



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)
Faculté de Génie de la Construction
Département Génie Mécaniques



Mémoire de fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Fabrication Mécanique et Productique

Présenter par :

SALAH Medjber

Thème

**Élaboration et Caractérisation d'un Matériau à
Haute Efficacité Energétique Et Environnementale
(terre crue-sable-grignon d'olive)**

Mémoire soutenu publiquement à Tizi-Ouzou, le 09/07/2025

Mr. BOURAS Rachid	Professeur, UMMTO	Président
Mme. MENDIL Sabrina	Maitre de conférences A, UMMTO	Examinatrice
Mr FERHOUM Rabah	Professeur, UMMTO	Encadrant
Mr BELMIHOUB Khellaf	Doctorant, UMMTO	Co- Encadrant

Promotion : 2024-2025

Dédicace

À ma chère famille,

À mon père et ma mère, pour leur amour inconditionnel, leur soutien et leurs sacrifices qui m'ont permis d'arriver jusqu'ici.

À mes frères et sœurs, pour leur présence, leurs encouragements et leurs prières.

À tous mes ami(e)s, pour les moments partagés, les échanges enrichissants et leur précieuse amitié tout au long de ce parcours.

Une pensée toute particulière à mon ami Ferhat Makhlouf Mouloud Mouhamed, dont le soutien, les conseils et la fraternité ont été d'une grande valeur.

À mes camarades de la promotion 2024/2025 – 2ème année Master FMP, pour cette belle aventure humaine et académique que nous avons vécue ensemble.

Merci à toutes et à tous.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Ferhoum Rabah, promoteur de ce mémoire, et à Mr Belmihoub Khellaf, mon co-encadreur, pour leur encadrement rigoureux, leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de ce travail.

Je remercie chaleureusement l'ensemble des membres du laboratoire de génie civil, ainsi que ceux des laboratoires béton et mécanique des sols du département de génie civil, pour les moyens mis à disposition, leur assistance technique et leur collaboration durant la phase expérimentale de ce projet.

Je tiens à adresser un remerciement tout particulier et appuyé à l'ensemble des membres du Laboratoire Élaboration et Caractérisation des Matériaux et Modélisation (LEC2M), pour leur accueil chaleureux, leur soutien technique et scientifique, ainsi que pour l'environnement de travail enrichissant qu'ils ont su offrir tout au long de cette recherche.

Je tiens aussi à exprimer toute ma reconnaissance à ma famille mon père, ma mère, mes sœurs et mon frère pour leur soutien moral inconditionnel, leurs encouragements permanents et leur patience, qui ont été essentiels à la réussite de ce travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes, de près ou de loin, qui m'ont aidé ou soutenu durant ce parcours.

SOMMAIRE

I.	Introduction générale :	13
I.	Chapitre 1 : Recherche bibliographique	14
I.1	Introduction	15
I.2	Présentation générale du sujet	15
I.2.1	Le contexte énergétique mondial et le secteur du bâtiment	15
I.2.2	L'urgence de la transition vers des matériaux durables	16
I.3	L'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment	17
I.3.1	Définition et enjeux de l'efficacité énergétique	17
I.3.2	Consommation énergétique des bâtiments : chiffres clés	17
I.3.3	Liens entre efficacité énergétique et confort thermique	18
I.3.4	Réglementations et labels énergétiques (HPE, BBC, etc.)	19
I.3.5	Conséquences environnementales : GES, déchets, pollution	19
I.4	Impacts environnementaux des matériaux conventionnels	20
I.4.1	Béton, briques cuites et autres : un cycle de vie énergivore	20
I.4.2	Analyse du cycle de vie (ACV) : méthode et indicateurs	21
I.4.3	Étude de cas : ACV du béton et des briques cuites	21
I.4.4	Conséquences environnementales : GES, déchets, pollution	21
I.5	Transition vers des matériaux de construction écologiques	22
I.5.1	Définitions et grands principes	22
I.5.2	Bénéfices environnementaux, économiques et sociaux	22
I.5.3	Exemples de matériaux écologiques utilisés dans le monde	22
I.5.4	Enjeux et obstacles liés à leur adoption	23
I.6	La terre crue comme matériau de construction	23
I.6.1	Histoire et usage traditionnel dans le monde	23
I.6.2	Techniques de mise en œuvre : Adobe, BTC, pisé, torchis, etc.	23
I.6.3	Propriétés intrinsèques : inertie, hygroscopie, recyclabilité	24
I.6.4	Avantages et limites de la terre crue	24
I.7	Les liants alternatifs écologiques	25
I.7.1	Le sable : origine, propreté, rôle dans la formulation	25
I.7.2	Le grignon d'olive : composition, potentiel, limites	25
I.7.3	Comparaison entre liants minéraux et organiques	26
	Tableau I-2 : Comparaison entre liants minéraux et organiques	26
I.8	Propriétés requises pour un matériau de construction durable	27
I.8.1	Résistance mécanique : compression, flexion	27
I.8.2	Propriétés thermiques : conductivité, inertie	27
I.8.3	Propriétés hygroscopiques : régulation de l'humidité	27

I.8.4	Durabilité, stabilité, coût et disponibilité	27
I.9	Potentiel des briques à base de terre crue, sable et grignon d'olive	28
I.9.1	Synthèse des résultats expérimentaux disponibles	28
I.9.2	Influence de la composition sur les performances	28
I.9.3	Comportement mécanique et thermique	28
I.10	Conclusion	28
II.	Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales	30
II.1	Introduction	31
II.2	Matériaux	32
II.2.1	Terre crue	32
II.2.2	Sable :	33
II.2.3	Grignon d'olive	33
II.2.4	Essais d'Identification les propriétés physiques des matériaux utiliser	34
II.2.5	Essais d'Identification les propriétés chimiques des matériaux utilise	53
II.3	Élaboration des éprouvettes	55
II.3.1	Formulations choisies	55
II.3.2	Préparation des mélanges	57
II.3.3	Description des moules utilisés :	59
II.3.4	Moulage des éprouvettes	60
II.3.5	Séchage des éprouvettes	63
II.4	Essai mécanique	64
II.4.1	Essaie de compression NF EN 1015-11 (XP P13-901)	64
II.4.2	Essai de flexion (traction par flexion en 3 point) XP P13-901,NF EN 196-1.	67
II.5	Essai thermique (ISO 8301) (ASTM C518) :	70
II.5.1	Essaie De mesure de conductivité thermique :	70
II.6	Essai non destructif – Ultrasons NF EN 12504-4 :	72
II.6.1	Principe de l'essai	72
II.6.2	Matériel utilisé	72
II.6.3	Conditions de l'essai	73
II.7	Autres essais physiques :	74
II.7.1	Essai de capillarité (remontée d'eau) :	74
II.7.2	Essai de retrait au séchage	75
II.8	Conclusion :	77
III.	Chapitre 3 : Résultats et Interprétations	78
III.1	Introduction :	79
III.2	Résultats et Interprétation des résultats des tests d'identification des matériaux utiliser :	79
III.2.1	Résultats de l'analyse granulométrique pour chaque matériau :	79
	Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation de la terre crue :	82

Résultats d'équivalent du sable obtenus :	83
III.2.2 Résultat et interprétation de l'analyse de la limite de liquidité et de plasticité : 84	
III.2.3 Résultat et interprétation de L'essai Proctor NF 94-093 :	87
III.2.4 Résultat et interprétation de l'essai de calcul de la masse volumique des particules solides ps (absolue): Méthode du pycnomètre a eau (NF P 94-054) :	90
III.2.5 Résultat et interprétation des résultats de l'essai de calculer Masse volumique des particules solides ps du grignon d'olive – Méthode par éprouvette graduée :	91
III.2.6 Résultat et interprétation de l'analyse de calcule la masse volumique des particules solides ps (Apparente) (NF P 94-059) :	92
III.2.7 Résultat et interprétation de l'analyse de spectroscopie infrarouge (FTIR) : ..	93
III.3 Préparation des Briques.....	95
III.3.1 Préparation des échantillons utilisés dans l'étude Préparation des échantillons utilisés dans l'étude.....	95
III.4 Résultats et Discussions des essai sur la brique :	98
III.4.1 Masse Volumique	100
III.4.2 Absorption capillaire d'eau (Ac) :	101
III.4.3 Retrait :	102
III.4.4 Essai non destructif – Ultrasons NF EN 12504-4	104
III.4.5 Essais Thermiques ISO 8301	105
III.4.6 Essais Mécaniques.....	109
III.4.7 Conclusion :	113
IV. Conclusion générale :	114

Liste Des Figures

Figure I-1 : Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2010 [1].....	16
Figure I-2 : Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur (WRI 2019).....	16
Figure I-3 : Écart de consommation énergétique entre bâtiments anciens et rénovés(Le Cerema).	18
Figure I-4 : Répartition des consommations énergétiques selon différents postes des bâtiments en fonction de leurs performances énergétiques [11]	18
Figure I-5 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de fondation, sur une période de 50 ans [5]	19
Figure I-6 : Répartition des émissions de GES par matériau pour le secteur de la construction (données : Manicore & Bribián et al).....	20
Figure I-7 : Distribution (a) des impacts environnementaux d'un bâtiment traditionnel (durée de vie 50 ans) et (b) des consommations énergétiques entre matériaux de construction et chauffage, en fonction de leurs performances énergétiques [4]	20
Figure I-8 : comparaison de différents impacts environnementaux d'un PBS partiellement biosourcé par rapport à un PBS conventionnel (IRMA).	21
Figure I-9 : Les techniques de construction avec la terre crue [22].	24
Figure II-1 : L'argile d'Akbil	32
Figure II-2 : Situation géographique du terrain et la Vue aérienne du terrain.....	32
Figure II-3 : Étapes de préparation du grignon d'olive avant incorporation dans le mélange .	34
Figure II-4 : Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique par tamisage	36
Figure II-5 : Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057)	39
Figure II-6 : Matériel utilisé pour l'essai d'équivalent de sable (NF P18-598)	41
Figure II-7 : Matériel et manipulation pour la détermination des limites d'Atterberg (NF P94-051).....	43
Figure II-8 : Matériel et manipulation de l'essai Proctor normal (NF P 94-093).....	46
Figure II-9 : Matériel et manipulation de la détermination de la masse volumique absolue par pycnomètre à eau (NF P 94-054)	49
Figure II-10 : Matériel utilisé pour la détermination de la masse volumique absolue du grignon d'olive par déplacement d'eau Protocole expérimental.....	51
Figure II-11 : Matériel et manipulation pour la détermination de la masse volumique apparente (NF P 94-059)	52
Figure II-12 : Appareil de spectroscopie infrarouge FTIR utilisé pour l'identification des groupes fonctionnels	54
Figure II-13 Séquence de préparation du mélange.....	58
Figure II-14 Moule pour la confection des éprouvettes de dimension 5x5x5 cm pour la compression mécanique	59
Figure II-15 : Les Moules pour la confection des éprouvettes de flexion mécanique : moules en bois de 16X4X4 cm,	60
Figure II-16 : Moule en bois pour la réalisation d'une éprouvette cubique de 30 × 30 × 5 Cm	60
Figure II-17 : Moule en bois pour la fabrication des briques de 200 × 100 × 50 mm	60
Figure II-18 : Échantillons cubiques (5 × 5 × 5 cm) réalisés pour les essais de compression uni axiale selon la norme NF EN 1015-11 (XP P13-901)	61
Figure II-19 : Échantillons prismatiques (16 × 4 × 4 cm) destinés aux essais de traction par flexion en trois points selon la norme XP P13-901	61
Figure II-20 : Échantillons prismatiques (30 × 30 × 4 cm) destinés aux essais thermiques	62
Figure II-21 : Briques expérimentales de format 20 × 10 × 5 cm.....	62

Figure II-22 : Procédés de séchage des briques crues – à l’air libre (droite) et en étuve ventilée (gauche) pour l’élimination de l’humidité résiduelle :	63
Figure II-23 : Matériel et déroulement de l’essai de compression selon NF EN 1015-11 (XP P13-901) :	66
Figure II-24 : Matériel et déroulement de l’essai de flexion selon (NF EN 1015-11) (XP P13-901).....	69
Figure II-25 : Matériel et manipulation de l’essai de conductivité thermique selon la méthode FLUXMETRE :	71
Figure II-26 : Matériel et manipulation de l’essai non destructif par ultrasons selon la norme NF EN 12504-4	73
Figure II-27 : Matériel utilisé pour l’essai de capillarité.....	74
Figure II-28 : manipulation de l'essai de retrait.	76
Figure III-1 : Courbe de granulométrie par tamisage de la terre crue (NF P18-560)	80
Figure III-2 : Courbe de granulométrie par tamisage de sable (NF P18-560)	81
Figure III-3 : Courbe granulométrique par sédimentation du terre crue (NF P94-057).....	83
Figure III-4 : Courbe de détermination de la limite de liquidité selon la norme NF P94-051 .	85
Figure III-5 : Abaque de Cassagnarde.....	86
Figure III-6 : Courbe de compactage Proctor normal du terre crue (NF P 94-093).....	88
Figure III-7 : Spectre FTIR de la terre crue	93
Figure III-8 : Spectre FTIR du sable	94
Figure III-9 : Spectre FTIR du grignon d’olive.....	94
Figure III-10 : résultats de la masse volumique	100
Figure III-11 :Absorption capillaire d’eau par plusieurs pourcentages des grignons	101
Figure III-12 : Diagramme à barres du retrait longitudinal et diagonal	103
Figure III-13 : résultats de l’essai non destructif – Ultrasons	104
Figure III-14 : Conductivité Thermique de plusieurs pourcentages des grignons	106
Figure III-15 : Évolution de la résistance thermique des briques en fonction du pourcentage de grignon d’olive (0 %, 10 %, 20 %, 30 %)	107
Figure III-16 : Évolution de flux thermique des briques en fonction du pourcentage de grignon d’olive (0 %, 10 %, 20 %, 30 %).....	108
Figure III-17 : courbe des résistances moyenne à la Compression RC MPa	110
Figure III-18 : les courbes des résistances moyenne à la flexion RC MPa.....	112

Liste des Tableaux

Tableau I-1: Composition chimique des différents types de Grignons	26
Tableau I-2 : Comparaison entre liants minéraux et organiques	26
Tableau II-1 : Composition volumique des différentes formulations terre-sable-grignon utilisées pour l'élaboration	55
Tableau II-2 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 40 % grignon d'olive à 0%) .	56
Tableau II-3 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 30 % grignon d'olive à 10%)	56
Tableau II-4 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 20 % grignon d'olive à 20%)	57
Tableau II-5 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 10 % grignon d'olive à 30%)	57
Tableau III-1 : Résultats du tamisage de la terre crue (NF P18-560).....	80
Tableau III-2 : Résultats du tamisage du sable (NF P18-560)	81
Tableau III-3 : Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation de la terre crue (NF P94-057).....	82
Tableau III-4 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable (NF P18-598).....	83
Tableau III-5 : Résultats de la limite de liquidité WL de la terre crue (NF P94-051).....	84
Tableau III-6 : Résultats de la limite de plasticité WP de la terre crue (NF P94-051).....	85
Tableau III-7 : Tableau Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité.....	86
Tableau III-8 : Résultats de l'essai Proctor normal pour la terre crue (NF P 94-093)	87
Tableau III-9 : La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor normal.....	88
Tableau III-10 : Résultats de l'essai Proctor normal pour le sable (NF P 94-093)	88
Tableau III-11 : Courbe de compactage Proctor normal du sable (NF P 94-093).....	89
Tableau III-12 : La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor normal.....	89
Tableau III-13 : Calcul de la masse volumique absolue de la terre crue (NF P 94-054).....	90
Tableau III-14 : Calcul de la masse volumique absolue du sable (NF P 94-054)	91
Tableau III-15 : Détermination expérimentale de la masse volumique absolue du grignon d'olive.....	91
Tableau III-16 : Codification des éprouvettes de compression (5x5x5 cm) pour chaque formulation en grignon d'olive	96
Tableau III-17 : Codification des éprouvettes de flexion (16x4x4 cm) pour chaque formulation en grignon d'olive	96
Tableau III-18 : Codification des éprouvettes de conductivité thermique (30x30x30 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive	97
Tableau III-19 : Codification des éprouvettes pour l'essai de capillarité (20x10x5 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive.....	97
Tableau III-20 : Codification des éprouvettes utilisées pour la mesure de la masse volumique (20x10x5 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive	97
Tableau III-21 : Codification des éprouvettes utilisées pour l'essai de retrait longitudinal et diagonal (20x10x5 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive	97
Tableau III-22 : Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience préliminaire	99
Tableau III-23 : Résultats de la résistance à la compression des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive.....	109

Tableau III-24 : Résultats de la résistance à la compression des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive.....	111
--	-----

Résumé :

Dans un contexte mondial marqué par la crise énergétique, le changement climatique et la raréfaction des ressources naturelles, la recherche de matériaux de construction durables, à faible empreinte écologique et valorisant les ressources locales, devient une priorité. Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en explorant l'utilisation combinée de terre crue, de sable et de grignon d'olive (sous-produit de l'extraction de l'huile d'olive) pour élaborer un matériau à haute efficacité énergétique et environnementale.

La problématique principale consiste à déterminer dans quelle mesure l'intégration du grignon d'olive, en tant qu'agrégat léger et organique, peut améliorer les performances thermiques des briques en terre crue tout en maintenant des propriétés mécaniques et physiques acceptables pour un usage en construction non porteuse.

La méthodologie adoptée repose sur une étude expérimentale comparative de plusieurs formulations, dans lesquelles le taux de grignon d'olive varie de 0 % à 30 %. Les matières premières ont été caractérisées par des essais physiques, chimiques et mécaniques normalisés (granulométrie, limites d'Atterberg, Proctor, FTIR, etc.). Les briques élaborées ont ensuite été soumises à des essais normés pour évaluer leurs propriétés mécaniques (compression, flexion), thermiques (conductivité, résistance et flux thermiques) et physiques (masse volumique, capillarité).

Les résultats montrent que l'ajout de grignon d'olive réduit significativement la conductivité thermique et améliore la résistance thermique, diminuant ainsi le flux thermique et renforçant l'efficacité énergétique du matériau. Sur le plan physique, la masse volumique diminue et la capillarité est réduite pour des taux modérés (10–20 %), ce qui améliore le comportement isolant. En revanche, les résistances mécaniques diminuent avec l'augmentation du taux de grignon, mais restent compatibles avec un usage non porteur.

Ces observations conduisent à recommander des formulations intégrant entre 10 % et 20 % de grignon d'olive, offrant un compromis équilibré entre performances thermiques élevées et propriétés mécaniques acceptables. Ce travail confirme le potentiel de ce matériau comme alternative écologique aux matériaux traditionnels, notamment dans des applications de remplissage, cloisonnement ou isolation pour des constructions durables. Il ouvre également la voie à des recherches futures portant sur l'optimisation des dosages, l'étude de la durabilité et l'application à grande échelle dans un contexte bioclimatique .

Mots clés :

Terre crue, grignon d'olive , sable , brique , efficacité énergétique .

I. Introduction générale :

Dans un contexte mondial marqué par la crise énergétique, le changement climatique et la raréfaction des ressources naturelles, le secteur du bâtiment se retrouve au cœur des enjeux environnementaux. Responsable d'une part importante de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, ce secteur soulève des interrogations profondes sur les matériaux utilisés et leurs impacts à long terme.

Les matériaux de construction traditionnels, tels que le béton, l'acier ou la brique cuite, bien qu'efficaces sur le plan technique, présentent une empreinte écologique élevée liée à leur extraction, leur transformation et leur transport. Face à cela, de nombreuses recherches s'orientent vers des alternatives plus durables, locales, et à faible impact environnemental.

La terre crue figure parmi les matériaux les plus anciens et les plus répandus dans le monde. Naturelle, abondante et peu transformée, elle offre de nombreuses qualités thermiques, hygrothermiques et écologiques. Son association avec des ressources locales, comme le sable, et des déchets organiques tels que le grignon d'olive – sous-produit issu de l'extraction de l'huile d'olive – ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine des éco-matériaux.

Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique. Il vise à élaborer un matériau de construction à haute efficacité énergétique et environnementale, basé sur un mélange de terre crue, sable et grignon d'olive. L'objectif est double : d'une part, valoriser un déchet agricole dans une approche d'économie circulaire ; d'autre part, améliorer les performances thermiques et environnementales des briques tout en assurant leur viabilité technique.

Pour cela, une étude expérimentale a été menée sur plusieurs formulations, en évaluant leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques à travers des essais normés.

I. Chapitre 1 : Recherche bibliographique

I.1 Introduction

Depuis des millénaires la terre crue est utilisée comme un matériau de construction dans plusieurs régions du monde pour ses qualités thermiques, écologiques, économiques et aussi la facilite à mettre en œuvre. Elle représente aujourd'hui une solution pour répondre aux enjeux environnementaux et énergétiques du secteur du bâtiment. Combiner à des ressources locales comme le sable ou des déchets agricoles tels que le grignon d'olive, elle offre un fort potentiel pour la mise au point de matériaux durables à la fois écologiques, économiques et adaptés aux contextes climatiques locaux.

Dans ce chapitre, nous allons explorer les bases théoriques nécessaires pour notre étude. On présente un aperçu sur les matériaux de construction conventionnels et de leurs impacts environnementaux, et on va présenter les différents enjeux liés à leur utilisation dans la construction, avant de nous concentrer sur les matériaux écologiques, notamment la terre crue, le sable et le grignon d'olive en mettant en avant leurs propriétés physique, mécanique et thermiques et leurs méthodes d'utilisation et leur potentiel dans une démarche de construction respectueuse de l'environnement.

I.2 Présentation générale du sujet

I.2.1 Le contexte énergétique mondial et le secteur du bâtiment

Le secteur du bâtiment figure par les plus grands consommateurs d'énergie à l'échelle mondiale avec près de 40 % de la consommation énergétique finale dans les pays industrialisés, en raison des besoins en chauffage, climatisation, ventilation et production d'eau chaude[1]. Dans quelque pays européen comme la France, le parc immobilier est majoritairement ancien, mal isolé, et contribue de façon significative aux émissions de gaz à effet de serre (GES). Les enjeux de rénovation thermique et de réduction de l'empreinte carbone du bâtiment sont cruciaux[2]. À l'échelle européenne, UE impose des exigences de performance énergétique toujours plus strictes comme la directive 2010/31/, visant à atteindre un bâtiment à énergie quasi nulle (nZEB) d'ici 2030 [3].

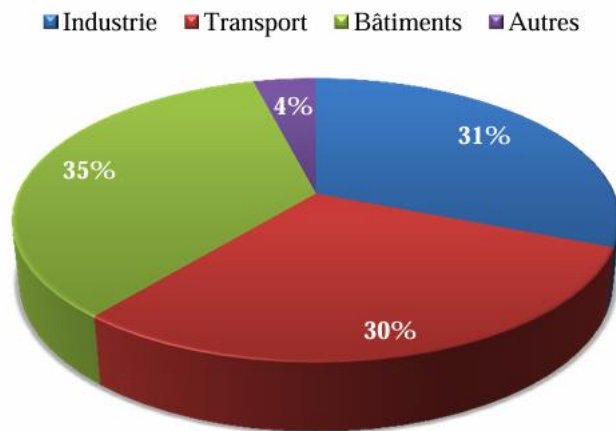


Figure I-1 : Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2010 [1]

I.2.2 L'urgence de la transition vers des matériaux durables

Les matériaux utilisés dans la construction, qui représentent à eux seuls 10 à 20 % de l'empreinte carbone totale d'un bâtiment alors face à ces enjeux, il devient indispensable de repenser a eu[4].

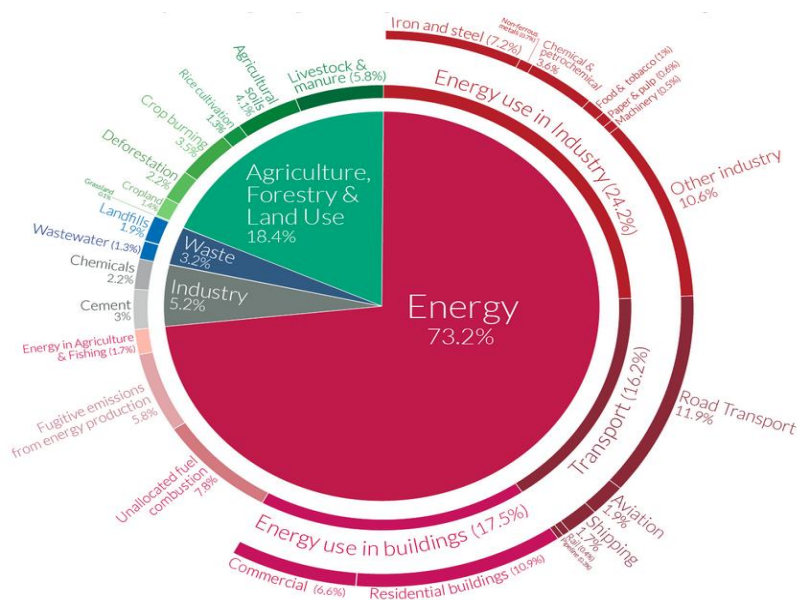


Figure I-2 : Émissions mondiales de gaz à effet de serre par secteur (WRI 2019)

D'après le processus de fabrication énergivore et la faible recyclabilité des matériaux conventionnels comme le béton, l'acier ou le PVC sont confédérer comme des matériaux fortement émetteurs de CO₂.

Tableau 1 : Les seuils d'émission CO₂, en comptant la phase de chantier[5]

En kgCO _{2eq} /m ² /an	2022 Entrée en vigueur	2025	2028	2031
Maisons individuelles	640	530	475	415
Logements collectifs	740	650	580	490

En réponse, l'usage de matériaux durables (biosourcés, géosourcés ou recyclés) se développe, pour le but de réduire les émissions, préserver les ressources naturelles et améliorer la qualité de l'air intérieur [6] Cette transition s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, de développement territorial et de résilience climatique [7].

