

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Numéro de série :

Numéro d'inscription : D.GM/3C/01/21

Thèse

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Spécialité : Génie mécanique

Option : Génie des matériaux

THEME

Comportement mécanique de brique de terre « ADOBE » : Effet de la nature
de fibres végétales et d'agent stabilisant.

Présenté Par :

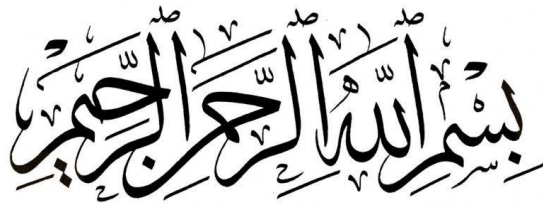
Kouidri Djamila

Soutenue le : 08/05/2025

Devant le Jury composé de :








Nom et Prénom	Grade	Établissement	Qualité
Farsi Chouki	Professeur	Univ. de M'sila	Président
Rokbi Mansour	Professeur	Univ. de M'sila	Encadreur
Rahmouni Zine El Abidine	Professeur	Univ. de M'sila	Co-Encadreur
Khaldi Abdelghani	Professeur	Univ. de BBA	Examineur
Cherif Saib	MCA	Univ. de M'sila	Examineur
Khelladi M.Redha	MCA	Univ. de BBA	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025



Dédicaces

Je dédie ce travail :

-  À mon père bien-aimé, « *KOUIDRI Ali* », pilier de ma vie et source mon inspiration et sagesse ;
-  À mon époux cher et précieux, « *KHERBICHE Younes* », pour son soutien indéfectible, sa patience infinie et ses encouragements ;
-  À mes frères et sœurs adorés, dont la présence et les encouragements illuminent chaque étape de mon parcours ;
-  À mes trésors, mes enfants chéris, « *Sadjida Rodayna El Djouri* » et « *Dhiaa Taha Elhabib* », qui incarnent ma fierté et ma motivation ;
-  À toute ma famille, qui m'entoure d'amour et m'offre force et réconfort ;
-  À mes amis fidèles, pour leur soutien, leur bonne humeur et leurs encouragements, qui m'ont accompagnée tout au long de ce chemin ;
-  Et enfin, à tous ceux et celles qui, par leur dévouement, mettent la science au service du progrès et du bien-être de l'humanité.

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au sein du Laboratoire des Matériaux et Mécanique des Structures (L.M.M.S), affilié au département de Génie Mécanique de l'Université Mohamed BOUDIAF – M'Sila.

Tout d'abord, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur Mansour Rokbi, Professeur à l'Université de M'Sila, pour avoir accepté de diriger mes travaux de recherche. Sa bienveillance, ses conseils avisés et ses qualités humaines ont été des atouts inestimables à chaque étape de ce travail. Collaborer avec lui a été une expérience enrichissante et profondément gratifiante.

Je tiens à remercier Monsieur Zine El Abidine Rahmouni, Professeur à l'Université de M'Sila, pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Je remercie également Monsieur Chouki Farsi, Professeur à l'Université de M'Sila, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant le jury de cette thèse. Sa présence et son engagement témoignent de son attachement à l'excellence académique.

Mes remerciements vont également à Monsieur Abdelghani Khaldi, Professeur à l'Université de Bordj Bou Arreridj, pour avoir accepté d'examiner ce travail. Ses remarques et observations pertinentes ont permis d'améliorer significativement cette recherche.

Je suis particulièrement reconnaissante à Monsieur Cherif Saïb, Maître de Conférences à l'Université de M'Sila, pour le soin et l'attention qu'il a consacrés à l'évaluation de cette thèse, ainsi qu'à ses commentaires constructifs.

Un immense merci également à Monsieur M.Redha Khelladi, Maître de Conférences à l'Université de Bordj Bou Arreridj, pour son implication et l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de faire partie du jury.

Je tiens à adresser ma profonde gratitude à ma famille, qui a été pour moi une source constante de soutien, d'encouragement et d'amour au cours de ces longues années de travail. Leur présence m'a donné la force de surmonter les défis et de persévérer dans mes études.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et mon respect à mon époux, Kherbiche Younes, pour son soutien indéfectible, sa patience qui m'ont accompagnée tout au long de ce parcours. Sa présence a été une source de force et de sérénité inestimable.

Enfin, je remercie chaleureusement mes collègues, mes amis, ainsi que toutes les personnes qui, de près ou de loin, directement ou indirectement, ont contribué à la réalisation de ce projet. Leur aide et leur soutien ont été essentiels à l'aboutissement de cette thèse.

Kouidri Djamila

Liste des Travaux

Les travaux de recherches consignés par la présente thèse ont été concrétisés par plusieurs publication et communication internationales dont :

Publication Internationales :

1. Kouidri, Djamila, Mansour Rokbi, Zine Elabidine Rahmouni, Younes Kherbiche, Samira Bouchareb, Sanjay Mavinkere Rangappa, and Suchart Siengchin. "Investigation of mechanical and physico-chemical properties of new natural fiber extracted from Bassia indica plant for reinforcement of lightweight bio-composites." Heliyon 10, no. 15 (2024).
2. Bouchareb, Samira, Mansour Rokbi, Mohamed Benhamida, Salih Mekideche, Naima Belayachi, Mostefa Meddah, Boumediane Boucherit, and Djamila Kouidri. "Effect of chemical treatment on the mechanical properties of intra-layer hybrid Alfa/Jute fabric composites." Journal of Composite Materials (2025) : 00219983251316336.

Sous préparation :

1. Kouidri, Djamila et al. "Mechanical Behavior of Adobe Bricks Reinforced with Bassia indica Fibers: Formulation, Mechanical Properties, and Stabilization Effects".

Conférences Internationales :

1. La communication intitulée : "Comparative Study Of Natural Fibers For Composite Materials" s'est présentée au cours de : The 1st International Conference on Innovation Research in Materials and Nanotechnology (ICIRMN 2023). Qui s'est tenue à université de Ghardaïa en Algérie.
2. La communication intitulée: "The effect of temperature on the mechanical properties of composites made form natural fibers, 1st International Seminar on Valorization of Bioresources in Environment & Health 10-11 May 2023". Qui s'est tenue à université d'El Oued en Algérie.

Conférences nationales :

1. La communication intitulée : "The Physicochemical And Mechanical Properties Of Composites From Natural Fibers" s'est présentée au cours de : The 1st Scientific Days On Materials And Their Applications (Sdma'2023), 18/19 décembre 2023. qui s'est tenue à université de Biskra en Algérie.
2. La communication intitulée : "Analyse Des Travaux Réalisés Dans Le Domaine Matériaux Composites A Fibres Naturelles " s'est présentée au cours de 1^{ère} conférence national sur les fondements et les méthodes de la recherche scientifique (13/14 décembre 2021). Qui s'est tenue a université de M'sila en Algérie.

Table des Matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction Générale	1
Contexte général et problématique	1
Objectifs	3
Présentation de la thèse	3

Partie 01 : État de l'art

Chapitre I : Matière argileuse

I.1 Introduction	5
I.2 Définition d'un composite	5
I.3 La terre, un matériau de construction	6
I.3.1 Évaluation de la qualité du sol pour la construction	6
I.3.1.1 Texture ou Granularité	6
I.3.1.2 Plasticité	7
I.3.1.3 Compressibilité	8
I.3.1.4 Cohésion	8
I.3.1.5 Matière organique	9
I.3.2 Techniques d'utilisation de la terre en construction	9
I.3.2.1 Technique du torchis	10
I.3.2.2 Brique d'adobe	11
I.3.2.3 Technique du pise	11
I.3.2.4 Blocs de terre comprimés BTC et BTCS	12
I.3.2.5 Technique de la bauge	13
I.3.2.6 Technique de la terre allégée	14
I.3.2.7 Technique de la terre coulée	15
I.4 Classification minéralogique	17

I.4.1 Minéraux phylliteux	20
I.4.2 Minéraux fibreux	22
I.4.3 Minéraux interstratifiés	23
I.5 Caractéristiques physico-chimiques, données structurales et thermiques	23
I.5.1 Caractéristiques physico-chimiques	23
I.5.2 Caractéristiques structurales	25
I.5.3 Comportement en température	27
I.6 Stabilisation des sols	28
I.6.1 Stabilisation mécanique	28
I.6.1.1 Mode de compactage	28
I.6.1.2 Contrainte de compactage	28
I.6.1.3 Influence de la teneur en eau sur la densité	29
I.6.2 Stabilisation physique	29
I.6.3 Stabilisation chimique	29
I.6.3.1 Stabilisation au ciment	30
I.6.3.2 Stabilisation à la chaux	30
I.6.3.3 Stabilisation au bitume	30
I.6.4 Stabilisation thermique	30
I.6.4.1 Formation d'une phase liquide	30
I.6.4.2 Absence de formation de phase liquide	31
I.6.5 Stabilisation par les fibres	31
I.6.5.1 Effet des fibres sur les propriétés des sols	31
I.6.5.2 Effet des fibres sur l'absorption d'eau	31
I.6.5.3 Influence des fibres sur les résistances mécaniques	32
I.6.5.4 Propriétés des adobes renforcés par des fibres naturelles	32
I.7 Applications des composites argileuse à base de fibres végétales	33
I.7.1 Fibres et leurs caractéristiques	34
I.7.2 brique de terre - Composition et fabrication	35
I.7.3 Ajout des fibres pour améliorer les propriétés	36
I.8 Conclusion	38

Chapitre II : Matière végétale

II.1 Introduction	39
II.2 Caractérisation des fibres végétales	39
II.2.1 Définition et classification des fibres végétales	39
II.2.2 Morphologie et descriptif de la fibre végétale	42
II.2.3 Structure et composition chimique de la cellule végétale	44

II.2.3.1 Cellulose	44
II.2.3.2 Hémicellulose	45
II.2.3.3 Lignine	45
II.2.3.4 Pectine	46
II.2.3.5 Extractibles	46
II.3 Méthodes d'extraction des fibres	47
II.3.1 Procédé mécanique.....	48
II.3.2 Procédé chimique.....	48
II.3.3 Procédé biologique	48
II.3.4 Procédé physique	49
II.4 Propriétés des fibres végétales.....	49
II.4.1 Propriétés mécaniques	50
II.4.2 Propriétés physiques	51
II.4.3 Propriétés chimiques.....	52
II.5 Traitements des fibres végétales.....	53
II.5.1 Méthodes chimiques	54
II.5.2 Méthodes physiques	55
II.6 Évaluation de la disponibilité des fibres végétales	55
II.7 Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	57
II.8 L'importance des fibres végétales dans les briques de terre	58
II.9 Conclusion	61

Partie 02 : Méthodes expérimentales et analyses

Chapitre III : Matières premières et matériaux utilisés

III.1 Introduction.....	63
III.2 Matières premières : Description, origine et échantillonnage.....	63
III.2.1 Les argiles et leurs préparations	63
III.2.2 Présentation de nouvelle fibre végétale	65
III.3 Matériels utilisés et méthodes expérimentales	67
III.3.1 Les fibres végétales de Bassia Indica (BI)	67
III.3.1.1 Extraction des fibres	67
III.3.1.2 Analyse morphologique	68
III.3.1.3 Analyse chimique.....	68
III.3.1.4 Analyse physique	69

III.3.1.5 Analyse thermique	70
III.3.1.6 Analyse cristalline.....	71
III.3.1.7 Analyse des propriétés mécaniques	72
III.3.1.8 Analyses statistiques de Weibull	74
III.3.2 Sols initiaux	75
III.3.2.1 Caractérisation minéralogique et chimique	75
III.3.2.2 Évaluation des propriétés géotechniques	75
III.3.2.3 Caractérisation de la fraction argileuse.....	77
III.3.2.4 Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG)	78
III.3.3 Composites Terre-Fibre (L'adobe).....	79
III.3.3.1 Méthodologies de fabrication des échantillons	79
III.3.3.2 Mesure du pH selon le protocole d'Eades-Grim	80
III.3.3.3 Essai de Compression simple.....	81
III.3.3.4 Essai de Flexion 3 points.....	81
III.3.3.5 Mesure du retrait des échantillons.....	82
III.4 Conclusion.....	83

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction	84
IV .2 Propriétés des fibres de Bassia Indica (BI).....	84
IV.2.1 Analyse anatomique	84
IV.2.2 Analyse du diamètre et densité.....	85
IV.2.3 Analyse de la composition chimique	86
IV.2.4 Analyse par spectroscopie infrarouge a transformee de fourier (RTA-IRFT).....	87
IV.2.5 Analyse thermogravimétrique (ATG)	89
IV.2.6 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	90
IV.2.7 Analyse de traction.....	91
IV.2.8 Analyse Statistique des resultats du test de traction	93
IV.2.9 Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)	95
IV.2.10 Analyse par Rayons X Dispersive en Énergie (EDX)	96
IV.3 Propriétés des sols.....	97
IV.3.1 Granulométrie des sols.....	97
IV.3.2 Abaque triangulaire de Taylor du sol.....	100
IV.3.3 Diagramme de plasticité	102
IV.3.4 Classification des sols	106
IV.3.5 Analyse chimique par spectrométrie infrarouge des sols	107
IV.3.6 Analyse thermogravimétrique différentielle des sols	109

IV.3.7 Analyse minéralogique par Diffractogrammes des rayons X des sols	110
IV.4 Comportement mécanique des briques d'Adobes	113
IV.4.1 Formulation des briques d'adobes	113
IV.4.2 Analyse de la courbe contrainte-déformation	116
IV.4.3 Effet de l'ajout des fibres sur le module d'Young	118
IV.4.4 Effet des fibres sur la résistance à la compression simple	120
IV.4.5 Effet des fibres sur la résistance à la flexion trois points	122
IV.4.6 Effet des fibres sur l'évolution du retrait et perte de masse	124
IV.4.7 Effet de la stabilisation sur les briques d'adobes renforcées par les fibres	126
IV.5 Conclusion	133
 Conclusions et Perspectives	 135
Références Bibliographiques	138

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Schéma illustrant la structure des matériaux composites.....	(6)
Figure I.2 Fuseaux granulaires utilisés dans diverses techniques de construction en terre	(7)
Figure I.3 Nomogrammes de plasticité montrant les surfaces recommandées de IP (%) = f (LL) des sols pour pisé, BTC ou BTM (Adobe).....	(8)
Figure I.4 Roue des techniques de construction en terre.....	(9)
Figure I.5 Mur en torchis.....	(10)
Figure I.6 Composition d'une Adobe traditionnelle.....	(11)
Figure I.7 Construction d'un mur en pisé.....	(12)
Figure I.8 Construction en BTC.....	(13)
Figure I.9 Construction d'un mur en bauge.....	(14)
Figure I.10 Construction d'un mur en terre allégée.....	(15)
Figure I.11 Construction d'un mur en terre coulée.....	(16)
Figure I.12 Structures des minéraux argileux (couche tétraédrique et couche octaédrique).....	(18)
Figure I.13 Structures de la famille : (a) des kaolinites et (b) des illites.....	(18)
Figure I.14 Structures de la famille : (c) des smectites et (d) des chlorites.....	(19)
Figure I.15 Structure des minéraux à pseudo – feuillets et à faciès fibreux.....	(22)
Figure I.16 Structure des minéraux inter-stratifiés.....	(23)
Figure I.17 Diagramme de Winkler et Niesper.....	(24)
Figure I.18 Corrélation entre les valeurs de surface spécifique et (a) la limite de plasticité et (b) la limite de liquidité.....	(25)
Figure I.19 Impact de 4% de fibre sur la corrélation contrainte-déformation du sol.....	(33)

Chapitre II

Figure II.1 Évaluation du processus de fabrication des agrocomposites entre 2000 et 2010	(40)
Figure II.2 (a) Production annuelle de FV, (b) Prix des produits FV sélectionnés.....	(42)
Figure II.3 (a) Propriétés de traction absolues de différentes séries de fibres (b) Représentation schématique de la structure des fibres de lin et de chanvre	(43)
Figure II.4 Organisation des composants de la fibre dans la paroi cellulaire d'une fibre végétale typique.....	(44)
Figure II.5 Molécule de cellulose.....	(45)
Figure II.6 Structure de l'hémicellulose.....	(45)
Figure II.7 Structure des précurseurs de la lignine.....	(46)
Figure II.8 Structure de la pectine.....	(46)
Figure II.9 Machine d'extraction de jute, la fibre de chanvre, le sisal, le hurd et la palme.....	(47)
Figure II.10 Propriétés mécaniques moyennes de différentes fibres végétales.....	(50)
Figure II.11 Teneur en humidité de certaines fibres végétales sélectionnées.....	(51)

Figure II.12 Analyse chimique de certaines fibres végétales.....	(53)
Figure II.13 Superficie cultivée en lin fibre (2009-2024).....	(56)
Figure II.14 Gisement mondial de fibres végétales (2001-2021).....	(57)
Figure II.15 (a) La résistance à la compression, (b) La résistance à la flexion et (c) la conductivité thermique tous en fonction de la quantité et de la longueur des fibres.....	(59)

Chapitre III

Figure III.1 Site d'échantillonnage.....	(64)
Figure III.2 Plante de <i>Bassia Indica</i>	(65)
Figure III.3 Plan de la zone de collecte.....	(66)
Figure III.4 Étapes d'obtention de la fibre : (a) Plante BI, (b) rouissage à l'eau, (c) extraction des FBIs et (d) FBIs.....	(67)
Figure III.5 Test mécanique des FBIs : (a) machine de traction universelle, (b) préparation de l'échantillon et (c) détail de la pince.....	(72)
Figure III.6 Test de gouttelette des FBIs : (a) Imprégnation de fibre, (b) Spécimen micrographique et (c) Test microgouttelette	(73)
Figure III.7 Limites d'Atterberg : (a) Limite de plasticité au rouleau, (b) Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.....	(76)
Figure III.8 Analyse granulométrique : (a) Tamisage par voie humide, (b) Granulomètre Laser COULTER LS 230.....	(77)
Figure III.9 Essai au bleu de méthylène.....	(78)
Figure III.10 Analyse thermogravimétrique SETSYS Evolution ATG-DTG.....	(79)
Figure III.11 Evolution du pH d'une suspension de sol+chaux dans l'eau.....	(80)
Figure III.12 Configuration d'essai de flexion pour la brique de terre.....	(82)
Figure III.13 (a) Dispositif d'expérimentation pour évaluer le retrait. (b) Mesure du retrait d'un échantillon.....	(82)

Chapitre IV

Figure IV.1 Micrographies optiques transversales de la tige BI capturées à : (a) 10 x, et (b) 40 x	(84)
Figure IV.2 Image idéale au microscope pour la mesure du diamètre.....	(85)
Figure IV.3 Spectre RTA-IRFT pour les FBIs à l'état brut.....	(87)
Figure IV.4 (a) Thermogrammes ATG et DTG des FBIs et (b) Graphique de Broido des FBIs.....	(89)
Figure IV.5 Diffraction des rayons X des FBIs.....	(91)
Figure IV.6 (a) Courbe standard de contrainte-déformation des FBIs avec une vue agrandie de la région élastique et (b) Contrainte à la rupture et module de Young en fonction du diamètre des fibres.....	(92)
Figure IV.7 (a) La force de cisaillement interfaciale apparente de chaque échantillon et la longueur de la fibre incorporée, et (b) la force de cisaillement interfaciale calculée.....	(93)

