériaux et méthodes détaillée permet ainsi de bien cerner les modalités de l'étude expérimentale menée, en préparation de l'analyse et de la discussion des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

Analyse et interprétation des résultats

Chapitre IV

Analyse et interprétation des résultats

IV. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter, analyser et interpréter les résultats des essais mécaniques réalisés sur différents matériaux de construction (béton, brique, mortier) incorporant des dosages variables de boues de station d'épuration.

L'objectif est d'évaluer l'impact de cette incorporation de boues, considérées comme un déchet, sur les performances mécaniques clés que sont la résistance à la compression et la résistance à la flexion. Ces propriétés sont en effet primordiales pour assurer la tenue structurelle et la durabilité des ouvrages en béton, brique ou mortier.

Les essais ont été menés sur des éprouvettes avec des taux d'incorporation de boues allant de 0% (matériaux témoins) jusqu'à 20% pour le béton et le mortier, et jusqu'à 60% pour la brique. Les résistances mécaniques ont été mesurées à différents âges (7, 14 et 28 jours) afin de suivre leur évolution dans le temps.

L'analyse détaillée des résultats permettra de dégager les tendances et d'identifier les dosages critiques au-delà desquels les pertes de résistances deviennent trop importantes. Nous tenterons également d'expliquer les mécanismes en jeu et les raisons de la dégradation ou non des propriétés, en nous appuyant sur la littérature scientifique.

IV.2 Essai de la capacité d'absorption d'eau (CAE)

Tableau IV.1 : Variation de CAE en fonction du dosage de la boue.

Matériaux Dosage	Brique	Béton	Mortier
0%	11,35%	1,82%	4,03%
5%	-	1,40%	3,9%
10%	9,95%	1,73%	7,17 %
15%	-	1,20%	6,94%
20%	9,69%	0,63%	8,77 %
60%	12,75%	-	-

IV.3 Essai d'humidité

Tableau IV.2 : Variation du taux de l'humidité en fonction du dosage de la boue.

Matériaux Dosage	Béton	Mortier
0%	2,63%	4,07%
5%	3,79%	4,76%
10%	3,07%	4,53%
15%	3,50%	4,47%
20%	1,92%	3,48%

L'étude des propriétés d'absorption d'eau et d'humidité de briques, bétons et mortiers incorporant différents dosages de boues de station d'épuration a mis en évidence des comportements contrastés selon le type de matériau et la teneur incorporée.

Pour les briques, si la capacité d'absorption d'eau (CAE) diminue légèrement jusqu'à 20% de boue, elle augmente de manière significative (+12,3%) pour un dosage élevé de 60%, probablement en raison d'une porosité accrue de la matrice cimentaire par les matières organiques.

Les bétons semblent peu impactés par l'ajout de boue, avec une CAE restant très faible (< 2%) quelle que soit le dosage. On note cependant une baisse progressive de 65% de la CAE à 20% de boue. L'humidité interne subit une légère hausse jusqu'à 15% de boue (+32,9%) avant de rechuter à 20%.

C'est sur les mortiers que l'effet des boues est le plus marqué, avec une très forte augmentation de la CAE dès 10% de boue, atteignant +118% à 20%. Cette hausse importante est probablement liée à une porosité accrue et des défauts d'interface pâte/granulats. L'humidité semble quant à elle légèrement diminuer avec l'ajout de boue.

En synthèse, si les propriétés hydriques des bétons ne sont que peu altérées, l'incorporation de boues de station d'épuration entraîne des changements notables pour les mortiers et les briques, en particulier à forte teneur. Ces modifications de la compacité et des transferts hydriques devront être prises en compte pour le développement d'éco-matériaux valorisant ces boues résiduelles, en les reliant aux performances mécaniques et à la durabilité.

IV.4 Influence du taux de la boue sur la résistance

IV.4.1 Évolution de la résistance à la compression

IV.4.1.1 Le béton



Figure IV.1 : Mode de rupture des éprouvettes par la presse.

Tableau IV.3 : Variation de la résistance en compression des bétons en fonction du dosage la boue des stations d'épuration

Age		7jours	14jours	28jours
R (MPa)				
Compression	B 0%	25,70±0,05	25,65±0,03	28,70± 0,08
	B 5%	21,01±0,02	21,62± 0,05	22,54±0,06
	B10%	17,60±0,08	19,06±0,06	21,92±0,03
	B15%	18,97±0,06	18,93±0,08	20,67±0,05
	B20%	15,05±0,08	17,09±0,02	17,17±0,03

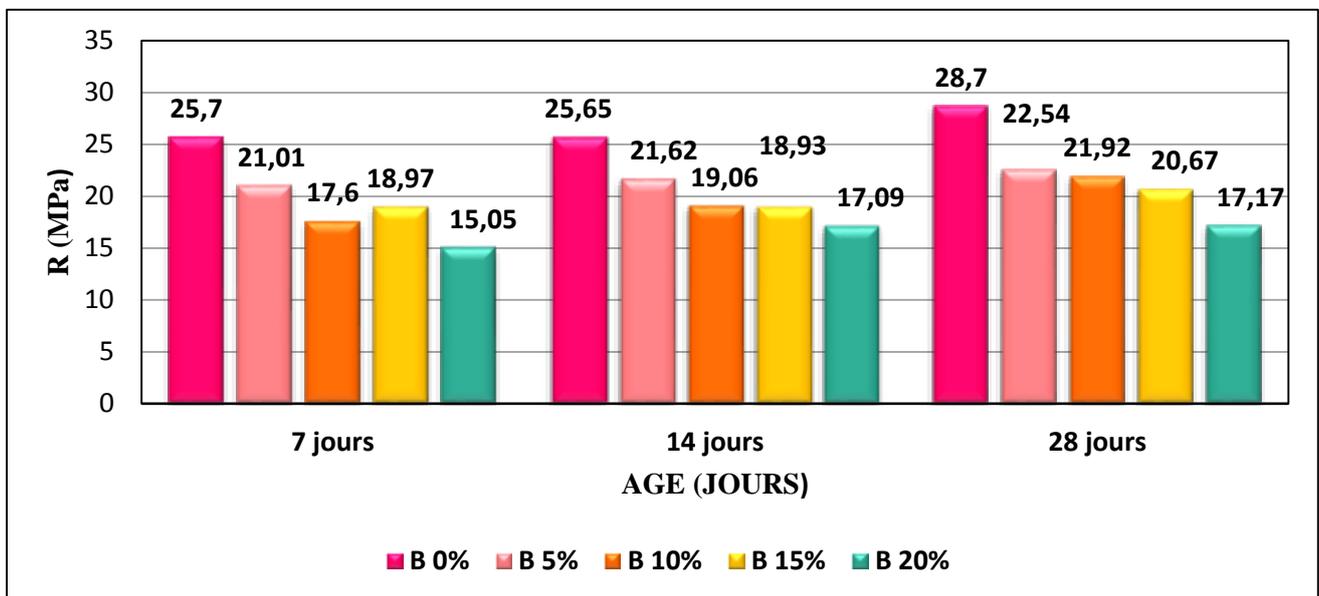


Figure IV.2 : Variation de la résistance en compression du béton en fonction du dosage la boue des stations d'épuration

On observe une diminution générale de la résistance à la compression avec l'ajout de boue dans le béton :

- Le béton témoin sans ajout de boue (B0%) présente les résistances en compression les plus élevées à tous les âges : 25,70 MPa à 7 jours, 25,65 MPa à 14 jours et 28,70 MPa à 28 jours.