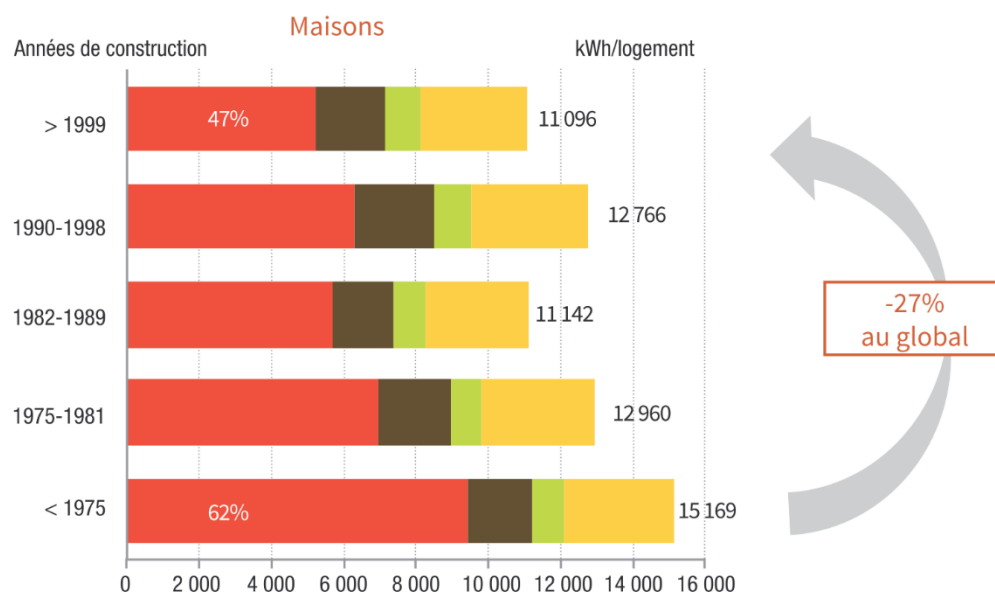
I.3 L'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment

I.3.1 Définition et enjeux de l'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique d'un bâtiment c'est la capacité à réduire sa consommation d'énergie tout en assurant un confort thermique optimal. Elle nécessite une bonne isolation, des matériaux à forte inertie thermique et des systèmes techniques performants[8]. beaucoup de pays qui on commencera rendre compte de l'importance de cette transition , L'Union européenne a adopté le principe "Efficiency First", qui impose de considérer les économies d'énergie comme priorité avant tout autre investissement énergétique[8].

I.3.2 Consommation énergétique des bâtiments : chiffres clés

Le secteur du bâtiment est responsable d'environ 45 % de la consommation énergétique finale dans certains pays, notamment pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'éclairage et la ventilation[2]. Les défauts d'isolation et l'usage de matériaux peu performants Dans les bâtiments anciens, créent un écart important entre les performances théoriques et les consommations réelles, aggravant les pertes thermiques[9].



* Les consommations de bois ne sont pas incluses.

Source : CEREN - « Secteur résidentiel - Suivi du parc et des consommations d'énergie » - mai 2017 (données 2016)

Champ : France métropolitaine (données corrigées du climat en prenant comme référence la température de référence de Météo-France pour l'année 2014)

Figure I-3 : Écart de consommation énergétique entre bâtiments anciens et rénovés(Le Cerema).

I.3.3 Liens entre efficacité énergétique et confort thermique

Le confort thermique c'est la sensation de bien-être lorsque la température ambiante est stable, l'humidité bien régulée et les échanges thermiques équilibrés. Les matériaux à forte inertie thermique permettent de ralentir les variations de température et de limiter le recours aux systèmes de chauffage et de climatisation[10].

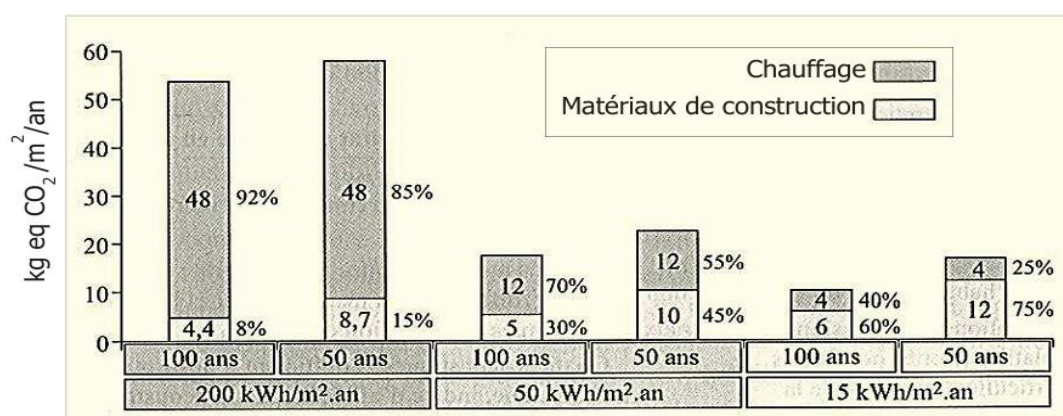


Figure I-4 : Répartition des consommations énergétiques selon différents postes des bâtiments en fonction de leurs performances énergétiques [11]

I.3.4 Réglementations et labels énergétiques (HPE, BBC, etc.)

Par exemple les réglementations RT2005, RT2012 et RE2020 ont imposé des seuils de consommation de plus en plus stricts, jusqu'à viser des bâtiments à consommation quasi nulle (nZEB) en France . Le label BBC a fixé une limite à 50 kWh/m²/an, tandis que la RE2020 intègre également l'impact carbone des matériaux[3]. Parallèlement, des labels comme HQE, LEED ou BREEAM intègrent d'autres critères liés à la durabilité, la qualité de l'air intérieur et la gestion de l'eau[2].

I.3.5 Conséquences environnementales : GES, déchets, pollution

Les matériaux conventionnels sont associés à plusieurs formes de pollution :

- **Émissions de gaz à effet de serre (GES)** pendant la production (CO₂, NO_x),
- **Déchets de chantier massifs**, souvent non recyclés,
- **Pollution de l'air** lors de la cuisson ou de la manipulation (poussières fines),
- **Impacts sur les ressources naturelles** via l'extraction massive de graviers, argiles, calcaire.

La généralisation de ces matériaux contribue fortement à l'épuisement des ressources non renouvelables et au changement climatique mondial[12].

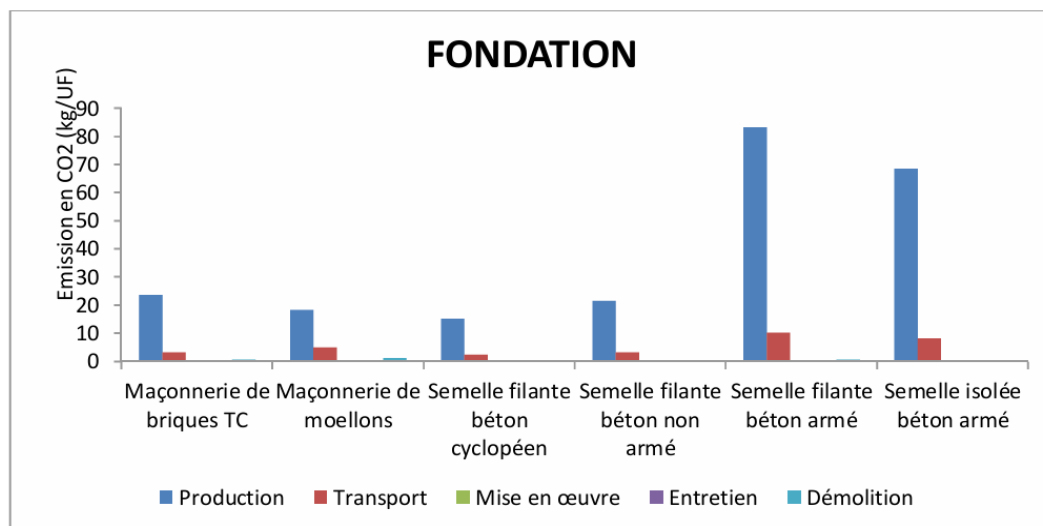


Figure I-5 : Emission en gaz carbonique pour chaque étape de l'ACV des différents types de fondation, sur une période de 50 ans [5]

I.4 Impacts environnementaux des matériaux conventionnels

I.4.1 Béton, briques cuites et autres : un cycle de vie énergivore

Dans les pays en développement où l'urbanisation s'accélère les matériaux conventionnels sont très utilisés comme le béton, les briques cuites ou l'acier. Leur fabrication consomme trop d'énergie : la production de ciment représente seule environ 8 % des émissions mondiales de CO₂[1]. La cuisson des briques demande une température élevée, obtenue avec du gaz naturel ou du charbon, ce qui génère des émissions de GES. Ces matériaux sont ainsi à fort impact carbone tout au long de leur cycle de vie, de l'extraction à la fin de vie[13].

Émissions GES en fonction du matériau

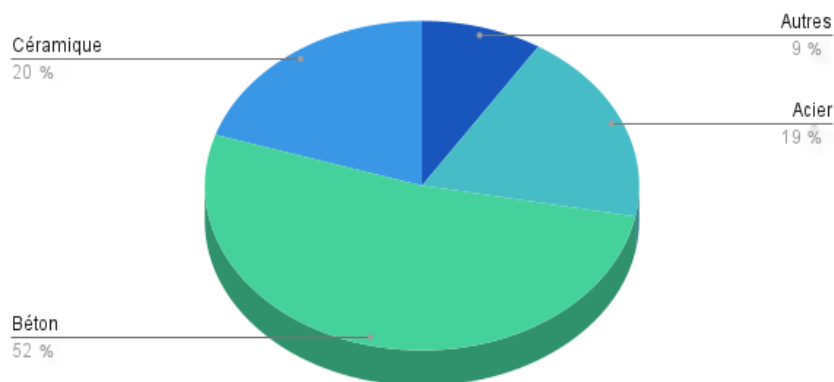


Figure I-6 : Répartition des émissions de GES par matériau pour le secteur de la construction (données : Manicore & Bribián et al)

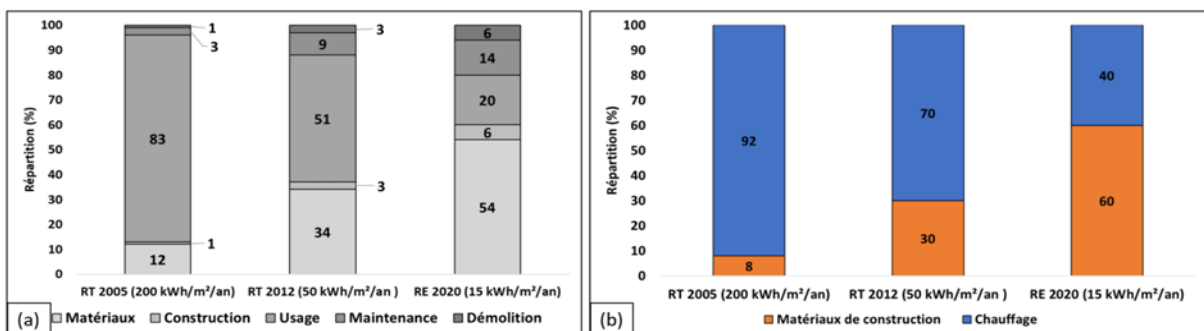


Figure I-7 : Distribution (a) des impacts environnementaux d'un bâtiment traditionnel (durée de vie 50 ans) et (b) des consommations énergétiques entre matériaux de construction et chauffage, en fonction de leurs performances énergétiques [4]

I.4.2 Analyse du cycle de vie (ACV) : méthode et indicateurs

L'analyse du cycle de vie (ACV) permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un matériau ou d'un produit à chaque étape : extraction, production, usage, fin de vie. Elle prend l'empreinte carbone, l'énergie primaire consommée, l'eutrophisation et la formation d'ozone comme des indicateurs clés. Cette méthode est indispensable pour comparer les matériaux conventionnels avec des alternatives plus durables[5].

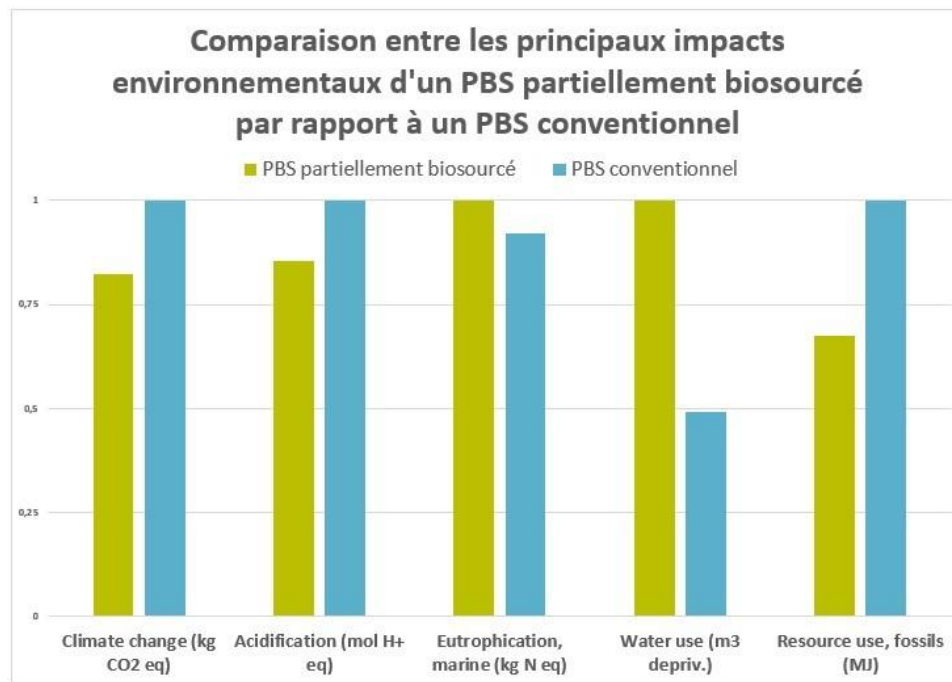


Figure I-8 : comparaison de différents impacts environnementaux d'un PBS partiellement biosourcé par rapport à un PBS conventionnel (IRMA).

I.4.3 Étude de cas : ACV du béton et des briques cuites

D'après les études de ACV montrent que la production du ciment est la principale source d'émissions dans le béton. Selon les formulations de l'étude, 1 tonne de béton peut produire entre 100 et 300 kg CO₂ [12]. Ainsi les briques cuites, quant à elles, émettent jusqu'à 600 kg CO₂ par m³, en fonction du combustible utilisé on peut réduire ces émissions de 15 à 30 %, avec l'ajout de cendres volantes ou de granulats recyclés sans perte majeure de performance mécanique [12].

I.4.4 Conséquences environnementales : GES, déchets, pollution

Les matériaux conventionnels causent des nuisances environnementales tels que l'émissions de GES (CO₂, NO_x) lors de la production, les déchets non recyclés sur les chantiers, pollution de l'air par les poussières, et dégradation des ressources naturelles via l'extraction de

sable, graviers ou argile. Leur généralisation contribue significativement au changement climatique et à l'épuisement des ressources [4].

I.5 Transition vers des matériaux de construction écologiques

I.5.1 Définitions et grands principes

Les matériaux de construction écologiques sont ceux dont la production, l'utilisation et la fin de vie génèrent un impact environnemental réduit par rapport aux matériaux de construction conventionnels. Ils présentent généralement une faible énergie grise avec une biodégradabilité élevée et recyclable, et une origine locale ou renouvelable [7]. Les principes fondamentaux sont : Réduction des gaz à effet de serre (GES), Préservation des ressources naturelles, Promotion de l'économie circulaire, Amélioration de la qualité de l'air intérieur[6]. Ces matériaux peuvent être biosourcés tels que le bois, chanvre, fibres végétales et géo sources comme terre crue, pierre, ou issus de matières recyclées comme déchets agricoles, plastiques revalorisés[14].

I.5.2 Bénéfices environnementaux, économiques et sociaux

Les matériaux écologiques procurent des avantages multiples :

- **Environnementaux** : réduction des émissions de CO₂, diminution des déchets, amélioration du cycle de vie du bâtiment [12].
- **Économiques** : coûts réduits à long terme grâce à leur durabilité, facilité d'entretien, et performances thermiques [15].
- **Sociaux** : amélioration de la qualité de l'air intérieur, valorisation des ressources locales, soutien à l'artisanat, et résilience accrue des habitations face aux crises climatiques [16]. Le réemploi des matériaux et la conservation des structures existantes permettent d'éviter l'émission de plusieurs tonnes de carbone par projet [17].

I.5.3 Exemples de matériaux écologiques utilisés dans le monde

- **Terre crue (Afrique, Asie, Amérique latine)** : abondante, recyclable, excellente régulation hygrothermique[18].
- **Bambou (Asie tropicale)** : croissance rapide, résistance mécanique élevée, ressource renouvelable [16].

- **Fibres végétales (chanvre, lin, coco, balle de riz)** : légères, isolantes, naturelles, biodégradables [17].
- **Bois massif ou CLT (Europe, Amérique du Nord)** : matériau porteur avec bilan carbone négatif, recyclable, sain[8].
- **Bio-foams** : matériau à base d'huile de ricin ou de résidus agricoles : substituts écologiques aux mousses pétrochimiques, avec faible impact carbone[19].

I.5.4 Enjeux et obstacles liés à leur adoption

Malgré leurs qualités, plusieurs freins limitent encore l'usage de ces matériaux :

- Les normes techniques actuelles : la plupart de normes sont conçues pour les matériaux industriels, ne reconnaissent pas toujours les performances des matériaux alternatifs [3].
- Le manque de formation des professionnels pour les architectes et artisans qui empêche une mise en œuvre correcte à grande échelle [20].
- Les performances des matériaux naturels peuvent être variables selon les conditions d'humidité d'origine, traitement, ce qui complique leur standardisation [21].
- Les surcoûts initiaux liés à la non-industrialisation de la filière, à l'absence de filières de distribution, ou à des exigences d'adaptation locale ralentissent leur adoption [6].

Ces barrières peuvent être levées par l'adoption de normes adaptées, des politiques publiques de soutien à l'innovation environnementale, et une meilleure intégration dans les marchés publics.

I.6 La terre crue comme matériau de construction

I.6.1 Histoire et usage traditionnel dans le monde

La terre crue est l'un des plus anciens matériaux de construction utilisés à travers le monde. On la retrouve sous forme d'adobe, de pisé, de torchis ou de bauge [18]. Elle a permis de bâtir des structures durables et saines, souvent adaptées aux climats locaux [21].

I.6.2 Techniques de mise en œuvre : Adobe, BTC, pisé, torchis, etc.

- Il existe plusieurs techniques traditionnelles de construction en terre crue :

- L'adobe est une brique moulée à la main et séchée naturellement à l'air libre, sans cuisson.
- Le pisé consiste à tasser la terre dans un coffrage en couches successives.
- Le torchis est un mélange de terre, de fibres (paille, foin) et d'eau, appliqué sur un support en bois.
- Les BTC (blocs de terre comprimée) sont produits avec des presses manuelles ou mécaniques, parfois stabilisés à la chaux ou au ciment [22].

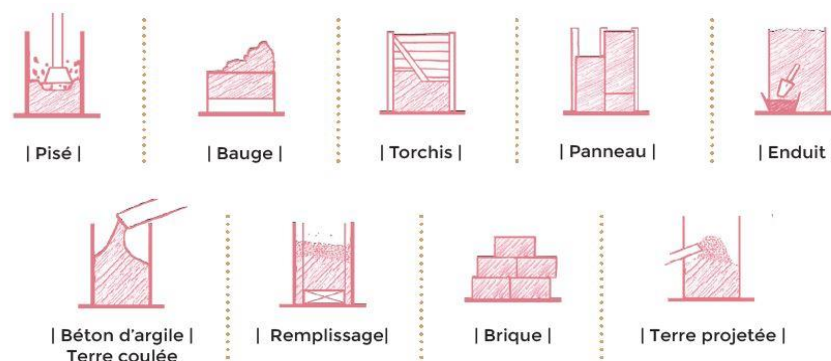


Figure I-9 : Les techniques de construction avec la terre crue [22].

I.6.3 Propriétés intrinsèques : inertie, hygroscopie, recyclabilité

La terre crue est dotée de propriétés environnementales remarquables :

- Une forte inertie thermique, qui permet de stocker la chaleur et de réguler les variations de température [21].
- Une capacité hygroscopique élevée, qui permet de réguler naturellement l'humidité de l'air intérieur et d'améliorer le confort [21].
- Une recyclabilité totale : la terre crue peut être réutilisée sur site, sans transformation industrielle [18].

I.6.4 Avantages et limites de la terre crue

La terre crue présente de nombreux avantages premièrement elle est locale, peu coûteuse, non polluante, et offre un excellent confort thermique et hygrométrique. Elle ne nécessite ni cuisson ni transformation lourde, ce qui réduit considérablement l'énergie grise [18]. Mais elle a aussi certaines limites comme la sensibilité à l'humidité, ce qui nécessite des protections en

toiture ou en soubassement et sa résistance mécanique brute est plus faible que celle du béton, sauf en cas de stabilisation[21]. Et enfin peu reconnue dans les normes de construction modernes, ce qui limite son usage dans les projets conventionnels [3].

I.7 Les liants alternatifs écologiques

I.7.1 Le sable : origine, propreté, rôle dans la formulation

Le sable est un composant essentiel dans les formulations terreuses, notamment dans les blocs de terre comprimée (BTC). Il permet de renforcer la résistance mécanique on joue un rôle de squelette granulaire, et aussi d'éviter la fissuration et d'améliorer la compacité du matériau. Un sable performant doit être propre, bien calibré, et exempt de particules fines argileuses ou organiques qui nuiraient à l'adhérence[18]. Dans les BTC la granulométrie du sable influence directement l'ouvrabilité du mélange et limite les retraits au séchage[21].

I.7.2 Le grignon d'olive : composition, potentiel, limites

Le grignon d'olive est un sous-produit issu de l'extraction de l'huile d'olive, constitué de noyaux broyés, de pulpe résiduelle et de fragments de peau. Il est riche en fibres et éléments organiques. Son intégration dans les mélanges terreux améliore l'isolation thermique, allège le matériau et il valorise localement un déchet agricole [17] Cependant, le grignon d'olive présente aussi des limites techniques :

- Risques de décomposition biologique si non traité,
- Besoin de stabilisation pour éviter fermentations ou moisissures,
- Variabilité de composition selon les variétés d'olive et la méthode d'extraction [7].

Tableau I-1: Composition chimique des différents types de Grignons

		% de la Matière Sèche			
Type	Matière Sèche	Matières minérales	Matières Azotés Totale	Cellulose Brute	Matières Grasses
Grignon brut	75–80	3–5	5–10	35–50	8–15
Grignon Gras partiellement Dénoyauté	80–95	6–7	9–12	20–30	15–30
Grignon épuisé	85–90	7–10	8–10	35–40	4–6
Grignon épuisé partiellement Dénoyauté	85–90	6–8	9–14	15–35	4–6
Pulpe grasse	35–40	5–8	9–13	16–25	26–33

I.7.3 Comparaison entre liants minéraux et organiques

Tableau I-2 : Comparaison entre liants minéraux et organiques

Type de liant	Exemples	Avantages	Inconvénients
Minéraux	Ciment, chaux, cendres volantes	Haute résistance, durabilité	Émissions de CO ₂ , énergie grise élevée
Organiques	Grignon d'olive, fibres végétales, bitume naturel	Faible impact environnemental, biodégradabilité	Sensibilité à l'eau, variabilité, faible standardisation

Les liants minéraux comme le ciment sont très utilisés pour leur résistance et leur disponibilité, mais sont énergivores et très carbonés. Contrairement aux les liants organiques qui sont plus durables et écologiques. Des formulations hybrides combinant minéraux et organiques sont en cours de développement pour réduire l'impact environnemental tout en assurant des performances mécaniques satisfaisantes [5], [18].

I.8 Propriétés requises pour un matériau de construction durable

I.8.1 Résistance mécanique : compression, flexion

La résistance à la compression est un critère fondamental pour évaluer la capacité mécanique d'un matériau à supporter des charges. La norme française XP P13-901 recommande une résistance minimale de 2 MPa à l'état sec Pour les briques en terre crue stabilisée [21]. La résistance à la flexion, bien qu'elle soit secondaire mais importante pour les éléments soumis à des efforts transversaux (linteaux, dalles). L'ajout de liants comme le ciment, la chaux améliore considérablement ces performances [22].

I.8.2 Propriétés thermiques : conductivité, inertie

Un matériau de construction durable doit avoir une faible conductivité thermique pour limiter les pertes de chaleur, et une forte inertie thermique pour réguler naturellement les variations de température. Ces propriétés réduisent la consommation d'énergie pour le chauffage ou la climatisation [21]. Des études montrent que la densité du matériau influence davantage la conductivité thermique que le type de liant utilisé. Même avec 4 % de ciment ou de liant organique, les performances restent compatibles avec les normes actuelles [22].

I.8.3 Propriétés hygroscopiques : régulation de l'humidité

Un bon matériau doit aussi pouvoir réguler l'humidité ambiante, assurant ainsi un bon confort hygrothermique et préservant la durabilité des structures. La terre crue est naturellement hygroscopique, capable d'absorber et de restituer l'humidité sans condensation[21].