Figure IV.8 Distribution de Weibull avec deux paramètres et trois paramètres pour la résistance à la traction, le module de Young et la déformation à la rupture.....	(94)
Figure IV.9 Micrographies MEB des FBIs : (a) vue longitudinale (1000x) et (b) vue en coupe transversale (4000x).....	(96)
Figure IV.10 Analyse EDX des FBIs.....	(97)
Figure IV.11 Courbes granulométriques des sols.....	(98)
Figure IV.12 Distribution de tailles de particules obtenue par granulométrie laser.....	(99)
Figure IV.13 Abaque triangulaire de Taylor des sols.....	(102)
Figure IV.14 Limites d'Atterberg des 6 sols.....	(103)
Figure IV.15 Classification des sols sur le diagramme de Casagrande des sols.....	(104)
Figure IV.16 Classification des sols sur le diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901).....	(105)
Figure IV.17 Diagramme synoptique des matériaux : Classification des sols selon leur nature d'après le GRT.....	(107)
Figure IV.18 Spectres infrarouges des sols.....	(108)
Figure IV.19 Analyse thermogravimétrique des sols.....	(109)
Figure IV.20 Diagrammes de rayons X des sols.....	(111)
Figure IV.21 Préparation du mélange.....	(113)
Figure IV.22 Élaboration des éprouvettes.....	(114)
Figure IV.23 Brique d'adobe à base du sol (b) : (a) Courbes contraintes-déformations pour différents type d'adobes, (b) Module de Young pour différents type d'adobes.....	(116)
Figure IV.24 Brique d'adobe à base du sol (f) : (a) Courbes contraintes-déformations pour différents type d'adobes, (b) Module de Young pour différents type d'adobes.....	(117)
Figure IV.25 Brique d'adobe à base du sol (b) : variation du module d'Young en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.....	(118)
Figure IV.26 Brique d'adobe à base du sol (f) : variation du module d'Young en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.....	(119)
Figure IV.27 Brique d'adobe à base du sol (b) : résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.....	(120)
Figure IV.28 Brique d'adobe à base du sol (f) : résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.....	(121)
Figure IV.29 Brique d'adobe à base du sol (b) : résistance à la flexion 3 points d'adobe en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.....	(122)
Figure IV.30 Brique d'adobe à base du sol (f) : résistance à la flexion 3 points d'adobe en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.....	(123)
Figure IV.31 influence des fibres sur l'évolution du retrait et perte de masse.....	(125)
Figure IV.32 Synthèse sur les dosages en stabilisants et limites d'atterberg selon les recommandations du centre de recherches routières en Belgique.....	(127)
Figure IV.33 Évaluation du pH en fonction du taux chaux avec la méthode Eads-Grim pour le sol (b), (b) pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée (méthode Eads-Grim) pour le sol (f).....	(128)

Figure IV.34 (a) Idéalisations bilinéaires de la courbe contrainte-déformation typique et (b) courbes contrainte-déformation idéalisées d'éprouvettes.....	(129)
Figure IV.35 Variation de la résistance des briques d'adobe à base de sol (b) : Effet des formulations et influence du temps.....	(130)
Figure IV.36 Variation de la résistance des briques d'adobe à base de sol (f) : Effet des formulations et influence du temps.....	(131)

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 Structures des minéraux argileux principaux.....	(21)
---	------

Chapitre II

Tableau II.1 Classification des fibres par famille	(41)
---	------

Chapitre IV

Tableau IV.1 Composition chimique des nouvelles fibres naturelles	(86)
Tableau IV.2 Spectres vibrationnels RTA-IRFT pour les FBIs	(88)
Tableau IV.3 Propriétés des fibres de <i>Bassia indica</i> comparées à celles d'autres fibres naturelles	(95)
Tableau IV.4 Fiche synoptique des échantillons	(112)
Tableau IV.5 Formulations des éprouvettes (4 x 4 x 16 cm)	(115)

Liste des abréviations

Notations

BI	: <i>Bassia indica</i> .
BT	: Brique de terre.
BTC	: Blocs de terre comprimée.
LL	: limite de liquidité.
IP	: Indice de plasticité.
BTM	: Brique de terre moulée.
BTCS	: Briques de terre comprimée et stabilisée.

AIPEA	: Association Internationale Pour l'Étude des Argiles.
CEC	: Capacité échange cationique.
DRX	: Diffraction des rayons X.
IRTF	: Infrarouge à transformée de Fourier.
RMN	: Résonance magnétique nucléaire.
TEO	: Teneur en eau optimale.
FV	: Fibres végétales.
CBP	: Composites bois/plastique.
PSF	: Point de saturation des fibres.
FBI	: Fibre Bassia indica.
MEB	: Microscopie électronique à balayage.
EDX	: Rayons X à dispersion d'énergie.
TC	: Taille de Cristal.
IC	: l'indice de cristallinité.
ATG	: Analyse Thermogravimétrique.
Rc	: Résistance à la compression.
$F_{c, \max}$: Force de compression maximale.
S	: Surface.
GRT	: Guide de Réalisation des Terrassements.
VBS	: Valeur au bleuissement au solvant.
A_i^j	: Adobe avec i : type de sols et j : leur pourcentage. Sachant que : i [1 ,2].
$A_i^j S_k$: Adobe et sable avec j et k : leurs pourcentages respectivement.
$A_i^j S_k F_l^m$: Adobe, Sable et Fibre ; avec j, k et l : leurs pourcentages respectivement et m : longueur de FBI.
$A_i^j S_k F_l^m C_n$: Adobe, Sable, Fibre et Chaux avec j, k, l et n : leurs pourcentages respectivement et m : longueur de FBI.

Symboles

ρ_{FBI}	: La densité de la fibre naturelle (FBI).
Δm_1	: La différence de poids entre le pycnomètre vide et rempli de FBI.
Δm_2	: La différence de masse entre le pycnomètre avec la solution d'éthanol et vide.
Δm_3	: La variation de masse entre le pycnomètre avec et sans FBI dans la solution d'éthanol.
$\rho_{ethanol}$: La densité de l'éthanol.
L	: La longueur de FBI.
D_{BI}	: Le diamètre FBI.
M	: La masse de fibre BI.
ρ_{FBI}	: La densité de FBI.

E_a	: L'énergie d'activation.
W_o	: Le poids initial de l'échantillon.
W_t	: Le poids de l'échantillon à une température donnée.
W_f	: Le poids final de l'échantillon après la fin de la réaction.
A	: Le facteur de fréquence.
β	: Le taux de chauffage le long d'une ligne droite.
R	: La constante des gaz.
T	: La température en degrés absolus.
$I_{\text{cristalline}}$: L'indice de cristallinité.
I_{amorphe}	: L'indice amorphe.
k	: Le facteur de correction de Scherrer ($k = 0,94$).
λ	: La longueur d'onde du rayonnement X incident ($\lambda = 0,1542 \text{ nm}$).
θ	: L'angle de Bragg.
β	: La largeur à mi-hauteur du pic.
τ_c	: La force de cisaillement interfaciale (<i>IFSS</i>).
F_{max}	: La force de traction la plus élevée.
$2r$: Le diamètre de la fibre.
l	: La longueur incorporée.
n	: Le module de Weibull.
K	: Le paramètre d'échelle.
k_0	: La valeur moyenne de x .
$\omega (\%)$: Taux d'humidité.
$PF (\%)$: Perte au feu.
M_1	: La masse d'argile humide.
M_2	: La masse d'argile étuvée à 1000°C .
M_3	: La masse d'argile résiduelle.
D	: La densité d'un matériau argileux.
ρ_{eau}	: Une masse d'argile est ajoutée au pycnomètre.
S_s	: Densité d'eau.
m_{BM}	: Surface spécifique.
N_a	: Teneur en bleu de la solution de titrage. ($=10\text{g/ml}$).
A_{BM}	: Nombre d'Avogadro ($6.02 \times 10^{23} \text{ atomes/mol}$).
σ_f	: Aire couverte par une molécule de bleu de méthylène.
F	: Le module de rupture.
L	: La charge maximale.
b	: La distance entre appuis.
h	: La largeur.
	: La hauteur de l'éprouvette à la section de rupture.

Introduction générale

Contexte général et problématique

Les matériaux dérivés du pétrole ont joué un rôle crucial et irremplaçable dans l'avancement de la science, de la technologie, ainsi que dans l'amélioration des conditions de vie. Cependant, Au cours des dernières années, ne conscience environnementale croissante a incité les chercheurs, les industries et les scientifiques à innover en développant des matériaux écologiques. Cette dynamique vise à concevoir des produits qui sont à la fois recyclables et biodégradables, ce qui nécessite la sélection de matières premières adéquates pour établir une chaîne de production durable. ^{1, 2} Parmi celles-ci, les matériaux composites renforcés par des fibres végétales se distinguent par leur capacité à réduire l'impact environnemental de l'ingénierie. Ces matériaux se caractérisent par une légèreté et une rigidité spécifique élevées, ainsi que par le caractère recyclable et biodégradable des fibres végétales. Par conséquent, les composites à base de fibres végétales représentent une option prometteuse pour le développement de structures légères et durables.

L'industrie du bâtiment représente à elle seule plus de 43 % de la consommation de l'énergie mondiale et contribue à un quart des émissions de gaz à effet de serre. Elle est alors une des principales responsables de la consommation d'énergie globale. Le béton traditionnel, qui est principalement employé dans le domaine de la construction, présente une empreinte carbone préoccupante. Dans le monde entier, 190 m³ de béton sont éjectés chaque seconde, ce qui équivaut à 6 milliards de mètres cubes par an. ³ Il est composé de matériaux onéreux associés à du ciment, tels que du sable et du gravier. La production de ciment utilise des ressources fossiles non renouvelables pour obtenir l'énergie nécessaire. Ainsi, il est essentiel de trouver d'autres solutions, telles que les matériaux éco matériaux, afin de construire des bâtiments de manière durable, économique et respectueuse de l'environnement.

La terre, en tant que ressource naturelle, est utilisée par l'humanité dans la construction depuis des millénaires, comme en attestent les nombreux sites archéologiques découverts à travers le monde. De nos jours, les structures des bâtiments sont devenues plus vastes et plus complexes, nécessitant l'emploi de matériaux plus performants et durables. Ainsi, il est crucial, de mener des recherches approfondies afin de mieux comprendre les propriétés des éco matériaux, tels que les mélanges terre-fibres végétales.

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques et hygrométriques des briques en terre, divers stabilisants tels que le ciment, la chaux, le bitume, et les fibres peuvent être employés. Pour élaborer de nouveaux matériaux composites respectueux de l'environnement, une compréhension approfondie des caractéristiques des fibres est indispensable.

L'intégration de fibres naturelles comme agents de renforcement dans les composites polymères a permis le développement de produits divers, répondant aux besoins de plusieurs industries telles que l'automobile, l'aviation, le maritime, la construction, les textiles et les applications domestiques. Ces fibres sont préférées pour leurs propriétés avantageuses par rapport aux alternatives synthétiques, incluant leur faible densité, leur coût réduit, leur biodégradabilité, leur disponibilité abondante, leur facilité d'extraction, leurs capacités d'isolation thermique et leur non-toxicité. ^{4, 5} En outre, les fibres naturelles sont appréciées pour leur impact environnemental minimal, notamment en termes d'émissions négligeables de gaz nocifs. ⁶ Les composites renforcés par ces fibres se montrent également moins dangereux et plus simples à fabriquer que les composites traditionnels. ^{7, 8}

La tendance à remplacer les fibres synthétiques par des fibres cellulosiques naturelles est en nette progression. Cette évolution a encouragé les chercheurs à identifier et à exploiter de nouvelles fibres naturelles dotées de propriétés pertinentes. Toutefois, la production actuelle de fibres naturelles ne suffit pas à répondre aux exigences industrielles. ^{9, 10} Bien que des milliers d'espèces de fibres naturelles soient disponibles, seules quelques-unes ont été exploitées comme renforts dans les matériaux composites. Les fibres naturelles, souvent riches en cellulose, hémicellulose, pectine, lignine, cire et humidité, ont l'avantage de provoquer moins de réactions allergiques et ne causent généralement aucun inconfort grave lors de leur utilisation dans le corps humain. ¹¹

La qualité finale de la fibre est grandement influencée par les conditions géologiques de croissance des plantes, la nature et l'âge de la plante, la partie de la plante utilisée pour l'extraction de la fibre, ainsi que par la méthode d'extraction employée. Les techniques varient, incluant le rouissage par immersion des parties de la plante dans l'eau, ¹² ainsi que d'autres méthodes mécaniques ou chimiques. ^{13, 14} Les fibres ligno-cellulosiques, extraites de diverses parties des plantes telles que la racine, la tige, l'écorce ou la feuille, sont considérées comme des sources majeures de fibres cellulosiques. ¹⁵

Différentes méthodes sont adoptées pour l'extraction des fibres naturelles. L'une de ces approches consiste à immerger les parties de la plante dans l'eau, technique connue sous le nom de rouissage. ¹² Par ailleurs, d'autres stratégies recourent à des procédés mécaniques ou chimiques. ^{13, 14} Ces approches économiques contribuent à une réduction significative des composants amorphes tels que l'hémicellulose et la lignine. Ce processus se traduit par une amélioration de la composition chimique et des qualités de surface des fibres, favorisant ainsi l'acquisition de propriétés mécaniques optimales. ¹⁶ Face à une demande croissante pour les fibres cellulosiques naturelles, l'industrie est poussée à rechercher de nouvelles fibres dotées des propriétés requises. ¹⁷

Ce travail met en lumière une plante prometteuse, " *Bassia indica* ", qui pourrait s'ajouter à la liste des plantes écologiques exploitées dans le marché des fibres végétales. Comparativement à d'autres fibres naturelles, les fibres de *Bassia indica* (BI) ne sont pas étudiées, expliquant leur absence dans le secteur industriel.

Objectifs

Cette thèse a pour objectif d'examiner les performances mécaniques d'un matériau composé de terre et de fibres végétales en vue de son application dans le domaine de la construction, ainsi que d'évaluer son comportement en conditions réelles. Pour atteindre cet objectif, quatre objectifs secondaires ont été identifiés :

- Explorer de nouvelles ressources naturelles en vue de formuler un biocomposite destiné à la construction.
- Effectuer les analyses géotechniques et physico-chimiques du sol.
- Suggester une méthode de stabilisation des sols à faible impact environnemental.
- Procéder les essais mécanique sur d'adobes renforcées à l'aide de la fibre végétale et stabilisées par la chaux.

Présentation de la thèse

Ce travail est exposé dans ce mémoire de thèse en deux parties, divisées en quatre chapitres, qui exposent les principaux résultats des recherches menées.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique et à l'état de l'art concernant les techniques de construction en terre, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, ainsi que des critères de sélection des sols à stabiliser et des différentes méthodes de stabilisation. Ce chapitre aborde également les recherches antérieures sur l'effet de l'incorporation de fibres, notamment les fibres végétales, sur les propriétés physiques et mécaniques des briques de terre, ainsi que sur leur comportement mécanique.

Le deuxième chapitre propose une synthèse bibliographique sur les renforts fibreux végétaux afin de mieux contextualiser la recherche. Il aborde les généralités sur les fibres cellulosiques, leur classification, leur composition chimique, ainsi que les différentes méthodes d'extraction, en soulignant leurs avantages et inconvénients.

Le troisième chapitre examine les caractéristiques des matériaux employés dans la composition des mélanges à base de terre, en mettant l'accent sur les propriétés des sols, des fibres

végétales, et des composites. Ce chapitre présente également les diverses méthodes de caractérisation utilisées au cours de cette recherche.

Le quatrième chapitre est dédié à la caractérisation physicochimique et minéralogique des différentes matières premières utilisées. Nous exposons les spécificités des fibres végétales, en mettant en évidence les caractéristiques des fibres de 'Bassia indica', qui seront employées dans cette thèse, ainsi que les performances des matériaux à base de terre et de fibres végétales. Il présente également les résultats et leur interprétation concernant le comportement mécanique des briques de terre d'Adobe. Suite à ces analyses, le choix le plus approprié s'est porté sur les adobes qui satisfont aux exigences de résistance mécanique optimale.

Enfin, une conclusion générale sera formulée à partir des résultats de cette recherche, accompagnée de perspectives et de recommandations pour les futurs travaux dans le domaine de la construction en terre.

Partie 01 : État de l'art

Chapitre I : Matière argileuse

I.1 Introduction	5
I.2 Définition d'un composite	5
I.3 La terre, un matériau de construction	6
I.3.1 Évaluation de la qualité du sol pour la construction	6
I.3.2 Techniques d'utilisation de la terre en construction	9
I.4 Classification minéralogique.....	17
I.4.1 Minéraux phylliteux.....	20
I.4.2 Minéraux fibreux	22
I.4.3 Minéraux interstratifiés.....	23
I.5 Caractéristiques physico-chimiques, données structurales et thermiques.....	23
I.5.1 Caractéristiques physico-chimiques	23
I.5.2 Caractéristiques structurales	25
I.5.3 Comportement en température	27
I.6 Stabilisation des sols.....	28
I.6.1 Stabilisation mécanique.....	28
I.6.2 Stabilisation physique	29
I.6.3 Stabilisation chimique.....	29
I.6.4 Stabilisation thermique.....	30
I.6.5 Stabilisation par les fibres	31
I.7 Applications des composites argileuse à base de fibres végétales	33
I.7.1 Fibres et leurs caractéristiques	34
I.7.2 brique de terre - Composition et fabrication	35
I.7.3 Ajout des fibres pour améliorer les propriétés	36
I.8 Conclusion.....	38

I.1 Introduction

L'argile a été, et demeure, l'un des matériaux de construction les plus importants utilisés par les civilisations anciennes en raison de ses propriétés écologiques et économiques remarquables. ¹⁸ Malgré les avancées significatives dans les techniques et les matériaux de construction modernes, l'architecture en terre continue d'exister dans plusieurs régions du monde. Ces dernières années, de nouveaux systèmes architecturaux ont émergé pour répondre aux besoins de la vie moderne, tels que l'architecture verte et intelligente, soulevant des questions quant à la compatibilité de l'architecture en terre avec les exigences actuelles des utilisateurs. ¹⁹ Avec les progrès technologiques, l'architecture en terre fait face au risque de disparaître. Cependant, depuis le Protocole de Kyoto en 1998, ²⁰ visant à réduire les émissions de carbone, les matériaux de construction écologiques connaissent un regain d'intérêt, plusieurs gouvernements ayant adopté des politiques de développement durable. ²¹ En ce qui concerne l'argile, il n'existe pas de définition universelle, car ses composants minéraux varient, incluant des phyllosilicates et des minéraux tels que le quartz, oxydé l'aluminium et divers hydroxydes, lui conférant des propriétés physiques diverses selon sa composition précise. ²²

Ce chapitre est dédié à une revue bibliographique et comporte deux parties principales. Dans un premier temps, nous présenterons diverses techniques de construction en terre. Ensuite, nous nous concentrerons sur les matériaux utilisés, notamment la terre et les fibres légères. L'origine des matériaux employés dans la construction en terre sera examinée à partir de la littérature, tout comme la définition des sols dans les différentes zones géotechniques et argileuses. En fin, nous traiterons plus spécifiquement des diverses applications liées à la construction en terre, en présentant notamment quelques travaux issus de la littérature consacrés à la stabilisation des sols par l'incorporation de fibres végétales.