- L'incorporation de boue dans le béton entraîne une diminution de la résistance en compression par rapport au béton témoin. Cette baisse est d'autant plus marquée que

le dosage en boue est élevé.

- À 7 jours, les pertes de résistance par rapport au témoin sont d'environ 22% pour 5% de boue, 32% pour 10%, 30% pour 15% et 42% pour 20%.

- À 14 jours, les baisses respectives sont de 16% (5%), 26% (10%), 26% (15%) et 33% (20%).

- À 28 jours, les diminutions sont de 21% pour 5% de boue, 24% pour 10%, 28% pour 15% et 40% pour 20%.

- On note une légère reprise de résistance entre 14 et 28 jours pour les bétons avec 5% et 10% de boue. En revanche, pour 15% et 20%, la résistance stagne voire diminue légèrement sur cette période.

En résumé, l'ajout de boue dégrade significativement les performances en compression des bétons, en particulier pour les dosages élevés (15-20%). Une teneur en boue de 5 à 10% semble être mieux tolérée avec un regain partiel de la résistance entre 14 et 28 jours d'âge.

- Ceci peut s'expliquer par une dilution du ciment, une perturbation de l'hydratation et l'introduction de porosités supplémentaires [Yong Yuan et al. 2022, Amin et al. 2017].

Cette dégradation des performances est principalement liée à la dilution de la matrice cimentaire par la boue, qui perturbe l'hydratation du ciment. La boue contient également des matières organiques qui peuvent interférer avec ce processus [Yong Yuan et al. 2022]. De plus, son incorporation augmente la porosité du béton, ce qui diminue sa compacité et affaiblit sa résistance mécanique [Amin et al. 2017].

L'impact est plus prononcé aux jeunes âges (7 jours) quand la structure n'est pas totalement formée, comparé aux âges tardifs (28 jours).

IV.4.1.2 La brique



Figure IV.3 : Mode de rupture de la brique par la presse.

Tableau IV.4 : Variation de la résistance en compression de la brique en fonction du Dosage de la boue

Dosage	0%	10%	20%	60%
R(MPa)				
Compression	2,53	2,32	2,36	1,29

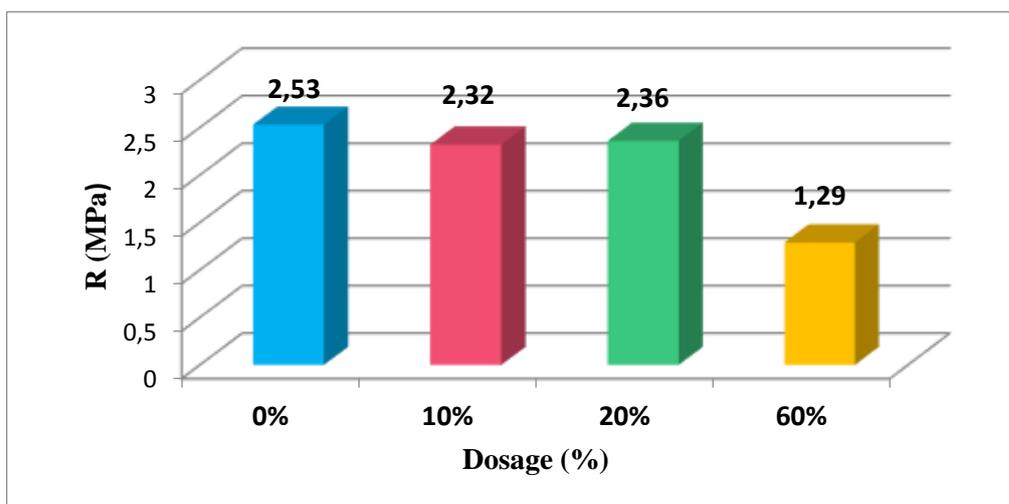


Figure IV.4 : Variation de la résistance en compression de la brique en fonction du dosage la boue des stations d'épuration

Pour la brique, on n'observe pas de baisse significative de la résistance en compression jusqu'à 20% de boue incorporée :

- 0% : 2,53 MPa
- 10% : 2,32 MPa (-8,3%)
- 20% : 2,36 MPa (-6,7%)

Cependant, à 60% de boue, on constate une chute importante de -49% (1,29 MPa).

- L'ajout de boue jusqu'à 20% ne semble pas dégrader significativement la résistance en compression par rapport au brique témoin.
- En revanche, un dosage élevé de 60% de boue entraîne une baisse importante (-49%) de la résistance.
- Ceci pourrait s'expliquer par une trop forte dilution de la matrice argileuse et l'apparition de défauts structurels [Phonphuok et al 2019, Lin 2007].

IV.4.1.3 Le mortier



Figure IV.5 : Mode de rupture des éprouvettes de mortier par la presse.

Tableau IV.5: Variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de la boue

Age		7jours	14jours	28jours
R (MPa)				
Compression	M 0%	21,65±0,01	35,50±0,03	36,56±0,04
	M 5%	17,28±0,02	17,47±0,04	22,57±0,02
	M 10%	16,73±0,03	16,85±0,02	16,94±0,02
	M 15%	10,40±0,04	12,27±0,01	16,55±0,01
	M 20%	10,12±0,01	16,73±0,03	25,96±0,02