I.8.4 Durabilité, stabilité, coût et disponibilité

Un matériau de construction durable doit être :

- Résistant aux cycles d'humidité et de sécheresse,
- Production moins couteuse ,
- Localement disponible pour limiter le transport,
- Compatible avec les savoir-faire traditionnels.

La terre crue, associée à des stabilisants biosourcés ou à faible empreinte carbone, répond à ces critères. Toutefois, la durabilité réelle dépend de la formulation, du climat et des protections contre l'humidité (toiture, soubassement, enduit). Il est donc nécessaire de

rechercher un équilibre optimal entre performance mécanique, coût, et impact environnemental dans le choix des composants [18].

I.9 Potentiel des briques à base de terre crue, sable et grignon d'olive

I.9.1 Synthèse des résultats expérimentaux disponibles

Les recherches sur les briques à base de terre crue, enrichies en sable et en grignon d'olive ont mis en évidence leur fort potentiel thermique, mécanique et environnemental [7], [17]. Ces briques allient légèreté, faible énergie grise et propriétés isolantes naturelles, tout en valorisant un déchet agricole local[18]. Des études récentes montrent que la géométrie, la densité et la composition influencent fortement la résistance thermique et mécanique, même pour des briques fabriquées par impression 3D ou compression mécanique [22].

I.9.2 Influence de la composition sur les performances

L'ajout de grignon d'olive dans un mélange terre-sable allège le matériau, augmente la porosité, et améliore ainsi l'isolation thermique. Cependant, une teneur trop élevée peut réduire la résistance mécanique, sauf si elle est stabilisée (chaux, ciment) ou un compactage renforcé. Les résultats expérimentaux sur des bio-composites démontrent que les performances dépendent de l'équilibre entre la fraction organique (grignon) et la matrice minérale (terre/sable)[6].

I.9.3 Comportement mécanique et thermique

Les briques de terre crue avec grignon d'olive, stabilisées à la chaux ou au ciment, présentent des résistances à la compression entre 1 et 2,5 MPa, selon la formulation. Ces valeurs sont compatibles avec les normes pour des murs non porteurs, remplissages ou cloisons. Thermiquement, l'ajout de fibres organiques réduit la conductivité thermique (souvent $< 0,6$ W/m·K), ce qui améliore le confort en climat chaud en limitant les gains thermiques intérieurs[6].

I.10 Conclusion

Cette revue bibliographique a mis en évidence les enjeux énergétiques et environnementaux majeurs du secteur du bâtiment, en particulier ceux liés à l'utilisation massive de matériaux conventionnels comme le béton ou la brique cuite qui connue par leur

forte empreinte carbone. Dans ce contexte, le recours vers les matériaux alternatifs, naturels et peu transformés, devient une urgence pour construire de manière plus durable et responsable.

Ce chapitre pose les fondations de notre réflexion et nous aide à élaborer une démarche expérimentale claire, cohérente et bien structurée. Dans la suite de ce travail, nous chercherons à évaluer de manière concrète les performances des matériaux sélectionnés, en menant différents essais physiques, mécaniques et thermiques. L'objectif est de vérifier, par l'expérimentation, si le mélange à base de terre crue, sable et grignon d'olive peuvent réellement répondre aux exigences d'un matériau de construction à la fois performant, économe en énergie et respectueux de l'environnement.

II. Chapitre 2 : Matériaux et procédures expérimentales

II.1 Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent une revue bibliographique sur les matériaux de construction écologiques et les performances attendues, ce chapitre est consacré à la description des matériaux utilisés ainsi qu'aux méthodes expérimentales adoptées pour leur caractérisation.

Il s'agit d'abord d'identifier les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des constituants du mélange (terre crue, sable et grignon d'olive) à travers des essais normalisés (granulométrie, limites d'Atterberg, Proctor, FTIR, etc.).

Ensuite, les différents protocoles d'élaboration des éprouvettes sont détaillés, en précisant les dimensions, les méthodes de préparation et les conditions de séchage.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une base expérimentale solide pour l'interprétation des résultats présentés dans le chapitre suivant, et de garantir la reproductibilité des essais réalisés.

II.2 Matériaux

II.2.1 Terre crue

II.2.1.1 Présentation de la terre crue utiliser

- **Origine et Description :**

La terre crue utilisée dans cette étude a été prélevée localement dans la région d'Akbil à Tizi Ouzou en Algérie . Elle est présentée sous forme d'un sol argilo-limoneux, de couleur rouge d'ocre ce matériau est utilisé pour ses propriétés liantes naturelles pour sa capacité de former une matrice cohésive une fois séché. La terre est séchée à l'air libre, puis tamisée à 5 mm pour assurer d'enlever les fibres végétales et les roches avant l'utilisation dans les mélanges[23] ,Elle présente la matrice principale du composite étudié .



Figure II-1 : L'argile d'Akbil

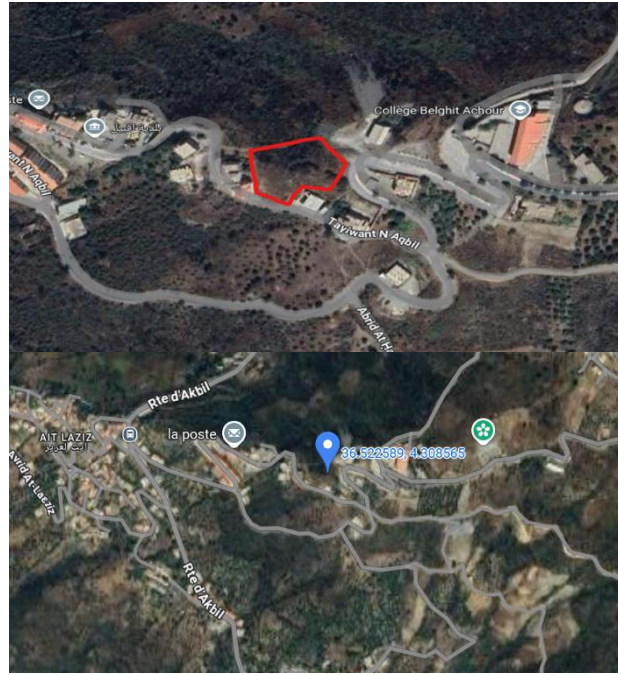


Figure II-2 : Situation géographique du terrain et la Vue aérienne du terrain

- **Situation géographique de la terre utiliser :**

La terre crue utiliser dans notre recherche est obtenue d'un terrain de superficie de plus 100m² ,il se trouve à 200 mètres de chef-lieu d'Akbil (36.522537, 4.308319) daïra Ain El Hammam la wilaya de Tizi Ouzou nord d'Algérie .

- **Collecte des échantillons :**

L'échantillon est récupéré et dégagé proprement dans une zone bien localisée sans extraire ou ajouter quoi que ce soit de son état naturel, et afin de pouvoir mener l'ensemble des essais prescrit pour caractériser une terre destinée à l'utilisation comme matériau de construction, on extraira des échantillons d'environ 100 kg.

II.2.2 Sable :

II.2.2.1 Présentation de sable utiliser :

- **Type de sable utiliser :**

Le sable utilisé provient d'une carrière locale, se présente sous forme de grains siliceux de teinte beige clair.

- **Caractéristiques et Utilisation :**

Il est utilisé comme dégraissant pour réduire la plasticité du mélange terreux et limiter les phénomènes de retrait au séchage et aussi il réduit la diffusivité thermique (diminution d'environ 6% dans un cas) . Le sable va être utilisé à sec après d'être tamisé a est tamisé à 5 mm pour avoir un matériau de granulométrie entre 0.08 et 5 mm .

II.2.3 Grignon d'olive

II.2.3.1 Présentation de grignon d'olive utiliser :

- **Origine et Description**

Le grignon d'olive utilisé dans notre étude est récupéré dans une huilerie moderne située à Souk El Had commune de Yatafen daïra de Beni Yani wilaya de Tizi Ouzou en Algérie. Ce matériau est un résidu solide issu de l'extraction de l'huile d'olive. Il représente environ 25% des olives traitées il est composé du noyau concassé en morceaux, de la peau et de la pulpe broyée de l'olive.

- **Préparation des grignons d'olive pour Utilisation dans le Matériau**

- **Récolte** : Il s'agit de la première étape de récupération du grignon.
- **Trituration** : Une opération de trituration est effectuée pour les grignons sales afin d'éliminer les impuretés.
- **Nettoyage** : Les grignons d'olive sont lavés avec de l'eau tiède pour éliminer les impuretés (pulpes, pulpe d'olive, etc.).

- **Étuvage (séchage)** : Les grignons lavés sont séchés dans une étuve à une température de 105°C pour évaporer l'eau résiduelle du lavage. Un séchage naturel à l'air libre pendant trois jours est également mentionné.
- **Broyage et tamisage** : Le grignon séché est broyé jusqu'à obtenir une poudre fine de moins de 0/4mm.

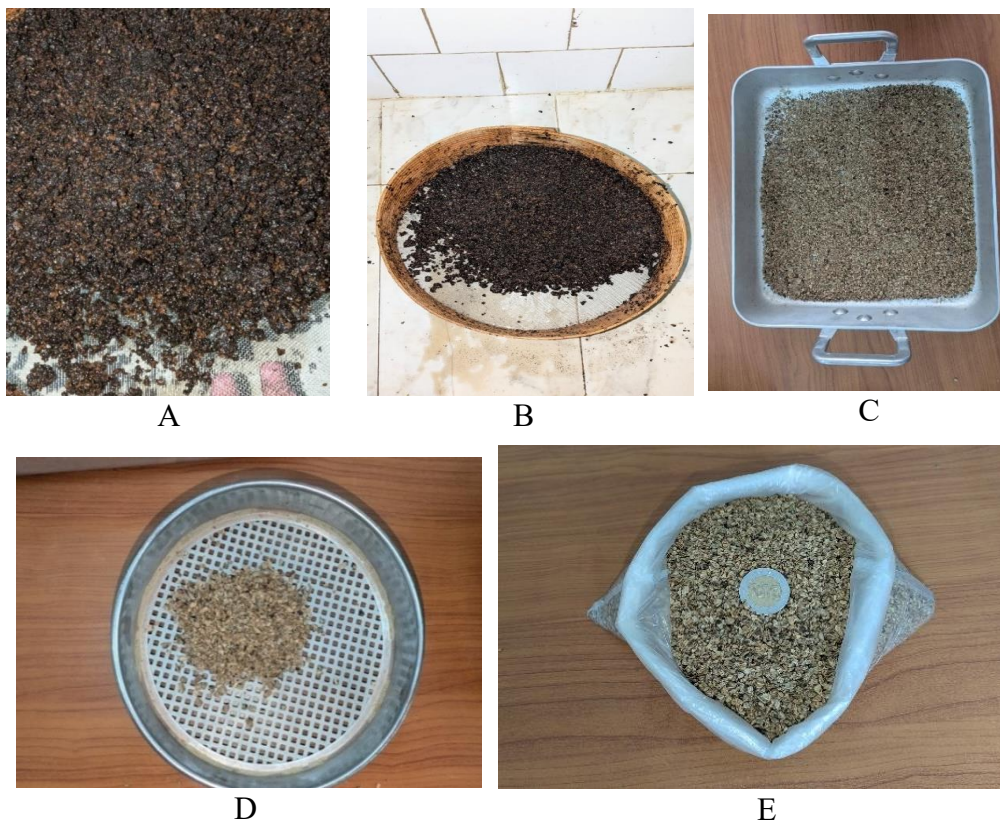


Figure II-3 : Étapes de préparation du grignon d'olive avant incorporation dans le mélange

(A) Récolte de grignon d'olive , (B) Nettoyage des grignons d'olive , (C) Étuvage (séchage),
(D) Tamisage des grignons d'olive , (E) Grignon d'olive prêt à l'utilisation .

- **Essai d'identification**

II.2.4 Essais d'Identification les propriétés physiques des matériaux utiliser

II.2.4.1 . Analyse Granulométrique NF P18-560 et NF P94-057

- **Définition :**

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions.

A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

- **But de l'essai :**

Il permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant d'échantillon

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les ouvertures sont décroissantes de haut vers le bas .le matériau analysé est placé dans le tamis supérieur et le classement des grains s'obtient par la vibration de l'ensemble de la colonne des tamis .

- **Matériels nécessaires :**

- une tamiseuse
- une série de tamis conformes
- un couvercle qui évite la perte de matériaux pendant le tamisage
- un fonds pour recueillir le dernier tamis
- une balance



A



B



C



D



E

Figure II-4 : Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique par tamisage

(A) Une tamiseuse , (B) Une série de tamis conformes , (C) Un couvercle qui évite la perte de matériaux tamiser , (D) Une balance , (E) Un fonds pour recueillir le dernier tamis .

- **Protocol d'essai :**

- **Préparation de l'échantillon :** Un échantillon de sol sec est nécessaire. Les tamis et le contenu sont séchés avant la pesée des refus cumulés.
- **Assemblage des tamis :** Les tamis sont empilés par ordre décroissant de diamètre de maille, du plus grand en haut au plus petit en bas, avec un fond à la base.
- **Introduction de l'échantillon :** L'échantillon de sol préparé est versé sur le tamis supérieur de la colonne.
- **Tamissage :** L'ensemble est agité doucement et horizontalement, manuellement, jusqu'à ce qu'il ne passe pratiquement plus de matière. Ensuite, chaque tamis est agité individuellement, en commençant par le tamis supérieur.
- **Pesée :** Après le tamissage, la masse de refus retenue sur chaque tamis (refus partiels) et la masse recueillie dans le fond sont pesées. La masse de refus cumulés sur chaque tamis est ensuite rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.
- **Calculs et tracé de la courbe :** Les pourcentages cumulés de refus et de tamisât sont calculés. Ces résultats sont ensuite utilisés pour tracer une courbe granulométrique. Cette courbe permet, par exemple, de déterminer la proportion de sable grossier et fin dans un échantillon de sable de dune.

L'analyse a été réalisée selon la norme NF P 18-560 [24].

II.2.4.2 Analyse granulométrique par sédimentation NF P 94-057 :

- **Définition :**

Cette méthode est complémentaire à l'analyse par tamisage et est utilisée pour les fractions fines du sol, en particulier les grains dont le diamètre est inférieur à 0,08 mm¹. La norme NF P94-057 régit cette méthode .

- **But de l'essai :**

- Déterminer la distribution pondérale des particules fines du sol.
- Compléter la courbe granulométrique pour la fraction fine, qui ne peut pas être efficacement séparée par tamisage .

- **Principe de l'essai :**

La sédimentométrie est basée sur la vitesse de sédimentation des particules dans un milieu liquide, qui varie en fonction de leur taille. Un exemple de méthode de sédimentation est la méthode allemande "Sedimentationszeiten Köhn"

- **Matériels nécessaires :**

- Eprouvette graduée de 1000 ml
- Une plaque chauffante
- L'eau distillée,
- Un défloculant
- Balance
- malaxeur
- densimetre
- thermometre



A



B



C



D



E





F



E

Figure II-5 : Matériel utilisé pour l'analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-057)

(A)Eprouvette graduée ,(B) Une plaque chauffante ,(C) L'eau distillée , (D) Un défloculant ,
(E) balance , (F) malaxeur ,(G) Densimetre et Thermometre .

- **Protocol d'essai :**

- **Séchage du matériau :** Le matériau doit être séché jusqu'à l'obtention d'une masse constante.
- **Pesée de l'échantillon :** Peser 10g du matériau séché.
- **Préparation de la suspension :** Placer le matériau dans un bécher sur une plaque chauffante à 60°C. Ajouter 15 ml de défloculant et 110 ml d'eau distillée.
- **Agitation :** Agiter la solution pendant 2 heures, par exemple avec une agitation magnétique.
- **Transfert et dilution :** Verser la solution agitée dans un cylindre gradué de 1000 ml et compléter avec de l'eau distillée jusqu'à la marque de 1000 ml.
- **Mesures et calculs :** Les résultats des mesures effectuées pendant l'essai sont ensuite présentés sous forme de tableaux et de courbes pour l'analyse .

Et Conformément à la norme NF P 94-057 [3][25], les particules fines ont été analysées par sédimentation.

II.2.4.3 Equivalent de Sable NF P 18-598

- **Principe de l'essai**

L'essai d'équivalent de sable a pour objectif d'évaluer la propreté du sable, c'est-à-dire la teneur en fines (argiles, limons) présentes dans le sable. En grand ce test permet d'évaluer la propreté du sable utilisé, comme recommandé dans [23] . Il est basé sur la sédimentation différentielle : les fines remontent dans la colonne d'eau argileuse, tandis que le sable sédimente au fond. L'indice ES est calculé par :

$$ES = \frac{H_s}{H_t} \times 100$$

Où :

- H_s : hauteur de sable décanté
 - H_t : hauteur totale du mélange
- **Matériel utilisé**
 - Agitateur manuel
 - Un défloculant
 - Éprouvette graduée (1000 ml)
 - Balance
 - Règle
 - Piston



A



B

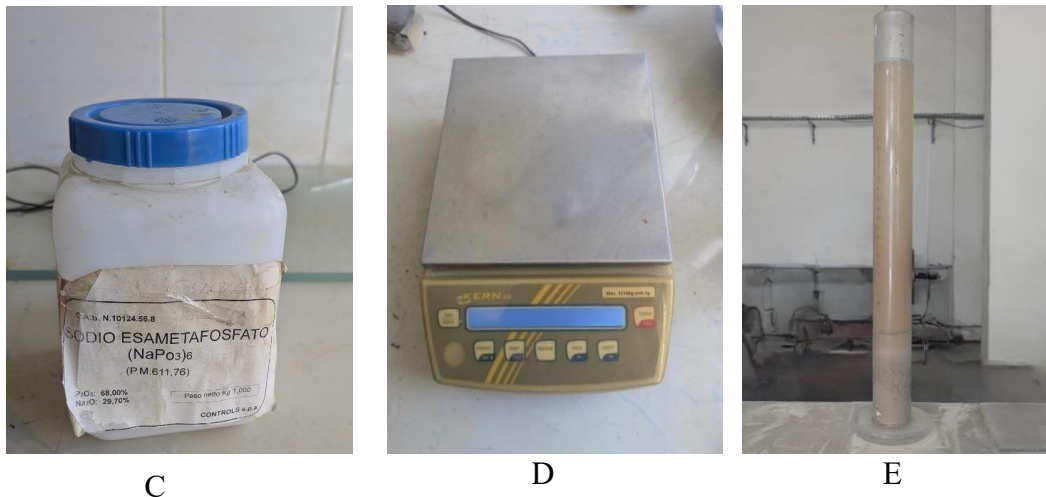


Figure II-6 : Matériel utilisé pour l'essai d'équivalent de sable (NF P18-598)

(A) Règle, Piston ,(B) Agitateur manuel ,(C) Éprouvette graduée (1000 ml) , (D) Un défloculant, (E) Balance.

- **Protocol d'essai :**

Un échantillon de sable sec est introduit dans l'éprouvette contenant la solution flocculante. Après agitation vigoureuse pendant 1 minute, on laisse reposer pendant 20 minutes. On mesure ensuite les hauteurs du sable sédimenté (H_s) et de la suspension totale (H_t).

II.2.4.4 Limites d'Atterberg NF P 94-051

- **Définition :**

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui définissent les seuils de transition entre différents états de consistance du sol, basés sur sa teneur en eau. Elles sont déterminées sur la fraction du sol passant au travers du tamis de 400 μm .

- **But de l'essai :**

- Déterminer la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité, WL)
- Déterminer la teneur en eau à laquelle le sol passe de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité, WP)
- Quantifier la plage de plasticité du sol via l'indice de plasticité (IP)
- Identifier et caractériser un sol et son état au moyen de son indice

- **Principe de l'essai :**

L'essai est basé sur la détermination de teneurs en eau pondérales spécifiques qui correspondent à des changements de comportement du sol remanié

- **Matériels nécessaires :**

- Appareil de Cassagnarde
- Outil à rainurer
- Cale d'épaisseur 10 mm
- Une plaque de verre
- Un rouleau Ø 3 mm
- Tare de pesée
- Étuve
- Une balance de précision de 0.01g
- Un tamis de diamètre 400 µm



A



B



C



D

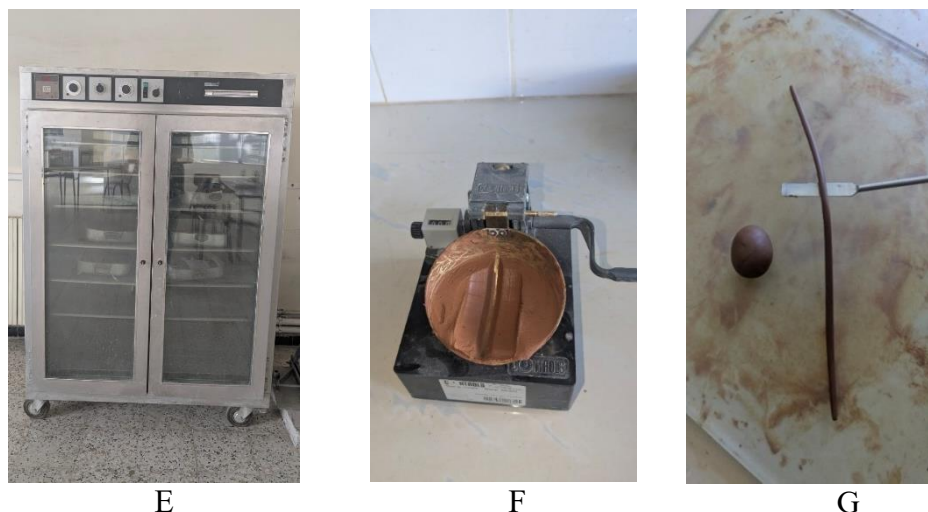


Figure II-7 : Matériel et manipulation pour la détermination des limites d'Atterberg (NF P94-051)

(A) Balance de précision de 0.01g ,(B) Appareil de Cassagnarde ,Une plaque de verre, un tamis de 40 μm , (C) Terre crue tamiser à 40 μm et sécher ,(D) Spatule ,(E) Étuve , (F) Appareil de Cassagnarde avec la pâte formée, (G) Un rouleau Ø 3 mm .

- **Protocol d'essai :**

- **Pour la détermination de la limite de liquidité (WL) :**

- **Préparation de l'échantillon :** Un échantillon d'environ 70 g de la fraction de sol inférieure à 400 μm est humidifié et lavé à l'eau sur le tamis de 0,4 mm
- **Préparation dans la coupelle :** La pâte de sol est étalée par couches successives dans la coupelle de Cassagnarde, en évitant l'emprisonnement de bulles d'air. L'épaisseur au centre doit être de 15 à 20 mm
- **Rainurage :** La pâte est ensuite partagée en deux par un outil à rainurer, en un seul mouvement, séparant complètement la pâte
- **Chocs et observation :** L'appareil est monté délicatement et soumis à une série de chocs réguliers (environ 2 coups/seconde). L'opérateur doit arrêter les coups dès que les deux lèvres de la rainure se touchent sur une longueur d'environ 15 mm
- **Acceptabilité de l'essai :** L'essai est acceptable si le nombre de coups est compris entre 15 et 35
- **Mesure de la teneur en eau :** La teneur en eau est déterminée en pesant la masse humide, en séchant l'échantillon à l'étuve à 105°C, puis en pesant la masse sèche
- **Détermination de WL :** La limite de liquidité est la teneur en eau du sol nécessitant 25 coups pour la fermeture d'un centimètre de la rainure. Les résultats de plusieurs mesures (par

exemple, 4 essais) sont reportés sur une courbe , et WL est déduite de cette courbe pour 25 coups.

- **Pour la détermination de la limite de plasticité (WP)**

Les limites de liquidité et plasticité ont été déterminées selon la norme NF P 94-051 [26].

- **Préparation de la boulette :** À partir de la pâte préparée pour la limite de liquidité, une boulette de sol est formée
- **Roulage :** Cette boulette est roulée à la main sur une plaque lisse (ou plaque de verre) de façon à obtenir un rouleau qui s'amincit progressivement jusqu'à atteindre 3 mm de diamètre. La cadence de mouvement de la main doit être régulière
- **Fissuration :** La limite de plasticité est la teneur en eau d'un rouleau de sol qui se fissure lorsque son diamètre atteint $3 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$
- **Mesure de la teneur en eau :** Lorsque les fissures apparaissent, la partie centrale du rouleau est prélevée pour une mesure de teneur en eau. Un deuxième essai est effectué sur une nouvelle boulette. La WP est la moyenne de ces mesures

II.2.4.5 L'essai Proctor NF 94-093

- **Définition :**

C'est l'un des essais les plus utilisés en domaine de géotechnique. Il a pour but de déterminer au laboratoire la teneur en eau optimale (T.E.O) pour notre échantillon et conditions qui conduit à la meilleure compression possible ou encore capacité portante maximale. La T.E.O. coïncide avec la masse volumique la plus grande qu'il est possible d'atteindre avec l'énergie de compactage mise en œuvre.

- **Essai Proctor normal :**

La présente norme détermine les caractéristiques de compactage d'un sol qui sont la teneur en eau optimale (W_{opt} en %) et la masse volumique sèche maximale ($\rho_d \text{ max}$). Le principe de l'essai Proctor normal consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter avec une dame normalisée, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe de variation de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau . L'essai Proctor a été mené selon la norme NF P 94-093 [23], [6].

- **But de l'essai :**

Objectif principal de l'essai Proctor Normal est de déterminer la teneur en eau optimale (T.E.O ou W_{opt}) et la masse volumique sèche maximale (ρ_d max ou γ_{OPN}) qu'un sol peut atteindre sous une énergie de compactage définie

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à compacter un échantillon de sol de manière définie et répétitive en faisant varier sa teneur en eau, Pour chaque teneur en eau, la masse volumique sèche du matériau est mesurée. En reportant ces mesures sur un graphique (masse volumique sèche en fonction de la teneur en eau), on obtient une courbe en cloche. Le point maximal de cette courbe correspond à l'optimum Proctor, indiquant la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. L'énergie déployée lors de cet essai est équivalente à celle des compacteurs utilisés sur chantier pour les terrassements.