I.2 Définition d'un composite

Les matériaux composites sont définis comme des mélanges de deux matériaux ou plus aux propriétés distinctes, aboutissant à un matériau aux caractéristiques supérieures qui ne peuvent être obtenues avec des matériaux traditionnels. ²³ Leur objectif est d'intégrer des fonctionnalités uniques, telles que la légèreté et la résistance, les rendant idéaux pour diverses industries, notamment l'aéronautique, l'automobile et la construction. Ces matériaux se composent de deux éléments clés : la matrice et les fibres (Figure I.1), où les fibres influencent les propriétés mécaniques tandis que la matrice fournit un soutien structurel. ²⁴

Les matériaux composites peuvent être classés selon la nature de la matrice utilisée, en différentes catégories, y compris les composites à matrice métallique, qui sont résistants à la

chaleur et à la corrosion, et ceux à matrice polymère, qui offrent légèreté et flexibilité. ²⁵ La préparation des matériaux composites nécessite des étapes précises, telles que le choix des composants appropriés, le moulage, la fusion et le durcissement, afin de garantir la qualité du produit final. ²⁶ Comprendre les classifications et méthodes de préparation des matériaux composites est essentiel pour améliorer leurs performances, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives d'innovation dans de nombreux domaines.

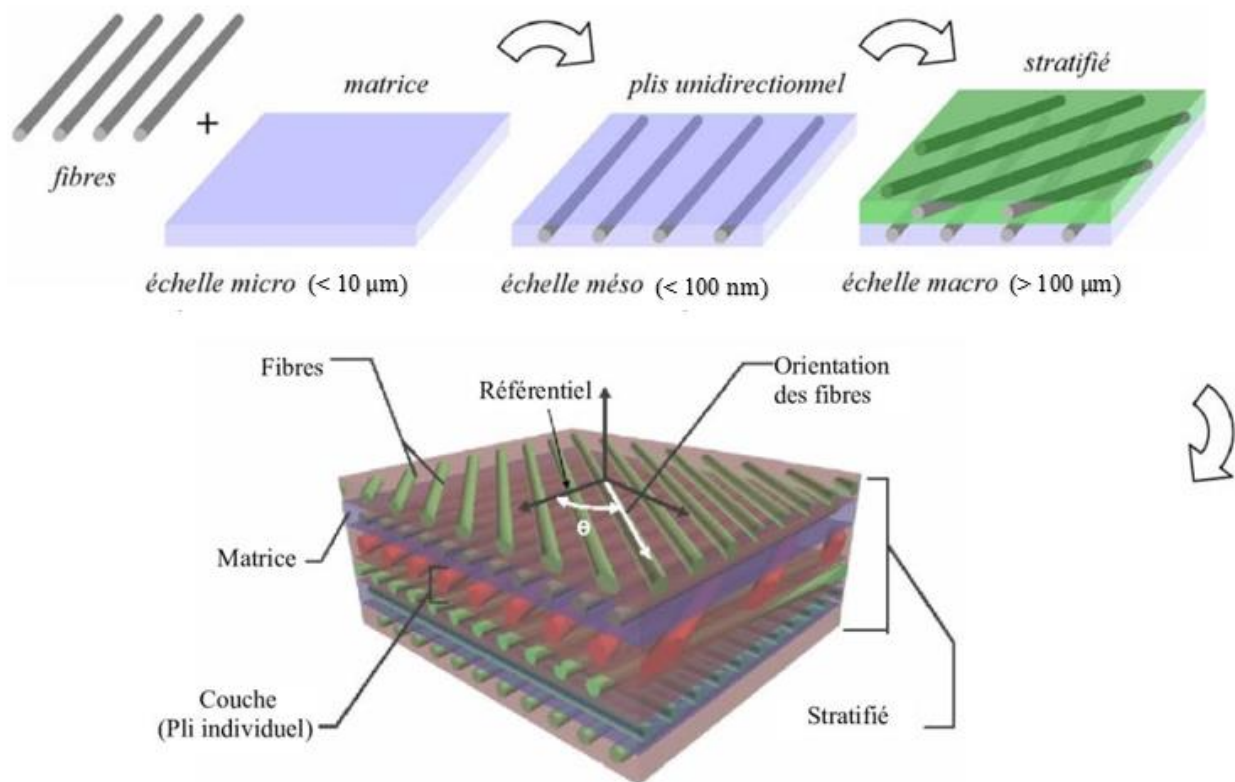


Figure I.1 Schéma illustrant la structure des matériaux composites.

I.3 La terre, un matériau de construction

I.3.1 Évaluation de la qualité du sol pour la construction

I.3.1.1. Texture ou Granularité

L'analyse granulométrique (Figure I.2) constitue la méthode privilégiée pour évaluer la distribution des particules dans un sol. Les éléments grossiers sont caractérisés par tamisage, tandis que les fractions fines font l'objet d'une analyse sédimentométrique. La structure du sol repose sur les composants grossiers, alors que les argiles assurent la cohésion et influencent les propriétés hygroscopiques.

L'expérience empirique a permis d'établir des courbes granulométriques de référence pour les différentes techniques de construction en terre. Le taux d'argile minimal requis varie selon la méthode employée : 10-22% pour les blocs de terre comprimée (BTC) et 10-15% pour le pisé. La teneur en limon des BTC se situe entre 10% et 25%. Des études ont démontré qu'un excès de particules fines ou grossières peut compromettre les performances mécaniques du matériau. ²⁷

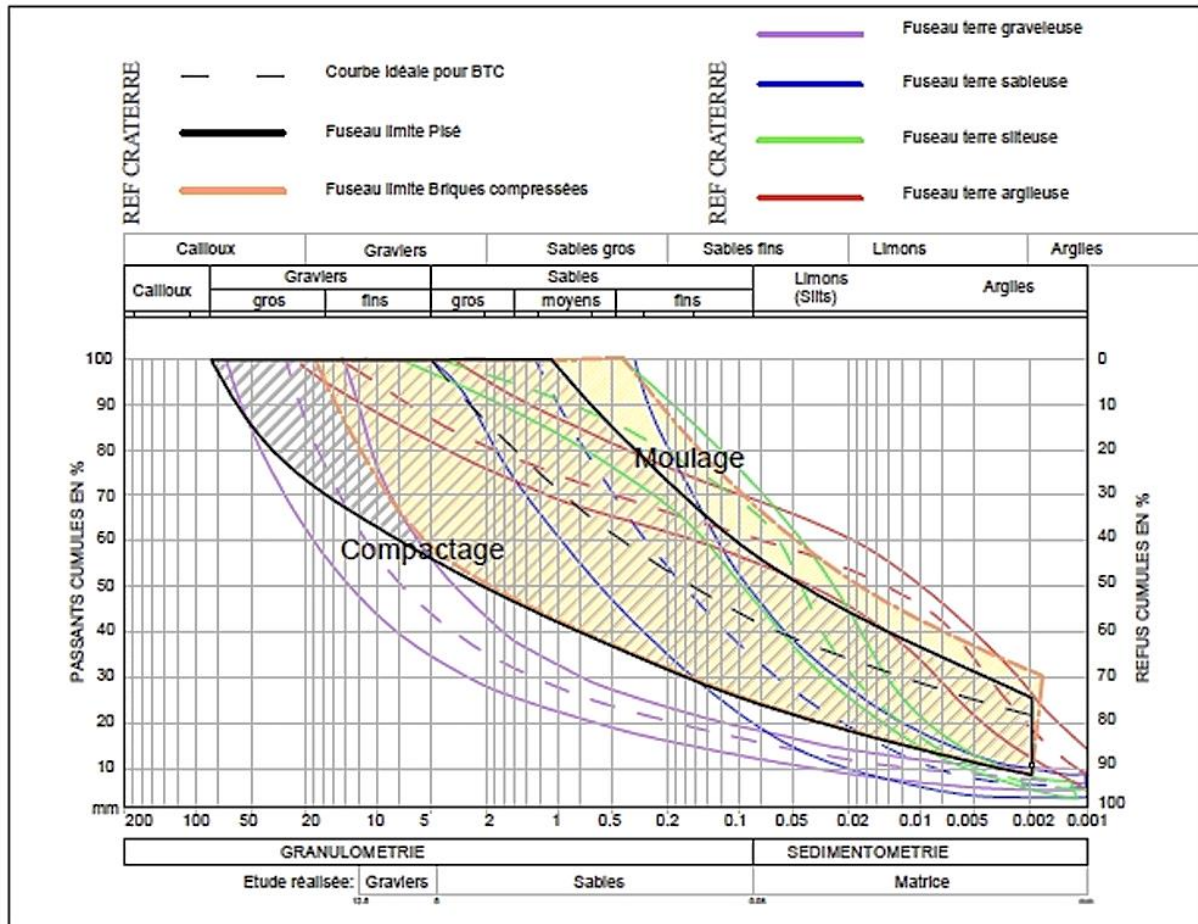


Figure I.2 Fuseaux granulaires utilisés dans diverses techniques de construction en terre. ²⁷

I.3.1.2. Plasticité

La plasticité, caractéristique essentielle des sols fins, se définit par leur capacité à se déformer sans rupture. Les limites d'Atterberg, notamment la limite de liquidité (LL) et l'indice de plasticité (IP), représentent des paramètres fondamentaux pour la classification des sols et l'évaluation de leur comportement mécanique, comme illustré dans la Figure I.3. Pour les constructions en terre, on recherche généralement un IP entre 16% et 28%, et une LL entre 32% et 46%. ²⁸

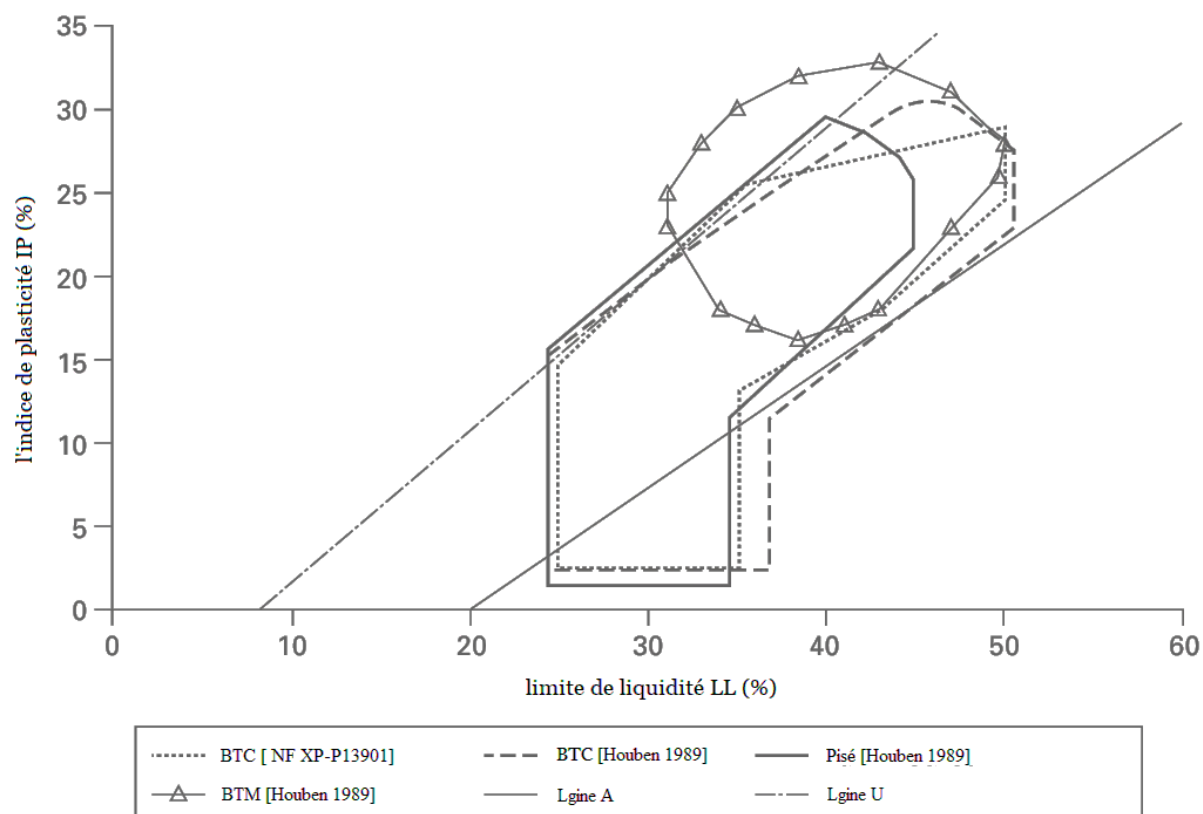


Figure I.3 Nomogrammes de plasticité montrant les surfaces recommandées de $IP (\%) = f(LL)$ des sols pour pisé, BTC ou BTM (Adobe) .²⁸

I.3.1.3. Compressibilité

La compressibilité d'un sol dépend de sa capacité à réduire son volume sous l'effet d'une contrainte, pour une teneur en eau donnée. Ce phénomène résulte de la réorganisation des particules et de la réduction de la porosité. L'optimisation de la teneur en eau est cruciale pour faciliter le réarrangement des grains tout en évitant la saturation. L'essai Proctor demeure la méthode de référence pour évaluer l'aptitude d'un sol à la compaction.

I.3.1.4. Cohésion

La cohésion d'un sol est déterminée par sa résistance au cisaillement, laquelle dépend des propriétés liantes de sa fraction fine ($< 2 \text{ mm}$). Cette caractéristique est fonction de la quantité et de la nature des éléments cohésifs. Les sols sont classifiés selon leur teneur en liant, allant des mortiers sableux aux argiles pures.¹⁸

I.3.1.5. Matière organique

En géotechnique, la matière organique englobe l'ensemble des composés organiques d'origine biologique présents dans le sol. Dans l'industrie céramique, notamment la briqueterie, ces substances organiques influencent significativement les processus de stabilisation et de cuisson. Une teneur en matière organique supérieure à 1% est considérée comme potentiellement problématique, et il est recommandé de ne pas excéder 2% pour le traitement des sols destinés à la construction. ¹⁸

I.3.2 Techniques d'utilisation de la terre en construction

La construction en terre crue englobe diverses méthodologies, chacune exploitant les propriétés spécifiques du matériau terreux. Ces techniques, illustrées dans un diagramme circulaire (Figure I.4) selon Houben et Guillaud (1984), ²⁹ mettent en évidence les différentes approches adaptées aux caractéristiques des sols utilisés.

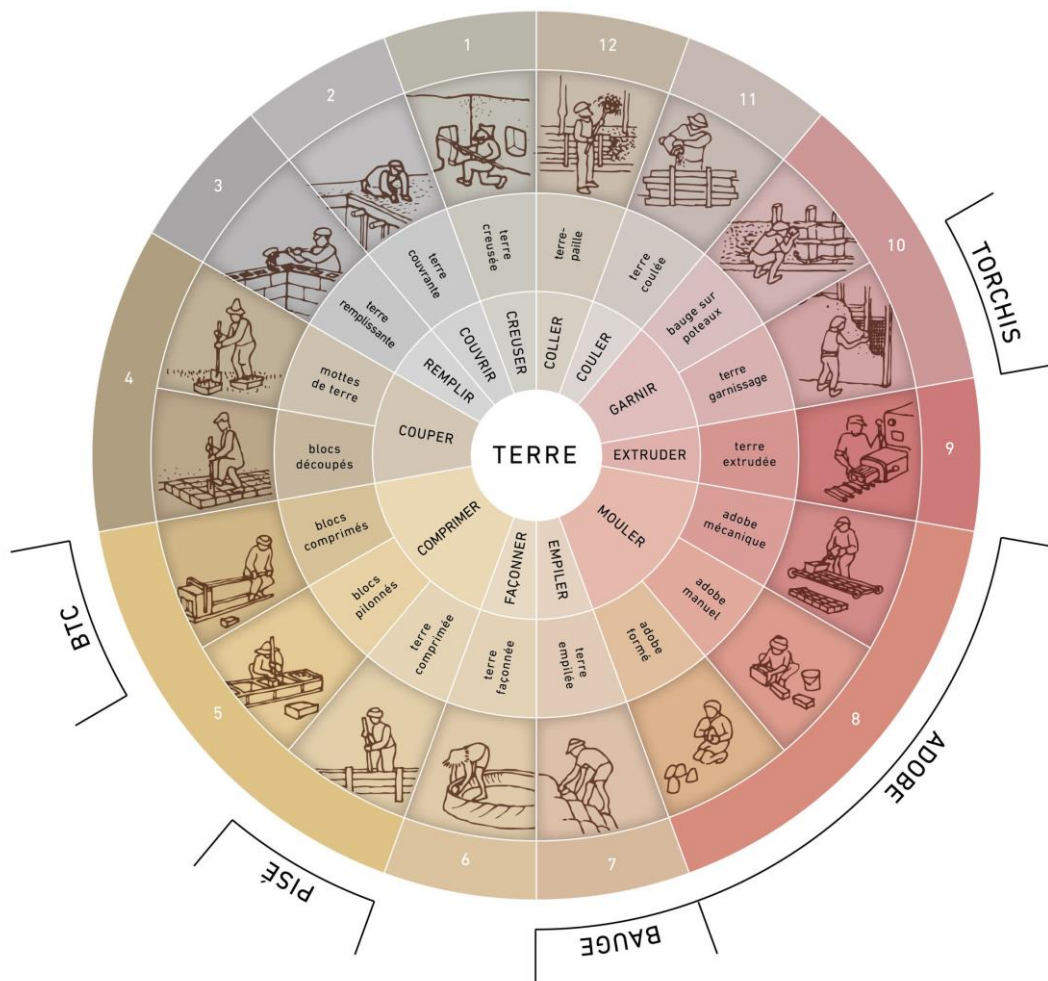


Figure I.4 Roue des techniques de construction en terre. ²⁹

I.3.2.1. Technique du torchis

Les techniques de construction en terre crue présentent une diversité remarquable, comme l'illustre la taxonomie établie par Houben et Guillaud (1984).²⁹ Parmi ces méthodes, le torchis (Figure I.5) se distingue par l'utilisation d'un composite terre-fibres appliqué sur une ossature. Ce procédé exploite les propriétés plastiques d'un mélange argileux enrichi en fibres végétales, mis en œuvre sur un support structural en bois ou en matériaux ligneux.³⁰ Ce procédé, répandu en Europe et dans les régions tropicales, a donné naissance à des édifices remarquables, dont certains sont inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. La spécificité du torchis réside dans sa nature non porteuse, nécessitant une structure indépendante. Post-application, le revêtement peut être stabilisé par l'ajout de chaux ou d'un mortier chaux-sable.³¹ L'incorporation de fibres dans le mélange améliore sa résistance à la fissuration lors du séchage et renforce sa durabilité face aux intempéries. Deux variantes principales se distinguent³² : le torchis lourd, caractérisé par une forte proportion de terre (conductivité thermique : $1,05 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, masse volumique : 1400 kg.m^{-3} sec, 1800 kg.m^{-3} humide), et le torchis allégé, privilégiant la paille (conductivité thermique : $0,12\text{-}0,15 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, masse volumique : $300\text{-}400 \text{ kg.m}^{-3}$), particulièrement adapté à l'isolation thermique.