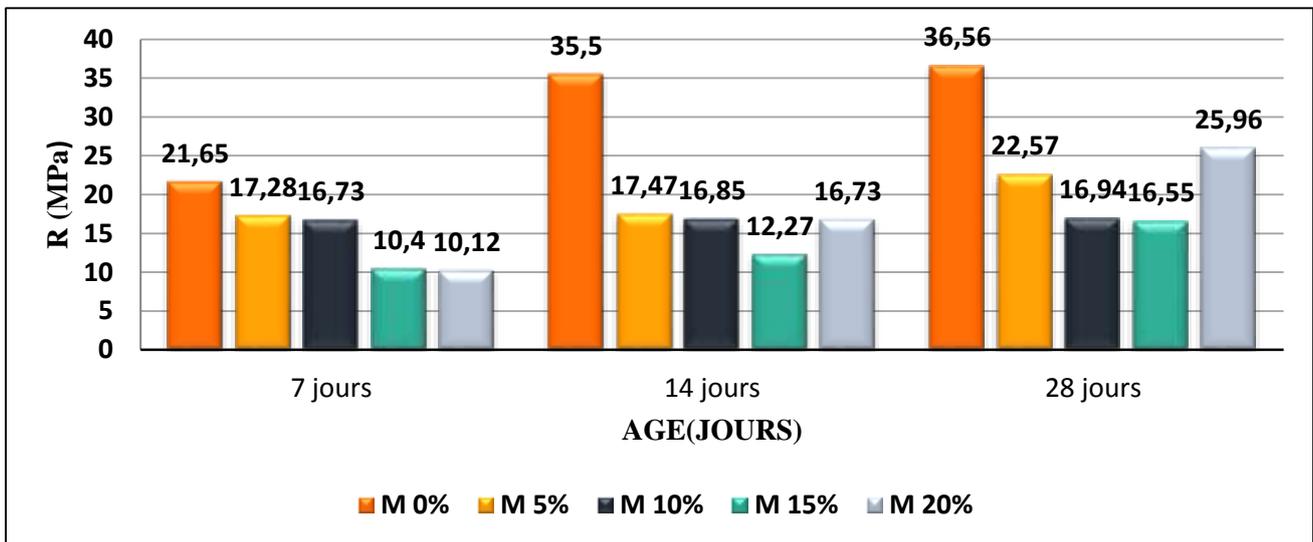


Figure IV.6 : Variation de la résistance en compression des éprouvettes de mortier en fonction du dosage la boue des stations d'épuration

Cette figure présente les résultats de la variation de la résistance en compression du mortier en fonction du dosage de boue à différents âges (7, 14 et 28 jours).

- Le mortier témoin sans ajout de boue (M 0%) présente les résistances les plus élevées à tous les âges, atteignant 36,56 MPa à 28 jours.
- L'ajout de boue entraîne une diminution de la résistance en compression du mortier par rapport au témoin. Cette diminution est d'autant plus importante que le dosage de boue est élevé.
- À 7 jours, la résistance chute d'environ 17% pour un dosage de 5% de boue, 34% pour 10%, 39% pour 15% et 39% pour 20% par rapport au mortier témoin.

- À 14 jours, les pertes de résistance sont de l'ordre de 51% pour 5% de boue, 53% pour 10%, 65% pour 15% et 53% pour 20%.
- À 28 jours, les baisses respectives sont d'environ 38% (5%), 54% (10%), 55% (15%) et 29% (20%).
- Le mortier avec 20% de boue semble présenter un regain de résistance notable entre 14 et 28 jours, atteignant 25,96 MPa à 28 jours.

En résumé, l'incorporation de boue dans le mortier dégrade ses performances mécaniques en compression, particulièrement à jeune âge et pour des dosages élevés. Cependant, un dosage de 20% de boue semble permettre au mortier de regagner une partie de sa résistance à plus long terme (28 jours).

Comme pour le béton, cela est dû aux effets perturbateurs de la boue sur l'hydratation et la formation de la matrice cimentaire [Yong Yuan et al. 2022, Amin et al. 2017].

IV.4.2 Évolution de la résistance à la flexion

IV.4.2.1 La brique



Figure IV.7 : Mode de rupture en traction par flexion de la brique.

Tableau IV.6 : Variation de la résistance à la flexion de la brique en fonction du dosage de la boue

Dosage \ R (MPa)	0%	10%	20%	60%
Flexion	0,88	0,84	0,79	0,69

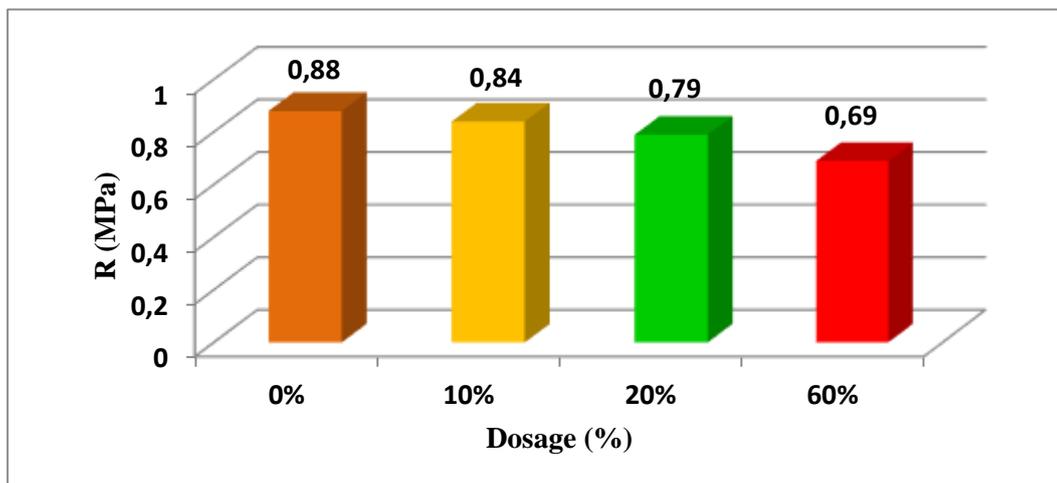


Figure IV.8: Variation de la résistance à la flexion de la brique en fonction du dosage de la boue

De même pour la flexion, les résistances restent proches jusqu'à 20% :

0% : 0,88 MPa

10% : 0,84 MPa (-4,5%)

20% : 0,79 MPa (-10,2%)

Mais à 60%, on perd 22% de résistance (0,69 MPa).

- Une tendance similaire à la compression est observée, avec une baisse de la résistance à la flexion lorsque le dosage en boue augmente.

- À 60% de boue, on perd environ 22% de la résistance à la flexion par rapport au brique témoin.

Cela peut s'expliquer par le fait que la boue se comporte comme une charge à faible dosage dans la matrice argileuse de la brique, sans trop de défauts structurels.

Cependant, au-delà d'un certain seuil (ici 60%), la matrice est trop diluée et des défauts (porosités, fissures) apparaissent, dégradant fortement les propriétés mécaniques [Lin 2007, Phonphuok et al. 2019].

IV.4.2.2 Le mortier



Figure IV.9 : Mode de rupture en traction par flexion des éprouvettes de mortier.