- **Matériels nécessaires :**

- Moule Proctor
- Dame Proctor normale
- Règle à araser
- Bacs d'homogénéisation pour préparation l'échantillon
- Tamis 5 mm
- Truelle
- Spatule
- Pinceau
- Petits récipients
- Balance de précision a 0,1 g
- Etuve 105°C à 5°C



A



B



C



D



E



F



G



H



I

Figure II-8 : Matériel et manipulation de l'essai Proctor normal (NF P 94-093)

(A) Bacs d'homogénéisation pour préparation ,(B) Moule Proctor ,(C) Échantillon humidifié ,
(D) Eau distillée , (E) Dame Proctor normal , (F) Balance ,(G) Spatule ,(H) Échantillon
humidifier et compacter ,(I) Étuve .

- **Protocol d'essai :**

- **Préparation de l'échantillon :** Un échantillon de sol sec (2 kg) est humidifié à une teneur en eau initiale et placé dans un sac hermétique pendant 24 heures.
- **Assemblage du moule :** Le moule est assemblé avec sa base, un disque d'espacement.
- **Compactage :** L'échantillon est compacté en couches (3 couches pour l'essai Proctor normal). Pour chaque couche, la masse de matériau est approximativement égale. Chaque couche est damée avec la dame normalisée un nombre spécifié de coups .
- **Arasement :** Après le compactage de la dernière couche, la réhausse est retirée. Le sol compacté doit dépasser d'environ 1 cm du moule. L'opérateur arase soigneusement l'échantillon à partir du centre, en veillant à ne pas créer de trous à la surface.
- **Pesée :** pesé le matériau compacter .

Mesure de la teneur en eau et de la masse volumique sèche : Un échantillon du sol compacté est prélevé pour déterminer sa teneur en eau¹. La masse volumique humide est calculée, puis la masse volumique sèche est déduite.

- **Répétition :** La procédure est répétée plusieurs fois en faisant varier la teneur en eau de l'échantillon
- **Tracé de la courbe :** Les couples de valeurs (teneur en eau, masse volumique sèche) sont reportés sur un graphique pour obtenir la courbe Proctor.

Détermination de l'Optimum : Le point culminant de la courbe représente la teneur en eau optimale (W_{opt}) et la masse volumique sèche maximale ($\rho_d \text{ max}$).

II.2.4.6 Masse volumique des particules solides ρ_s (absolue): Méthode du pycnomètre a eau (NF P 94-054)

- **Définition :**

La masse volumique des particules solides du sol (ρ_s) est le quotient de la masse sèche de ces particules (M_s) par leur volume (V_s). Vu l'hétérogénéité du sol, l'essai permet la détermination de la masse volumique moyenne des particules et éléments solides constituant un échantillon. Cette dernière sert par la suite à la suite de déduire d'autres caractéristiques du sol telles que l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité.

- **But de l'essai :**

La masse volumique absolue (ou masse spécifique, poids volumique des grains solides) représente la masse des particules solides du sol par unité de volume de la phase solide, sans inclure les vides internes ou entre les grains

- **Principe de l'essai :**

L'essai s'applique à tout échantillon de sol intact ou remanié dont la dimension des plus gros éléments est inférieure à 2mm. Le principe consiste à sécher un échantillon de sol à l'étuve puis déterminer sa masse sèche par pesée (masse des particules et éléments solides). Le volume des particules et éléments solides est déduit également par pesée à l'aide d'un pycnomètre. Il permet de déterminer le volume des échantillons de forme irrégulière et de masse connue, tels que les granulats. Le principe repose sur le remplacement d'une certaine quantité de liquide du pycnomètre (eau généralement) par l'échantillon à étudier (plonge dans le pycnomètre) . La masse volumique des particules solides a été mesurée par pycnomètre à eau selon la norme NF P 94-054 [27].

- **Matériels nécessaires :**

- Une enceinte thermique ou une étuve
- Une balance de précision
- Un tamis de 2mm d'ouvertures
- Coupelles pour le séchage du sol
- Pycnomètres de volume minimal 50 cm³ munis de bouchons
- Une réserve de 10 litres minimum d'eau distillée ou déminéralisée
- Une source de chaleur permettant l'ébullition de l'eau dans le pycnomètre

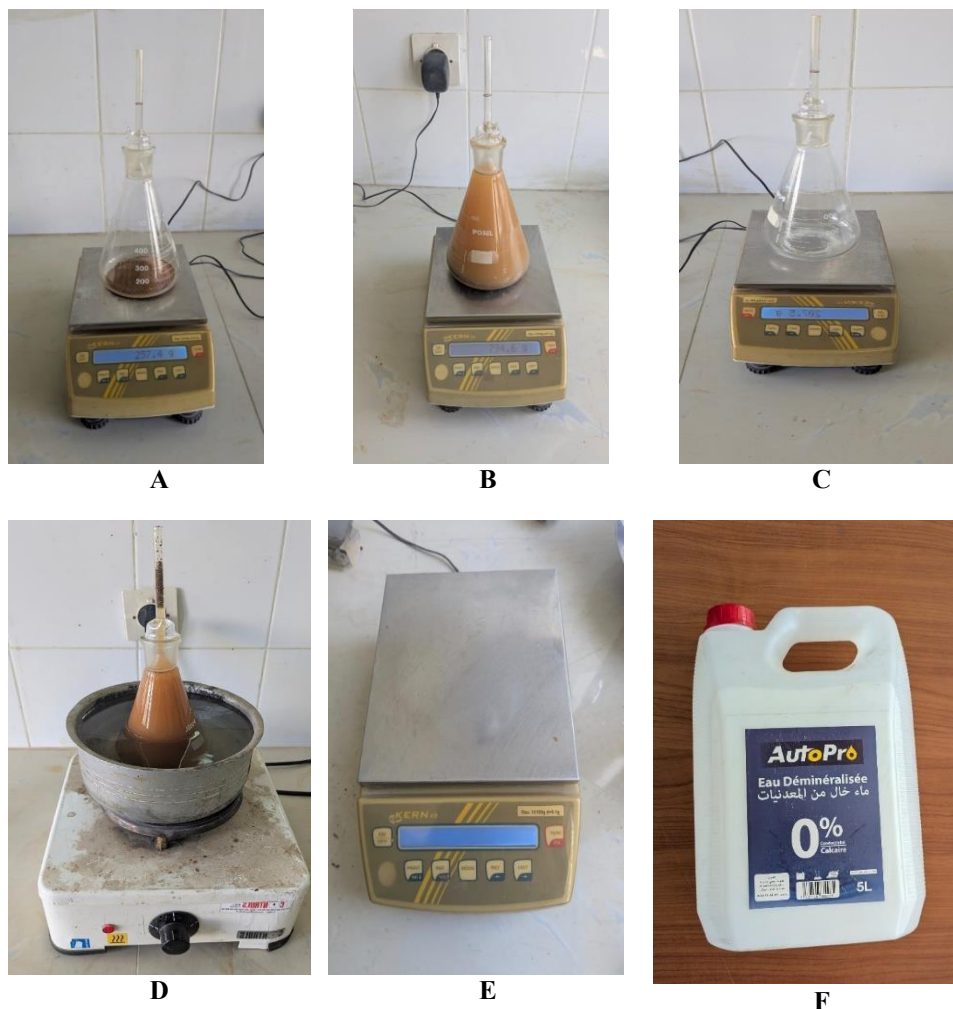


Figure II-9 : Matériel et manipulation de la détermination de la masse volumique absolue par pycnomètre à eau (NF P 94-054)

(A) Pycnomètres + matériau sec ,(B) Pycnomètres + matériau sec+ eau ,(C) Pycnomètres vide , (D) Plaque chauffante , (E) Balance, (F) Eau distiller .

- **Protocol d'essai :**

- **Séchage du matériau**

Sécher à 105 °C pendant 24 h, puis refroidir dans un dessiccateur.

- **Pesées : m_1 :** Pycnomètre vide et sec

m_2 : Pycnomètre + matériau sec

m_3 : Pycnomètre + matériau + eau

m_4 : Pycnomètre plein d'eau (sans matériau)

- **Élimination de l'air :**

Agiter doucement ou mettre sous vide pour éliminer les bulles d'air.

- **Température :**

Laisser stabiliser à 20 °C.

- **Formule de calcul :**

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 + m_2 - m_3}$$

II.2.4.7 Masse volumique des particules solides ρ_s du grignon d'olive – Méthode par éprouvette graduée

- **Définition**

La masse volumique absolue (ou réelle) correspond à la masse par unité de volume des particules solides, sans prendre en compte les vides entre elles. Elle est une donnée essentielle dans les calculs de formulation volumique des matériaux composites.

- **But**

Déterminer la masse volumique réelle du grignon d'olive, un sous-produit organique utilisé comme allègement et correcteur thermique dans les mélanges terreux.

- **Principe**

La méthode repose sur la mesure du volume d'eau déplacé par une masse connue de grignon sec dans une éprouvette graduée. En divisant cette masse par le volume déplacé, on obtient la masse volumique absolue.

- **Matériel utilisé**

- Éprouvette graduée
- Balance de précision
- Eau distillée
- Grignon d'olive séché et tamisé (< 2 mm)



Figure II-10 : Matériel utilisé pour la détermination de la masse volumique absolue du grignon d'olive par déplacement d'eau Protocole expérimental

(A) Éprouvette graduée 500ml ,(B) Éprouvette graduée 500ml + grignon d'olive ,(C) Eau distiller , (D) balance + matériau sec + tamis , (E) balance.

1. Sécher le grignon d'olive au four à 105 °C jusqu'à masse constante.
2. Introduire 300 g de grignon sec dans une éprouvette contenant 300 ml d'eau distillée.
3. Observer le nouveau volume
4. Calculer le volume d'eau déplacé

- **Définition :**

La masse volumique apparente sèche (ou masse volumique en vrac) est le rapport entre la masse sèche d'un matériau en vrac (sols, sables, terres crues, etc.) et le volume total qu'il occupe, y compris les vides entre les grains.

Elle s'exprime en kg/m³ ou g/cm³

$$\rho_d = \frac{ms}{V}$$

- **But de l'essai :**

- Déterminer la masse volumique apparente sèche d'un matériau.
- Caractériser la compacité naturelle ou en laboratoire du matériau.
- Évaluer des paramètres dérivés comme la porosité, la masse volumique humide ou le taux de vide.
- Essentiel pour les matériaux granulaires ou pulvérulents

- **Principe de l'essai :**

Le principe de l'essai de la Masse volumique apparente ρ_{app} vise à déterminer la masse d'un matériau par unité de son volume total, lequel inclut les grains solides et les vides intergranulaires. Ce concept est également parfois désigné comme la "masse volumique en vrac». Cette mesure donne une indication de la compacité naturelle du matériau [28].

- **Matériels nécessaires :**

- Cylindre calibré de volume connu
- Balance de précision ($\pm 0,1$ g ou mieux)
- Étuve ($105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$)
- Règle de nivellement (ou spatule droite)



A



B



C

Figure II-11 : Matériel et manipulation pour la détermination de la masse volumique apparente (NF P 94-059)

(A) Balance + cylindre calibre ,(B) Remplir le cylindre ,(C) Cylindre calibrée + matériau sec .

- **Protocol d'essai :**

- **Séchage du matériau :** Sécher l'échantillon à $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant au moins 24 h, puis laisser le refroidir à l'air libre .
- **Préparation du récipient :** Connaître précisément le volume intérieur du récipient (V). Le tarer sur la balance.
- **Remplissage :** Remplir le récipient avec le matériau sec, sans tasser.
- **Pesée :** Peser le récipient plein. Déduire la masse du matériau sec (*ms*)
- **Calculer :** $\rho d = \frac{ms}{V} \text{ g/cm}^3$

II.2.5 Essais d'Identification les propriétés chimiques des matériaux utilise

II.2.5.1 Spectroscopie infrarouge (FTIR)

- **Définition :**

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) est une technique d'analyse physico-chimique qui permet de communiquer des informations sur les liaisons entre les noyaux atomiques et leurs arrangements. Cette méthode permet d'accéder directement à l'information moléculaire, à la nature chimique et à l'organisation structurale des matériaux analysés.

La spectroscopie infrarouge consiste pour les minéralogistes un outil de caractérisation de la cristallinité de la terre crue utiliser par observation des intensités relatives des bandes de vibration des hydroxyles de structure.

Le spectre est représenté avec la transmittance en ordonnée (pourcentage de lumière ayant traversé l'échantillon) et le nombre d'onde (l'inverse de la longueur d'onde) en cm^{-1} en abscisse

- **But de l'essai :**

- **Principe de l'essai :**

La technique FT-IR se base sur les fréquences de vibration et de torsions (symétriques/asymétriques, planes ou non) qui sont caractéristiques des longueurs et forces des liaisons entre les atomes constitutifs d'un matériau. Lorsqu'un rayonnement du spectre infrarouge traverse le matériau, les bandes correspondant aux fréquences de vibration/torsion

typiques des groupes fonctionnels et des atomes présents sont absorbées. Cette absorption se manifeste par des pics de diminution de la transmission (ou d'augmentation de l'absorption) de l'onde à des fréquences spécifiques sur le spectrogramme infrarouge, après transformation de Fourier.

La composition du matériau peut alors être déduite grâce à des bases de données existantes. Pour les minéralogistes, cette méthode est un outil de caractérisation de la cristallinité, notamment par l'observation des intensités relatives des bandes de vibration des hydroxyles de structure[29].

- **Matériel et préparation:**

Les diagrammes infrarouges sont généralement obtenus sur des échantillons préparés sous forme de poudres, broyées au mortier d'agate jusqu'à un passant de 80 μm

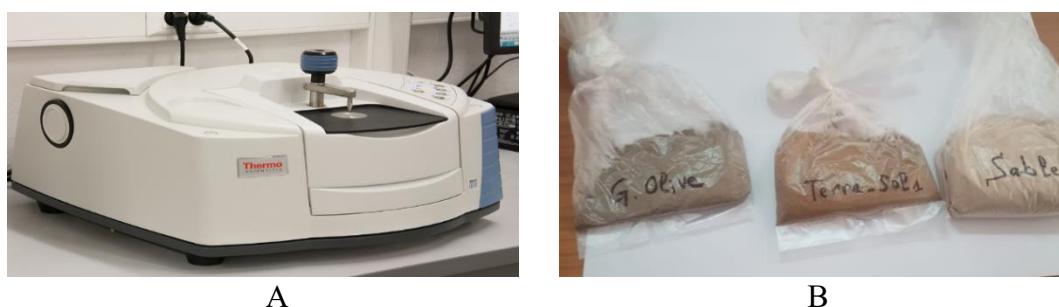


Figure II-12 : Appareil de spectroscopie infrarouge FTIR utilisé pour l'identification des groupes fonctionnels

(A) appareil de spectroscopie infrarouge FTIR, (B) poudre des matériaux analysés après d'être tamiser dans un tamis de 80 μm .

- **Protocol d'essai :**

- **Préparation des échantillons :**

Les échantillons de matériaux, qu'il s'agisse de minéraux argileux ou d'autres composés, sont généralement préparés sous forme de poudres.

Ils sont broyés au mortier d'agate jusqu'à obtenir une poudre fine, passant typiquement au tamis de 80 μm

- **Matériel d'analyse :**

Un spectromètre infrarouge à transformée de Fourier est utilisé pour l'analyse.

Poudre des matériaux 80 μm

- **Processus d'acquisition du spectre :**

- L'échantillon préparé est placé dans le spectromètre.
- Un rayonnement du spectre infrarouge est envoyé à travers le matériau .
- Les groupes fonctionnels et les atomes présents dans le matériau absorbent les bandes de rayonnement correspondant à leurs fréquences de vibration et de torsion caractéristiques. Ces vibrations peuvent être symétriques, asymétriques, planes ou non planes.
- La diminution de la transmission (ou l'augmentation de l'absorption) de l'onde à ces fréquences spécifiques est mesurée.
- Une transformation de Fourier est appliquée au spectrogramme infrarouge brut pour obtenir le spectre final.[29], [30]

II.3 Élaboration des éprouvettes

II.3.1 Formulations choisies

Dans le but d'étudier l'influence de l'ajout de grignon d'olive et le sable sur les propriétés du matériau, plusieurs formulations ont été préparées en variant les pourcentages de grignon d'olive et sable avec un pourcentage de terre crue fix. Ces pourcentages sont volumiques, pas massiques, car les matériaux ont des densités différentes.

Le tableau ci-dessous présente les proportions choisies pour les trois composants : terre crue, sable, et grignon d'olive.

Tableau II-1 : Composition volumique des différentes formulations terre-sable-grignon utilisées pour l'élaboration

Formulation	Terre crue %	Sable %	Grignon d'olive %
F1	60	40	0
F1	60	10	30
F2	60	20	20
F3	60	30	10

- **Choix des formulations et conversion en masse à partir des volumes :**

- Les pourcentages de grignon d'olive ont été choisis pour analyser progressivement son impact sur les propriétés mécaniques et thermiques du matériau. Quatre formulations ont été choisies , avec des proportions volumiques croissantes de grignon d'olive : 0 %, 10 %, 20 %, et

30 %. Le sable complète le volume restants dans chaque mélange avec un pourcentage de terre crue fix dans tous les mélanges .

- La proportion en volume influence directement la structure, la porosité et le comportement thermique pour ça on a choisi la base volumique, dans un matériau de construction, Toutefois, en laboratoire, la préparation des mélanges nécessite des pesées, il est donc nécessaire de convertir ces volumes en masses.

- Cette conversion a été effectuée à l'aide des masses volumiques absolues suivantes :

- Terre crue : $\rho = 2,22 \text{ g/cm}^3$
- Sable : $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$
- Grignon d'olive : $\rho = 1,15 \text{ g/cm}^3$

Pour une base de 1000 cm^3 (1 litre) de mélange total, les volumes attribués à chaque composant sont définis selon les pourcentages choisis. La masse de chaque constituant est ensuite calculée par la relation

$$m_i = V_i \times \rho_i$$

Où :

m_i : masse du constituant (g)

V_i : volume attribué au constituant (cm^3)

Ces calculs dans le but de déterminer avec précision les masses à peser pour chaque formulation. Les composants ont été ensuite mélangés à sec, puis humidifiés selon la teneur en eau optimale obtenue dans l'essai Proctor.

Tableau II-2 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 40 % grignon d'olive à 0%)

Moule (cm)	Volume (cm^3)	Terre crue (g)	Sable (g)	Grignon (g)	Total (g)
16×4×4	256	340.32	340.00	0	680.32
5×5×5	125	166.50	133.00	0	299.50
30×30×5,5	4950	6594.00	5260.00	0	11854.00
20×10×5	1000	1332.00	1060.00	0	2392.00

Tableau II-3 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 30 % grignon d'olive à 10%)

Moule (cm)	Volume (cm ³)	Terre crue (g)	Sable (g)	Grignon (g)	Total (g)
16×4×4	256	325.6	207.4	34.0	567.0
5×5×5	125	159.0	101.2	16.6	276.9
30×30×5,5	4950	6296.4	4009.5	658.4	10964.3
20×10×5	1000	1272.0	810.0	133.0	2215.0

Tableau II-4 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 20 % grignon d'olive à 20%)

Moule (cm)	Volume (cm ³)	Terre crue (g)	Sable (g)	Grignon (g)	Total (g)
16×4×4	256	325.6	138.2	51.1	514.9
5×5×5	125	159.0	67.5	25.0	251.5
30×30×5,5	4950	6296.4	2673.0	1316.7	10286.1
20×10×5	1000	1272.0	540.0	266.0	2078.0

Tableau II-5 : Quantités de matériaux nécessaires par éprouvette selon le pourcentage volumique de grignon d'olive (terre crue fixée à 60 % sable à 10 % grignon d'olive à 30%)

Moule (cm)	Volume (cm ³)	Terre crue (g)	Sable (g)	Grignon (g)	Total (g)
16×4×4	256	325.6	69.1	102.1	496.9
5×5×5	125	159.0	33.8	49.9	242.6
30×30×5,5	4950	6296.4	1336.5	1975.1	9608.0
20×10×5	1000	1272.0	270.0	399.0	1941.0

II.3.2 Préparation des mélanges

Les matériaux ont été d'abord homogénéisés à l'état sec (terre crue, sable, grignon d'olive) pendant environ 3 minutes. Par la suite, une quantité d'eau a été ajoutée progressivement jusqu'à obtention d'une pâte plastique homogène après le Calcul du taux d'humidité optimal du mélange.

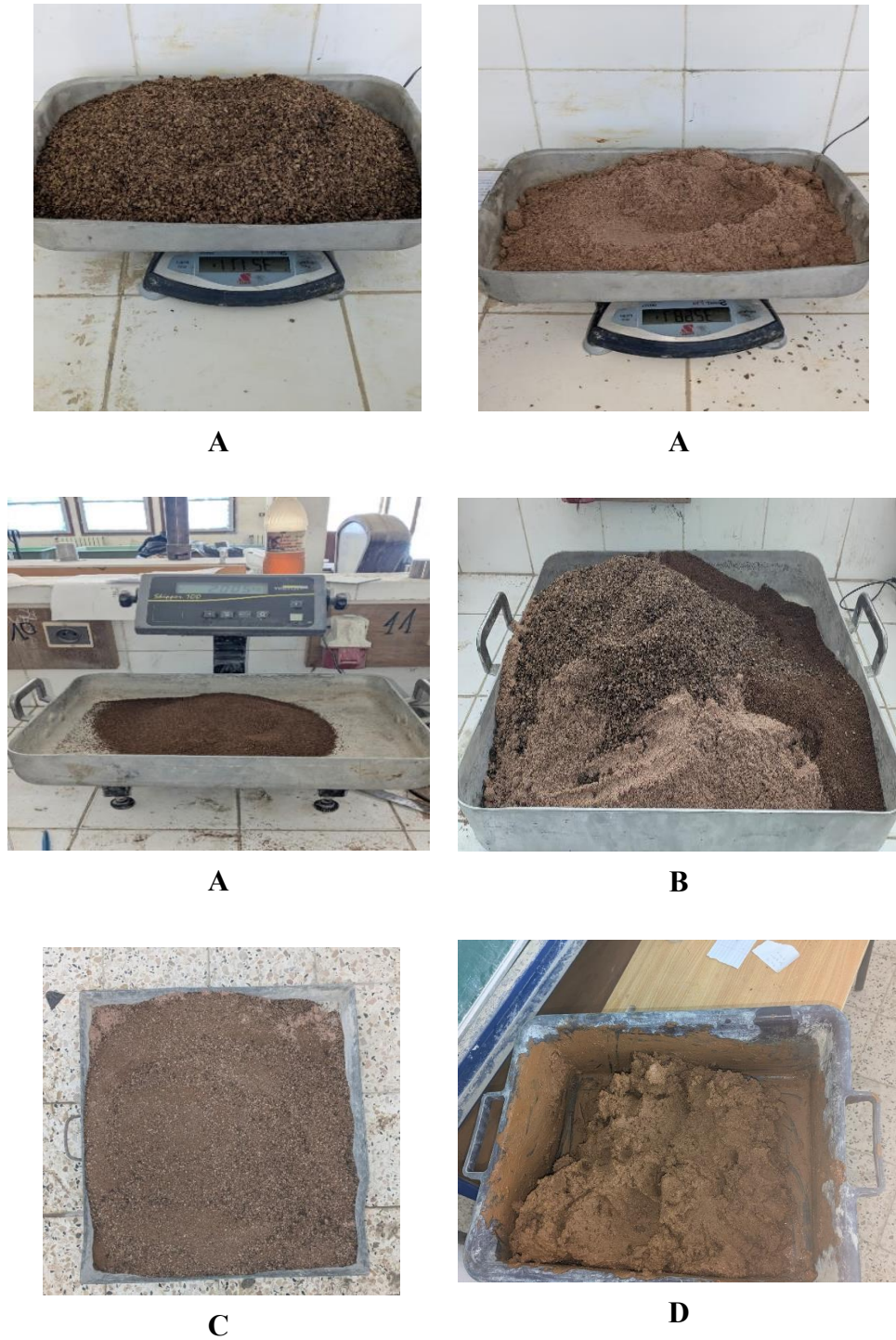


Figure II-13 Séquence de préparation du mélange

(A) Pesée individuelle des matériaux, (B) Regroupement dans un bac de malaxage, (C) Malaxage à sec, (D) Incorporation progressive de l'eau et homogénéisation

Le taux d'humidité optimal on l'a défini à partir des résultats de l'essai Proctor normal .

$$W_{opt} - melange = \frac{\sum(W_i \times P_i)}{\sum P_i}$$

II.3.3 Description des moules utilisés :

Pour la fabrication des éprouvettes, plusieurs différents types de moules ont été utilisés en fonction de la nature des essais à réaliser :

- **Compression** : moules cubiques rigides en métal et en bois de dimensions $5 \times 5 \times 5$ cm (XP P13-901)



Figure II-14 Moule pour la confection des éprouvettes de dimension $5 \times 5 \times 5$ cm pour la compression mécanique

- **Flexion** : moules prismatiques en métal et en bois de $16 \times 4 \times 4$ cm (inspirés de la norme NF EN 196-1)
- (A) Moule en acier pour la confection des éprouvettes de $5 \times 5 \times 5$ cm ,(B) Moule en bois pour la confection des éprouvettes de $5 \times 5 \times 5$ cm



A



B

Figure II-15 : Les Moules pour la confection des éprouvettes de flexion mécanique : moules en bois de 16X4X4 cm,

(A) Moule en bois pour la confection des éprouvettes de 16x4x4 cm ,(B) Moule en acier pour la confection des éprouvettes de 16x4x4 cm



Figure II-16 : Moule en bois pour la réalisation d'une éprouvette cubique de $30 \times 30 \times 5$ Cm

• **Briques réelles** : moules de $20 \times 10 \times 5$ cm ces briques ont été fabriquées pour simuler des conditions proches de la réalité. Ce format est largement utilisé dans les constructions en terre crue en raison de sa maniabilité, de son temps de séchage raisonnable, et de sa compatibilité avec les modules de construction standard.