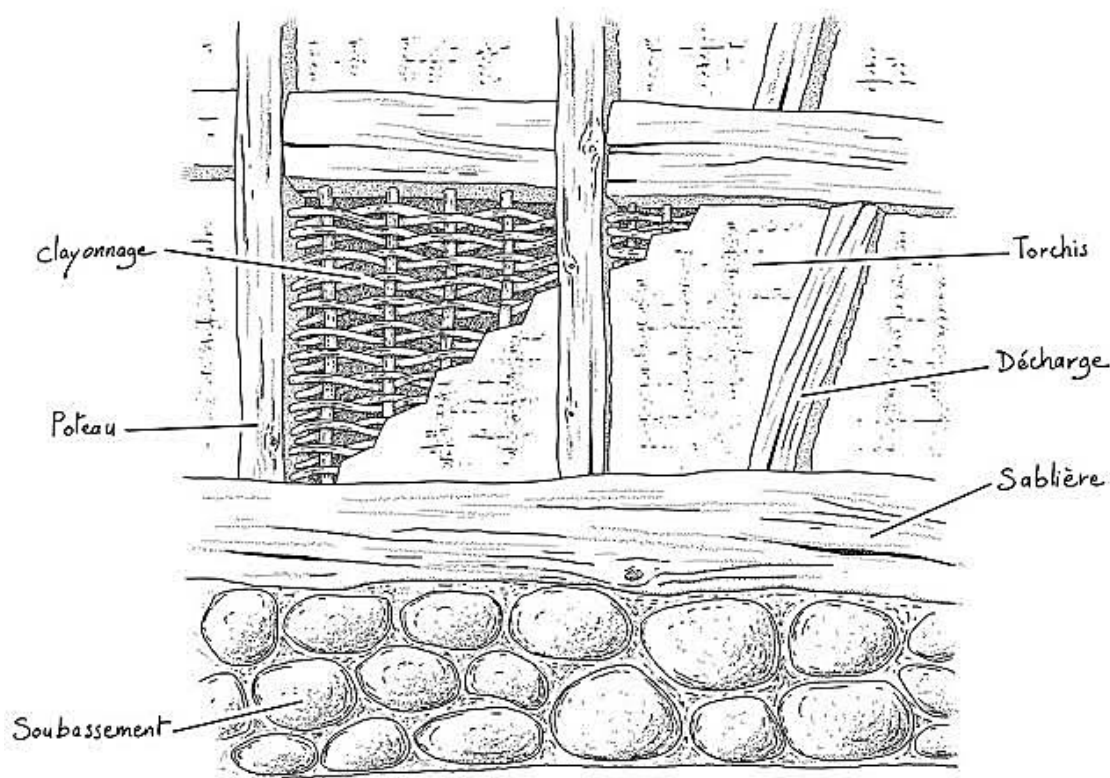


Figure I.5 Mur en torchis.³²

I.3.2.2. Brique d'adobe

L'adobe, représenté dans la Figure I.6, est une brique de terre crue moulée et séchée naturellement, constituant une méthode de construction millénaire. Sa composition, qui associe argiles, limons, sables et fibres végétales, lui confère des propriétés plastiques et mécaniques adaptées à diverses configurations architecturales. Sa fabrication artisanale permet une grande flexibilité dans les dimensions, facilitant la construction de structures variées. Les propriétés thermophysiques de l'adobe (conductivité thermique $\approx 1,1 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$, masse volumique $\approx 1780 \text{ kg.m}^{-3}$) et ses performances mécaniques (résistance à la compression $\approx 2,5 \text{ MPa}$, résistance à la flexion $\approx 1 \text{ MPa}$) en font un matériau de construction polyvalent. ³³

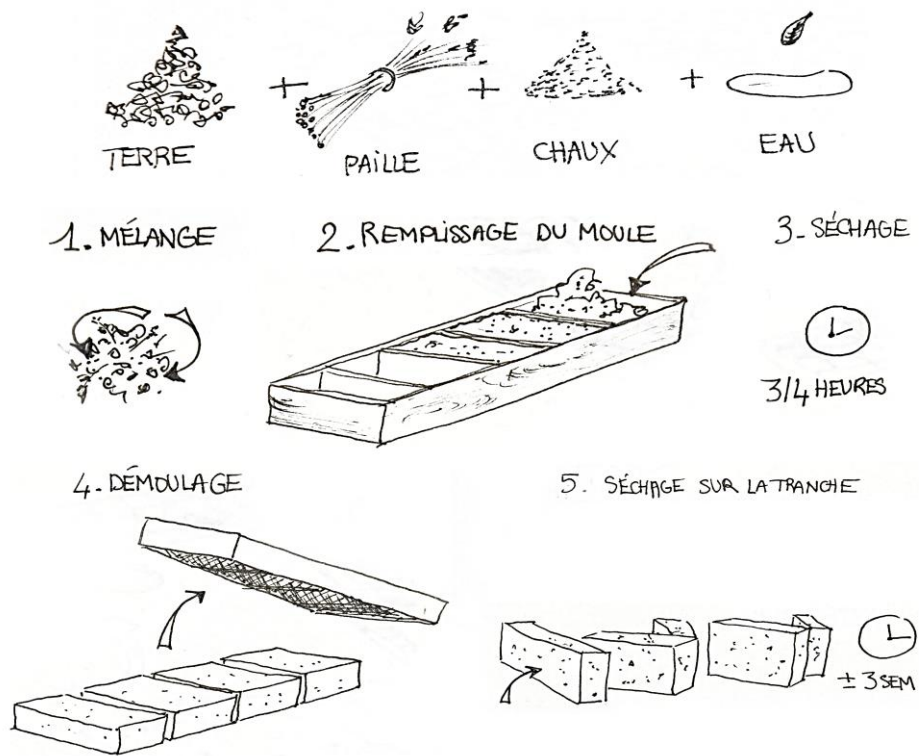


Figure I.6 Composition d'une Adobe traditionnelle. ³³

I.3.2.3. Technique du pise

Le pisé, technique de compression de terre légèrement humide en couches successives, se caractérise par sa robustesse et son esthétique particulière. Cette méthode, utilisée depuis l'Antiquité, connaît un regain d'intérêt dans l'architecture contemporaine, notamment grâce à ses qualités environnementales. Cette technique (Figure I.7) produit des murs massifs d'une épaisseur supérieure à 50 cm, assurant ainsi leur stabilité structurelle. ¹⁸

Le processus de compactage, réalisable manuellement ou mécaniquement, confère au matériau une texture distinctive et une résistance accrue. Dans certaines régions, la stabilisation au ciment ($\approx 10\%$) est préconisée par la réglementation. Les propriétés du pisé varient selon sa composition : teneur en eau optimale de 8-12%, diamètre maximal des grains de 5 cm, masse volumique de 1700 à 2400 kg.m⁻³, conductivité thermique de 0,86 à 1,01 W.m⁻¹.K⁻¹.³⁴ Les paramètres techniques du pisé, tels que sa teneur en eau optimale et sa résistance mécanique, ont fait l'objet d'études approfondies.

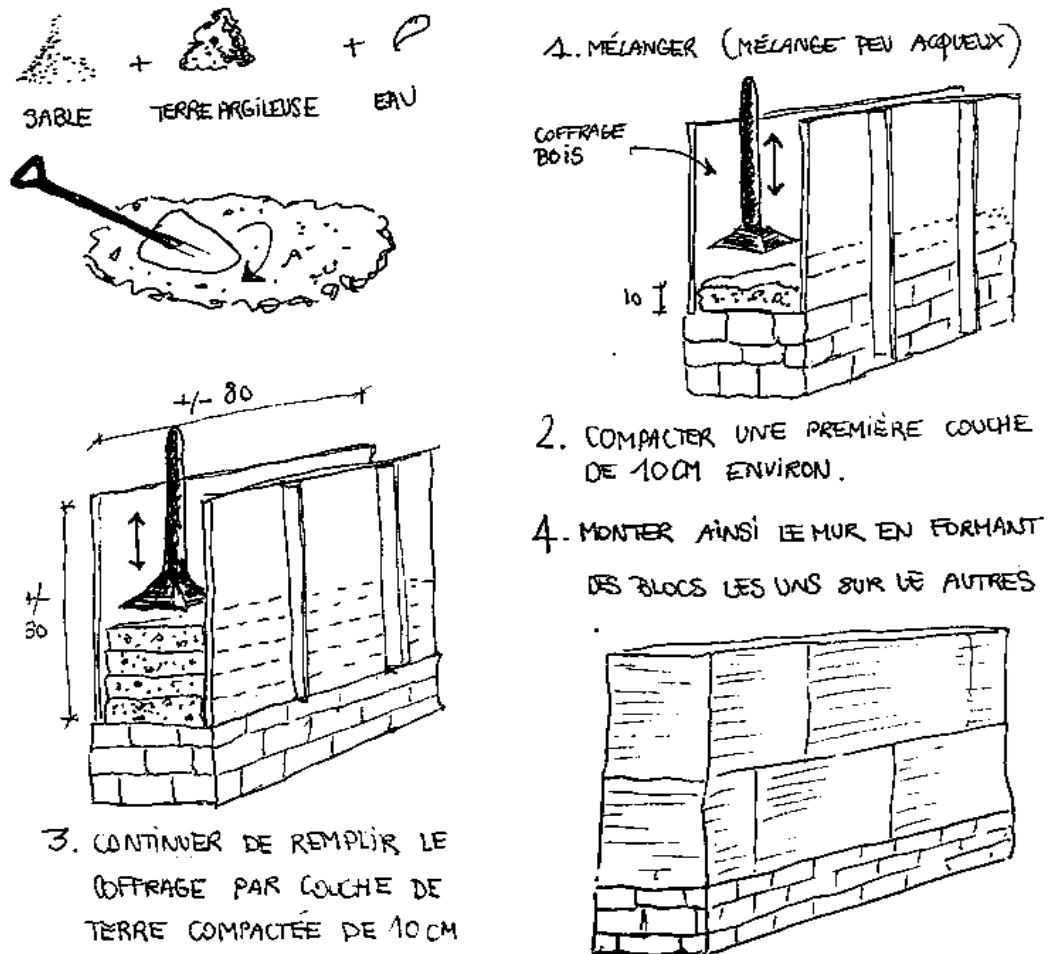


Figure I.7 Construction d'un mur en pisé.³⁴

I.3.2.4. Blocs de terre comprimés BTC et BTCS

Les briques de terre comprimée (BTC) et stabilisée (BTCS) représentent une évolution moderne des techniques traditionnelles. Comme le montre la Figure I.8, elles sont obtenues par compression mécanique et constituent une alternative innovante aux briques d'adobe. La composition optimale pour les BTC inclut 0-40% de gravier, 25-80% de sable, 10-25% de limon et 8-30% d'argile.¹⁸ Les BTCS intègrent généralement 3 à 19% de stabilisant (chaux hydraulique ou

ciment). Ces matériaux présentent des résistances à la compression variant de 2,5 à 4 MPa pour les BTC, et de 2 à 6 MPa pour les BTCS avec 8% de ciment. ³⁵ Leur conductivité thermique est corrélée linéairement à leur masse volumique, oscillant entre 0,52 et 0,93 W.m⁻¹.K⁻¹ pour des masses volumiques de 1500 à 2100 kg.m⁻³. ³⁶ Leur processus de fabrication permet un contrôle précis des propriétés, facilitant leur intégration dans des constructions contemporaines.

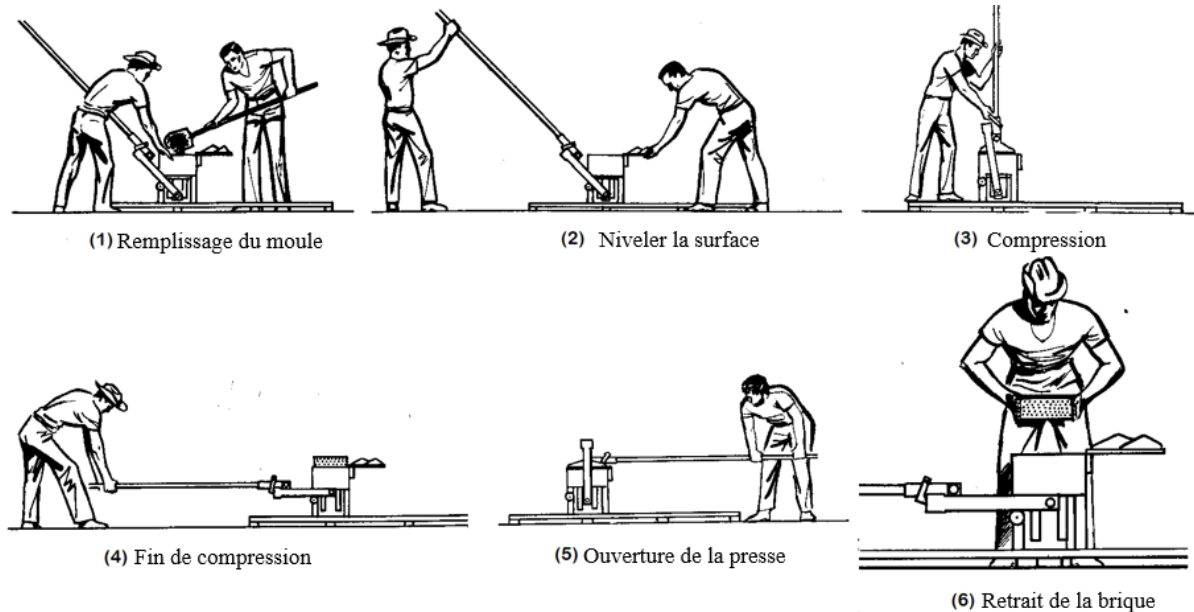


Figure I.8 Construction en BTC. ³⁵

I.3.2.5. Technique de la bauge

La construction en bauge, illustrée dans la Figure I.9, représente une méthode ancestrale de bâti en terre crue, caractérisée par son approche artisanale et sa mise en œuvre sans coffrage. Cette technique repose sur l'élaboration d'un composite terre-fibres, occasionnellement enrichi de minéraux, formant une matière modelable. L'édification se réalise par superposition et compression manuelle de volumes de ce mélange, aboutissant à des structures monolithiques porteuses. Les parois, d'une épaisseur oscillant entre 40 et 60 cm, voire davantage selon les exigences structurelles, sont érigées par strates de 60 à 80 cm. Le processus de construction implique une séquence méthodique : après la mise en place d'une couche, celle-ci est compactée, puis sa surface est travaillée pour prévenir les fissurations dues au séchage et assurer une planéité optimale.

La bauge s'inscrit dans un patrimoine architectural diversifié, s'étendant de la péninsule arabique à l'Afrique subsaharienne (Burkina Faso, Bénin, Ghana, Nigeria), en passant par le Devon anglais et les Abruzzes italiennes, sans oublier les constructions vernaculaires de l'Ouest français

(Vendée, Bretagne, Normandie). Des recherches comparatives récentes ^{31, 37-39} ont mis en lumière les attributs singuliers de la bauge, notamment sa durabilité supérieure par rapport à d'autres techniques de construction en terre. L'incorporation de fibres végétales confère au matériau des propriétés uniques. Les investigations actuelles visent à optimiser les capacités structurelles et les méthodes de mise en œuvre de la bauge, en explorant des solutions innovantes pour son application en tant qu'écomatériau composite.

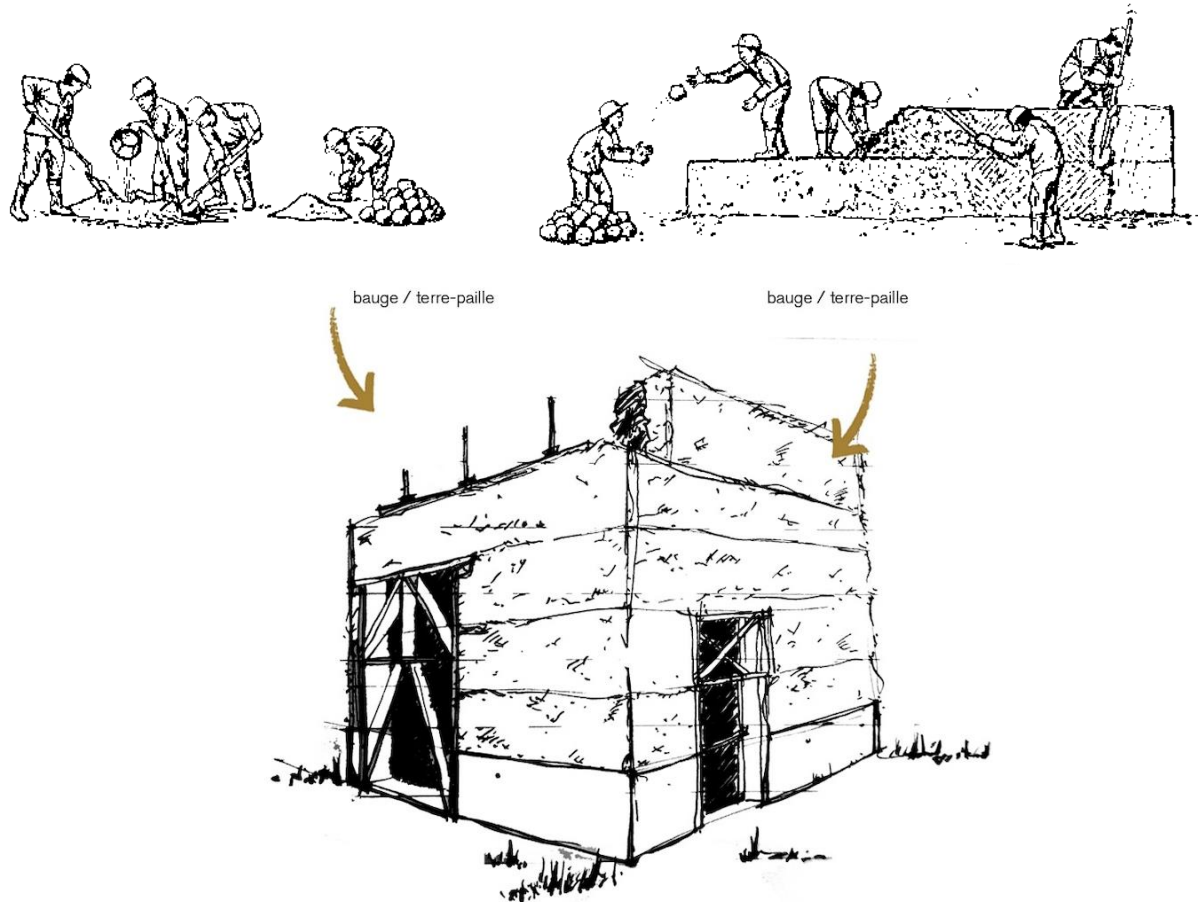


Figure I.9 Construction d'un mur en bauge. ³¹

I.3.2.6. Technique de la terre allégée

La terre allégée ou terre-paille représente une innovation récente dans le domaine de la construction en terre. Cette technique (Figure I.10), caractérisée par sa faible densité, est principalement employée pour le remplissage d'ossatures en bois. Sa composition allie une matrice argileuse (10 à 20%) à une forte proportion de granulats végétaux (80 à 90%), tels que roseaux, tiges de colza, paille de chanvre, ou copeaux de bois. La masse volumique de ces mélanges varie considérablement, de 200 à 1200 kg.m⁻³ à l'état sec. La mise en œuvre s'effectue à l'état humide, soit par projection mécanisée, soit par préfabrication. ⁴⁰

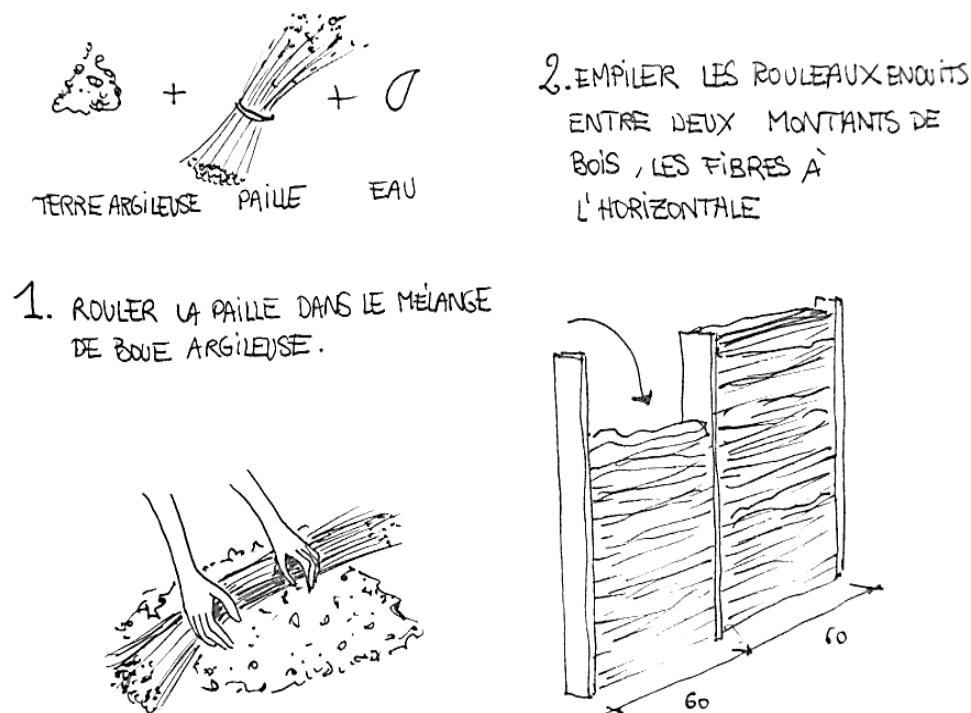


Figure I.10 Construction d'un mur en terre allégée. ⁴⁰

L'évolution des normes de confort thermique et l'émergence de réglementations énergétiques plus strictes ont catalysé le développement de matériaux isolants biosourcés. La terre allégée s'inscrit dans cette tendance, offrant une alternative aux isolants conventionnels. Son origine remonte à l'Allemagne de l'après-Première Guerre mondiale, où elle fut développée comme solution de reconstruction économique face aux pénuries de matériaux traditionnels.