Tableau IV.5 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la boue

Age		7jours	14jours	28jours
R (Mpa)				
Flexion	M 0%	4,47±0.06	6,71±0,10	9,11±0,40
	M 5%	3,94±0,1	3,62±0,14	4,88±0,47
	M 10%	3,24±0,09	3,90±0,17	4,10±0,3
	M 15%	2,55±0,24	4,22±0,14	4,92±0,63
	M 20%	2,07±0,04	3,15±0,05	4,65±0,70

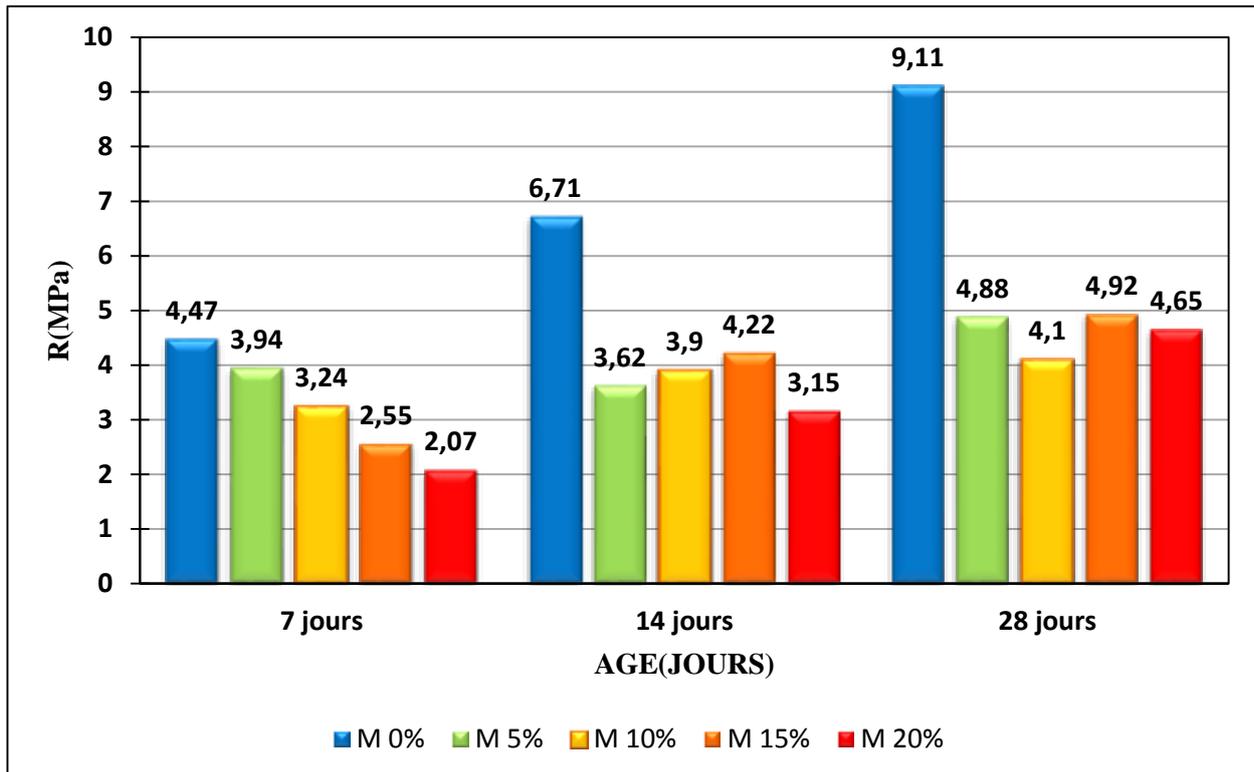


Figure IV.10 : Variation de la résistance en flexion du mortier en fonction du dosage de la boue

- Le mortier témoin sans ajout de boue (M 0%) présente les meilleures résistances en flexion à tous les âges : 4,47 MPa à 7 jours, 6,71 MPa à 14 jours et 9,11 MPa à 28 jours.

- L'incorporation de boue dans le mortier entraîne une diminution de la résistance en flexion par rapport au mortier témoin. Cette baisse de résistance est plus prononcée à jeune âge (7 jours) et pour les dosages élevés en boue.

- À 7 jours, les pertes de résistance par rapport au témoin sont d'environ 12% pour 5% de boue, 28% pour 10%, 43% pour 15% et 54% pour 20%.

- À 14 jours, les baisses respectives sont de 46% (5%), 42% (10%), 37% (15%) et 53% (20%).

- À 28 jours, les diminutions de résistance sont plus faibles : 46% pour 5% de boue, 55% pour 10%, 46% pour 15% et 49% pour 20%.

- On note une reprise progressive de la résistance en flexion entre 7 et 28 jours pour les mortiers avec boue, en particulier pour les dosages de 15% et 20%.

En résumé, l'ajout de boue nuit aux performances en flexion du mortier, particulièrement à jeune âge et pour les forts dosages. Cependant, on observe un regain de résistance plus marqué à 28 jours pour les mortiers avec 15 à 20% de boue.

Comme en compression, cela est imputable aux effets néfastes de la boue sur le développement de la structure cimentaire [**Amin et al. 2017, Yan et al. 2022**].

On constate des baisses très significatives des résistances en compression et flexion pour le mortier, dès les plus faibles dosages en boue. Comme pour le béton, cela est imputable aux effets perturbateurs de la boue sur l'hydratation du ciment et la formation d'une structure cimentaire dense. La boue crée de la porosité supplémentaire et introduit des défauts qui fragilisent le mortier [**Amin et al. 2017, Yan et al. 2022**].

Les pertes de résistance sont généralement plus élevées aux jeunes âges (7 jours) qu'aux âges tardifs (28 jours), quand la matrice cimentaire est mieux formée.

In fine, ces résultats aideront à définir les conditions d'incorporation optimales de ces boues dans les différentes matrices, en vue de valoriser ce déchet tout en préservant des performances mécaniques satisfaisantes pour les matériaux de construction.

IV.5 Conclusion

L'incorporation de déchets ou sous-produits industriels dans les matériaux de construction soulève de nombreux défis techniques. Si elle permet de valoriser ces résidus et de réduire l'impact environnemental, elle ne doit pas se faire au détriment des propriétés d'usage essentielles, en particulier les résistances mécaniques.

Dans le cas présent, les résultats ont montré que l'ajout direct de boues de station d'épuration dans le béton, le mortier et la brique entraînait une dégradation plus ou moins marquée des résistances à la compression et à la flexion. Ceci est dû aux effets perturbateurs de la boue sur la formation des matrices cimentaires et argileuses, ainsi qu'à l'apparition de défauts microstructuraux.

Cependant, plusieurs leviers existent pour remédier à ces inconvénients et tirer parti du potentiel valorisable de la boue, tout en conservant des performances mécaniques satisfaisantes pour les matériaux. Ils passent notamment par un prétraitement adéquat de la boue, l'optimisation des dosages d'incorporation, son association avec d'autres ajouts minéraux complémentaires, l'ajustement des liants et des conditions de cure.

Cette analyse détaillée vise ainsi à présenter les différentes stratégies envisageables, s'appuyant sur la littérature scientifique, pour incorporer la boue de manière contrôlée et valorisante dans le béton, le mortier et la brique, en ciblant le maintien ou l'amélioration des résistances mécaniques requises pour les applications visées en construction :

1. Traitement préalable de la boue

Avant incorporation, un traitement de la boue s'avère souvent nécessaire pour en améliorer la compatibilité avec les matrices cimentaires ou argileuses :

- Séchage et calcination pour réduire la teneur en matières organiques et en eau [Tantawy et al. 2019].
- Activation thermique ou chimique pour développer un potentiel pouzzolanique [Pan et al. 2003].
- Combinaison avec d'autres ajouts minéraux pour des effets synergiques [Bahurudeen et Santhanam 2015].