Figure II-17 : Moule en bois pour la fabrication des briques de $200 \times 100 \times 50$ mm

- Selon les normes (NF XP P13-901) (ASTM E2392) (USA) ou (Cratère recommandations)

II.3.4 Moulage des éprouvettes

Plusieurs types d'éprouvettes avec des différentes dimension ont été préparés pour répondre aux exigences des chaque essais expérimentaux :

- Compression : cubes de $50 \times 50 \times 50$ mm, conformes à la norme NF EN 1015-11 / XP P13-901.



Figure II-18 : Échantillons cubiques ($5 \times 5 \times 5$ cm) réalisés pour les essais de compression uni axiale selon la norme NF EN 1015-11 (XP P13-901)

- Flexion : prismes de $160 \times 40 \times 40$ mm, selon la norme NF EN 196-1 adaptée aux matériaux terreux.



Figure II-19 : Échantillons prismatiques ($16 \times 4 \times 4$ cm) destinés aux essais de traction par flexion en trois points selon la norme XP P13-901

- Essais thermiques : blocs de $300 \times 300 \times 50$ mm, pour assurer un transfert thermique mesurable et représentatif.

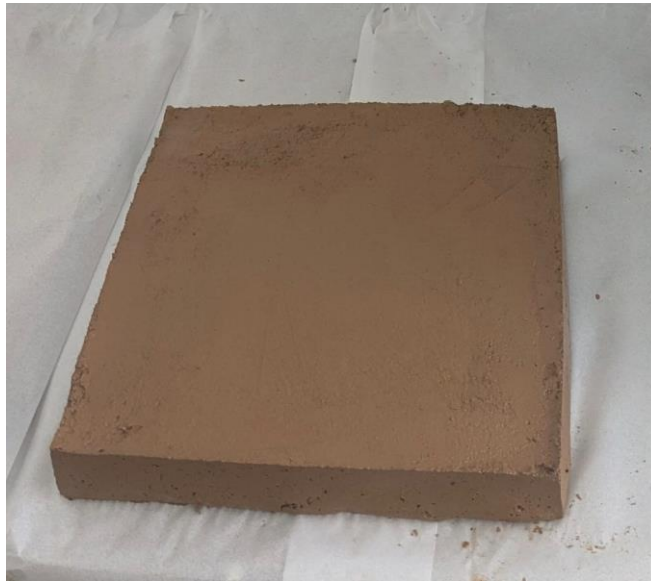


Figure II-20 : Échantillons prismatiques ($30 \times 30 \times 4$ cm) destinés aux essais thermiques

- Ébauche de brique : blocs de $20 \times 10 \times 5$ cm, fabriqués pour des essais représentatifs en conditions réelles .



Figure II-21 : Briques expérimentales de format $20 \times 10 \times 5$ cm

Le moulage s'est effectué manuellement à l'aide de moules rigides en bois et en acier . Chaque moule a été rempli en deux ou trois couches compactées manuellement afin de garantir une densité uniforme.

II.3.5 Séchage des éprouvettes

Après démoulage réalisé 24 heures après moulage, les éprouvettes ont été laissées à sécher à l'air libre et dans un espace ventilé loin d'humidité directe et de la lumière solaire pour éviter les fissures . Le séchage a duré 21 jours, à une température ambiante moyenne de 25 °C

Pour assurer d'obtenir une brique sèche sans humidité qui s'influence sur les résultats des essais surtout thermique .

Aucune cuisson n'a été appliquée afin de respecter la démarche de construction en terre crue, fondée sur l'utilisation de matériaux non transformés thermiquement.



Figure II-22 : Procédés de séchage des briques crues – à l'air libre (droite) et en étuve ventilée (gauche) pour l'élimination de l'humidité résiduelle :

(A) Séchage des éprouvettes dans une étuve ventilée ,(B) Séchage des éprouvettes a l'air libre.

Justification des dimensions

- Pour les éprouvettes de 5x5x5 cm Cette dimension est conforme à la norme XP P13-901, applicable aux matériaux de construction en terre crue. Elle permet une bonne représentativité tout en restant compatible avec les capacités de la presse hydraulique du laboratoire.
- Pour les éprouvettes de 16 × 4 × 4 cm ont été adoptés, conformément à la norme NF EN 196-1 utilisée pour les mortiers. Ce format est adapté aux essais de traction par flexion en trois points, permettant une lecture précise de la rupture au centre.
- Pour les essais thermiques (conductivité thermique), des échantillons cubiques de 30 × 30 × 5 cm ont été confectionnés, compatibles avec le capteur du CT-mètre utilisé. Ce

volume réduit permet d'assurer une mesure stable et homogène de la conductivité à cœur.

- Pour les essais non destructifs aux ultrasons, les éprouvettes de $5 \times 5 \times 5$ cm ont été également utilisées. Cette dimension permet un contact correct entre les transducteurs et le matériau, avec une longueur suffisante pour mesurer une vitesse de propagation représentative.
- Les briques de dimensions $20 \times 10 \times 5$ cm ont été fabriquées à titre illustratif et pour simuler des conditions réelles de mise en œuvre, on les a utilisés dans des essais normés comme l'essai d'absorption capillaire .

Les dimensions des éprouvettes ont été choisies conformément à la norme XP P13-901 [31] et selon les recommandations de Houben et Guillaud [23]

II.4 Essai mécanique

II.4.1 Essaie de compression NF EN 1015-11 (XP P13-901)

- **Définition :**

Cette expérience recherche la contrainte de pression maximale que les échantillons de briques peuvent supporter. Cela se fait

- **But de l'essai :**

Déterminer la résistance à la compression d'un matériau, c'est-à-dire sa capacité à supporter une charge sans s'écraser.

- **Principe de l'essai :**

- Préparation de l'éprouvette :**

- Éprouvette de forme cubique ou parallélépipédique.
 - Faces supérieures et inférieures bien planes et parallèles.

- Mise en place dans la machine :**

- L'éprouvette est placée entre deux plateaux en acier de la presse de compression.

- Application de la charge :**

- Une force verticale croissante est appliquée à vitesse constante.
 - La charge est enregistrée jusqu'à la rupture de l'échantillon.

- Mesure et calcul :**

- On mesure la charge maximale F supportée.
- La résistance à la compression R_c est calculée par la formule :

$$R_c = \frac{F}{A}$$

Avec A = surface de la section transversale (en mm²).

- **Matériels nécessaires :**

- Balance de précision
- Règle ou pied à coulisse (précision $\pm 0,1$ mm)
- Éprouvettes normalisées
- Plaques de compression rigides
- Machine d'essai de compression



A



B



C



D

Figure II-23 : Matériel et déroulement de l'essai de compression selon NF EN 1015-11 (XP P13-901) :

(A) Machine d'essai de compression , (B) Machine d'essai de compression, (C) Balance de précision, (D) Les éprouvette cubique 50×50×50 mm

- **Protocol d'essai :**

En plaçant l'échantillon entre les mâchoires de la presse et une charge est placée dessus qui augmente progressivement jusqu'à ce que l'échantillon s'effondre. À la fin, grâce au dispositif d'expérimentation, nous pourrions obtenir une courbe de changement de contrainte et de contrainte d'effondrement (réfraction), où $\sigma_c = F / S$. Cette expérimentation a été réalisée sur la base des normes ASTM C67-03 (2003), NF P18-406 et XP 13-30.

L'essai de compression a été réalisé conformément à la norme NF EN 1015-11 [31], adaptée ici aux échantillons en terre crue selon XP P13-901 [31].

Utilité dans la construction :

- S'assurer que la brique peut résister à son propre poids + celui du mur + charges du bâtiment.
- Choisir le bon usage (mur porteur, cloison, remplissage...).

II.4.2 Essai de flexion (traction par flexion en 3 point) XP P13-901,NF EN 196-1

- **Définition :**

L'essai de flexion est une méthode expérimentale utilisée pour évaluer la résistance d'un matériau à la flexion, c'est-à-dire à une sollicitation combinée de compression et de traction exercée simultanément sur une pièce.

Il consiste à appliquer une force perpendiculaire à un échantillon reposant sur deux appuis, jusqu'à ce que celui-ci se casse ou se déforme de manière significative. L'essai permet de déterminer des propriétés mécaniques, notamment la résistance à la flexion (ou contrainte de rupture en flexion), exprimée en MPa (mégapascals)

- **But de l'essai :**

Évaluer la résistance à la traction indirecte du matériau, en mesurant sa capacité à se plier sans se casser.

- **Principe de l'essai :**

- **Préparation de l'éprouvette :**

Éprouvette prismatique (ex : $16 \times 4 \times 4$ cm).

Faces bien planes, dimensions précises.

- **Disposition :**

L'éprouvette est posée sur deux appuis espacés d'une distance connue .

Une charge verticale est appliquée au centre de la portée (flexion 3 points).

- **Application de la charge :**

La charge est augmentée progressivement jusqu'à la rupture.

Le point de rupture correspond à la fissuration ou la cassure nette au niveau du point de charge.

- **Calcul :**

La résistance à la flexion R_F est calculée par :

$$R_F = \frac{3FL}{2BH^2}$$

- **Où :**

- F = charge maximale (N),

- L = portée (mm),
- B = largeur (mm),
- H = hauteur (mm).
- **Matériels nécessaires :**
 - Machine d'essai mécanique de flexion
 - Support de flexion (appuis + chargeur)
 - Éprouvettes parallélépipédiques normalisé
 - Pied à coulisse ou réglette
 - Balance de précision



A



B

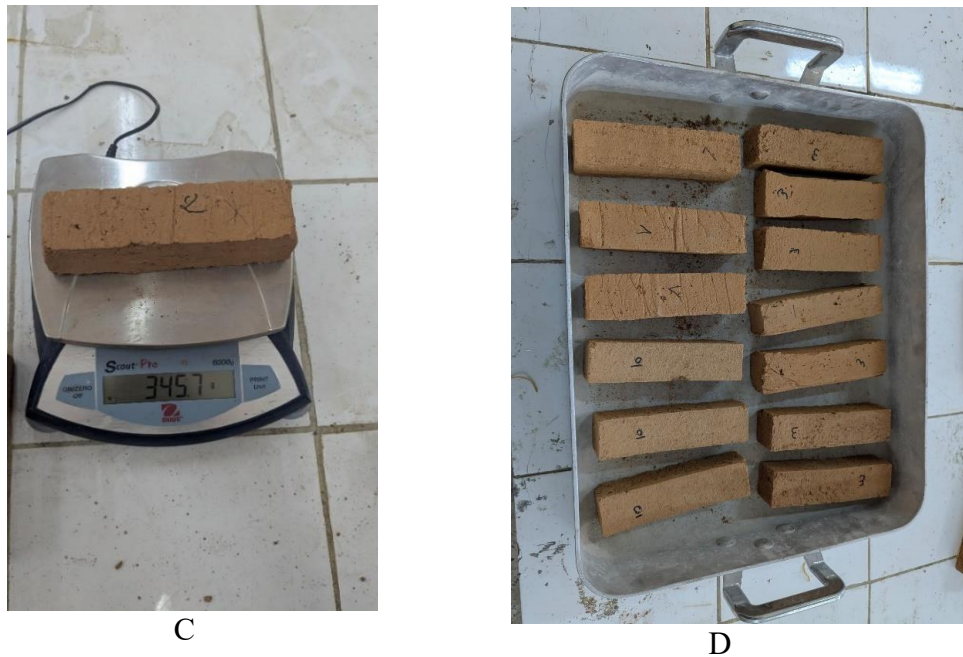


Figure II-24 : Matériel et déroulement de l'essai de flexion selon (NF EN 1015-11) (XP P13-901)

(A) Machine d'essai mécanique de flexion ,(B) zone d'essai de flexion ,(C) Balance de précision ,(D) Les éprouvettes de 16X4X4 cm pour l'essai de flexion .

- **Protocole d'essai :**

L'échantillon est placé sur deux supports et une force concentrée est exercée sur lui au milieu de la dimension entre les deux supports augmentant progressivement jusqu'à l'effondrement. Nous avons utilisé pour cette expérience la machine de flexion. Elle est donnée par : $\sigma_f = 3FL / (2ba^2)$ Où; F est la force exercée lorsque l'échantillon s'effondre; L est la distance entre les deux accoudoirs et nous l'avons fixée à 10 cm ; a et b est une dimension de section d'échantillon ; Les normes adoptées dans cette expérimentation sont XP P13-901,NF P15-471, NF EN 196-1.

- **Utilité dans la construction :**

- Prévoir le comportement du matériau en cas de flexion, de mouvements de terrain, ou de sollicitations latérales.
- Identifier les risques de fissuration précoce.

II.5 Essai thermique (ISO 8301) (ASTM C518) :

II.5.1 Essai De mesure de conductivité thermique :

- **Définition :**

L'essai thermique par fluxmètre est une méthode normalisée qui permet de mesurer la conductivité thermique d'un matériau solide à l'état stationnaire. Elle repose sur l'usage d'un fluxmètre, un capteur qui mesure le flux de chaleur traversant un échantillon sous un gradient de température contrôlé. [32]

- **But de l'essai :**

Le principal objectif de cet essai est :

- De déterminer la conductivité thermique λ (W/m·K) d'un matériau,
- D'évaluer ses performances d'isolation thermique,
- De contribuer à la caractérisation thermique des matériaux, que ce soit pour la construction, l'industrie ou la recherche environnementale.

- **Principe de l'essai :**

Le principe de l'essai repose sur l'établissement d'un gradient thermique à travers un échantillon de matériau placé entre deux plaques isothermes. Un flux de chaleur constant est induit et mesuré via un fluxmètre, selon les étapes suivantes [33]:

1. On applique une température chaude d'un côté et une température froide de l'autre.
2. On attend d'atteindre l'état stationnaire.
3. Le flux de chaleur ϕ (W/m²) est mesuré.
4. La conductivité est déterminée par la loi de Fourier :

$$\lambda = \frac{\phi \cdot e}{\Delta T}$$

- Où :

- e = l'épaisseur du matériau,
- ΔT = la différence de température entre les faces.

- **Matériels nécessaires :**

- Échantillon plat de matériau homogène.
- Appareil à fluxmètre (ou flux de chaleur gardé).
- Capteurs de température (thermocouples).
- Régulation de température haute et basse.
- Enregistreur de données.



Figure II-25 : Matériel et manipulation de l'essai de conductivité thermique selon la méthode FLUXMETRE :

(A) Régulateur de température, (B) enceinte de mesure ou module de fluxmètre thermique, (C) unité de refroidissement.

- **Protocole d'essai :**

Permanente notre échantillon de 30x30x5 cm d'abord par séchage dans l'étuve jusqu'à assure d'éliminer l'humidité qui peut influencer le résultat de l'essai, après cette étape on rectifie notre échantillon jusqu'à que sa surface devienne plate et on le place dans notre appareille entre deux plaque et on contrôle la température, et on attend que le système atteigne un régime permanent (typiquement 1–2 h), à la fin on mesure le fluxmètre via le fluxmètre et on calcule la conductivité thermique a partir des valeurs mesuré [32].

II.6 Essai non destructif – Ultrasons NF EN 12504-4 :

II.6.1 Principe de l'essai

L'essai par ultrasons est une méthode non destructive utilisée pour évaluer la compacité, l'homogénéité et la qualité interne des matériaux de construction. Il repose sur la mesure de la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore à travers l'échantillon.

Dans cet essai, deux transducteurs piézoélectriques sont placés sur les deux extrémités opposées de l'éprouvette. L'un sert d'émetteur, l'autre de récepteur. Un gel de couplage est appliqué entre les capteurs et les faces du matériau pour assurer un bon contact acoustique.

La vitesse de propagation des ondes est calculée par la relation :

$$V = \frac{L}{\Delta t}$$

- Avec :

V : vitesse des ondes ultrasonores (m/s)

L : longueur traversée (m)

Δt : temps de transit de l'onde (s)

L'essai non destructif par ultrasons a été réalisé selon la norme NF EN 12504-4 , couramment utilisée pour évaluer l'homogénéité des matériaux cimentaires .

II.6.2 Matériel utilisé

- Deux transducteurs à ultrasons (émetteur et récepteur)
- Générateur d'impulsion / appareil de mesure de temps de transit
- Gel de couplage
- Éprouvette de brique en terre crue (dimensions : 5×5×5 cm)
- Chronomètre intégré à l'appareil
- Réglette ou pied à coulisse pour mesurer L



Figure II-26 : Matériel et manipulation de l'essai non destructif par ultrasons selon la norme NF EN 12504-4

(A) Deux transducteurs à ultrasons (émetteur et récepteur), (B) Gel de couplage et les équipements de la machine, (C) Appareillage de la manipulation de l'essai

II.6.3 Conditions de l'essai

Température ambiante : $\sim 25^{\circ}\text{C}$

Échantillons séchés à l'air libre

Placement des transducteurs sur deux faces opposées (transmission directe)

II.7 Autres essais physiques :

II.7.1 Essai de capillarité (remontée d'eau) :

- **Définition**

L'essai de capillarité il vas nous permettra d'évaluer la remontée capillaire de l'eau de notre matériau (brique). Il est souvent repris dans les recommandations de la norme XP P13-901 relative aux matériaux à base de terre.

- **But**

L'objectif est de mesurer la capacité d'un matériau sec à absorber de l'eau par capillarité verticale. Et cela permet d'évaluer son comportement face à l'humidité ascensionnelle, facteur crucial pour des éléments au contact du sol.

- **Matériaux utilisés**

- Brique séchée ($20 \times 10 \times 5$ cm)
- Récipient plat contenant de l'eau
- Règle millimétrée
- Chronomètre ou minuterie
- Marqueur ou crayon



A
B
Figure II-27 : Matériel utilisé pour l'essai de capillarité

(A) , Brique noyée dans un bac d'eau ,(B) Séchage des éprouvettes a dans une étuve .

- **Protocol d'essai :**

- Sécher complètement l'échantillon à l'air libre ou en étuve (40 °C) jusqu'à masse constante.
- Placer l'échantillon verticalement dans un bac contenant 1 cm d'eau propre.
- Noter le temps de démarrage et relever la hauteur d'humidité visible sur la surface verticale à 30 min, 1 h, 2 h, 4 h, 24 h.
- À chaque intervalle, marquer la hauteur atteinte par l'eau, puis mesurer à l'aide d'une règle.
- Arrêter l'essai lorsque la hauteur n'évolue plus

II.7.2 Essai de retrait au séchage

- **Définition**

L'essai de retrait consiste à mesurer la variation dimensionnelle longitudinale d'un matériau entre son état humide et son état sec. Il n'existe pas de norme unique applicable, mais la méthode est largement décrite dans les documents de l'ASTM D427 ou la norme XP P13-901 pour les matériaux terreux.

- **But**

Le test a pour objectif de déterminer la rétractabilité du matériau pendant le séchage, paramètre essentiel pour estimer le risque de fissuration dans la construction.

- **Matériaux utilisés**

- Moule rectangulaire (20×10×5)
- Mélange sec (terre-sable-grignon d'olive)
- Règle graduée (1 mm) ou pied à coulisse
- Four ventilé
- Chronomètre



A



B



C



D

Figure II-28 : manipulation de l'essai de retrait.

(A) Mélange sec (terre-sable-grignon d'olive) , (B) Mélange humidifié (terre-sable-grignon d'olive) , (C) Moule rectangulaire (20×10×5) , (D) séchage des éprouvettes pour éliminer l'humidité

- **Protocole d'essai :**

- Huiler le moule et le remplir du mélange frais préparé selon la formulation.
- Lisser la surface, puis mesurer immédiatement la longueur initiale L_0 .
- Laisser sécher l'éprouvette à l'air libre dans un local ventilé.
- Après séchage (7 à 14 jours), mesurer la longueur finale L_f .

- Calculer le **taux de retrait linéaire** avec la formule :

$$R = \frac{L_0 - L_F}{L_0} \times 100$$

- Répéter pour plusieurs formulations afin de comparer l'impact du grignon d'olive.

II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans l'élaboration du matériau composite (terre crue, sable, grignon d'olive), ainsi que les procédures expérimentales mises en œuvre pour les caractériser.

Les essais d'identification physiques et chimiques (granulométrie, limites d'Atterberg, Proctor, FTIR...) ont permis de mieux comprendre les propriétés fondamentales de chaque composant. Les essais mécaniques (compression, flexion), thermiques (conductivité) et non destructifs (ultrasons) ont été décrits avec précision, tout comme la méthode de fabrication des éprouvettes.

Ces démarches expérimentales constituent la base essentielle pour interpréter les performances du matériau développé. Elles permettront dans le prochain chapitre d'analyser l'influence des différentes formulations sur les propriétés mécaniques et thermiques, et d'évaluer la pertinence de l'utilisation du grignon d'olive dans une optique de construction durable.

III. Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

III.1 Introduction :

L'étude expérimentale de notre travail consiste à déterminer les caractéristiques thermiques et mécaniques de notre matériau fabriquer à base de la terre crue locale sous forme des briques sécher à l'air sans compactage, on utilise pour chaque test une dimension spéciale suivant la norme ou l'appareille utiliser .pour la formalisation de ces briques on a utilisé la terre crue d'Akbil, Tizi Ouzou et le sable de de carrière local et des grignons d'olive broyé de Tizi Ouzou. Dans ce chapitre on va voir et interpréter les résultats des essais d'identification des matériaux et les essais effectuer sur les briques confectionner.

– Les différents essais effectuer sur notre brique à savoir :

- Essais mécaniques :
 - La résistance à la flexion ;
 - La résistance à la compression ;
- Essais thermiques :
 - Conductivité thermique;
- Essai non destructif – Ultrasons ;

Les essaies sont effectués au laboratoire de Génie Civil de l'universalité de UMMTO Tizi Ouzou , dans les conditions suivantes : Température ($30 \pm 5^{\circ}\text{C}$).

III.2 Résultats et Interprétation des résultats des tests d'identification des matériaux utiliser :

III.2.1 Résultats de l'analyse granulométrique pour chaque matériau :

- Terre crue :

Tableau III-1 : Résultats du tamisage de la terre crue (NF P18-560)

Tamisage	Tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse refus cumulée (Mc)	%Refus cumulés (Pr)	%Passant (Pt)
	4	0	0	0	100
	3,15	0,6	0,6	0,03	99,97
	2	7,8	8,4	0,42	99,58
	1	480	488,4	24,42	75,58
	0,5	472,2	960,6	48,03	51,97
	0,315	657,8	1618,4	80,92	19,08
	0,2	169,4	1787,8	89,39	10,61
	0,125	96,8	1884,6	94,23	5,77
	0,08	94,4	1979	98,95	1,05

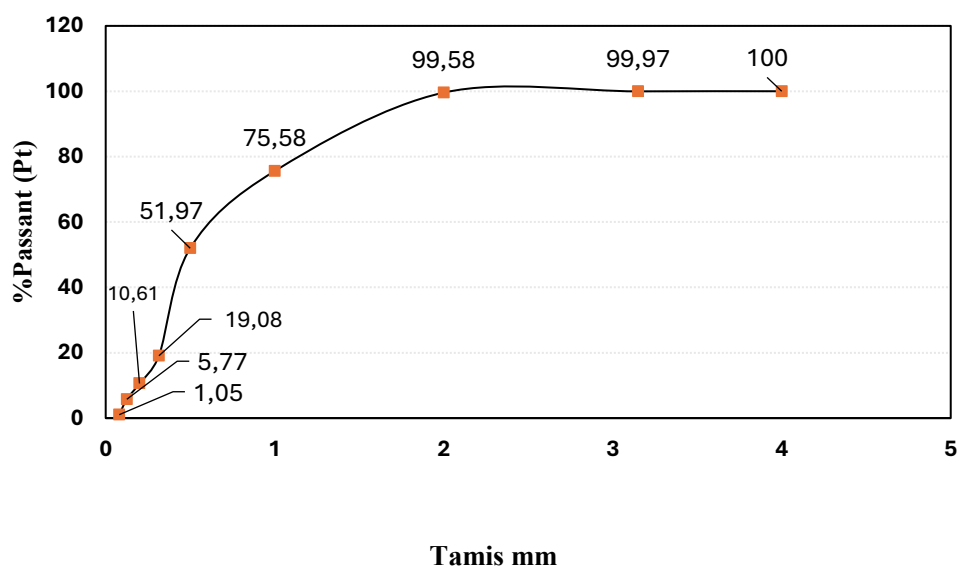


Figure III-1 : Courbe de granulométrie par tamisage de la terre crue (NF P18-560)

Sable

Tableau III-2 : Résultats du tamisage du sable (NF P18-560)

Tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse refus cumulée (Mc)	%Refus cumulés (Pr)	%Passant (Pt)
4	0	0	0	100
3,15	22,1	22,1	1,1	98,9
2	76,1	98,2	4,91	95,09
1	460,2	558,4	27,92	72,08
0,5	275,1	833,5	41,67	58,33
0,315	534,5	1368	68,4	31,6
0,2	278,8	1646,8	82,34	17,66
0,125	181,1	1827,9	91,39	8,61
0,08	156,8	1984,7	99,23	0,71
Fond	15,2	2000	100	0

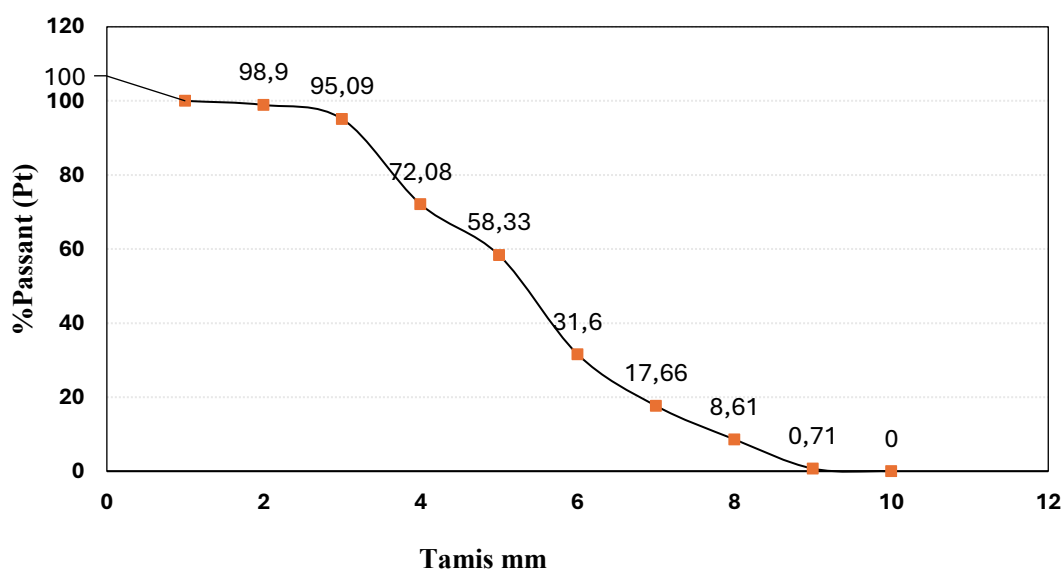


Figure III-2 : Courbe de granulométrie par tamisage de sable (NF P18-560)

La courbe granulométrique du sable montre que notre sable bien gradué, avec une majorité de particules entre 0,2 mm et 1 mm. Pour la terre crue, la courbe est plus inclinée, indiquant une existence importante de particules fines ($< 0,315$ mm), avec un passage progressif cela indique que notre terre utilisée est argileuse, ce qui est favorable à la cohésion du matériau de construction.