La recherche actuelle sur la terre allégée et les matériaux biosourcés s'intensifie, visant à optimiser leurs propriétés mécaniques et thermiques tout en explorant de nouvelles applications dans la construction durable. ⁴¹

I.3.2.7. Technique de la terre coulée

La technique de la terre coulée, parfois désignée sous l'appellation de "pisé coulé", constitue une méthode de construction utilisant un composite terreux à forte teneur en agrégats. Cette approche est principalement employée pour l'élaboration d'éléments non structurels tels que les cloisons intérieures ou les remplissages.

Ce matériau peut être comparé à un béton géopédologique, comme illustré dans la Figure I.11, dont la préparation et la mise en œuvre sont analogues à celles du béton conventionnel à base de ciment. Sa composition repose sur une matrice argileuse jouant le rôle de liant, dans laquelle

sont incorporés des granulats de diverses tailles. L'obtention d'une distribution granulométrique optimale, essentielle à la performance du matériau, nécessite une analyse et un ajustement minutieux de la terre source.

Le processus d'optimisation granulométrique implique soit un tamisage de la terre lorsque celle-ci présente naturellement une forte proportion d'éléments grossiers, soit un enrichissement en granulats dans le cas d'une terre à dominante fine. Cette étape cruciale vise à atteindre un équilibre adéquat entre les fractions granulaires (graviers, sables) et la fraction argileuse, garantissant ainsi les propriétés mécaniques et rhéologiques recherchées.

Cette technique de construction en terre présente l'avantage de combiner les propriétés inhérentes aux matériaux géosourcés avec une facilité de mise en œuvre comparable à celle des bétons conventionnels, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans le domaine de la construction écologique et durable.

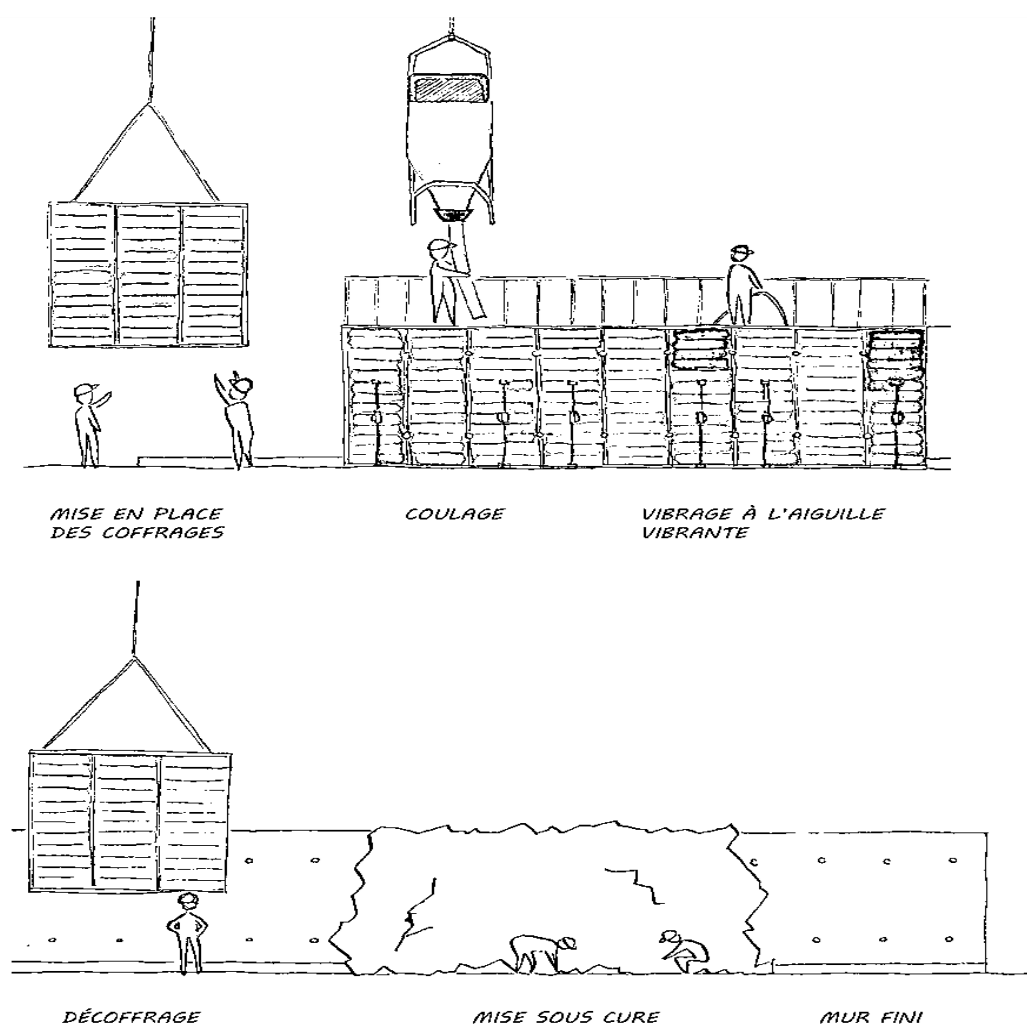


Figure I.11 Construction d'un mur en terre coulée. ⁴¹

I.4 Classification minéralogique

La genèse et l'évolution des minéraux argileux s'inscrivent dans le contexte plus large de la formation et de la transformation géologique de la Terre. Ces processus, initiés il y a environ 4,6 milliards d'années, ont conduit à la différenciation des éléments constitutifs de notre planète, résultant en une structure stratifiée comprenant le noyau, le manteau et la croûte terrestre. L'histoire géologique de la Terre est archivée dans les différentes roches formées au cours des ères. La croûte terrestre se compose d'un assemblage minéralogique diversifié, classé selon leur genèse en trois grandes catégories : magmatiques, sédimentaires et métamorphiques. Les roches magmatiques, telles que le basalte et le granite, résultent de la solidification de magmas. Les roches sédimentaires, dont l'argile, le grès et le calcaire, se forment par accumulation et diagenèse de débris minéraux. Les roches métamorphiques, comme les schistes et l'ardoise, sont le produit de la transformation de roches préexistantes sous l'effet de conditions thermodynamiques spécifiques.

Le cycle géologique implique la formation, l'altération et le recyclage des roches de la croûte terrestre. L'affleurement des roches les expose aux agents atmosphériques, initiant leur dégradation. Les minéraux constitutifs subissent alors des transformations chimiques, notamment par hydrolyse et carbonatation, générant de nouveaux composés comme l'argile. Ces produits d'altération sont transportés par divers agents (glaciers, cours d'eau, vent) jusqu'à des bassins sédimentaires, où ils se déposent et se consolident. La composition minéralogique des gisements argileux reflète ainsi la nature des roches mères et les processus d'altération, associant typiquement argiles, quartz, silice, feldspaths, carbonates et oxydes de fer.

La granulométrie des constituants d'une terre argileuse varie significativement. Les limons, représentant la fraction intermédiaire, se caractérisent par des particules de 2 à 50 μm . Les sables, plus grossiers, présentent une distribution granulométrique de 50 à 2000 μm . Les minéraux argileux proprement dits se distinguent par leur structure en feuillets submicroniques ($<2 \mu\text{m}$), conférant aux argiles leurs propriétés physico-chimiques caractéristiques. ⁴²

La structure cristalline des argiles (Figure I.12) se compose de deux unités fondamentales : une couche tétraédrique et une couche octaédrique. La couche tétraédrique (T) consiste en un réseau bidimensionnel de tétraèdres d'oxygène, où un atome de silicium occupe le centre, coordonné par quatre atomes d'oxygène. La formule chimique de cette unité s'exprime sous la forme SiO_4 . La couche octaédrique (O) se caractérise par un réseau d'octaèdres de type gibbsite, de formule $\text{Al}(\text{OH})_6$, où un atome d'aluminium central est lié à six groupes hydroxyles. ⁴³

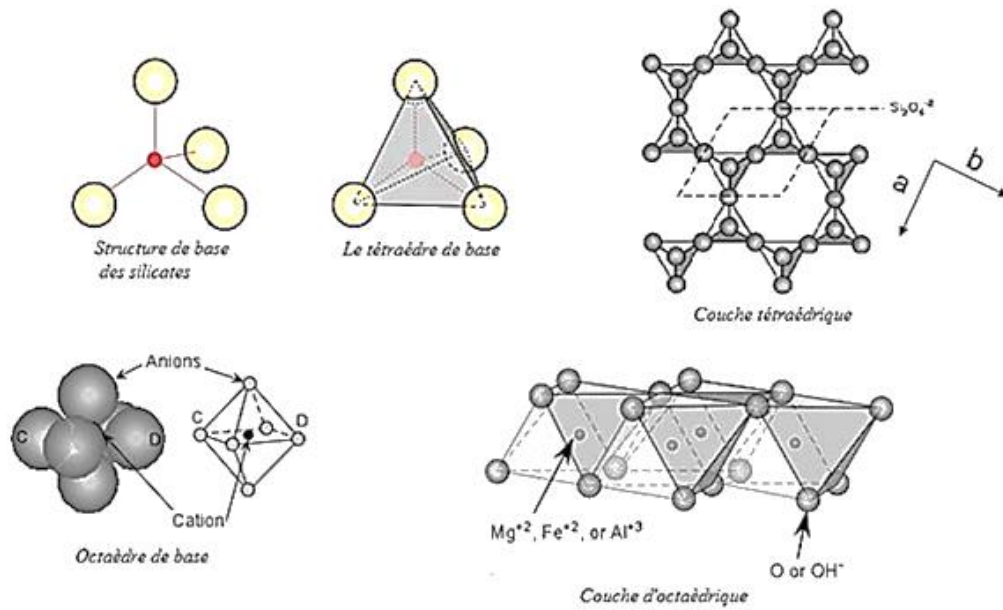


Figure I.12 Structures des minéraux argileux (couche tétraédrique et couche octaédrique). ⁴⁴

L'agencement spécifique de ces couches T et O, illustré dans la Figure I.13 et I.14, détermine la classification des minéraux argileux en quatre familles principales : la kaolinite, l'illite, les smectites et les chlorites. Chaque famille présente des propriétés physico-chimiques distinctes, influençant leur comportement et leurs applications. ⁴⁴

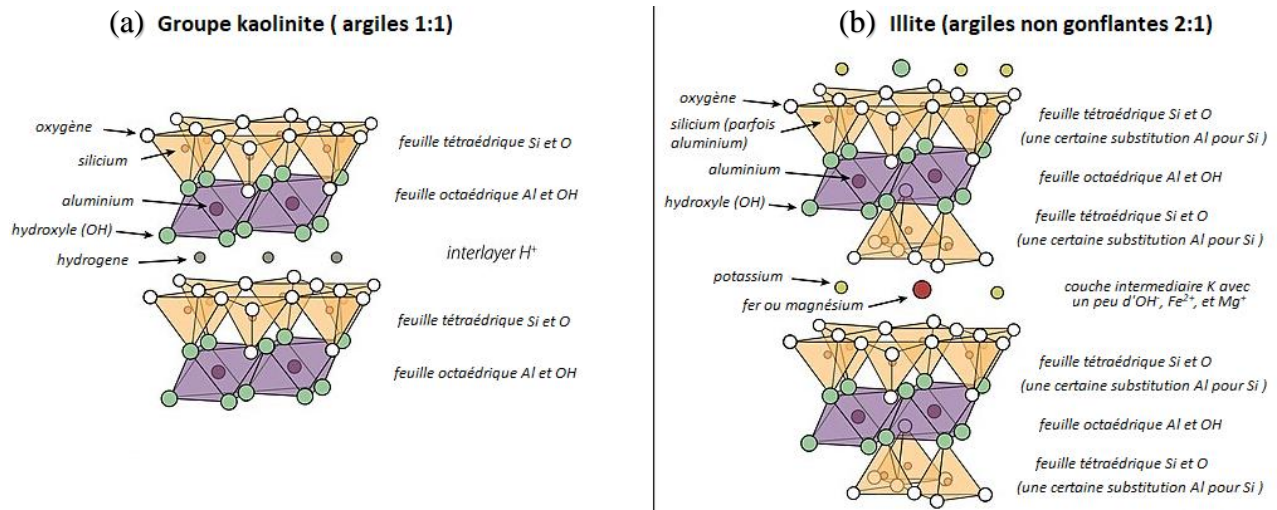


Figure I.13 Structures de la famille : (a) des kaolinites et (b) des illites. ⁴⁴

La kaolinite, nommée d'après le mont Kao-Ling en Chine, se distingue par sa structure bicouche T-O. Sa stabilité structurale résulte de l'interaction entre les groupements hydroxyles de la couche octaédrique et les atomes d'oxygène de la couche tétraédrique.

Cette configuration confère à la kaolinite une faible capacité d'adsorption cationique et une formule chimique $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Les feuillets de kaolinite maintiennent une distance interfoliaire constante de $7,2\text{\AA}$, limitant leur capacité de gonflement. ⁴⁵

L'illite, associée à l'État de l'Illinois aux États-Unis, présente une structure à trois couches T-O-T. Sa particularité réside dans la substitution partielle du silicium par l'aluminium dans la couche tétraédrique, compensée par l'incorporation d'ions potassium dans l'espace interfoliaire. Cette configuration influence significativement les propriétés électrostatiques et la cohésion des feuillets d'illite. ⁴⁶

Ces caractéristiques structurales et compositionnelles des minéraux argileux déterminent leurs propriétés macroscopiques, telles que la plasticité, la capacité d'échange cationique, et la surface spécifique, facteurs cruciaux pour leurs diverses applications dans l'industrie et la construction.

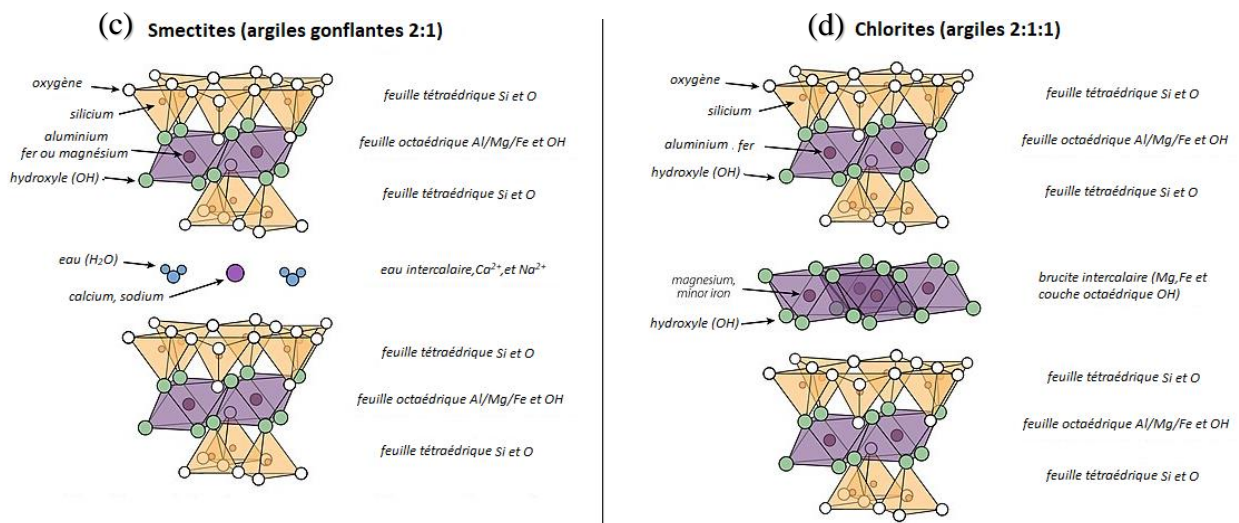


Figure I.14 Structures de la famille : (c) des smectites et (d) des chlorites. ⁴⁷

Les smectites se distinguent par leur affinité hydrophile prononcée et leur propriété de gonflement caractéristique. ⁴⁸ Structuellement analogues aux illites, elles présentent une configuration en trois couches, avec une couche octaédrique centrale encadrée par deux couches tétraédriques. Cependant, les smectites se démarquent par des substitutions isomorphiques plus étendues dans la couche octaédrique, impliquant principalement des ions fer ou magnésium. Cette particularité engendre un déficit de charge au sein des feuillets, compensé par l'incorporation de cations interchangeables hydratés, tels que le sodium ou le calcium.