2. Dosages optimisés

Comme observé dans les résultats, les dosages en boue doivent être ajustés finement :

- Pour le béton et mortier : maintenir des dosages $\leq 10\%$ pour limiter les baisses de résistance [Yong Yuan et al. 2022]
- Pour la brique : possibilité d'aller jusqu'à 20-30% de boue en substitution partielle

des argiles [Zhang 2013]

3. Approche ternaire

Combiner la boue avec d'autres ajouts minéraux complémentaires (laitier, cendres volantes, fumée de silice) permet de compenser les effets néfastes et d'obtenir de bonnes résistances [Tantawy et al. 2015].

4. Ajout de liants hydrauliques

L'ajout de liants hydrauliques supplémentaires (laitiers, pouzzolanes naturelles) améliore les réactions pouzzolaniques et le développement des résistances quand la boue est utilisée [Pan et al. 2003].

5. Optimisation de la cure

Un soin particulier doit être apporté à la cure (humide, thermique) pour favoriser l'hydratation et les réactions pouzzolaniques malgré les effets retardateurs de la boue [Bahurudeen et Santhanam 2017].

En suivant ces différentes pistes, plusieurs études ont pu obtenir des résistances mécaniques satisfaisantes, proches ou supérieures aux matériaux conventionnels, tout en valorisant la boue :

- Béton avec 10% de boue calcinée + laitier : 45 MPa à 90 jours [Pan et al. 2003]
- Mortier avec 10% boue activée + cendres volantes : 30 MPa à 28j [Tantawy et al. 2015]
- Brique avec 20% boue calcinée : 18 MPa compression à 28j [Zhang 2013].

Conclusion
Générale

Conclusion générale:

Après avoir étudié en détail les résultats des essais mécaniques sur les matériaux de construction incorporant les boues de station d'épuration, il convient de récapituler les principales conclusions qui peuvent en être tirées. Celles-ci permettront d'orienter les recommandations à suivre pour une valorisation optimale de ces déchets dans le béton, le mortier et la brique, tout en visant le maintien ou l'amélioration des propriétés mécaniques requises.

Au-delà de ces recommandations pratiques, il est également important d'identifier les perspectives de recherche futures. Celles-ci visent à approfondir les connaissances, lever les derniers verrous scientifiques et techniques, et envisager les développements à plus grande échelle vers une industrialisation de ces solutions valorisantes et respectueuses de l'environnement.

Les conclusions dégagées mettent en évidence le potentiel mais aussi les défis associés à l'incorporation directe des boues dans les matrices cimentaires et argileuses. Les recommandations apportent des pistes concrètes, étayées par la littérature, pour tirer le meilleur parti de ces déchets. Enfin, les perspectives tracent la feuille de route à suivre pour poursuivre ces travaux de valorisation selon une approche à la fois rigoureuse sur le plan scientifique et viable sur les plans environnemental, technique et économique.

- L'ajout direct de boues brutes dans le béton, mortier et brique conduit généralement à une diminution des résistances à la compression et à la flexion, d'autant plus marquée que le dosage est élevé.
- Cette dégradation des performances est liée aux effets perturbateurs de la boue sur l'hydratation des liants hydrauliques, la formation d'une structure dense, ainsi qu'à l'apparition de défauts microstructuraux.
- Cependant, en suivant certaines stratégies (prétraitement, dosages optimisés, combinaisons d'ajouts, adaptation des liants et de la cure), il est possible de valoriser ces boues tout en maintenant ou améliorant les résistances mécaniques.

Recommandations :

- Réaliser un prétraitement de la boue (séchage, calcination, activation) pour en améliorer la compatibilité et la réactivité au sein des matrices cimentaires/argileuses.
- Ajuster finement les dosages d'incorporation : $\leq 10\%$ pour béton/mortier, 20-30% maximum pour la brique.
- Adopter une approche ternaire en combinant la boue avec des ajouts minéraux complémentaires (laitiers, cendres volantes, fumées de silice) pour des effets synergiques bénéfiques.
- Envisager l'ajout de liants hydrauliques supplémentaires pour favoriser les réactions pouzzolaniques avec la boue traitée.

- Optimiser les conditions de cure (humide, thermique) pour permettre un développement optimal des résistances malgré les effets retardateurs de la boue.
- Contrôle de la Porosité : Pour les briques, une attention particulière doit être portée à la porosité de la matrice cimentaire lors de l'incorporation de boues, en particulier à des

dosages élevés. Des études supplémentaires sont nécessaires pour optimiser la formulation afin de minimiser la porosité tout en intégrant des boues de manière efficace.

- **Évaluation de la Durabilité :** Les modifications des propriétés hydriques nécessitent une évaluation approfondie de la durabilité des matériaux, notamment en termes de résistance aux cycles gel-dégel, de perméabilité et de tenue à long terme.
- **Approche Holistique :** Il est essentiel de lier les propriétés hydriques aux performances mécaniques des matériaux. Des essais mécaniques complémentaires doivent être réalisés pour déterminer l'impact global des boues sur la résistance et la stabilité structurelle des briques, bétons et mortiers.

Perspectives :

- Approfondir l'étude des mécanismes liant les caractéristiques de la boue (composition, structure) et ses effets sur les matrices au niveau microstructural.
- Évaluer les performances des matériaux incorporant la boue sur d'autres propriétés clés : durabilité, résistance aux agressions, comportement au feu, isolation thermique, etc.
- Réaliser des études à plus grande échelle (ouvrages réels) pour confirmer les résultats obtenus au laboratoire et lever les derniers verrous à l'industrialisation de ces matériaux valorisants.
- Mener des analyses de cycle de vie et des évaluations économiques pour s'assurer de la viabilité environnementale et de la compétitivité de ces solutions valorisantes.
- Développement d'Éco-Matériaux : Les résultats de cette étude ouvrent la voie au développement d'éco-matériaux valorisant les boues de station d'épuration. Des recherches supplémentaires peuvent explorer des formulations et traitements de surface pour améliorer les performances hydriques et mécaniques de ces matériaux.
- Impact Environnemental : L'utilisation de boues de station d'épuration dans la construction peut contribuer à la réduction des déchets et à la gestion durable des ressources. Une évaluation complète du cycle de vie des matériaux incorporant des boues pourrait quantifier les bénéfices environnementaux.
- Innovations Technologiques : L'intégration de technologies de traitement et de modification des boues avant leur incorporation pourrait améliorer les propriétés des matériaux. Des recherches sur les additifs et les techniques de traitement sont nécessaires pour optimiser cette intégration.
- Normes et Réglementations : Enfin, les résultats de cette étude devraient informer la mise à jour des normes et réglementations concernant l'utilisation de boues dans les matériaux de construction, afin d'assurer la sécurité, la durabilité et la performance des structures construites.