- **Grignon d'olive :**

Le grignon d'olive est un matériau organique broyé. Son analyse granulométrique est indicative, car il ne suit pas exactement la même classification que les sables ou sols minéraux.

Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation de la terre crue :

Tableau III-3 : Résultats de l'analyse granulométrique par sédimentation de la terre crue (NF P94-057)

Sédimentation	Tamis (mm)	Masse des refus (g)	Masse refus cumulée (Mc)	%Refus cumulés (Pr)	%Passant (Pt)
	0.05919				0
	0.04185				0,1
	0.02959				0,2
	0.01872				0,29
	0.01323				0,39
	0.00936				0,49
	0.00662				0,59
	0.00468				0,69
	0.00270				0,88
	0.00110				1,08

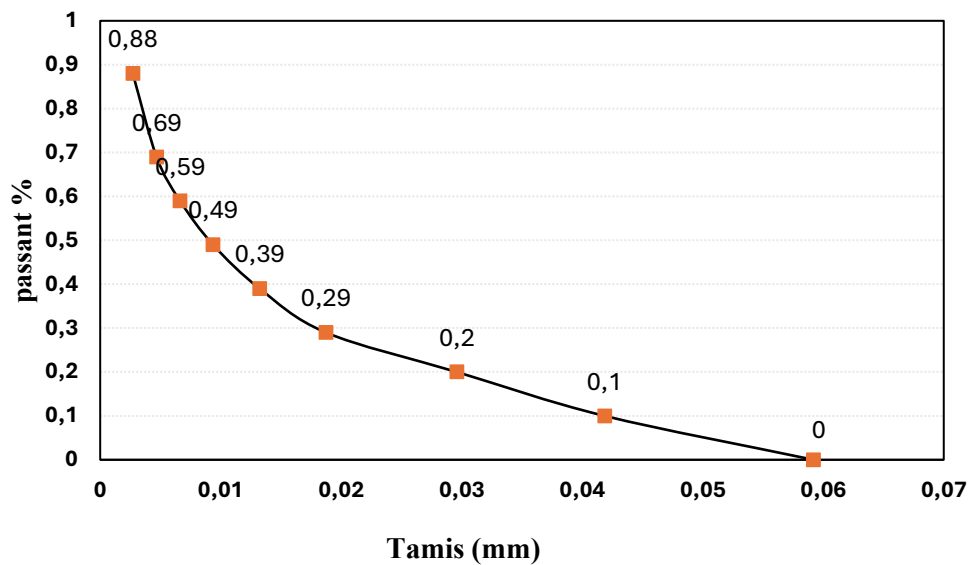


Figure III-3 : Courbe granulométrique par sédimentation du terre crue (NF P94-057)

Cette courbe complète celle du tamisage en couvrant la fraction fine du sol ($< 0,08$ mm). La courbe obtenue montre une évolution régulière du % passant en fonction du diamètre des particules. La présence importante de particules inférieures à 0,01 mm nous confirme la nature argilo-limoneuse de la terre crue ce qui la capacité de la plasticité et la capacité de rétention d'eau.

Résultats d'équivalent du sable obtenus :

- Calcule d'*Equivalent de sable visuel* :

$$\text{Equivalent de sable (ES)} = \left(\frac{95}{100} \right) \times 100 = 95$$

- Calcule d'*Equivalent de sable avec piston* :

$$\text{Equivalent de sable (ES)} = \left(\frac{98}{100} \right) \times 100 = 98$$

Les résultats d'équivalent de sable obtenus :

Tableau III-4 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable (NF P18-598)

	(ES) Visuel	(ES) avec piston
ES %	95	98

- **Interprétation**

Les deux valeurs obtenues sont très élevées se traduisent par une très faible teneur en particules fines (argiles et limons) dans le sable, ce qui signifie que le sable étudié est très propre et stable bien adapté comme matériau dégraissant dans les mélanges à base de terre crue ,car la faible présence de l'argile va Réduira le retrait et les fissurations au séchage et Améliorer la cohésion granulaire du matériau composite et donne une meilleure compacité .

III.2.2 Résultat et interprétation de l'analyse de la limite de liquidité et de plasticité :

III.2.2.1 La limite de liquidité WL

Tableau III-5 : Résultats de la limite de liquidité WL de la terre crue (NF P94-051)

Echantillon	1	2	3	4
Nombre de coup	18	24	29	32
Mh (gr)	4,3	4,9	5,8	4,9
Ms (gr)	2,5	2,9	3,5	3
MW (gr)	1,8	2	2,3	1,9
WL %	72	68,97	67,71	63,33
WL % Moyenne		68		

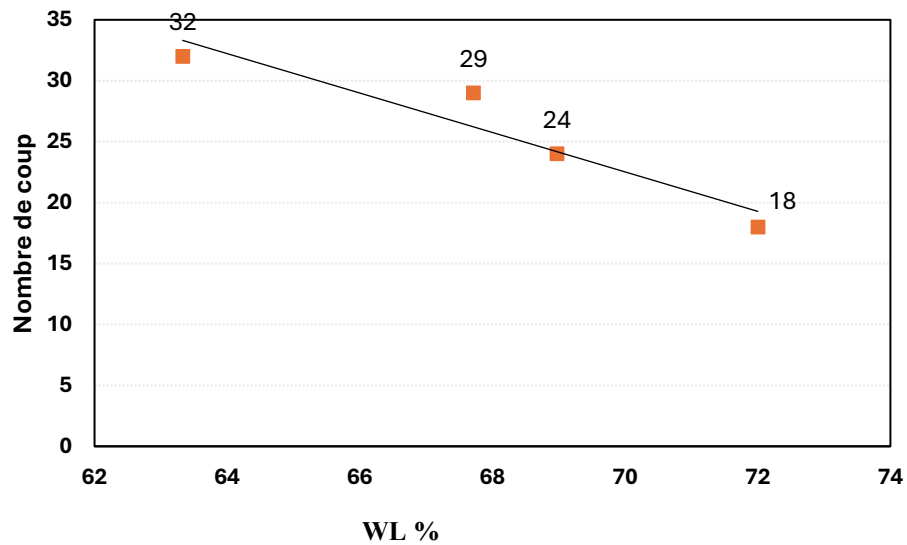


Figure III-4 : Courbe de détermination de la limite de liquidité selon la norme NF P94-051

Limite de plasticité (WP):

Tableau III-6 : Résultats de la limite de plasticité WP de la terre crue (NF P94-051)

Echantillon	1	2	3
Mh (gr)	2,9	3,1	4,3
Ms (gr)	2,3	2,3	3,3
MW (gr)	0,6	0,8	1
WP %	26,08	34,78	30,30
WP % Moyenne	30,38		

III.2.2.2 Indice de plasticité (IP) :

IP est l'indice de plasticité : c'est la différence entre les deux limites de liquidité et de plasticité, il caractérise l'étendue ou la zone où le sol étudié a un comportement plastique.

$$IP = WL - WP = 68 - 30,38 = 37,62 \% \approx 38 \%$$

D'après ce qui est trouvé, on peut donner la classification du sol étudié.

Tableau III-7 : Tableau Etat du sol en fonction de l'indice de plasticité

Indice de plasticité	Etat du sol
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
>40	Très plastique

Les résultats des tests montrent que l'état du sol est **Plastique**

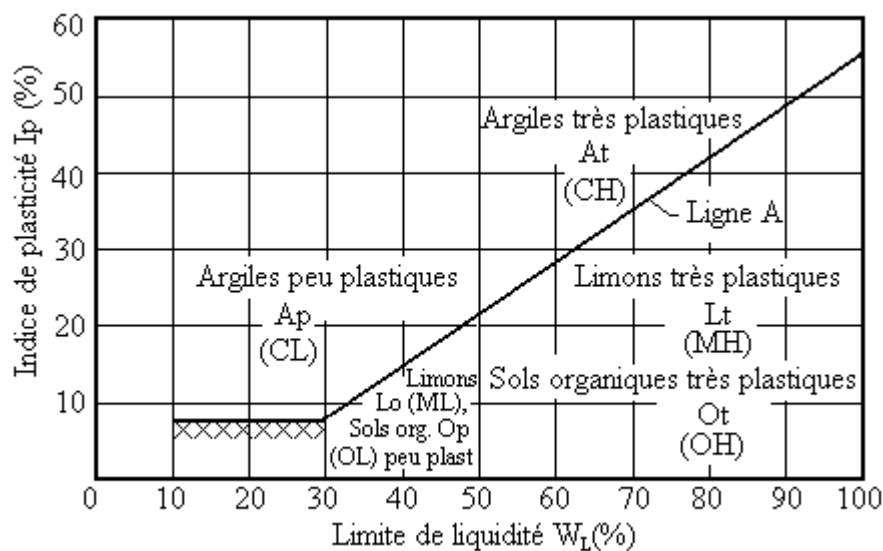


Figure III-5 : Abaque de Cassagnarde

Les essais réalisés selon la norme NF P 94-051 ont permis de déterminer les limites de consistance de la terre crue :

- Limite de liquidité (WL) : 68 %
- Limite de plasticité (WP) : 30 %
- Indice de plasticité ($IP = WL - WP$) : 38 %

Ces résultats montrent que la terre crue est un matériau très plastique, avec une capacité importante à retenir l'eau et à se déformer sans rupture lorsqu'elle est humide.

Un indice de plasticité IP de 38 % classe cette terre comme très cohésive, ce qui est favorable pour la mise en forme des briques (bonne maniabilité), mais avec :

- Un retrait important au séchage

- Des fissurations si la formulation n'est pas bien stabilisée avec sable ou fibres/grignons

Selon le système de classification des sols (Cassagnarde), un sol avec $IP > 20 \%$ est considéré comme argile plastique, voire très plastique, Cela justifie l'utilisation de sable dans les mélanges pour réduire la plasticité, et de grignon d'olive pour atténuer les effets du retrait et améliorer le comportement thermique.

III.2.3 Résultat et interprétation de L'essai Proctor NF 94-093 :

Résultat et interprétation de l'essai Proctor pour la terre crue :

Tableau III-8 : Résultats de l'essai Proctor normal pour la terre crue (NF P 94-093)

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6	7	8
(%) Teneur en eau	14	16	20	22	24	26	28	30
Teneur en eau réel (%)	13,61	15,07	17,01	21,74	23,74	25,71	28,10	29,70
Volume du moule (cm3)	944	944	944	944	944	944	944	944
Masse du sol humide (g)	1423,5	1476,5	1530	1729,6	1782,3	1798,2	1754,9	1687
Masse du sol sec (g)	1252,5	1283,1	1305	1420,6	1440,3	1436,4	1369,9	1300,6
ρ_h (g/cm3)	1,507	1,564	1,620	1,832	1,888	1,904	1,859	1,787
ρ_d (g/cm3)	1,327	1,359	1,385	1,505	1,525	1,521	1,451	1,377

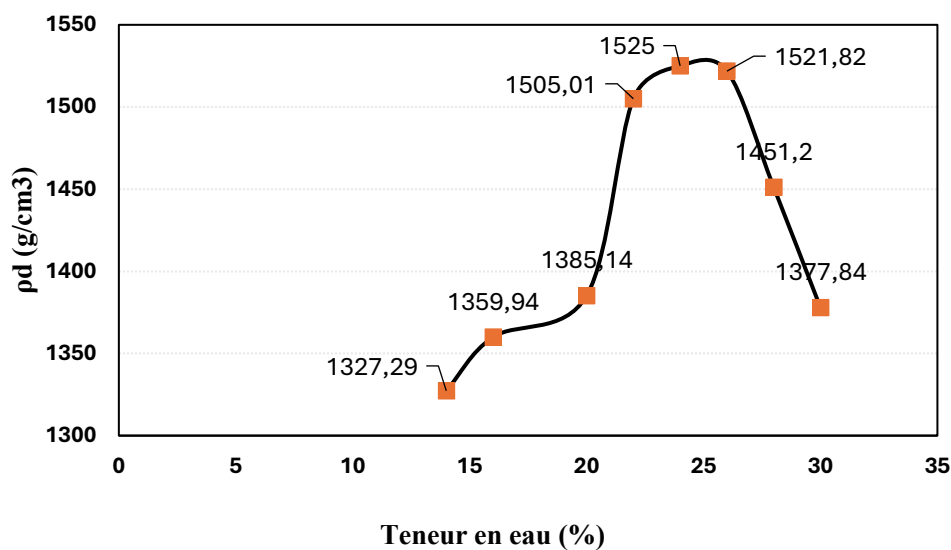


Figure III-6 : Courbe de compactage Proctor normal du terre crue (NF P 94-093)

Tableau III-9 : La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor normal

	Proctor normal
Wopt (%)	26
ρd (g/cm³)	1,52

Résultat et interprétation de l'analyse pour le sable :

Tableau III-10 : Résultats de l'essai Proctor normal pour le sable (NF P 94-093)

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6
Teneur en eau (%)	5	7	9	11	13	15
Teneur en eau réel (%)	4,50	6,21	8,46	10,30	11,71	14,37
Volume du moule (cm³)	944	944	944	944	944	944
Masse du sol humide (g)	1903,9	1934,9	2007	2068	2085,2	2050,1
Masse du sol sec (g)	1821,8	1821,7	1850,3	1874,8	1865,6	1792,5
ρh (g/cm³)	2,016	2,049	2,126	2,190	2,208	2,171
ρd (g/cm³)	1,929	1,929	1,961	1,986	1,977	1,905

Tableau III-11 : Courbe de compactage Proctor normal du sable (NF P 94-093)

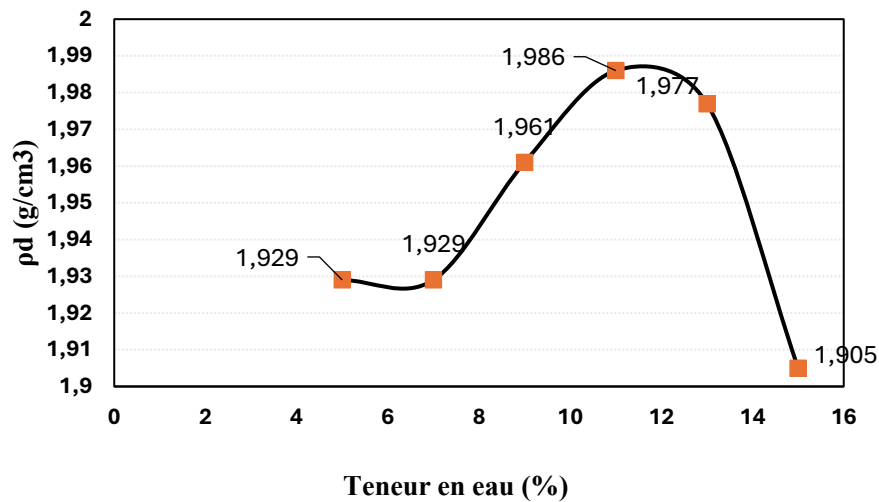


Tableau III-12 : La teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale de l'essai Proctor normal

	Proctor normal
Wopt (%)	11
ρ_d (g/cm ³)	1,98

- Pour la terre crue, les résultats sont les suivants :
 - Teneur en eau optimale (W_{opt}) : 26 %
 - Masse volumique sèche maximale ($\gamma_{d_{max}}$) : 1,52 g/cm³
 - Cette teneur en eau optimale élevée confirme la nature argileuse de la terre crue. Cela est en cohérence avec les résultats des limites d'Atterberg, qui indiquaient une plasticité élevée. La densité sèche maximale modérée (1,52 g/cm³) reflète une compacité moyenne, en raison de la microporosité naturelle du matériau.
- Pour le sable, les résultats montrent :
 - Teneur en eau optimale (W_{opt}) : 11 %
 - Masse volumique sèche maximale ($\gamma_{d_{max}}$) : 1,98 g/cm³

- Cette faible teneur en eau optimale est typique des matériaux granulaires, qui ne nécessitent que peu d'humidité pour se compacter efficacement. Le sable atteint une densité sèche plus élevée que la terre, preuve de sa structure plus dense et stable.

Ces résultats sont essentiels pour l'élaboration des mélanges terre-sable-grignon d'olive. Ils permettent de choisir une teneur en eau adaptée afin d'obtenir une bonne compacité, de limiter le retrait et d'optimiser la résistance mécanique des briques produites.

III.2.4 Résultat et interprétation de l'essai de calcul de la masse volumique des particules solides ρ_s (absolue): Méthode du pycnomètre a eau (NF P 94-054) :

- Terre crue :

Calcule :

Tableau III-13 : Calcul de la masse volumique absolue de la terre crue (NF P 94-054)

Masse	m_1	m_2	m_3	m_4
Valeur (g)	206.6	256.6	786.6	759.1

– On a :

m_1 : Pycnomètre vide et sec

m_2 : Pycnomètre + matériau sec

m_3 : Pycnomètre + matériau + eau

m_4 : Pycnomètre plein d'eau (sans matériau)

- Formule de calcul :

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 + m_2 - m_3}$$

- Les résultats montrent que :

La terre crue présente une valeur intermédiaire (**2,22 g/cm³**), ce qui confirme la présence de silices et d'argiles

- **Sable :**

Calcule :

Tableau III-14 : Calcul de la masse volumique absolue du sable (NF P 94-054)

Masse	m_1	m_2	m_3	m_4
Valeur (g)	206.6	256	789.2	758

- On a :

m_1 : Pycnomètre vide et sec

m_2 : Pycnomètre + matériau sec

m_3 : Pycnomètre + matériau + eau

m_4 : Pycnomètre plein d'eau (sans matériau)

- **Formule de calcul :**

$$\rho_s = \frac{m_2 - m_1}{m_4 - m_1 + m_2 - m_3}$$

- Les résultats montrent que le sable a la plus grande masse volumique absolue (**2,70 g/cm³**), ce qui est normal pour un matériau minéral siliceux

III.2.5 Résultat et interprétation des résultats de l'essai de calculer Masse volumique des particules solides ρ_s du grignon d'olive – Méthode par éprouvette graduée :

Calcule

- Calculer le volume d'eau déplacé

- $V_1 = 300 \text{ cm}^3$

- $V_d = 560 \text{ cm}^3$

- $m_s = 300 \text{ g}$

$$V_d = V_1 - V_0 = 560 - 300 = 260 \text{ cm}^3$$

Tableau III-15 : Détermination expérimentale de la masse volumique absolue du grignon d'olive

Masse sèche (g)	Volume initial V_d (cm ³)	Volume final V_1 (cm ³)	Volume déplacé V_d (cm ³)	Masse volumique ρ_s (g/cm ³)
300	300	560	260	1,15

III.2.6 Résultat et interprétation de l'analyse de calcul de la masse volumique des particules solides ρ_s (Apparente) (NF P 94-059) :

La formule pour calculer la masse volumique des particules solides ρ_s (Apparente) (NF P 94-059)

$$\rho_d = \frac{ms}{V}$$

- **Terre crue**

Calculer la Masse volumique des particules solides ρ_d :

$$\rho_d = \frac{1051,9}{1050} = 1,05 \text{ g/cm}^3$$

La terre crue, avec une valeur moyenne par rapport aux autres (**1,05 g/cm³**), montre une bonne compacité naturelle et en conservant une certaine porosité, ce qui augmente le séchage et la diffusion de la vapeur d'eau.

- **Sable**

Calculer la Masse volumique des particules solides ρ_d :

$$\rho_d = \frac{1544,3}{1050} = 1,54 \text{ g/cm}^3$$

Le sable possède une masse volumique apparente élevée par rapport aux autres matériaux utilisés dans notre étude (**1,54 g/cm³**), ce qui montre sa structure granulaire dense et son faible taux de vide. Cela contribue positivement aux caractéristiques mécaniques de matériau en augmentant la résistance mécanique du mélange lorsqu'il est ajouté à la terre.

- **Grignon d'olive**

Calculer la Masse volumique des particules solides ρ_d :

$$\rho_d = \frac{657,8}{1050} = 0,65 \text{ g/cm}^3$$

Le grignon d'olive avec une masse volumique apparente faible (**0,65 g/cm³**), en raison de sa nature fibreuse et poreuse. Avec cette masse volumique il va permettre de réduire la densité finale de mélange et d'améliorer les performances thermiques mais il va réduire la résistance mécanique si le pourcentage est trop élevé.

III.2.7 Résultat et interprétation de l'analyse de spectroscopie infrarouge (FTIR) :

- La figure III – 07 Cette figure représente le spectre FTIR de la terre crue .

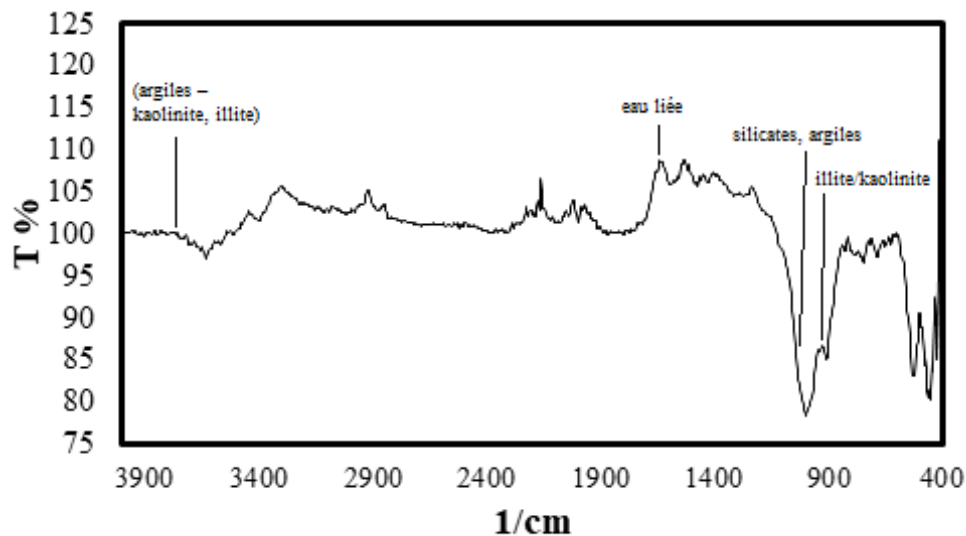


Figure III-7 : Spectre FTIR de la terre crue

- **Principaux pics FTIR :**
 - **3620–3700 cm⁻¹ :** O–H (argiles – kaolinite, illite) (argiles – kaolinite, illite)
 - **1630 cm⁻¹ :** eau liée (bande de flexion)
 - **1030 cm⁻¹ :** Si–O (silicates, argiles)
 - **915 cm⁻¹ :** Al–OH (illite/kaolinite)

La terre crue montre une forte présence d'argiles hydrophiles (kaolinite, illite), ce qui en fait une matrice cohésive efficace pour les briques

- La figure III – 07 Cette figure représente le spectre FTIR du sable

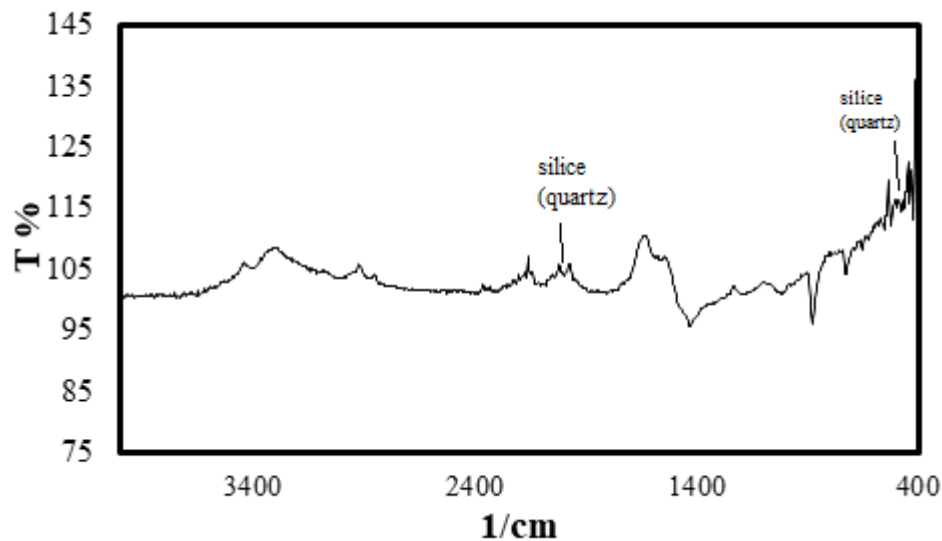


Figure III-8 : Spectre FTIR du sable

- 1080 cm^{-1} : Si–O–Si (vibration asymétrique) → silice (quartz)
- 470 cm^{-1} : autres modes du quartz

Matrice minérale très stable chimiquement, inerte, idéale pour structure il apporte un squelette minéral qui améliore la résistance mécanique et réduit les risques de retrait au séchage. Il est indispensable dans toute formulation de brique crue équilibrée, bien qu'il ne participe pas à la cohésion chimique.