Les chlorites, dont l'étymologie grecque "khlôros" évoque leur coloration verdâtre caractéristique, constituent un groupe minéralogique issu de l'altération des micas. Leur structure

cristalline s'apparente à celle des illites, présentant une configuration tri-couche. Cependant, les chlorites se distinguent par une prédominance d'atomes de magnésium ou de fer dans la couche octaédrique. La neutralité électrique des feuillets de chlorite est maintenue par l'intercalation d'une entité minérale riche en magnésium dans l'espace interfoliaire, généralement sous la forme $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Ce composé interfoliaire, analogue à la brucite et électrostatiquement stable, assure la cohésion entre les feuillets avec un espacement constant de 14\AA , limitant ainsi la capacité d'échange cationique des chlorites. Une particule de chlorite typique se compose d'environ une centaine de feuillets et présente une surface spécifique relativement faible, généralement inférieure à $20\text{m}^2/\text{g}$. Cette caractéristique confère aux chlorites une faible affinité pour l'eau et une propension limitée au gonflement. ⁴⁷

La composition minéralogique des terres argileuses utilisées dans la production de terre cuite est intrinsèquement complexe, résultant d'une combinaison de minéraux argileux issus des différentes familles précédemment décrites. Cette hétérogénéité se manifeste soit par une distribution de particules distinctes au sein d'un gisement, soit par une stratification intraparticulaire de feuillets de natures diverses. Le phénomène d'inter-stratification des minéraux argileux peut se produire selon divers modes d'organisation, allant de configurations régulières à des arrangements aléatoires.

La classification des minéraux argileux, établie par l'Association Internationale Pour l'Étude des Argiles (AIPEA), repose sur des critères structuraux fondamentaux. Elle distingue trois grandes catégories :

- Les minéraux phylliteux
- Les minéraux fibreux
- Les minéraux interstratifiés

I.4.1 Minéraux phylliteux

Les minéraux phylliteux, prédominants dans de nombreuses applications, font l'objet d'une classification plus approfondie selon les recommandations de la « Clay Minerals Society ». Trois paramètres clés sont considérés :

- La configuration des couches (ratio 1:1 ou 2:1)
- La charge électrique nette du feuillet
- La nature des éléments compensateurs de charge

Cette méthodologie permet d'identifier cinq groupes principaux, subdivisés en fonction du taux d'occupation des sites octaédriques. Cette classification hiérarchique facilite la différenciation des divers phyllosilicates, comme illustré dans le Tableau I.1.

Type	Groupe	Sous-groupe	Espèce	Formule
1 : 1	kaolinite	kaolinites	Dickite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
			Nacrite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
			kaolinite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
			Métahalloysite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
			Halloysite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
		Serpentines	Antigorite	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
2 : 1	Talc	Pyrophyllites	Pyrophyllites	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		Talc	Talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Smectites	Smectites dioctaédriques	Montmorillonite	$(\text{Al}_{1.67} \text{Mg}_{0.33}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
		Smectites trioctaédriques	Saponite	$\text{Mg}_3 \text{Si}_{3.67} \text{Al}_{0.33} \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
	Vermiculites	Vermiculites dioctaédriques	Vermiculite	$(\text{Al}, \text{Fe} \dots)_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
		Vermiculites trioctaédriques	Vermiculite	$(\text{Mg}, \text{Fe} \dots)_2 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
		Micas dioctaédriques	Muscovite	$\text{KAl}_2 (\text{Si}_3, \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
	Micas	Micas trioctaédriques	Phlogopite	$\text{KMg}_3 (\text{Si}_3, \text{Al}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2$
		Chlorites dioctaédriques	Sudoite	$\text{Al}_4 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$
	Chlorites	Chlorites trioctaédriques	Espèce différentes	$(\text{Mg}, \text{Fe} \dots)_6 (\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_8$

Tableau I.1 Structures des minéraux argileux principaux.

Un aspect structural supplémentaire, crucial pour comprendre le comportement des argiles, est l'ordre d'empilement des feuillets. Cet arrangement peut varier d'une structure parfaitement ordonnée à des configurations plus ou moins désordonnées, caractérisées par des translations non aléatoires ou totalement aléatoires des feuillets.

I.4.2 Minéraux fibreux

Les minéraux fibreux se distinguent par leur morphologie particulière, présentant des feuillets argileux discontinus (Figure I.15). Leur structure de base s'apparente à un ruban de type 2:1, reminiscente du talc en composition, mais adoptant une configuration en chaînes similaire à celle observée dans les pyroxènes ou les amphiboles. Cette architecture unique engendre des espaces importants entre les chaînes, occupés par de l'eau (liée ou zéolitique) et des cations échangeables.

Au sein de cette catégorie, on distingue deux familles principales: ^{49, 50}

- Les sépiolites, caractérisées par un ruban à 8 octaèdres, où le magnésium (Mg) est le cation échangeable prédominant.
- Les palygorskites, composées d'un ruban à 5 octaèdres (aussi appelées attapulgites), présentant une teneur en aluminium (Al) supérieure à celle des sépiolites.

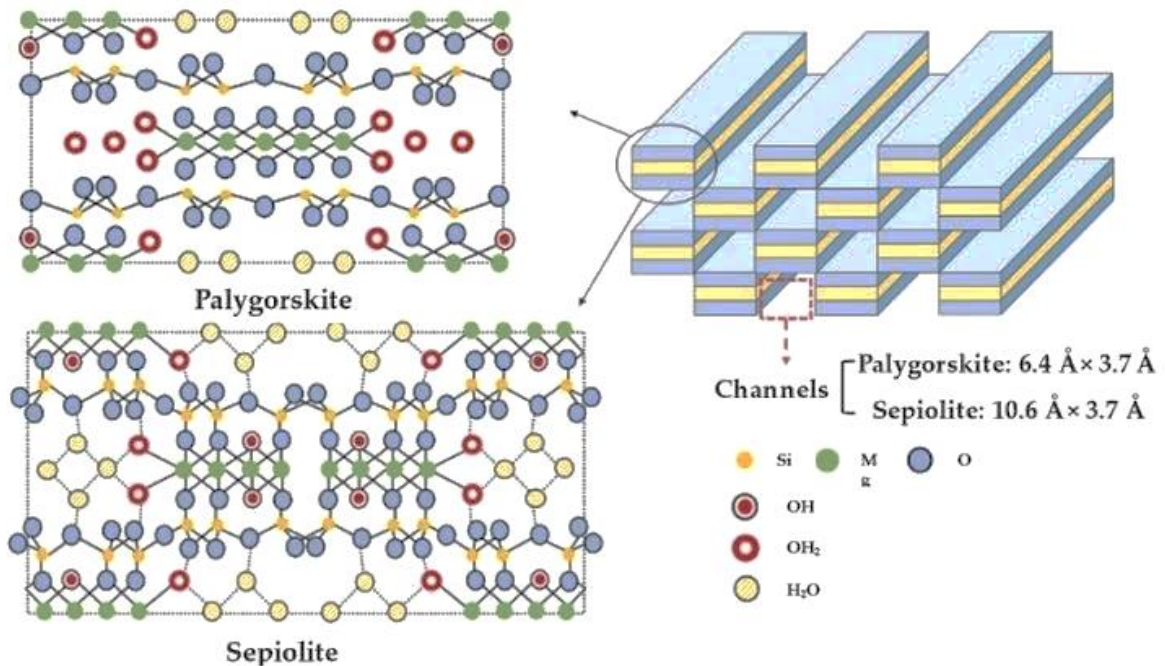


Figure I.15 Structure des minéraux à pseudo – feuillets et à faciès fibreux. ⁵⁰

I.4.3 Minéraux interstratifiés

Les minéraux interstratifiés représentent une catégorie complexe, caractérisée par l'alternance de feuillets de minéraux argileux élémentaires de natures distinctes, comme illustré dans la Figure I.16. La proportion et l'arrangement de ces feuillets peuvent varier, donnant lieu à des structures régulières ou irrégulières. Dans les cas d'interstratification régulière, les différents types de feuillets suivent des séquences répétitives (par exemple, AB - AB - AB). À l'inverse, l'interstratification irrégulière se caractérise par un empilement aléatoire des feuillets, sans motif récurrent identifiable (par exemple, AB - BA - BA A). Cette complexité structurale des minéraux interstratifiés soulève des défis considérables en termes d'identification et de nomenclature. Cette complexité structurelle et compositionnelle des terres argileuses utilisées dans la fabrication de produits en terre cuite souligne l'importance d'une caractérisation précise et d'une compréhension approfondie des matières premières pour optimiser les processus de production et les propriétés des produits finis. ⁵¹

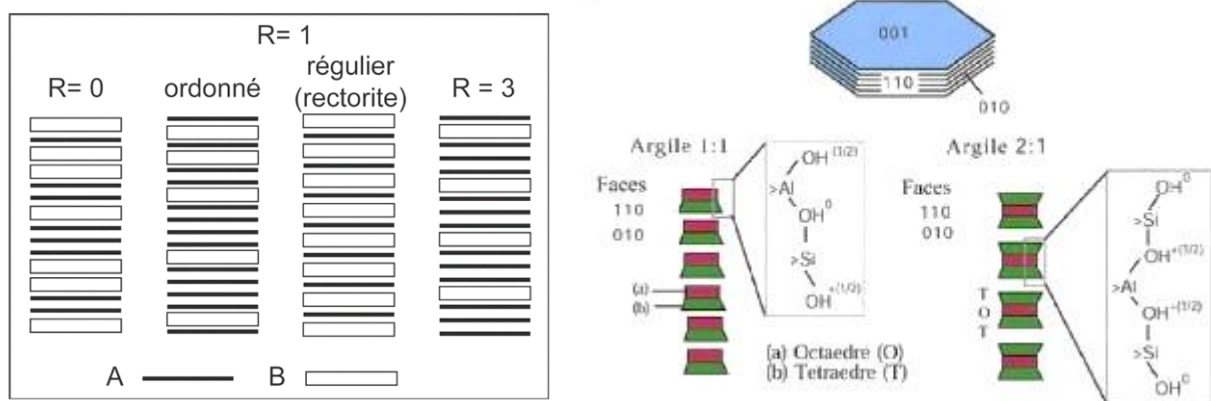


Figure I.16 Structure des minéraux inter-stratifiés. ⁵²

I.5 Caractéristiques physico-chimiques, données structurales et thermiques

L'étude approfondie des minéraux argileux nécessite une approche multidisciplinaire, intégrant des analyses physico-chimiques, structurales et thermiques. Cette méthodologie exhaustive permet de caractériser avec précision la diversité complexe de ces matériaux géologiques.

I.5.1 Caractéristiques physico-chimiques

Les propriétés physico-chimiques des argiles sont déterminées par plusieurs paramètres fondamentaux : la morphologie et la granulométrie des particules, leur composition chimique

globale, et leurs caractéristiques de surface, notamment la capacité d'échange cationique et le comportement acido-basique. Ces attributs influencent directement les propriétés rhéologiques telles que la plasticité et la viscosité, essentielles pour de nombreuses applications industrielles.

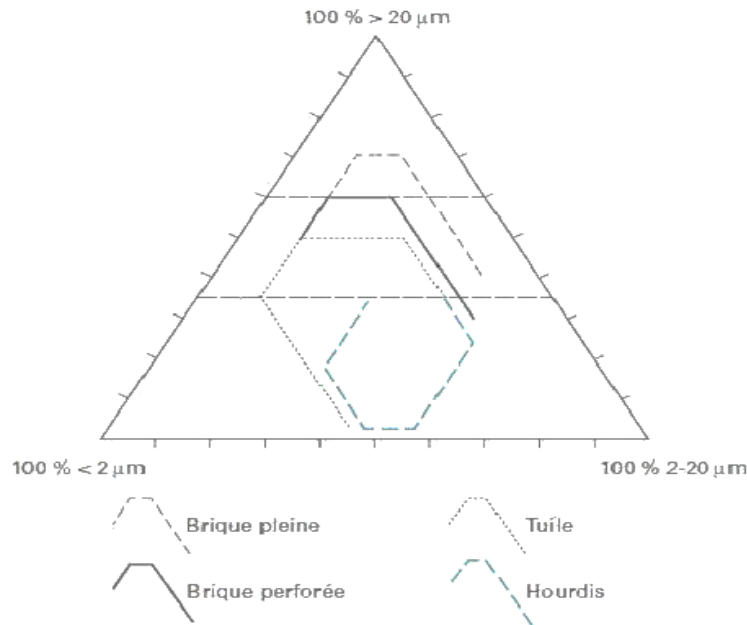


Figure I.17 Diagramme de Winkler et Niesper. ⁵³

La distribution granulométrique des particules argileuses constitue un critère prépondérant pour l'évaluation de leur aptitude technologique. Les méthodes de caractérisation granulométrique, incluant le tamisage classique et les techniques plus avancées comme la granulométrie laser ou la sédimentation, permettent d'établir des profils granulométriques précis. Ces données sont cruciales pour déterminer l'adéquation des argiles à diverses applications dans l'industrie céramique, comme l'illustre le diagramme de Winkler et Niesper (Figure I.17). Ce diagramme ternaire délimite les compositions optimales pour différents produits céramiques en fonction de la distribution des tailles de particules. ⁵³

Dans le contexte de la fabrication céramique, la formulation des mélanges requiert une combinaison judicieuse de différentes classes texturales : les argiles fines ($< 2 \mu\text{m}$), les limons ($2-20 \mu\text{m}$), les sables ($20-200 \mu\text{m}$) et les graviers ($> 2 \text{ mm}$). Les fractions plus grossières, qualifiées de "dégraissants", jouent un rôle crucial dans la modulation des propriétés plastiques et confèrent une rigidité structurelle au produit final. La fraction ultra-fine ($< 0,2 \mu\text{m}$) exerce une influence particulièrement significative sur la plasticité et le comportement dimensionnel des produits céramiques, notamment les tuiles. Par ailleurs, la surface spécifique des argiles et leur capacité

d'échange cationique (CEC) sont des paramètres essentiels pour comprendre et prédire le comportement rhéologique des suspensions argileuses.

Une étude menée par M. Raimondo et al. ⁵⁴ a mis en évidence une corrélation linéaire entre la surface spécifique des argiles et leurs limites d'Atterberg (limite de liquidité et de plasticité) pour un panel de onze argiles utilisées dans la production de briques. Cette relation, illustrée dans la Figure I.18 (a, b), souligne l'importance de la surface spécifique comme indicateur de la plasticité et de la teneur en particules fines, reflétant ainsi la composition minéralogique du mélange argileux.

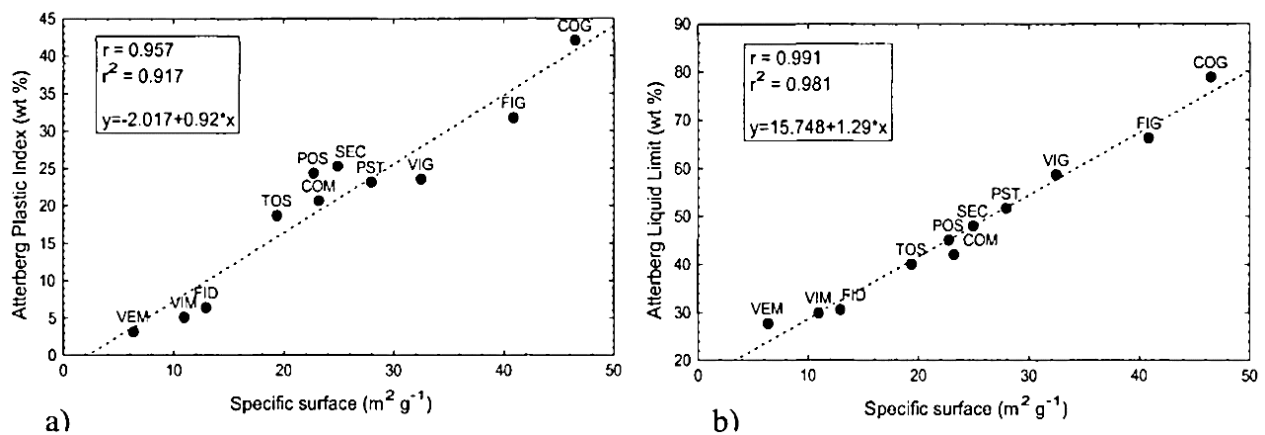


Figure I.18 Corrélation entre les valeurs de surface spécifique et (a) la limite de plasticité et (b) la limite de liquidité. ⁵⁴

I.5.2 Caractéristiques structurales

La caractérisation structurale des minéraux argileux constitue une étape cruciale dans la sélection des matières premières pour les applications industrielles. ⁵⁵ Diverses techniques analytiques sont employées pour obtenir des informations minéralogiques et cristallographiques détaillées, incluant la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), la spectroscopie UV-visible, et la résonance magnétique nucléaire (RMN).

- **Diffraction des rayons X :**

La diffraction des rayons X s'impose comme une méthode incontournable dans l'analyse structurale des argiles. Différentes préparations d'échantillons permettent d'extraire des informations complémentaires : l'analyse du matériau brut (bulk) révèle la présence de phases argileuses et de minéraux accessoires, tandis que la préparation en lame orientée favorise l'identification des minéraux argileux en accentuant les réflexions (00ℓ). ⁵⁶

Des traitements spécifiques, tels que le chauffage à 550°C ou l'exposition à l'éthylène glycol, permettent de différencier les espèces minérales. Par exemple, la déstabilisation de la kaolinite à 550°C ou le gonflement caractéristique des smectites en présence d'éthylène glycol fournissent des informations diagnostiques précieuses. ⁵⁷

L'étude d'A. Bennour et al. ⁵⁸ illustre une approche intégrée, combinant l'analyse de la fraction grossière par préparation classique et celle de la fraction fine (<2 µm) par lame orientée, soumise à divers traitements (EG-Éthylène Glycol et H-Hydrazine). Cette méthodologie permet une évaluation complète de l'aptitude des argiles pour l'industrie céramique.

La diffraction des rayons X apporte également des informations sur la structure fine des minéraux argileux, notamment la kaolinite. P. Aparicio et E. Galan ⁵⁹ ont étudié différentes méthodes d'évaluation de la cristallinité de la kaolinite (indices de Hinckley, de Stoch, et de Hughes et Brown) sur huit kaolins d'ordres structuraux variés. Leurs travaux ont mis en évidence l'influence potentielle d'impuretés minérales sur ces indices de cristallinité.

Des études complémentaires, comme celle de N.M. Mestdagh et al. ⁶⁰ ont exploré l'impact de la teneur en fer total et sa distribution structurale sur la cristallinité de la kaolinite. Ces recherches ont révélé une relation inverse entre l'augmentation de la teneur en fer total et l'indice de cristallinité, soulignant la complexité des interactions entre composition chimique et structure cristalline dans les minéraux argileux.

- **Spectroscopie IRTF :**

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF) s'impose comme une méthode d'analyse fondamentale pour l'identification des minéraux argileux. Cette technique permet de différencier des polymorphes tels que la kaolinite et la dickite, qui, bien que chimiquement identiques, présentent des structures cristallines distinctes. Ces différences se manifestent notamment dans les bandes de vibration des liaisons OH. La présence de fer dans la structure des kaolinites peut également être détectée par IRTF, comme l'ont démontré T. Delineau et al. ⁶¹ Leurs travaux ont mis en évidence des bandes caractéristiques à 3598 et 875 cm⁻¹, attribuées respectivement aux vibrations de déformation des OH et aux vibrations de déformation dans l'environnement octaédrique du fer Fe⁺³.