Références

Bibliographique

[Alouache,2010] : Alouache Hicham, Saghi Sofiane<<Influence des déchets de marbre sur caractéristiques mécaniques et le retrait des bétons>>.Année 2009/2010. Mémoire de fin d'études, Université de Bejaia.

[Ademe, 2001] : Agence De l'Environnement et de la Métrise de l'Energie (ADEME), (2001). Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture, Ademe édition, Paris. p: 59.

[Afee, 1974] : Association Française pour l'Etude des Eaux (AFEE). (1974). Utilisation agricole des boues d'origine urbaine. p: 107.

[Admeme, 2001] : ADMEME. (2001). Les boues d'épuration municipales et leur utilisation en agriculture - dossier documentaire. p. 30.

[Amir, 2005] : Amir, S. (2005). ontribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage: devenir des Micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences, Marrakech

[Aadraoui,2020] : Aadraoui Mohamed Faisabilité technique et environnementale de l'utilisation des boues de station d'épuration dans les matériaux de construction thèse de doctorat: Géo ressources et Environnement université sultan moulay slimane maroc2020

[Bouhellal,2021] : Bouhellal Sara Effet de l'ajout des argiles locales sur les performances et la Stabilité des briques rouges 2021, mémoire de mastère : Chimie des matériaux Université M'Hamed Bougera Boumerdes

[Bouziane , 2007] : Bouziane Nouzha. Elimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre. Université Mentouri de CONSTANTINE., 2007.

[Boulouza,2018] :Mr. Boulouza Oualid.Mr. Grine Abdelbasset « Effet de l'ajout des déchets de brique sur les propriétés physicomécanique des mortiers »Mémoire de Master, Université akli mohand oulhadj de Bouira, 2018.

[Bouacida, 2022] : Ali Bouacida Loucif. «Effet de la qualité de ciment sur les propriétés mécaniques du béton» .Mémoire de magister, Centre Universitaire de Tébessa2022.

[Benchiheub, 2019] : Benchiheub Djihen « Contributions à l'étude de la compréhension des phénomènes et mécanismes d'action des effets des additions sur le comportement des matris cimentaires »thèse de doctorat, Université 20 Août 1955-Skikda, Année 2018/2019.

[Boubekeur,2017] : Boubekeur T: «Polycopié du cours: Matériaux De Construction 01 Licence Génie Civil », Centre Universitaire De Tissemsilt – Algérie- (2017).

[Boeraeve, 1994] Dr. Ir. P. Boeraeve. Cours de Béton armé Chapitre 1. Composition du béton Technologie du béton, Edition 1994, Groupement Belge du Béton .p.1.

[Baron,1982]: Baron. J et Sauterey. R, 1982 .Le béton hydraulique Connaissances et Pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey

[Boutouata,2019] : Boutouata et Haouam : Etude de l'influence des ajouts des adjuvants et le mode de séchage sur la résistance du béton. », mémoire de master, université Larbi tébessi – Tébessa–Algérie (2019).

[Chaib, 2017] :Chaib Hachem. Contribution à l'Etude des Propriétés Thermomécaniques des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale. (Cas de la ville de Ouargla) thèse de doctorat: Géo-Matériaux: université kasdi merbah Ouargla 2017.

[Chanvillard, 1999] Chanvillard. G, 1999. Connaissances générales sur le matériau béton, Ed. Aléas

[Djoughri, 2007] : Djoughri Mohamed. Confection d'une brique à base de sable de dunes, Thèse de doctorat: Génie civil: université kasdi merbah Ouargla 2007.

[Govin ,2016] : Govin A.« Aspects physico-chimiques de l'interaction bois-ciment, modification de l'hydratation du ciment par le bois ». Thèse de doctorat, Ecole National Supérieur des Mines de Saint Etienne,2016 p. 2004

[Hakkoum, 2015] : Hakkoum Soumia. Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya d'Ouargla.2015.thèse de magister: Géo-Matériaux: université kasdi merbah Ouargla

[Hemill] : hemil, samir «effet combine des billes du polystyrene et les fibres

[Haffaf,2019] :Haffaf i et Lamourio : « Etude de la résistance des mortiers Aux attaques acides », mémoire de master, université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen – Algérie (2019).

[Hakkoum , 2015] : S. hakkoum Etude des caractéristiques thermiques et mécaniques des briques en terre cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya d'Ouargla mai 2015.

[Kattab,2007] :Kattab.r, valorisation de sable de dune. Thèse doctorat, Alger: ENP, 2007

[Lafhaj, 2008] : Lafhaj, Z., Samara, M., Agostini, F., Boucard, L., Skoczylas, F.,Depelsenaire. G. Polluted River sediments from the North region of France: Treatment with Novo sol® process and valorization in clay bricks. Construction and Building Materials; 22: 755–762, 2008.

[Lin,2001]: Lin, DF.Wenig, CH. Use of sewage sludge ash as brick material. J. Environ. Eng; 127 (10): 922-927, 2001

[Lindberg,2002]: Lindberg, E, Akander, J. 2002. Power-optimised Ventilation Considering Moist-buffering of the Surface Layer of Clay.ModernerLehmbau 2002.Ed. Peter Steingass. 2002: 102-109, 2002.

[Mekhermeche, 2012] : Mekhermeche Abdessalam : Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes, thèse de magister: Géo-Matériaux: université kasdi merbah Ouargla 2012.

[Maage, 1984]: Maage, M, Frost resistance and pore size distribution in bricks. Materials and structures. 1984, 17(5): 345–350.

[Menezes, 2005] : Menezes, R, Ferreira, HS., Neves, GA., Lira de LH., Ferreira, HC. Use of granite sawing wastes in the production of ceramic bricks and tiles. J. Eur. Ceram. Soc 2005; 25:1149–1158.

[Mekhermeche, 2012] : Mekhermeche Abdessalam. Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration

des Ksours sahariennes.2012 thèse de magister: Géo-Matériaux: université kasdi merbah Ouargla

[Net 1] : Collection mémento technique « Tuiles et briques de terre cuite » édition le moniteur, Paris 1998 livre.

[Net 2] : Matériaux de construction « Cours en ligne matériaux de construction », «<http://www.la.refer.org>.» en ligne en consulté le 3/05/2024]

[Nf en iso,2000] : NF EN ISO 12571. Hygrothermal performance of building materials and products Determination of hygroscopic sorption properties, 2000.