- La figure III – 07 Cette figure représente le spectre FTIR du grignon d'olive

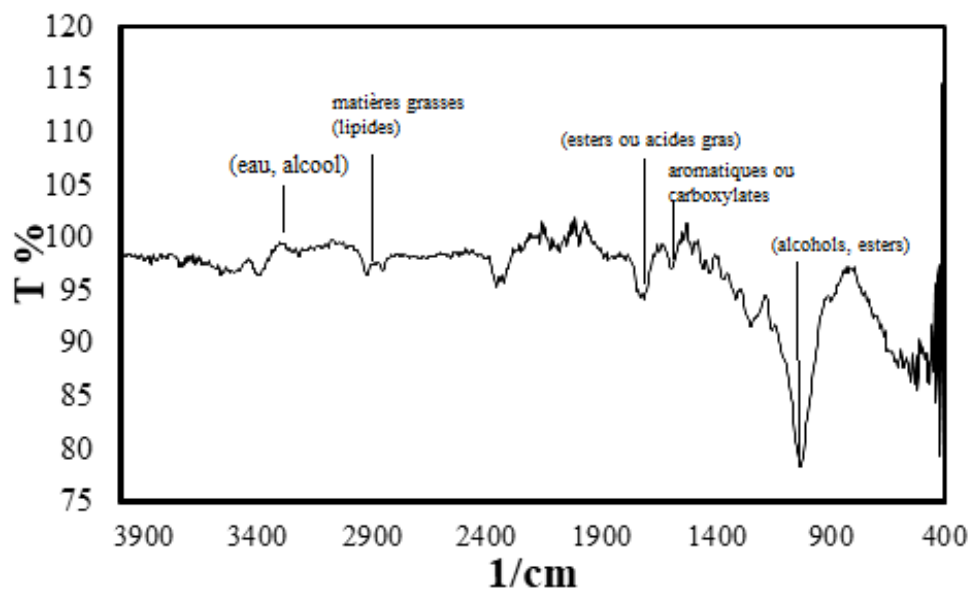


Figure III-9 : Spectre FTIR du grignon d'olive

- 3300 cm^{-1} : vibrations O–H $\rightarrow$ groupes hydroxyles (eau, alcool)
- 2920 & 2850 cm^{-1} : C–H (alcanes) $\rightarrow$ matières grasses (lipides)
- 1730 cm^{-1} : C=O (esters ou acides gras)
- 1600 cm^{-1} : C=C aromatiques ou carboxylates
- 1050–1150 cm^{-1} : C–O (alcohols, esters)

Le grignon d'olive contient des composés organiques (lipides, esters, hydroxyles) potentiellement biodégradable qui peuvent améliorer la porosité et alléger les briques et un meilleur choix pour un matériaux biodégradable .

III.3 Préparation des Briques

III.3.1 Préparation des échantillons utilisés dans l'étude Préparation des échantillons utilisés dans l'étude

Pour la préparation des briques, nous avons suivi les étapes suivantes cite dans le chapitre 2 :

- Peser la terre crue ;
- Peser le sable ;
- Peser les grignons d'olive ;
- Mélanger a sec le mélange jusqu'a qu'il soit homogène
- Ajouter l'eau;
- Mélanger les ingrédients manuellement ;
- Remplissage des moules en bois ;
- Séchage à l'air libre pendant 21 jours ;
- Etuver les échantillons avant l'utilisation pour éliminer humidité qui peut influencer les résultats durant 24h;

Dans notre travail on a proposé 4 compositions [60% terre crue ,30% sable 10% grignon d'olive - 60% terre crue ,20% sable 20% grignon d'olive - 60% terre crue ,10% sable 30% grignon d'olive] en plus la composition de référence ,les compositions utilisées sont indiquées dans les tableaux 2-16 2-17 2-18 2-19. Et pour chaque de ces compositions à un nombre d'échantillon pour l'essai, pour les essais de compression et flexion on a étudié le comportement de 3 éprouvettes pour chaque composition par test après on a calculé le moyen

Chapitre 3 : Résultats et Interprétations

pour chaque composition et on calcule l'écart-type (σ), et pour les autres tests un échantillon par composition .

Les Compositions Utilisées et les noms des éprouvettes utiliser pour chaque test :

Tableau III-16 : Codification des éprouvettes de compression (5x5x5 cm) pour chaque formulation en grignon d'olive

	0C1	0C2	0C3	10C1	10C2	10C3	20C1	20C2	20C3	30C1	30C2	30C3
Terre crue %	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Sable %	40	40	40	30	30	30	20	20	20	10	10	10
Grignon d'olive %	0	0	0	10	10	10	20	20	20	30	30	30

Tableau III-17 : Codification des éprouvettes de flexion (16x4x4 cm) pour chaque formulation en grignon d'olive

	0F1	0F2	0F3	10F1	10F2	10F3	20F1	20F2	20F3	30F1	30F2	30F3
Terre crue %	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Sable %	40	40	40	30	30	30	20	20	20	10	10	10
Grignon d'olive %	0	0	0	10	10	10	20	20	20	30	30	30

Tableau III-18 : Codification des éprouvettes de conductivité thermique (30x30x30 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive

	0TH	10TH	20TH	30TH
Terre crue %	60	60	60	60
Sable %	40	30	20	10
Grignon d'olive %	0	10	20	30

Tableau III-19 : Codification des éprouvettes pour l'essai de capillarité (20x10x5 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive

	Cap0%	Cap10%	Cap20%	Cap30%
Terre crue %	60	60	60	60
Sable %	40	30	20	10
Grignon d'olive %	0	10	20	30

Tableau III-20 : Codification des éprouvettes utilisées pour la mesure de la masse volumique (20x10x5 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive

	M0%	M10%	M20%	M30%
Terre crue %	60	60	60	60
Sable %	40	30	20	10
Grignon d'olive %	0	10	20	30

Tableau III-21 : Codification des éprouvettes utilisées pour l'essai de retrait longitudinal et diagonal (20x10x5 cm) selon le pourcentage de grignon d'olive

	R0%	R10%	R20%	R30%
Terre crue %	60	60	60	60

Sable %	40	30	20	10
Grignon d'olive %	0	10	20	30

III.4 Résultats et Discussions des essai sur la brique :

Nous listons les résultats obtenus à partir de divers tests dans le tableau 21

Tableau III-22 : Résultats expérimentaux de tous les tests de l'expérience préliminaire

Pourcentage (%)	Masse Volumique (kg/m³)	Absorption capillaire d'eau (AC) (g/cm².min0.5)	Retrait Diagonal (%)	Retrait Longitudinale (%)	Essai non destructif – Ultrasons (m/s)	Conductivité Thermique (W/m·K)	Résistance Thermique (m²·K/W)	Coefficient de transmission thermique (U) (W/m²·K)	Résistance à la Compression (MPa)	Résistance à la Flexion (MPa)
0%	1980	525	3,09	7,52	1620	0,697	0,076	261,04	2,5	0,99
10%	1660	425,5	2,04	6,95	1397	0,47	0,1	195,83	2,11	0,98
20%	1630	400	2,04	6,38	1306	0,38	0,12	158,33	1,88	0,72
30%	1510	350	1,01	5,82	877	0,3	0,16	125	1,68	0,45

III.4.1 Masse Volumique

La figure III – 10 montre la variation de la masse volumique des briques de 20×10×5 cm en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et de sable ajoutée.

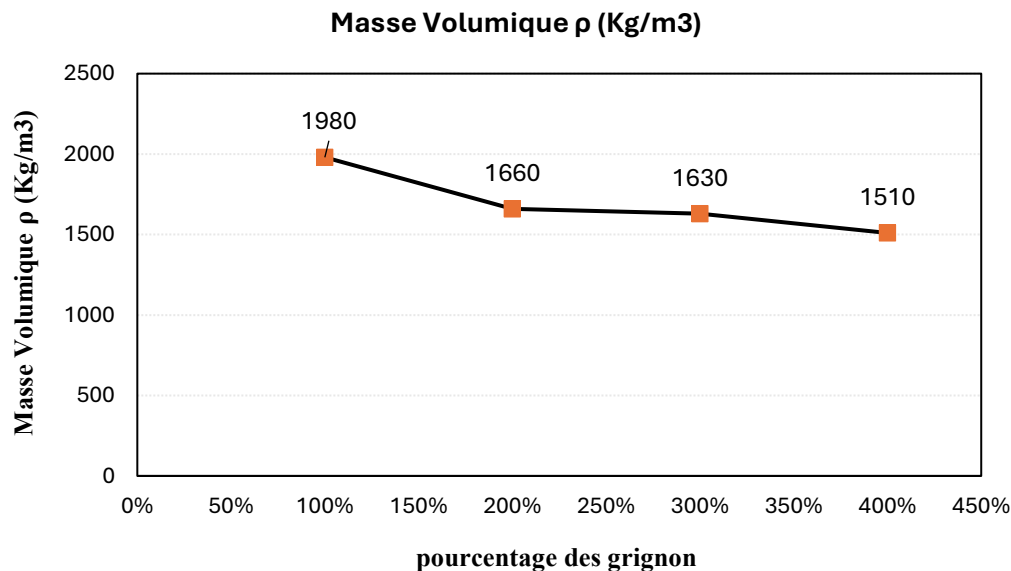


Figure III-10 : résultats de la masse volumique

- **Masse volumique : (ρ)**

$$\rho = \frac{m}{v}$$

La courbe expérimentale met en évidence une diminution progressive de la masse volumique des briques en fonction de l'augmentation du pourcentage de grignon d'olive dans la formulation. Cette tendance s'explique par la faible densité intrinsèque du grignon, matériau organique, léger et très poreux, qui remplace partiellement le sable, connu pour sa structure granulaire dense et sa masse volumique plus élevée.

L'incorporation croissante de grignon d'olive conduit à une réduction de la compacité du matériau, induisant ainsi une baisse de sa densité globale. Cette caractéristique peut présenter des avantages pour certaines applications dans le secteur du bâtiment, notamment dans la réalisation d'éléments non porteurs, où une masse allégée permet de réduire les charges permanentes sur les structures et de faciliter la manipulation et la mise en œuvre sur chantier.

Cependant, cette baisse de masse volumique doit être analysée en parallèle avec les performances mécaniques du matériau, qui peuvent être affectées négativement si la proportion

de grignon dépasse un certain seuil. D'où la nécessité d'optimiser le dosage en fonction des exigences spécifiques de l'usage visé

III.4.2 Absorption capillaire d'eau (A_c) :

La figure III – 11 montre l'absorption capillaire d'eau (A_c) des briques en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable .

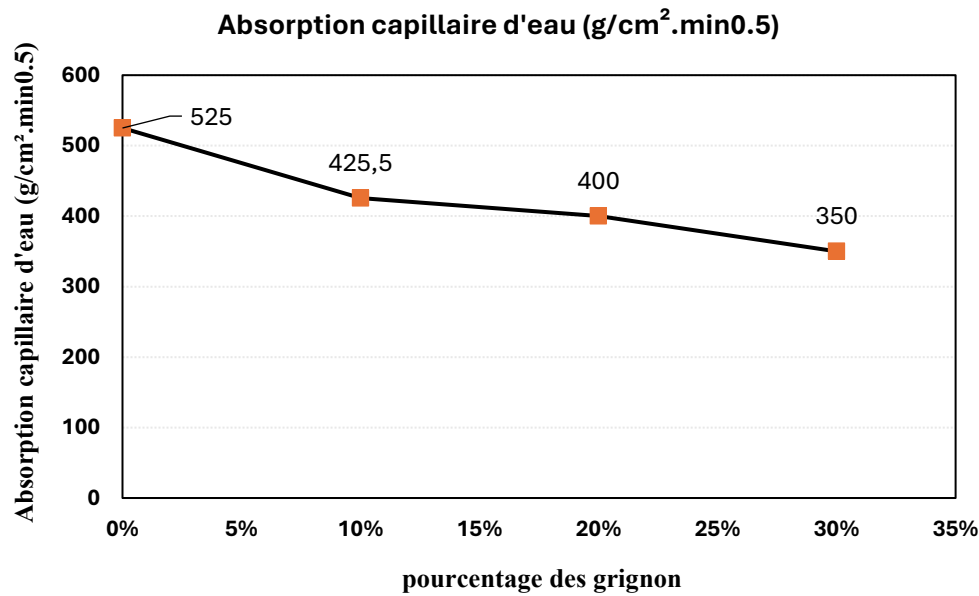


Figure III-11 : Absorption capillaire d'eau par plusieurs pourcentages des grignons

Les résultats de notre test montrent que l'ajout des grignons d'olive dans notre formalisation réduit globalement la hauteur de remontée capillaire, notamment à 10 % où la baisse est la plus significative (–3,5 cm par rapport au témoin). Cette amélioration est due à la structure organique, fibreuse et très poreuse du grignon, qui perturbe la continuité des pores capillaires et freine l'ascension de l'eau .

A propos de 20 % et 30 %, la hauteur augmente légèrement (8,0 cm et 7,5 cm), ce qui est dû à une répartition irrégulière des particules de grignon dans la matrice.

Globalement, l'introduction de 10 à 20 % de grignon améliore la résistance aux remontées capillaires, ce qui constitue un avantage important pour la durabilité des briques en milieux humides.

En conclusion, l'essai de capillarité a montré que l'ajout de grignon d'olive permet globalement de réduire la hauteur de remontée d'eau dans les briques, en particulier à 10 %. Cette amélioration du comportement hydrique confirme l'intérêt de ce déchet organique dans les formulations. Cependant, dans la formalisation de 30 %, une légère remontée capillaire

réapparaît, ce qui il expliquer par la présence d'un seuil optimal entre de 10 à 20 % pour tirer profit des propriétés du grignon sans altérer l'homogénéité du matériau.

III.4.3 Retrait :

La figure III – 12 montre retrait des briques en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable .

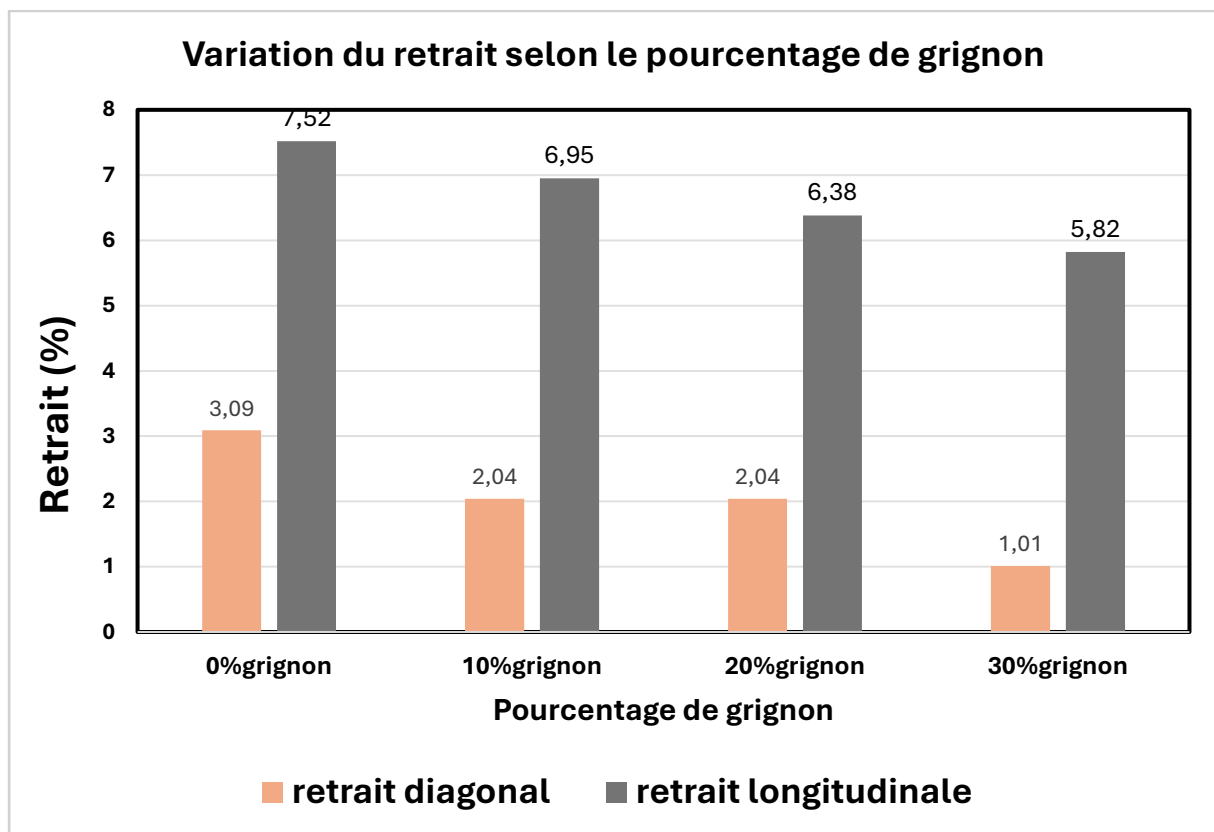
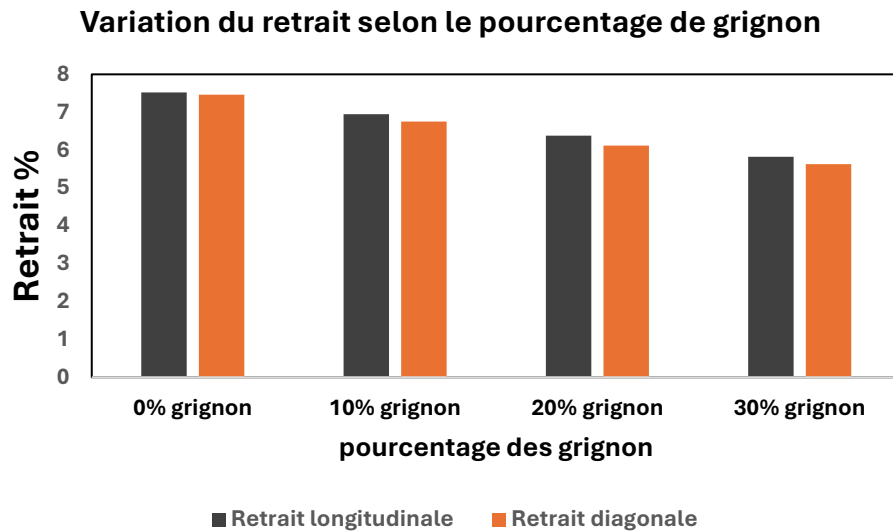


Figure III-12 : Diagramme à barres du retrait longitudinal et diagonal

Nous observons à travers le graphique que l'ajout de grignon d'olive aux échantillons a contribué à réduire le taux de retrait longitudinal et diagonal. Cette observation s'explique par le fait que ces additifs améliorent la plasticité de la pâte utilisée dans la fabrication, réduisant ainsi la quantité d'eau nécessaire pour le mélange.

Les grignons d'olive agissent comme fibre renforcement ils limitent la fissuration et le retrait pendant le séchage et comme adjuvant organique qui modifie la plasticité du mélange et aussi le grignon est un élément très poreux qui peut absorber une partie de l'eau et ralentir le séchage .

Nous avons remarqué que les taux de retrait de la plupart des échantillons avec grignon d'olive variaient de 5,63% à 7,52%, ce qui se situe approximativement dans la plage admissible soit de 5 à 8% .

III.4.4 Essai non destructif – Ultrasons NF EN 12504-4

La figure III – 13 montre la vitesse de propagation des ondes ultrasonores dans les briques en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable .

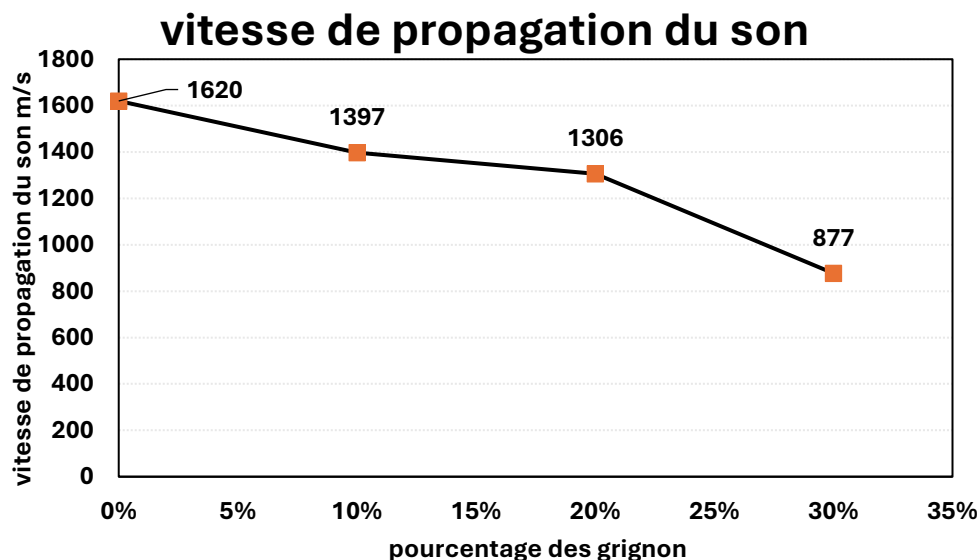


Figure III-13 : résultats de l'essai non destructif – Ultrasons

Les essais non destructifs réalisés par méthode ultrasonique ont permis d'évaluer de manière indirecte les caractéristiques mécaniques et la qualité interne des briques en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive. Les résultats montrent que la vitesse de propagation des ondes ultrasonores diminue progressivement à mesure que le taux de grignon augmente dans les formulations.

Cette baisse de vitesse traduit une diminution de la compacité et de la densité interne du matériau. En effet, l'introduction du grignon d'olive qui est un matériau organique, léger et très poreux dans la matrice terre-sable augmente la porosité du mélange et perturbe la continuité

granulaire. Les ondes ultrasonores traversent alors un milieu moins dense et plus hétérogène, ce qui ralentit leur propagation.

Du point de vue de la qualité des matériaux, cette baisse de vitesse ultrasonique peut être interprétée comme une réduction de l'homogénéité interne et de la résistance globale, en cohérence avec les résultats obtenus lors des essais mécaniques destructifs (compression, flexion). Cependant, elle ne remet pas en cause la pertinence du matériau pour des usages non structurels.

L'intérêt de cet essai réside dans sa capacité à détecter rapidement et sans endommager les briques des zones moins denses ou défectueuses. Il constitue donc un outil de contrôle qualité complémentaire, utile pour le suivi de production de matériaux à base de terre crue et de grignon d'olive.

III.4.5 Essais Thermiques ISO 8301

La conductivité thermique des échantillons a été déterminée à l'aide d'un fluxmètre thermique, selon la norme ISO 8301. L'appareil impose un gradient de température entre deux faces de l'échantillon, et mesure le flux thermique traversant le matériau. La conductivité thermique est ensuite calculée à partir de la loi de Fourier :

$$\lambda = \frac{q \cdot e}{\Delta T}$$

Les échantillons utilisés ont des dimensions de $30 \times 30 \times 5$ cm, et ont été bien séchés à l'étuve ventilé à masse constante avant l'essai pour garantir la reproductibilité des mesures.

III.4.5.1 La Conductivité Thermique

La figure III – 14 montre la variation de la conductivité thermique des briques $30 \times 30 \times 5$ cm d'en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et de sable ajoutée.

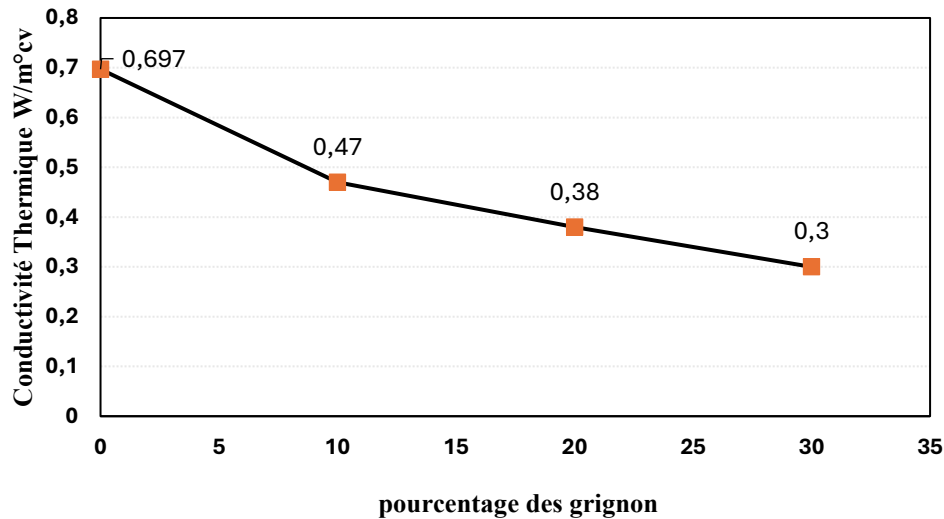


Figure III-14 : Conductivité Thermique de plusieurs pourcentages des grignons

La courbe expérimentale obtenue montre que la conductivité thermique de notre mélange de matériau diminue progressivement de 0,61 W/m·K à 0,30 W/m·K à mesure que le pourcentage de grignon d'olive augmente dans la formulation du matériau.