- **Spectroscopie UV :**

La spectroscopie UV-Visible s'avère particulièrement utile pour l'identification et la quantification des oxyhydroxydes de fer, composés souvent présents en faible quantité et difficiles à caractériser par diffraction des rayons X ou spectroscopie infrarouge en raison de leur faible

cristallinité. Cette technique exploite les propriétés chromatiques des minéraux ferrifères, l'hématite produisant une couleur rouge foncé et la goethite une teinte ocre. Les spectres d'absorption des oxyhydroxydes de fer présentent des contributions spécifiques à diverses longueurs d'onde, correspondant à différentes transitions électroniques des atomes de fer. Les travaux de Scheinost et al. ⁶² ont permis, grâce à la réflexion diffuse par spectroscopie UV-Visible, de quantifier la présence d'hématite et de goethite dans 56 échantillons de sols.

- **Résonance magnétique nucléaire :**

La résonance magnétique nucléaire (RMN) apporte des informations précieuses sur l'environnement local des atomes de silicium (^{29}Si) et d'aluminium (^{27}Al) dans les minéraux argileux. Cette technique permet de distinguer les différents états de coordination de l'aluminium (Al^{VI} , Al^{V} , Al^{IV}) et leurs contributions respectives dans divers minéraux argileux. Par exemple, la kaolinite de structure T-O présente une contribution caractéristique de l'aluminium en environnement octaédrique. La déshydroxylation de la kaolinite en métakaolinite induit une transformation d'une partie des Al^{VI} en Al^{IV} et Al^{V} . Les micas, de structure T-O-T, montrent des contributions de l'aluminium en coordination tétraédrique et octaédrique. Le traitement thermique des micas provoque la formation d' Al^{V} et d' Al^{IV} au détriment des Al^{VI} .

I.5.3 Comportement en température

L'analyse thermique des minéraux argileux permet d'observer les transformations structurales en fonction de la température. Ces transformations se manifestent par des pertes de masse et des variations énergétiques caractéristiques. Typiquement, on observe :

1. Une perte de masse entre 25 et 120°C, correspondant au départ de l'eau libre.
2. Une perte de masse entre 120 et 200°C, liée au départ de l'eau physisorbée.
3. Une perte de masse entre 300 et 650°C, associée à un pic endothermique, caractéristique de la déshydroxylation (départ des groupements OH structuraux).

Dans le cas spécifique des argiles utilisées dans le domaine de la construction, riches en kaolinite, la transformation en métakaolinite (désordonnée et amorphe) est observée. La température de déshydroxylation peut varier en fonction de la cristallinité de la kaolinite et de la présence de défauts structuraux. À des températures plus élevées, une transformation de phase liée à la formation de mullite et un flux visqueux riche en silice est observée, influencés par la présence d'éléments comme Na_2O et K_2O qui abaissent la température de l'eutectique $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$. Cette approche multidimensionnelle de la caractérisation des argiles, intégrant analyses physico-

chimiques, structurales et thermiques, fournit une base solide pour optimiser l'utilisation de ces matériaux dans diverses applications industrielles et technologiques.

I.6 Stabilisation des sols

L'amélioration des propriétés géotechniques des sols constitue un domaine d'étude crucial en ingénierie civile et environnementale. Cette discipline englobe un ensemble de procédés visant à optimiser les caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et hydriques des terrains. Les objectifs principaux incluent la réduction de la porosité, la limitation des phénomènes de retrait-gonflement, l'augmentation de la cohésion, le renforcement de la résistance à l'érosion, l'imperméabilisation de surface, ainsi que l'amélioration des performances mécaniques en compression (sèche et humide), en traction et en cisaillement. Les techniques de stabilisation se répartissent en quatre catégories principales : mécanique, physique, chimique et thermique.

I.6.1 Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique repose sur le principe de densification par compactage. Ce procédé vise à réduire la porosité du sol, augmentant ainsi sa résistance mécanique. Cependant, les matériaux ainsi traités conservent une sensibilité à l'eau, ce qui peut compromettre leur stabilité à long terme. Par conséquent, le compactage est fréquemment associé à d'autres méthodes de stabilisation, notamment chimiques.

I.6.1.1. Mode de compactage

L'efficacité du compactage mécanique dépend de trois paramètres fondamentaux : le mode opératoire, l'énergie appliquée et la granulométrie du sol. Quatre principales méthodes de compression sont identifiées : statique, dynamique par vibration, dynamique par impact et par pétrissage. Chacune correspond à un mode de production ou de mise en œuvre spécifique du matériau terreux.⁶³ Les recherches ont démontré que le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance supérieure d'environ 50% par rapport à la vibro-compression et de 20% par rapport à la compression statique.⁶⁴

I.6.1.2. Contrainte de compactage

La contrainte de compactage joue un rôle crucial dans la détermination des propriétés finales du matériau. Les travaux de Guettala et al.⁶⁵ ont mis en évidence une augmentation des résistances mécaniques en fonction de la contrainte de compactage, avec un optimum identifié à 17,5 MPa, au-delà duquel une diminution des performances est observée.

I.6.1.3. Influence de la teneur en eau sur la densité

Cette méthode implique l'application de forces compressives importantes sur le sol. L'efficacité de ce processus dépend crucialement de la teneur en eau optimale (TEO), déterminée par l'essai Proctor. Une TEO adéquate permet aux minéraux argileux de se réorganiser en structures parallèles plus denses et ordonnées sous l'effet des forces de compactage, résultant en une cohésion accrue et une résistance à la compression améliorée. L'influence de la teneur en eau sur la densité du sol compacté est un paramètre prépondérant. ⁶⁶ La relation entre ces deux variables suit une courbe caractéristique, avec un pic de densité maximale correspondant à une teneur en eau optimale. Un sol trop sec engendre des frictions importantes entre les particules, tandis qu'un sol trop humide voit une partie significative de l'énergie de compactage absorbée par l'eau, réduisant ainsi l'efficacité du processus.

I.6.2 Stabilisation physique

La stabilisation physique s'articule autour de deux approches principales :

- **Modification granulométrique :** Cette méthode vise à optimiser la distribution des tailles de particules avant compactage. Une granulométrie diversifiée permet de minimiser les vides interstitiels, réduisant ainsi les points de faiblesse structurelle.

Les normes techniques, telles que le diagramme de plasticité (XP P 13-901), fournissent des directives pour la composition idéale en graviers, sables, limons et argiles dans la production de matériaux de construction en terre. ⁶⁷ L'ajustement granulométrique peut être réalisé par l'incorporation de sable pour réduire la plasticité excessive, ou de fines pour augmenter la cohésion des sols trop peu plastiques.

- **L'ajout de fibres végétales aux terres argileuses,** renforçant la structure du matériau et limitant la fissuration lors du retrait de séchage.

Les études d'Izemmouren et Guettala ⁶⁸ ont exploré l'impact de la teneur en sable sur la durabilité des briques de terre comprimée. Leurs résultats indiquent une amélioration des résistances mécaniques à l'état sec et humide proportionnelle à l'augmentation du taux de sable. Néanmoins, la teneur en sable n'a pas montré d'effet significatif sur l'absorption totale d'eau.

I.6.3 Stabilisation chimique

Cette méthode implique l'incorporation d'additifs qui modifient les propriétés physico-chimiques du sol. Les stabilisants les plus couramment utilisés sont :

I.6.3.1. Stabilisation au ciment

Particulièrement efficace pour les sols sableux, il crée des liaisons irréversibles entre les particules grossières, améliorant significativement la résistance à l'eau et la compression. Cependant, son efficacité est limitée dans les sols à forte teneur en matière organique ou en sels. ⁶⁹

I.6.3.2. Stabilisation à la chaux

Particulièrement adaptée aux sols argileux, elle induit une floculation des particules d'argile. Les ions calcium de la chaux s'échangent avec les ions métalliques des argiles, créant des liaisons robustes comparables à celles du ciment. La teneur optimale en chaux varie généralement entre 6% et 12%, selon les caractéristiques spécifiques du sol. On distingue deux types principaux de chaux : la chaux vive, très réactive mais délicate à manipuler, et la chaux éteinte (ou hydratée), plus couramment utilisée en stabilisation. ⁷⁰

I.6.3.3. Stabilisation au bitume

Utilisé pour imperméabiliser les particules d'argile en les enrobant d'un film hydrophobe. Cette méthode limite les variations volumétriques indésirables dues à l'absorption d'eau. Le bitume peut être appliqué sous forme chauffée, fluidifiée par des solvants, ou en émulsion aqueuse. ⁷¹

La stabilisation des sols au ciment et à la chaux représente une approche efficace pour améliorer les propriétés géotechniques des matériaux terreux. La compréhension approfondie des mécanismes physico-chimiques impliqués et l'optimisation des formulations en fonction des caractéristiques spécifiques des sols traités sont essentielles pour maximiser l'efficacité de ces traitements dans les applications de génie civil et de construction durable.

I.6.4 Stabilisation thermique

Cette méthode implique l'exposition du matériau à des températures élevées (1000-1500°C), induisant des transformations physico-chimiques profondes. Deux processus distincts peuvent être observés: ⁷²

I.6.4.1. Formation d'une phase liquide

Caractéristique des terres cuites, ce processus implique une déshydratation progressive, suivie d'une réorganisation structurelle et d'une vitrification partielle. La température et la durée du traitement influencent le degré de vitrification et les propriétés finales du matériau.

I.6.4.2. Absence de formation de phase liquide

Ce procédé, réalisé à haute température, provoque la soudure des particules fines sans fusion complète. Il en résulte une réduction de la porosité, une augmentation de la densité et une amélioration significative des propriétés mécaniques et physiques du matériau.

L'efficacité de ces techniques de stabilisation dépend de multiples facteurs, incluant la nature minéralogique du sol, sa granulométrie initiale, et les conditions environnementales. Une approche intégrée, combinant potentiellement plusieurs méthodes, est souvent nécessaire pour atteindre les performances souhaitées tout en optimisant l'utilisation des ressources et en minimisant l'impact environnemental.

I.6.5 Stabilisation par les fibres

I.6.5.1. Effet des fibres sur les propriétés des sols

L'utilisation de fibres pour l'amélioration des propriétés géotechniques des sols représente une technique ancestrale dont les origines remontent à plusieurs millénaires. Cette approche, inspirée des processus naturels de stabilisation du sol par les systèmes racinaires, a été adoptée et perfectionnée par diverses civilisations antiques, notamment les Mésopotamiens et les Romains, qui ont découvert l'efficacité de l'incorporation de poudre de calcaire ou de calcium dans la construction de voies de circulation. ⁷³

L'évolution historique de cette méthode a conduit à son application dans des ouvrages monumentaux, tels que la Grande Muraille de Chine, où l'utilisation de branches d'arbres comme renfort structurel a significativement amélioré la résistance à la traction de l'ouvrage. Cette pratique s'est perpétuée et affinée au fil des siècles, culminant avec les travaux de Vidal qui, à l'époque contemporaine, a formalisé et développé scientifiquement la technique de stabilisation des sols par fibres, démontrant son efficacité pour améliorer la résistance au cisaillement des matériaux terreux. ⁷⁴

I.6.5.2. Effet des fibres sur l'absorption d'eau

Concernant l'absorption d'eau, les fibres végétales présentent généralement un comportement hydrophile, contrairement à certaines fibres synthétiques comme le polypropylène qui sont hydrophobes. Cette caractéristique des fibres végétales peut constituer un défi pour leur utilisation dans les matériaux terreux. Les études de Sallehan et Yaacob sur les fibres de palmier dattier, ⁷⁵ ainsi que celles de Ravishankar et al. sur les fibres de coco, ⁷⁶ ont confirmé une corrélation

positive entre le taux d'incorporation des fibres et l'augmentation de l'absorption d'eau du matériau composite.

I.6.5.3. Influence des fibres sur les résistances mécaniques

Les recherches actuelles sur l'incorporation de fibres dans les briques de terre ont mis en évidence plusieurs avantages significatifs: ^{77, 78}

1. Réduction de la fissuration : L'ajout de fibres naturelles diminue la propagation des fissures dues au retrait, améliorant ainsi la durabilité et la résistance à la traction du matériau.
2. Amélioration des propriétés mécaniques : Les études menées par Millogo sur l'utilisation de fibres d'hibiscus cannabinus (kénaf) dans les sols latéritiques ont démontré une amélioration notable des caractéristiques physiques et mécaniques des BTC. L'incorporation de fibres, dans des proportions de 0,2 à 0,8% en poids et des longueurs de 30 à 60 mm, a révélé des effets bénéfiques sur la résistance à la flexion, attribués à la haute résistance à la traction des fibres et à leur bonne adhérence à la matrice argileuse.
3. Résistance sismique : Les travaux de Verglas et al. ont mis en lumière l'amélioration de la résistance sismique de la maçonnerie par l'ajout de fibres de paille (0,5 à 8% en poids, longueur de 100 mm). Cette amélioration est attribuée à l'action de "couture" des fibres à l'interface BTC-mortier, limitant l'apparition de microfissures lors du retrait de séchage.

I.6.5.4. Propriétés des adobes renforcés par des fibres naturelles

Dans le domaine des adobes renforcés par des fibres naturelles, les recherches ont mis en évidence plusieurs effets bénéfiques :

1. Amélioration de la résistance en traction et en flexion.
2. Augmentation de la ductilité, permettant des déformations importantes sans rupture fragile.
3. Réduction de la fissuration au séchage grâce à une répartition homogène des fibres dans le volume du matériau.
4. Diminution de la densité et amélioration des propriétés thermiques.

Cependant, les résultats des études sur l'adobe utilisant divers types de fibres végétales présentent parfois des contradictions, soulignant la complexité des interactions entre les fibres et la matrice terreuse.

Les travaux de Ghavami et al. ⁷⁹ sur des sols renforcés par des fibres de sisal et de noix de coco ont apporté des éclaircissements sur le mécanisme de renforcement. Ils ont observé que,

contrairement aux sols non renforcés qui subissent une rupture rapide et brutale, les sols renforcés démontrent une résistance accrue au-delà du point de rupture initial. Ce phénomène est attribué au transfert efficace des contraintes internes de la matrice vers les fibres de renforcement, comme illustré dans la Figure I.19.

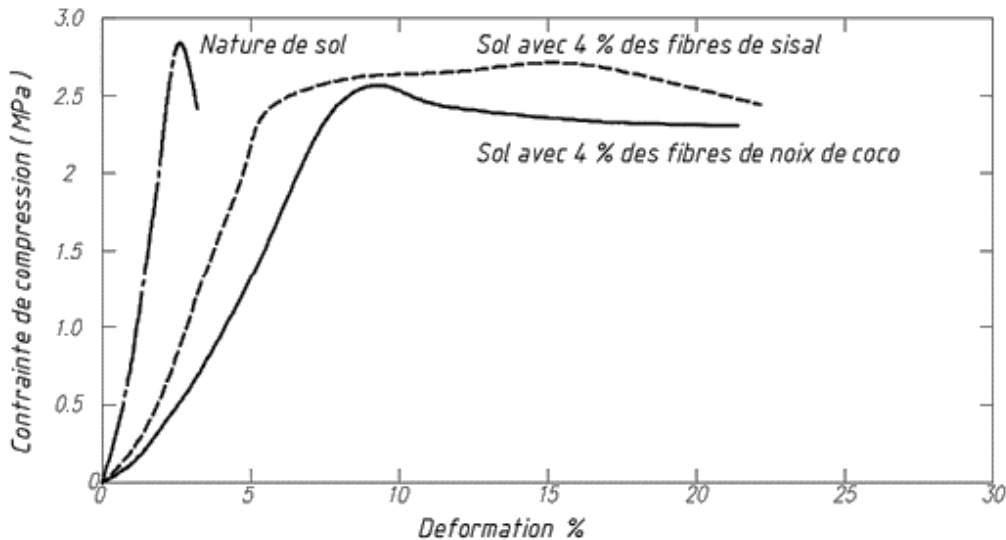


Figure I.19 Impact de 4% de fibre sur la corrélation contrainte-déformation du sol. ⁷⁹

Il est important de noter que l'efficacité du renforcement par fibres dépend de nombreux facteurs, incluant le type et la quantité de fibres, leur longueur, et leur compatibilité avec la matrice terreuse. Par exemple, les études de Yetgin et al. ⁴³ sur cinq types de sols stabilisés par de la paille ont révélé une diminution de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres de paille, soulignant la nécessité d'une optimisation minutieuse des formulations pour chaque application spécifique.

Ces avancées dans la compréhension et l'application des techniques de stabilisation par fibres ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement de matériaux de construction durables et performants, tout en s'inscrivant dans une continuité historique et une approche biomimétique de l'ingénierie des matériaux.

I.7 Applications des composites argileuse à base de fibres végétales

Ces recherches ne concernent que les fibres végétales et les interactions qu'elles ont avec des matériaux terreux. Il peut avoir des propriétés et une valeur différentes d'une fibre à l'autre. Ces fibres ont été principalement extraites des industries agricoles, des déchets végétaux ou des granulats. Les différentes fibres étudiées et extraites de plantes comprennent les fibres de palmier dattier, de jute, de banane, de coco, de canne à sucre, de chanvre et de sisal.

I.7.1. Fibres et leurs caractéristiques

- Fibre de palmier dattier

L'origine de ces fibres est le Moyen-Orient. Elle est extraite des palmiers. Les fibres de palmier dattier montrent plus de résistance par rapport aux autres fibres. Elle a un marché majeur au niveau mondial. Cette fibre est également utilisée pour l'industrie automobile, donc l'utilité de cette fibre est efficace. ^{80, 81}

- Fibre de jute

Les fibres de jute sont considérées comme l'une des fibres à coût élevé. Elle provient de l'Inde, du Bangladesh, de la Chine, etc. L'Inde est le plus grand producteur de jute. Le jute fibre, extrait de la tige de la plante de jute, a une résistance à la traction élevée. Cette fibre est un choix économique, de sorte qu'elle a été utilisée dans les industries textiles, les secteurs agricoles. ⁸²⁻⁸⁴

- Fibre de coco

Elle est originaire de l'Inde, du Sri Lanka. La fibre de coco est extraite de l'enveloppe extérieure de la noix de coco. Ces fibres montrent de bonnes propriétés physiques et chimiques. Elle est résistante à la conductivité thermique, ductile, durable et très résistante et elle est aussi économique. Ainsi, la fibre de coco peut être un meilleur additif complémentaire dans les matériaux de construction. ^{85, 86}

- Fibre de chanvre

La fibre de chanvre est obtenue à partir de la couche extérieure ou de la poitrine du Cannabis Sativa plant. Elle provient de l'Asie. Le chanvre fibre est utilisé pour les produits commerciaux et industriels. Elle est plus longue, plus résistante, plus absorbante et plus isolante. ⁸⁷

- Fibre de sisal

La fibre de sisal provient du Brésil, du Mexique, etc. Elle est extraite de la plante de sisal. La fibre de sisal est traditionnellement utilisée pour la corde, la ficelle, l'étude et le tissu. Elle est également utilisée comme renforcement de fibre pour le caoutchouc, les matériaux de ciment. La fibre de sisal a quelques bonnes propriétés lorsqu'elle est renforcée avec des matériaux en terre. ^{87, 88}

- Fibre de banane

La fibre est formée à partir de la tige est incroyablement durable. La fibre consiste en un tissu à paroi cellulaire épaisse, lié ensemble par des gommés naturelles et est spécialement composé

de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. La fibre de banane est comparable à la fibre de bambou naturelle, mais sa capacité de filage, sa finesse et sa résistance à la traction sont dites être meilleures. Les fibres de banane sont généralement lignocellulosiques, constituées de microfibrilles de cellulose enroulées hélicoïdalement dans une matrice amorphe de lignine et d'hémicelluloses.⁸⁹ La teneur en cellulose est un facteur déterminant pour les propriétés mécaniques ainsi que pour la fibre fibrillaire. Étant un matériau léger, sa densité moyenne est de 2400 kg/m³, la fibre de banane a été utilisée en Inde, au Brésil et en Indonésie.⁸⁹

- Fibre de canne à sucre

Les restes de la canne à sucre après l'extraction du jus sont connus sous le nom de bagasse de canne à sucre. Ils sont collectés dans des endroits locaux. C'est un sous-produit de l'industrie sucrière avec approximativement 32–34% de cellulose, 19–24% d'hémicellulose, 25–32% de lignine, 6–12% d'extractifs, et 2–6% de cendres. Ils utilisent ces fibres d'une longueur de 80 mm qui produisent une résistance optimale.^{85, 90}

I.7.2. brique de terre - Composition et fabrication

Le sol contient de l'argile, du gravier, du limon et du sable. Selon le pourcentage de ces quatre composants, le sol peut être classé comme argileux, sableux, graveleux et limoneux. En cas de stabilisation au ciment, la composition idéale des quatre composants peut être 20% d'argile, 15% de limon, 50% de sable et 15% de gravier. En cas de stabilisation à la chaux, la composition idéale des quatre composants peut être argile 35%, gravier 15%, limon 20%, et sable 30%.⁹¹

Il existe globalement six méthodes pour stabiliser la terre, à savoir la densification, le renforcement, la cimentation, le liaisonnement, l'imperméabilisation et l'étanchéifiassions.⁹¹ Dans les études examinées, toutes les méthodes permettant de stabiliser la terre ont été discutées.