[Net 3] : Collection Mémento Rechnique ; Tuiles et briques de terre cuite (édition le moniteur Paris) 1998 livre

[Net 4] : maçonnerie. les meilleurs artisans de votre région [en ligne Consulté le 10/05/2024]. Disponible à l'adresse: <https://www.travaux-maconnerie.fr/brique-terre-cuite-avantages-prix>

[Net 5] : maison écologique , les briques en terre cuite[en ligne en consulté le 10/05/2024]. Disponible à l'adresse: <http://www.guidemaisonecologique.com/les-briques-en-terre-cuite/>

[Net 6] : fiche technique matériaux [en ligne consulté le 10/05/2024]. Disponible à l'adresse: http://oci.cstb.fr/simulation/choix_proc.asp

[Net 8] Guide béton : les différents types de béton : le béton armé [consulté le 13/05/2024] disponible sur : <http://www.guidebeton.com/differents-types-beton>

[Net 9] Guide béton :La composition de béton, [consulté le 13/05/2024]. Disponible à l'adresse: <http://www.guidebeton.com/differents-types-beton>

[Sylver.p,2006] : Sylver.P. «science des matériaux» 2005 ,2006 université pierre et marie curie

[Vimane] : Monsieur Vimane phoummavong Vice-doyen et Professeur à la Faculté d'Ingénierie, Université Nationale du Laos, Campus Numérique Francophone de Vientiane.

[Zerrouki,2021] : Zerrouki Imane ,Refice Sara « L'influence de sable substitué par du brique sur l'évolution des propriétés physiques et mécaniques des mortiers soumis à de hautes températures » Mémoire master Académique Année universitaire : 2020 /2021

[Zami, 2010]: Zami, M.S., Lee, A. Stabilised or unstabilised earth construction for contemporary urban housing 5th International Conference on Responsive Manufacturing - Green Manufacturing (ICRM 2010), p.227–240, Ningbo, China, 11-13 Jan. 2010

[Barnabé et al, 2009] : Barnabé , S., Brar , S., Tyagi, R., & Beauchesne , I. (2009). Pretreatment and bioconversion of wastewater sludge to value-added products, Fate of endocrine disrupting compounds. *Science of the Total Environment*, 407, 1471- 1488.

[Bagge, et al, 2005] : Bagge, E., Sahlström, L., & Albin, A. (2005). The effect of hygienic treatment on the microbial flora of biowaste at biogas plants, National veterinary, institute, Uppsala, Sweden. *Water Research*, 39, 4879-4886.

[Benoudjit,2016] :benoudjit fouzia benoudjit :caractérisation et valorisation des boues issues d'un office d'assainissement. cas ona boumerdès (step boumerdès), thèse de doctorat universite m'hamed bougara-boumerdes 2016.

[Carbonell et al, 2009] : Carbonell , G., Pro, J., Gómez, N., & Babin, M. (2009). Sewage sludge applied to agricultural soil: ecotoxicological effects on representative soil organisms. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 1309-1319.

[Chang et al, 2004] : Chang, B., Yang, C., Cheng , C., & Yuan, S. (2004). Biodegradation of phthalate esters by two bacteria strains. *Chemosphere*, 55, 533-538.

[Chen & Lin , 2009] : Chen , L., & Lin , D. (2009). Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *Journal of Hazardous Materials*, 162, 321-327.

[Chen, 2012] : Chen, M. (2012). L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. Formation doctorale : Sciences de l'Environnement Industriel et Urbain

[Duguet j-p, 2006] : Duguet j-p, (2006). Réglementation et traitement des eaux destinées à la consommation humaine. 1 ère édition. ASTEE (Association Scientifique et Technique pour l'Environnement) p: 474.

[Emilie, 2012] : Emilie, J. (2012).< composition organique des boues résiduelles des stations d'épuration lorraines : caractérisation moléculaire et effets de la biodégradation> l'Université Henri Poincaré, Nancy I en Sciences de l'Univers.

[El fels, 2014] :El Fels, L. (2014). Suivi physico-chimique, microbiologique et écotoxicologique du compostage de boues de STEP mélangées à des déchets de palmier: validation de nouveaux indices de maturité. L'université de Toulouse

[Garrec, et al, 2003] : Garrec, N., Picard- Bonnaud, F., & Pourcher, A. (2003). Occurrence of *Listeria* sp. and *L. monocytogenes* in sewage sludge used for land application: effect of dewatering, liming and storage in tank on survival of *Listeria* species. *fems Immunol. Med. Microbiol* , 35, 275- 28.

[Hsu , Lo (2001)] : Hsu , J., & Lo , S. (2001). Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure. *Environmental Pollution*, 114, 119-127.

[Inoue et al, 1996] : Inoue, S., Sawayama, S., Ogi, T., & Yokoyama, S.-Y. (1996). Organic composition of liquidized sewage Sludge. *Biomass and Bioenergy*, 10, 1, 37- 40., 10, 37-40.

[Jarde et al, 2003] : Jarde, E., Mansuy, L., & Faure, P. (2003). Characterization of the macromolecular organic content of sewage sludges by thermally assisted hydrolysis and methylation - gas chromatography- mass spectrometer (THM- GC/MS). *J. Anal. Appl. Pyrol.*, 68- 69, 331- 350, 68-69, 331-350.

[Jouraiphy, 2007] : Jouraiphy, A. (2007). Compostage des boues activée-déchets vert: analyse physicochimiques, microbiologie, toxicologiques, bilan humique et valorisation agronomique. Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia, Marrakech

[Langford & Lester, 2003] : Langford, K., & Lester J.N., J. (2003). Fate and behaviour of endocrine disrupters in Wastewater Treatment Processes, In, Birkett J.W, Lester J.N, editors, Endocrine disrupters in wastewater and sludge treatment processe, London, CRC Press LLC and IW A publishing. 103-43.

[Lin,2008] : Lin , D., Chang , W., Yuan, C., & Luo, H. (2008). Production and characterization of glazed tiles containing incinerated sewage sludge. *Waste Management*, 28, 502-508.

[Milik et al, 2017] : Milik, J., Pasela, R., Lachowicz, M., & Chalamońsk, M. (2017). The Concentration of Trace Elements in Sewage Sludge From Wastewater Treatment Plant in Gniewino. *Journal of Ecological Engineering*, 18.

[Mcbride, 2003] : Mcbride, M. (2003). Toxic metals in sewage sludge- amended soils: has promotion of beneficial use discounted the risks. *Advances in Environmental Research*, 8, 5-19.

[N. Seghairi et al, 2017] : N. Seghairi , L. Mimeche, A. Bouzid, and Y. Ayachi, “Traitement des eaux uses par coagulation-floculation en utilisant le sulfate d ‘ aluminum come coagulant treatmentof wastewater by coagulation-floculation using aluminum sulfate as coagulant,” *J. Wat. Env. Sci. Vol.*, vol. 1, no. 2, pp. 230–234, 2017.

[Pérez et al., 2001] : Pérez , S., Guillamón , M., & Barceló , D. (2001). Quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons

[**Som, 2006**] : Som, M. (2006). Etude moléculaire des composés organiques de compost formation transformation dans les sols action sur les propriétés des sols. Université de Poitiers, France.

[**Su, et al, 2017**] : Su, J., Wei, B., Ou-Yang, W., Huang, F., Zhao, Y., Xu, H., et al. (2017). Antibiotic resistome and its association with bacterial communities during sewage sludge composting. *Environmental science & technology*, 49, 7356-7363.