Cela est due à la nature de grignon d'olive qui est un matériau organique, fibreux et très poreux. Son intégration dans le mélange augmente la porosité globale du matériau. Or, les pores contiennent principalement de l'air, dont la conductivité thermique est très faible, ce qui freine le transfert de chaleur à travers le matériau.

Le grignon d'olive améliore les performances d'isolation thermique, donc il contribue à réduire la capacité du matériau à transmettre la chaleur contrairement au sable qui est un matériau dense.

Sur le plan énergétique, cette baisse de conductivité thermique est un avantage considérable. Elle signifie que les parois construites avec le grignon d'olive limiteront mieux les échanges thermiques avec l'extérieur, ce qui contribue à réduire les besoins en chauffage ou en climatisation dans les bâtiments. Cela répond pleinement à l'objectif d'efficacité énergétique fixé dans notre thématique.

III.4.5.2 Résistance Thermique

La figure III – 15 montre la variation de la résistance thermique des briques en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable.

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

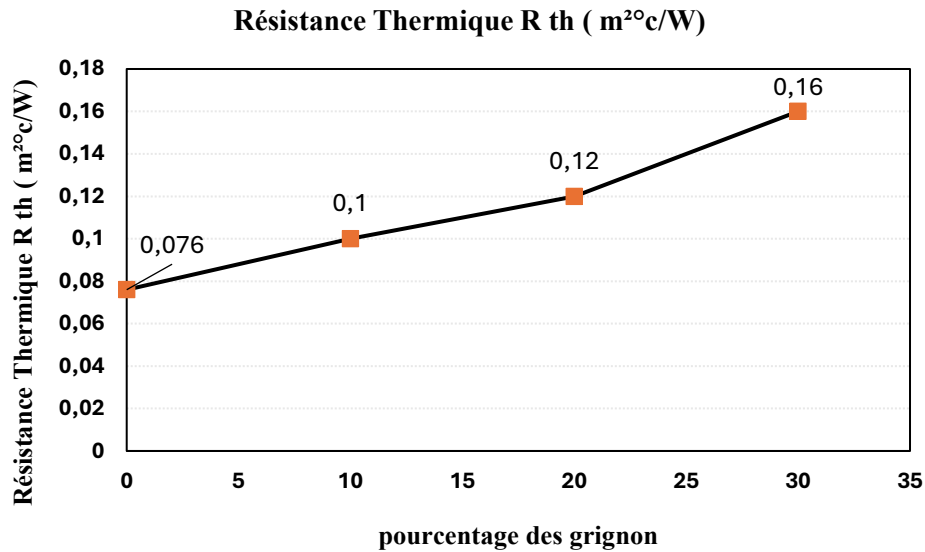


Figure III-15 : Évolution de la résistance thermique des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive (0 %, 10 %, 20 %, 30 %)

La courbe expérimentale obtenue montre que la résistance thermique de notre mélange de matériau augmente progressivement de $0,076 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ à $0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ à mesure que le pourcentage de grignon d'olive augmente dans la formulation.

Cela est dû à la nature légère, fibreuse et poreuse du grignon d'olive, qui introduit davantage d'air dans la matrice du matériau. Or, l'air étant un très bon isolant, il ralentit la transmission de chaleur à travers les briques. Plus le taux de grignon augmente, plus le matériau devient thermiquement résistant.

Contrairement au sable, qui est plus dense et conducteur, le grignon d'olive freine le flux thermique, ce qui améliore nettement le comportement isolant du matériau.

Sur le plan énergétique, cette augmentation de la résistance thermique est un atout majeur. Elle permet de réduire les pertes de chaleur en hiver et de maintenir la fraîcheur en été, contribuant ainsi à améliorer le confort thermique des bâtiments tout en réduisant la consommation énergétique. Ce résultat s'inscrit parfaitement dans notre démarche visant à élaborer un matériau de construction à haute efficacité énergétique et environnementale.

III.4.5.3 Coefficient de transmission thermique (U)

La figure III-16 montre l'évolution de flux thermique des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive (0 %, 10 %, 20 %, 30 %)

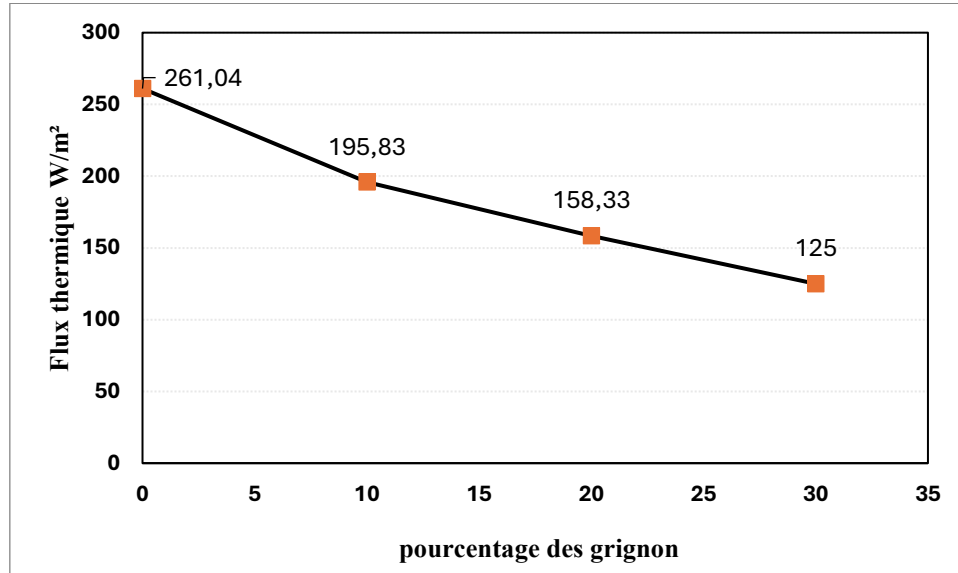


Figure III-16 : Évolution de flux thermique des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive (0 %, 10 %, 20 %, 30 %)

La courbe expérimentale obtenue montre que le flux thermique à travers les briques diminue nettement à mesure que le pourcentage de grignon d'olive augmente dans la formulation du matériau. Les valeurs passent de 261,04 W/m² pour le mélange sans grignon à 125 W/m² pour celui contenant 30 % de grignon.

Cette baisse du flux thermique s'explique par la nature légère et organique du grignon d'olive, qui crée une structure interne plus poreuse. Ces pores augmentent la quantité d'air emprisonné dans la brique, et comme l'air est un mauvais conducteur de chaleur, il ralentit efficacement le transfert thermique.

À l'inverse du sable, matériau dense et conducteur, le grignon d'olive agit ici comme un modificateur thermique naturel, en réduisant la conductivité interne du mélange et en améliorant ses performances isolantes.

Sur le plan énergétique, la baisse progressive du flux thermique démontre clairement que les mélanges enrichis en grignon permettent de limiter les pertes de chaleur. Cela s'inscrit parfaitement dans notre objectif de développer un matériau de construction à haute efficacité énergétique, tout en valorisant un déchet organique local.

III.4.6 Essais Mécaniques

Pour chaque formulation, trois éprouvettes cubiques de dimensions $5 \times 5 \times 5$ cm ont été testées à la compression. Les valeurs obtenues ont permis de calculer :

La moyenne arithmétique :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$$

L'écart-type (σ), qui mesure la dispersion des résultats :

$$\sigma = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{n}$$

Avec :

- x_1, x_2, x_3 = valeurs mesurées
- $\bar{x}$ = moyenne
- n = nombre d'échantillons

Les calculs permettent d'évaluer à la fois la valeur centrale et la variabilité des résultats, et donc la fiabilité du comportement mécanique de chaque formulation.

III.4.6.1 La Résistance à la Compression :

Le tableau III-23 montre les résultats de l'essai de compression sur les éprouvettes en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable .

Tableau III-23 : Résultats de la résistance à la compression des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive

Formulation	C1 (MPa)	C2 (MPa)	C3 (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
0 % grignon	2,68	2,8	2,3	2,5	0,21
10 % grignon	2,51	1,61	2,21	2,11	0,37
20 % grignon	1,92	1,86	1,88	1,88	0,0258

30 % grignon	1,89	1,74	1,43	1,68	0,191
-------------------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

La figure III – 18 montre la résistance des briques en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable dans l'essai de compression .

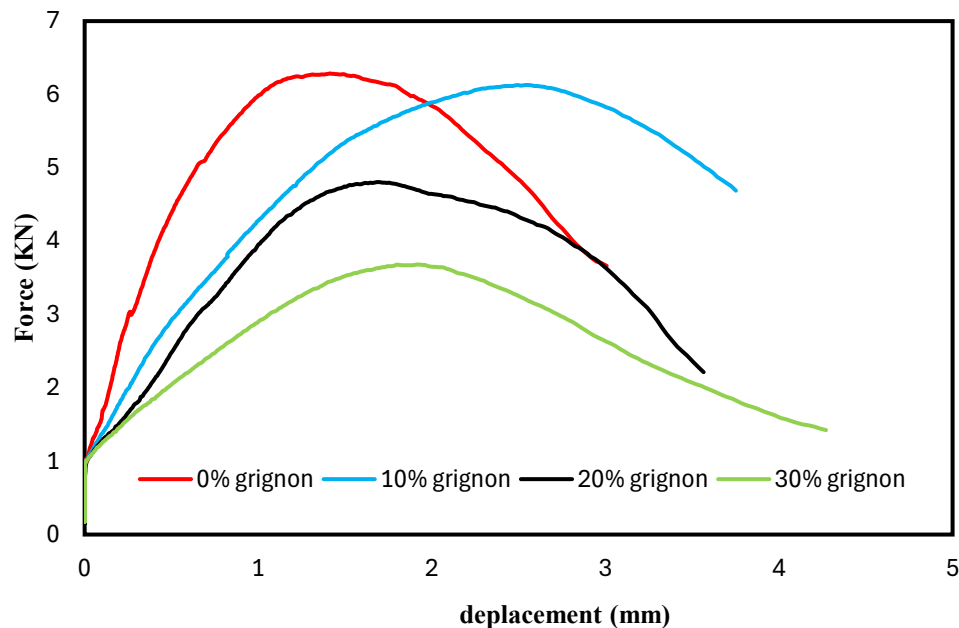


Figure III-17 : courbe des résistances moyenne à la Compression RC MPa

La figure III-17 illustre la courbe Force–Course obtenue lors de l'essai de compression de l'éprouvette cubique 0C1 de la formulation à 0 % de grignon d'olive. Cette éprouvette a été choisie car son comportement est représentatif de l'ensemble des échantillons de cette formulation et proche de la moyenne .

La courbe expérimentale obtenue révèle une diminution progressive de la résistance à la compression à mesure que le pourcentage de grignon d'olive augmente dans les formulations. La valeur maximale est enregistrée pour le mélange de référence sans grignon (0 %), tandis que la résistance la plus faible est observée pour la composition contenant 30 % de grignon d'olive.

Cette baisse s'explique principalement par la nature fibreuse, légère et peu dense du grignon, qui altère la structure compacte et homogène du matériau. En remplaçant partiellement

le sable, composant minéral dense assurant la stabilité mécanique, le grignon introduit des vides internes et réduit les liaisons solides entre les particules, ce qui affaiblit la capacité du matériau à supporter des charges verticales.

Par ailleurs, l'augmentation de la porosité liée à l'ajout du grignon diminue la densité globale des briques, ce qui impacte directement leurs performances mécaniques. Le sable, en jouant le rôle de squelette granulaire, contribue à la résistance, et sa réduction dans le mélange entraîne une baisse de compacité et de cohésion.

Malgré cette baisse, les résistances mesurées restent satisfaisantes pour des applications non structurelles, comme le remplissage ou les cloisons dans des constructions écologiques. Ce résultat met en évidence la nécessité de trouver un équilibre entre les propriétés mécaniques et les avantages thermiques apportés par le grignon, en fonction des exigences de l'usage visé.

III.4.6.2 La Résistance à la flexion

Le **tableau 24** montre les résultats de l'essai de flexion sur les éprouvettes en fonction des différents pourcentages de grignon d'olive et du sable .

Tableau III-24 : Résultats de la résistance à la compression des briques en fonction du pourcentage de grignon d'olive

Formulation	F1 (MPa)	F2 (MPa)	F3 (MPa)	Moyenne (MPa)	Écart-type (MPa)
0 % grignon	0,85	1,27	0,87	0,99	0,193
10 % grignon	0,96	1,23	0,78	0,98	0,185
20 % grignon	0,70	0,78	0,67	0,72	0,047
30 % grignon	0,52	0,45	0,38	0,45	0,057

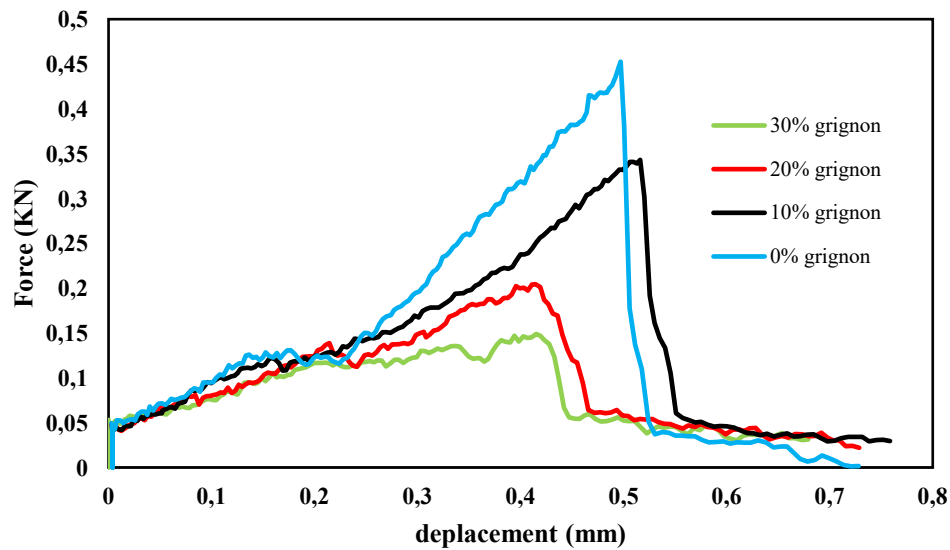


Figure III-18 : les courbes des résistances moyenne à la flexion RC MPa

Les résultats obtenus révèlent une baisse progressive de la résistance à la flexion à mesure que le pourcentage de grignon d'olive augmente dans les différentes formulations. La formulation sans grignon (0 %) présente les meilleures performances mécaniques en flexion, tandis que la formulation contenant 30 % de grignon enregistre la valeur la plus faible.

Cette diminution s'explique par la structure légère et organique du grignon, qui remplace partiellement le sable dans le mélange. Or, le sable joue un rôle essentiel dans la solidité et la rigidité du matériau en assurant un bon ancrage granulaire. En réduisant sa proportion, on fragilise la matrice et on réduit la résistance aux efforts de traction et de flexion.

De plus, l'ajout de grignon augmente la porosité interne du matériau et engendre une discontinuité dans la liaison entre les particules, ce qui limite la capacité du mélange à absorber les contraintes sans se fissurer. Le matériau devient plus sensible aux ruptures dès que le taux de grignon dépasse un certain seuil.

Malgré cela, les valeurs mesurées restent acceptables pour des éléments de remplissage ou non porteurs, notamment dans des constructions où l'on privilégie les aspects thermiques et écologiques. Cela confirme qu'un compromis judicieux entre performance mécanique et propriétés environnementales est nécessaire pour une application optimale.

III.4.7 Conclusion :

Les résultats expérimentaux obtenus dans ce chapitre ont permis d'évaluer l'influence de l'ajout progressif de grignon d'olive sur les propriétés mécaniques, thermiques et physiques des briques en terre crue stabilisées avec du sable. L'analyse comparative entre les différentes formulations montre que le grignon d'olive agit comme un modificateur de structure, avec des effets contrastés selon le type de performance étudiée.

Sur le plan thermique, les résultats sont particulièrement encourageants : la conductivité thermique diminue nettement avec l'augmentation du taux de grignon, tandis que la résistance thermique s'améliore significativement. De même, le flux thermique est réduit de manière notable, confirmant que l'introduction de grignon d'olive améliore l'efficacité énergétique du matériau.

En revanche, les résistances mécaniques à la compression et à la flexion diminuent avec l'ajout de grignon, en raison de sa nature organique, légère et très poreuse. Toutefois, les performances obtenues restent acceptables pour des usages non porteurs, notamment dans le cadre de constructions écologiques où l'isolation et la durabilité environnementale sont prioritaires.

D'un point de vue physique, les essais montrent une réduction de la masse volumique et une amélioration relative du comportement à l'eau (capillarité), surtout à des taux modérés (10–20 %).

Ainsi, l'ajout contrôlé de grignon d'olive dans une matrice terre-sable permet de valoriser un déchet agricole local tout en répondant à des enjeux d'économie d'énergie, de réduction d'impact environnemental et de construction durable. Ces résultats confirment le potentiel de ce matériau comme alternative écologique aux matériaux de construction traditionnels, dans des contextes adaptés.

IV. Conclusion générale :

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources locales et de réduction de l'impact environnemental des matériaux de construction. En associant la terre crue, le sable et le grignon d'olive, un sous-produit agricole peu valorisé, l'objectif était de développer un matériau alliant propriétés thermiques performantes, bonne durabilité et faible empreinte écologique. L'approche expérimentale adoptée a permis d'étudier différentes formulations, en faisant varier le taux de grignon d'olive de 0 % à 30 %, et d'évaluer leurs propriétés à travers une série d'essais mécaniques, physiques et thermiques.

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout progressif de grignon d'olive améliore nettement les performances thermiques du matériau, en réduisant la conductivité et le flux thermiques, tout en augmentant la résistance thermique. En revanche, une légère diminution des résistances mécaniques à la compression et à la flexion a été observée, particulièrement pour les taux élevés de grignon, en lien avec sa nature fibreuse, légère et poreuse. Sur le plan physique, la masse volumique diminue, ce qui rend le matériau plus léger, et l'absorption capillaire est réduite pour les taux modérés, renforçant le comportement isolant.

Les formulations contenant entre 10 % et 20 % de grignon offrent un bon compromis entre propriétés mécaniques acceptables et bonnes performances thermiques, ce qui les rend adaptées à des usages non porteurs, comme les cloisons, le remplissage ou l'isolation dans les constructions écologiques. Ce travail ouvre également des perspectives pour des recherches futures sur l'optimisation du dosage, l'étude de la durabilité à long terme ou encore l'application de ce matériau à une échelle plus large, notamment dans un contexte de construction bioclimatique ou rurale.

En conclusion, l'intégration du grignon d'olive dans les briques en terre crue permet de concevoir un matériau local, léger, isolant et respectueux de l'environnement, en accord avec les principes fondamentaux de la construction durable.

Source bibliographique:

- [1] Internationale Energieagentur, Éd., *World energy outlook 2012*. in World Energy Outlook, no. 2012. Paris, 2012.
- [2] P. Ibanda Kabaka, « Enjeux et préalables a l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les bâtiments en France », juillet 2019. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-02172674>
- [3] R. Rodriguez, « Cohérence ou contradiction? Les effets des réglementations environnementales sur le secteur du bâtiment. Une analyse à deux niveaux ».
- [4] S. Lasvaux, « Étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments », phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2010. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.hal.science/pastel-00712043>
- [5] M. P. Randrianarison, « Estimation de l'émission de CO2 d'habitat typique à Madagascar par l'Analyse de Cycle de Vie », phdthesis, Université d'Antananarivo ; Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience (INGE), 2011. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/tel-03090559>
- [6] N. Bendahmane, « Développement d'indicateurs d'approvisionnement en matériaux minéraux et métalliques issus de l'économie circulaire dans une approche d'évaluation absolue de la soutenabilité dans le secteur du bâtiment », phdthesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2023. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/tel-04818166>
- [7] L. Ayagapin, « L'Analyse de Cycle de Vie au défi de l'urgence climatique : une analyse multi-échelle de la qualité environnementale des bâtiments en milieu subtropical insulaire », phdthesis, Université de la Réunion, 2022. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04052336>
- [8] Z. Romani, « Développement d'une méthode d'aide à la décision multicritère pour la conception des bâtiments neufs et la réhabilitation des bâtiments existants à haute efficacité énergétique », phdthesis, Université de La Rochelle ; Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 2015. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01373443>
- [9] A. Merabtine, « Modélisation Bond Graphs en vue de l'efficacité énergétique du bâtiment », phdthesis, Université de Lorraine, 2012. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00789679>
- [10] M.-C. Zélem, « Le confort thermique. Norme technique ou norme sociale ? », 2013. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-03617490>
- [11] J.-B. Bouvenot, M. Siroux, B. Latour, et B. Flament, « Couplage optimal de solutions de micro cogénération avec les bâtiments d'habitation: création d'une plateforme numérique sous TRNSYS », in *Congrès français de thermique 2015, "La Thermique de l'Habitat et de la Ville, La Rochelle, France, 26 au 29 mai 2015*, La Rochelle, France, mai 2015. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-04234127>
- [12] N. Serres, S. Braymand, et F. Feugeas, « Evaluation environnementale de bétons de granulats recyclés de béton et de béton de granulats recyclés de terre cuite à partir d'analyses de cycle de vie », présenté à Conférence Matériaux 2014 - Colloque Ecomatériau, nov. 2014. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://enpc.hal.science/hal-01144339>

- [13] M. Mussotter, « Life Cycle Assessment of Energy Retrofitting Strategies for Residential Buildings in Rhode Island », University of Rhode Island, Kingston, RI, 2022. doi: 10.23860/thesis-mussotter-moritz-2022.
- [14] Y. Billaud, F. Moreau, X. Milhet, et D. Saury, « Revue bibliographique menée par analyse de texte : application aux transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi poreuse biosourcée », 2024, doi: 10.25855/SFT2024-020.
- [15] T. Pestre, « La pierre naturelle dans un contexte d'évolution réglementaire environnementale de la construction, étude des transferts hygrothermiques au sein de composants d'enveloppes de bâtiments. », phdthesis, Université d'Artois, 2021. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/tel-03521752>
- [16] M. Chabannes, « Formulation et étude des propriétés mécaniques d'agrobétons légers isolants à base de balles de riz et de chènevotte pour l'éco-construction », phdthesis, Université Montpellier, 2015. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01316947>
- [17] P. Tronet, V. Picandet, T. Lecompte, et C. Baley, « Béton de chanvre : Effet du dosage en granulat sur les propriétés thermique et mécanique. », in *Comptes-rendus des 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17)*, AMAC, Éd., Poitiers-Futuroscope, France, juin 2011, p. 161. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-00597501>
- [18] K. A. J. Ouedraogo, « Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux ».
- [19] J. Tannous, « Valorisation de l'acétate de cellulose issu de traitement industriel de mégots de cigarettes pour des applications en construction », phdthesis, Université Gustave Eiffel, 2024. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-05015007>
- [20] V. Grosdemouge, « Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical. Contribution à la méthode nationale d'évaluation des ÉcoQuartiers », phdthesis, Université de la Réunion, 2020. doi: 10/document.
- [21] F. Champiré, « Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction », phdthesis, Université de Lyon, 2017. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01698988>
- [22] M. Audren, « Formulation, mise en oeuvre et performances de blocs de terre crue vibrocompactés », phdthesis, Université de Bretagne Sud, 2024. Consulté le: 21 juin 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04940214>
- [23] H. Houben et H. Guillaud, *Traité de construction en terre*. CRATerre - Éditions Parenthèses, 1989.
- [24] AFNOR, *NF P18-560 : Granulats - Analyse granulométrique par tamisage*, norme, Paris., 1990.
- [25] AFNOR, *NF P94-057 : Analyse granulométrique par sédimentation*, norme, Paris., 1992.
- [26] AFNOR, *NF P94-051 : Détermination des limites d'Atterberg*, norme, Paris., 1993.
- [27] AFNOR, *NF P94-054 : Détermination de la masse volumique absolue par pycnomètre à eau*, norme, Paris., 1991.
- [28] P. Walker, « Standards for earth building », *Constr. Build. Mater.*, vol. 18, n° 4, p. 309-315, 2004, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.01.013.
- [29] A. Messan, « Caractérisation mécanique et thermique des blocs de terre crue stabilisée au liant végétal », Thèse de doctorat, INSA Lyon, 2020.

- [30] M. Achenza et L. Fenu, « On the measurement of thermal conductivity of earth bricks », *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, n° 9, p. 769-775, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.01.058.
- [31] AFNOR, *XP P13-901 : Méthodes d'essai pour matériaux en terre crue*, Norme expérimentale française, Paris., 2001.
- [32] R. Meinier, « Étude expérimentale et analytique de l'inflammation et de la propagation du feu sur un chemin de câbles électriques ».
- [33] C. Leray, « Etude du comportement thermique et thermomécanique des récepteurs solaires sous haut flux radiatif ».