[Sahlström, et al, 2004] : Sahlström, L., Aspan, A., Bagge, E., & Tham, M. (2004). Bacterial pathogen incidences in sludge from Swedish sewage treatment plants. *Water Research*, 38, 1989- 1994

[Scrimshaw & Lester, 2003] : Scrimshaw, M., & Lester , J. (2003). Fate and behaviour of endocrine disrupters in sludgetreatment and disposal, In, Birkett J.W, Lester J.N, editors, Endocrine disrupters in wastewater and sludge treatment processes, London, CRC Pres LLC and IV/A publishing. 145-176

[Su et al, 2004] : Su , D., Wong , J., & Jagadeesan, H. (2004). Implications of rhizospheric heavy metals and nutrients for the growth of alfalfa in sludge amended soil. *Chemosphere*, 56, 957-965

[Slimani.k, 2007] : SLIMANI K., (2007). Suivi d'une boue dans une station d'épuration des eaux usées urbaine. Universités. M. B. Boumerdas. P: 123.

[Singh et al, 2004]: Singh , K., Mohan, D., Sinha, S., & Dalwani, R. (2004). Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area. *chemosphere*, 55, 227-255.

[Werther, 1999]:Werther J., O. T. (1999). Sewage sludge combustion. *Progress in Energy and Comustion Science*.

[Warman & Termeer, 2005] : Warman, P., & Termeer , W. (2005). Evaluation of sewage sludge, septic waste and sewage sludge compost applications to corn and forage, Yields and N, P, and K content of crops and soils. *Technology*, 96 , 955–961.

[Zebarth et al, 2000]: Zebarth , B., McDougall , R., Neilsen , G., & Neil. (2000). Availability of nitrogen from municipal sewage sludge for dryland forage grass. *80*, 575–582.

[Benoudjit,2016] :Benoudjit Fouzia BENOUDJIT :Caractérisation et Valorisation des Boues Issues d'un Office d'Assainissement. Cas ONA Boumerdès (STEP Boumerdès), thèse de doctorat UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2016.

[Gorisse, 1978]: F. Gorisse, « Essais et contrôle des bétons », pp. 122-130, Editions Eyrolles, 1978.

[Kedjour, 2003] : N. Kedjour, «Le laboratoire du béton » , Office des publications universitaires, Algérie, 2003

[Kouici, 2016]: Kouici, A (2016). « Etude de l'effet de l'introduction des fibres végétales sur les propriétés des bétons autoplaçant (BAP) à l'état frais et durcis ». Mémoire de Master. Université de Msila, p05-08-13-18-32-45-46-47-48-49-50-51-52-65-76-81-83-91-105.

[Younes, 2021]: Younes, A (2021). «Influence de sable de déchets de ciment durci et de CKD sur les propriétés des bétons autoplaçants.Caractérisation-Formulation-Performance Durabilité» Mémoire de Master. Université Skikda, p04-05-06-07-46-47-48-63-65-66-67-68-70-72-73-74-79-80.

[Amin et al. 2017] : Amin S.K. et al. (2017). Use of sewage sludge ash in concrete as a partial replacement of cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*.

[Bahurudeen et Santhanam 2017] :Bahurudeen A., Santhanam M. (2017). Cementitious materials

[Lin 2007]:Lin K.L. (2007). The influence of waste sludge on the properties of clay ceramic bodies. In *ICS Proceedings*.

[Pan et al. 2003]:Pan S.C. et al. (2003). Reusing sewage sludge ash as cements replacement material. *Cement & Concrete Research*.

[Phonphuok et al. 2019] :Phonphuok N. et al. (2019). Physical and mechanical properties of fired brick containing sediment from natural rubber sheets with boiler ashes. *Materials Today: Proceedings*

[Tantawy et al. 2019] :Tantawy R. et al. (2019). Possible value-added applications of sewage sludge ash as a greener cement substitute. *Journal of Building Engineering*.

[Tantawy et al. 2015] :Tantawy R. et al. (2015). Performance characteristics of ternary blended cementitious binders containing thermally activated sewage sludge. *Eco-Efficient Concrete*.

[Yan et al. 2022] :Yuan Y. et al. (2022). Sewage sludge in concrete: A review. *Sustainability*.

[Yan et al. 2022] :Yan Q. et al. (2022). Effects of the substitution of cement with sewage sludge ash on the mechanical properties and durability of concrete. *Journal of Cleaner Production*

[Yong Yuan et al. 2022] : Yong Yuan et al. (2022). Sewage sludge in concrete: A review. *Sustainability*.

[Zhang, 2013]:Zhang, L. (2013). Production of bricks from waste materials. *Construction and Building Materials*, 47, 643-655.

[Morone et al, 2020] :Morone, P., Ghadamian, H., & Tajvidi, M. (2020). Recycling opportunity for disposing of waste water treatment residuals into fired clay bricks. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(1), 175-188.

[Imbabi et al, 2012] :Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194-216.

[Tantawy et al, 2019] :Tantawy, R., El-Roudi, A., Salem, A., & Abdelzaher, M. (2019). Possible value-added applications of sewage sludge ash as a greener cement substitute. *Journal of Building Engineering*, 26, 100849.

[Pan et al, 2003] :Pan, S. C., Tsang, D. C., Yu, I. K. M., Bashore, R. R., & Khan, S. U. (2003). Reusing sewage sludge ash as cements replacement material. *Cement and Concrete Research*, 33(11), 1843-1849.

[Amin et al, 2017] : Amin, S. K., Ahmed, K., Shalaby, B. N., & Hassan, H. S. (2017). Use of sewage sludge ash in concrete as a partial replacement of cement. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21(6), 2256-2267.

[Yong Yuan et al, 2022]:Yong Yuan, Y., Zhang, J., Dou, X., & Yu, H. (2022). Sewage sludge in concrete: A review.*Sustainability*, 14(2), 710.

[Bahurudeen et Santhanam, 2015]:Bahurudeen, A., & Santhanam, M. (2015). Influence of different processing methods on the pozzolanic performance of sugarcane bagasse ash. *Cement and Concrete Composites*, 56, 32-45.

[Tantawy et al 2015]:Tantawy, R., El-Roudi, A., Abdalla, A., & Abdelzaher, M. (2015). Fire resistance of ternary blended cementitious binders containing thermally activated sewage sludge and nano- metakaolin. *Journal of Building Engineering*, 3, 24-34.

Références

Normatives

References normatives

Les granulats	-Resistance au choc (essai Los Angeles) NF18-573, 90 -Resistance à l'usure NF P18-572, 90
Equivalent de sable	NF-P 08.501
Adjuvant	NF EN934-2
Le mortier	- Flexion mortier trois points NF EN 1015-11 - Compression mortier NF EN 196-1 - Composition de mortier NF EN 196-1
Le béton	- Compression béton NF EN 12390-3 - Composition béton NF-P 18.102 - Malaxage béton NF P 18-404
La Brique	- Essai de compression brique Norme NF EN 772-1 - Essai de flexion brique NF EN 772-6