La stabilisation au ciment est importante afin d'obtenir une résistance immédiate pour les sols sableux, comme indiqué dans l'étude de Bernardo. A. Lejano et al.⁹² Et ils ont préféré 3-8% de poids de sol pour la stabilisation. Alors qu'une autre étude par R. Abdeldjebar et al a fourni du ciment blanc comme stabilisant pour renforcer la fibre de palmier dattier avec 10% du poids du sol.⁸⁰ Entre-temps, une autre étude sur l'hygroscopicité du brique renforcé avec de la fibre de palmier dattier par bachirtallah et al, a prouvé que l'utilisation de liants et de bitume comme agent stabilisant améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau.⁹³ Et une autre étude par bachirtallah et al.⁸¹ affirme que la stabilisation peut être réalisée de trois manières différentes ; stabilisation mécanique, stabilisation physique et stabilisation chimique et elle indique également que pendant la condition de temps chaud, la stabilisation à la chaux est la plus efficace à réaliser.

Une autre étude par ching-lung Hwang et al. ⁹⁴ indique que parmi diverses fibres, les briques stabilisés à la chaux ont obtenu la résistance à la compression maximale avec 5% et 10% du poids des fibres de sol.

La technique de compression est le facteur clé pour la bonne résistance et l'état solide de la brique. Elle varie selon l'étude, R. Abdeld-jebbar et al. a utilisé une table vibrante pour enlever l'air à l'intérieur de la brique. ⁸⁰ Et une autre par Khiem Quang Tran et al. ⁹⁵ durci dans la chambre de 20° Celsius pour différents temps (7, 14, 28) jours.

La technique adoptée dans l'étude menée sur les briques de terres renforcées de fibres de banane utilisait des briques de terre compressée à l'aide de machines de compression. ⁸⁹ La compression des briques de terres renforcées de fibres de palmier a été réalisée par une presse manuelle fabriquée localement. ⁹⁶

Dans les études menées par Humphrey Danso et al, ⁸⁵ le brique a été fabriqué en utilisant la machine de fabrication de briques à jauge de pression. Tout d'abord, le rapport de mélange qui a été précédemment fait avec le contenu d'eau de mélange est pris et saupoudré sur le mélange de sol fibreux. Ensuite, il a été placé dans le moule et la pression constante a été appliquée et le brique a été fabriquée avec une machine de fabrication de briques BREPAC. ⁹⁷

I.7.3. Ajout des fibres pour améliorer les propriétés

La combinaison de fibres de chanvre et de sisal comme poutre composite fournit de bonnes propriétés mécaniques comme la résistance à la traction, la flexibilité et l'essai de flexion que le chanvre et les fibres de sisal ajoutées individuellement incluses dans l'étude de Manan shah et al. ⁸⁷

Mahjoub M. Salih et al indiquent que la densité de la brique de terre est directement proportionnelle aux paramètres de résistance. ⁹⁰ Les paramètres de résistance des briques de terre renforcés montrent de meilleurs résultats par rapport aux briques de terre non renforcées. ⁹⁰ Des tests de compression à sec et humide et des tests de résistance à la traction ont été effectués et la fibre de palmier dattier a été utilisée comme contenu fibreux. Selon la norme AFNOR standard XP P 13-901. ⁶³

Taalla et al. ⁸¹ ont effectué des tests. Il a été constaté qu'en augmentant la teneur en chaux et en prolongeant le durcissement (7 jours), les aspects de résistance ont été améliorés. Lorsque la fibre a été traitée avec 0,05% alcali, la résistance à la compression a montré une augmentation de 3,9% par rapport aux briques sans fibres. L'auteur a conclu que la valeur de résistance des fibres traitées à l'alcali est supérieure à celle des briques avec des fibres qui sont non traitées. ⁸¹

Saleem et al. ⁸³ ont utilisé le jute comme contenu fibreux et la résistance à la compression a été étudiée. Cette étude a révélé que la résistance à la compression des briques non cuites séchées au soleil est augmentée jusqu'à 2,75 fois (de 3 MPa à 8.25 MPa) en les compressant et en ajoutant 0,125% de fibres de jute avec 11% de contenu fibreux. ⁸³

Les tests de flexion, flexural et d'impact ont été effectués par Shah et al. ⁸⁷ selon les normes ASTM et les fibres de chanvre et de sisal ont été utilisées. Dans le composite chanvre-sisal, la fibre fournit de la résistance au composite tandis que l'ajout de fibre de sisal améliore la flexibilité du béton. ⁸⁷

Krishna et al. ⁸⁸ ont effectué des tests de traction (ASTM D638), de flexion (ASTM D790M) et d'impact (ASTM D256) pour cette étude. Le sisal, l'ananas, le palmier dattier et les fibres de verre ont été utilisés comme contenu. L'auteur a conclu que le composite renforcé de fibres de verre à la plus haute résistance à la traction et résistance à la flexion comparé au composite naturel, alors que le composite hybride composé de sisal et de fibre de pomme a un module élastique supérieur et une résistance à l'impact supérieure. ⁸⁸

La résistance à la compression, la résistance à la traction en termes de module de rupture ont été étudiées par Zardari et al. ⁹⁸ La résistance à la compression est réduite due à l'addition de fibre de jute, cela est dû à la fibre de jute placée de manière aléatoire qui a facilité l'échappement de l'eau pendant le processus de séchage laissant derrière des vides dans le sol. La densité du sol a diminué en raison de la présence de vides, puisque la résistance à la compression du sol dépend de la densité, qui a été réduite en raison de l'addition de la fibre.

Les briques de terre ont été étudiées pour leurs aspects de résistance lorsqu'ils ont été renforcés avec des fibres de plumes de poulet et des fibres de canne à sucre. ⁹⁰ Il a été observé que les aspects de résistance (à la fois en traction et en compression) des briques de terre ont montré une augmentation significative lorsque la longueur de la fibre a augmenté à un niveau optimal. La résistance à la compression et à la traction a montré de bons résultats lorsque la quantité de fibre était de 7% dans le cas de la fibre de plume de poulet et de 5% de fibre de canne à sucre lorsque la longueur de la fibre était limitée à 15 mm. ⁹⁰

Cette étude résume les études menées sur la performance des briques de terre lorsqu'ils sont renforcés avec des fibres végétales. Parmi les études examinées, il peut être conclu que la fibre de palmier dattier, la fibre de banane, la bagasse de canne à sucre, les fibres de jute améliorent les propriétés des briques de terre relativement. Ces fibres sont principalement utilisées en raison de leurs propriétés comportementales à la compression, à la résistance, à la durabilité, à la conductivité thermique, et plus important encore, leur adhésion au sol est bonne, utilisée et testée

dans la plupart des études. Parmi les études examinées, il a été constaté que le traitement des fibres avant utilisation est insuffisant, si cela est fait, les propriétés d'adhésion entre la fibre et le sol peuvent être significativement améliorées. Le rapport d'aspect de la fibre est un facteur majeur pour obtenir une résistance à la compression et à la traction optimale. Ces lacunes peuvent être comblées par de futures études pour faire de la brique de terre renforcée de fibres durables un matériau de construction fiable.

I.8 Conclusion

En conclusion, l'approche multidimensionnelle de caractérisation des argiles, combinant analyses physico-chimiques, structurales et thermiques, offre des perspectives précieuses pour l'optimisation de ces matériaux dans divers contextes industriels et technologiques. La compréhension approfondie des propriétés des argiles, ainsi que des mécanismes de stabilisation des sols par l'utilisation de ciment, de chaux ou de fibres, permet de maximiser l'efficacité des traitements géotechniques tout en minimisant l'impact environnemental. Les avancées récentes dans l'utilisation de fibres végétales renforcées offrent une alternative durable pour le développement de matériaux de construction, favorisant ainsi une approche plus respectueuse de l'environnement et des ressources naturelles.

Partie 01 : État de l’art

Chapitre II : Matière végétale

II.1 Introduction	39
II.2 Caractérisation des fibres végétales.....	39
II.2.1 Définition et classification des fibres végétales	39
II.2.2 Morphologie et descriptif de la fibre végétale	42
II.2.3 Structure et composition chimique de la cellule végétale	44
II.3 Méthodes d'extraction des fibres.....	47
II.3.1 Procédé mécanique.....	48
II.3.2 Procédé chimique.....	48
II.3.3 Procédé biologique	48
II.3.4 Procédé physique	49
II.4 Propriétés des fibres végétales.....	49
II.4.1 Propriétés mécaniques	50
II.4.2 Propriétés physiques	51
II.4.3 Propriétés chimiques.....	52
II.5 Traitements des fibres végétales.....	53
II.5.1 Méthodes chimiques.....	54
II.5.2 Méthodes physiques.....	55
II.6 Évaluation de la disponibilité des fibres végétales	55
II.7 Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	57
II.8 L'importance des fibres végétales dans les briques de terre	58
II.9 Conclusion	61

II.1 Introduction

L'incorporation de fibres comme agent de renforcement dans les polymères a débuté au début du 20^{ème} siècle, avec l'utilisation initiale de fibres de verre dans les résines phénoliques. Cette technologie s'est développée dans les années 1940 pour inclure le renforcement du polyester, trouvant des applications dans divers secteurs industriels tels que l'emballage, l'électronique et l'aéronautique. Cependant, les composites à base de fibres minérales, comme le verre, le mica ou le talc, présentent des inconvénients environnementaux du fait de leur dégradation lente. Cette problématique a conduit à l'émergence de fibres naturelles, caractérisées par leur biodégradabilité et leurs avantages économiques et mécaniques.⁹⁹ L'utilisation des fibres végétales (FV) comme matériau de base remonte à des civilisations anciennes, comme en témoigne l'usage de la paille pour renforcer l'argile dans la construction de murs en Égypte il y a 3000 ans. La prise de conscience environnementale contemporaine a ravivé l'intérêt de la communauté scientifique pour ces matériaux, en réponse à la nécessité de préserver les ressources pétrolières. Depuis la seconde moitié du XXe siècle, les FV ont connu un regain d'utilisation dans divers secteurs industriels.¹⁰⁰

La stabilisation des sols grâce à l'ajout de fibres est une technique largement utilisée dans le domaine de la construction en terre dans le monde entier. Ces fibres sont principalement utilisées pour la fabrication de blocs moulés par pétrissage, à partir de sols souvent argileux présentant un retrait important. La production artisanale de briques en adobe stabilisées à l'aide de paille est couramment pratiquée, mais l'emploi de fibres dans des techniques comme le torchis, la terre-paille, la bauge, ainsi que dans les blocs comprimés et le pisé, est également bien connu.¹⁰¹ En ce qui concerne les fibres synthétiques, celles-ci sont généralement exploitées pour renforcer les sols, améliorant ainsi leur résistance à la compression et au cisaillement.¹⁰²

Dans ce chapitre, nous examinerons les principales fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites, en général, ainsi que les briques à base de terre renforcées par fibres, en particulier pour le renforcement des sols.

II.2 Caractérisation des fibres végétales

II.2.1 Définition et classification des fibres végétales

Les fibres végétales, extraites de plantes cultivées telles que le coton, le lin et le bambou, représentent une ressource naturelle exploitée par l'humanité depuis l'aube de la civilisation. Ces matériaux biologiques ont joué un rôle crucial dans le développement de technologies essentielles, allant des vêtements aux outils.¹⁰³

L'utilisation de composites bois/plastique (CBP) s'est développée à partir des années 1970, d'abord en Italie, puis en Amérique du Nord dans les années 1990, avant de s'étendre à l'Inde, au Japon et à la Chine au début du 21^{ème} siècle. Une analyse graphique (Figure II.1) montre une croissance significative de la production de CBP entre 2000 et 2010 dans plusieurs régions du monde. ¹⁰⁴ Les fibres cellulosiques, notamment le bois, possèdent une densité inférieure à celle des fibres synthétiques, ce qui leur confère une résistance à la rupture et une rigidité relative élevées. Leur biodégradabilité les rend particulièrement attractives pour diverses applications industrielles.

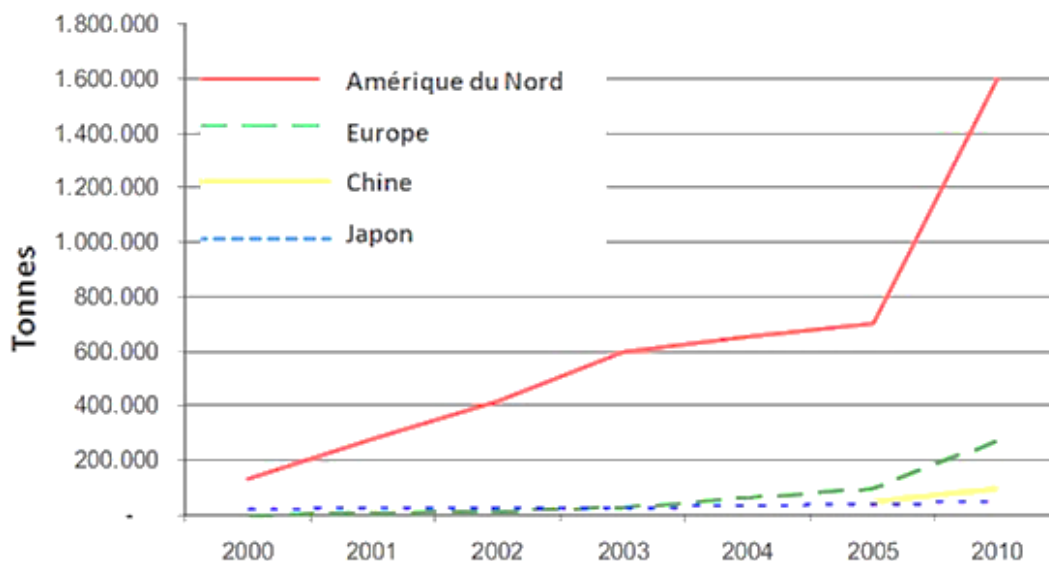


Figure II.1 Évaluation du processus de fabrication des agrocomposites entre 2000 et 2010. ¹⁰⁵

L'intérêt croissant pour les fibres végétales comme renfort dans les matériaux composites s'inscrit dans un contexte de prise de conscience écologique et économique. Ces fibres présentent des avantages environnementaux considérables par rapport aux fibres synthétiques : elles sont recyclables, renouvelables, et leur production a un impact carbone faible et une consommation énergétique réduite. ¹⁰⁶ Les fibres végétales offrent également des solutions aux problèmes de poussière et d'abrasion associés aux fibres de verre, tout en étant économiquement avantageuses. Leur polyvalence permet leur intégration dans divers domaines tels que la plasturgie, l'automobile, le bâtiment, le sport, le secteur médical, l'aérospatial et l'aéronautique. ¹⁰⁷

La composition des fibres végétales, principalement constituées d'hémicellulose, de lignine et de cellulose, varie considérablement selon l'âge, les organes et l'espèce de la plante. Cette variabilité nécessite une compréhension approfondie de leur structure et de leurs propriétés pour leur utilisation comme alternative aux composés pétroliers. ¹⁰⁸

La classification des fibres naturelles s'effectue selon leur origine : animale, minérale ou végétale. Les fibres végétales, également connues sous le nom de fibres lignocellulosiques en raison de leur composition principale (cellulose, hémicellulose et lignine), se subdivisent en fibres de bois et fibres non ligneuses. Les fibres de bois se distinguent par une teneur en lignine plus élevée et se répartissent en fibres de bois tendre (conifères) et de bois dur (feuillus). Les fibres non ligneuses englobent quatre catégories principales : fibres libériennes, de graines, de feuilles, et de tiges. ¹⁰⁹

Origine naturelle	Animal	Du type poil	<ul style="list-style-type: none"> • Laine (mouton) • Mohair (chèvre) • Cachemire (chèvre) 	<ul style="list-style-type: none"> • Alpaga (lama) • Chameau • Angora (lapin)
		Du type sécrétion	<ul style="list-style-type: none"> • Soie (chenille Bombyx) • Tussah (autre chenille) 	
	Végétal (extrait)	Graines	<ul style="list-style-type: none"> • Coton 	
		Tiges	<ul style="list-style-type: none"> • Lin, Ramie, Chanvre, Jute 	
		Feuilles	<ul style="list-style-type: none"> • Sisal, Raphia 	
		Fruits	<ul style="list-style-type: none"> • Coco, Kapok 	
		Sève	<ul style="list-style-type: none"> • Caoutchouc naturel 	
	Minéral	Fibres naturelles	<ul style="list-style-type: none"> • Amiante 	
		Matériaux filables	<ul style="list-style-type: none"> • Verre, Métal 	
Origine chimique	Artificiel	Cellulose régénérée (issue de fibres végétales)	<ul style="list-style-type: none"> • Acétate, • Triacétate • Viscose 	<ul style="list-style-type: none"> • Cupro • Modal • Lyocell
	Synthétique	Produits pétroliers transformés	<ul style="list-style-type: none"> • Polyamide, • Polyester, • Aramide, • Acrylique, • Modacrylique, 	<ul style="list-style-type: none"> • Chlorofibre, • Polyéthylène, • Polypropylène, • Élasthanne

Tableau II.1 Classification des fibres par famille

La classification des fibres végétales s'effectue selon leur origine anatomique, comme les tiges, les feuilles, les graines ou les fruits. Cette catégorisation est fondamentale pour comprendre leurs propriétés mécaniques, notamment leur rigidité et leur résistance à la traction, paramètres cruciaux pour les applications en ingénierie. Cette classification se fait selon trois critères principaux : ¹¹⁰

1. L'origine : tige (chanvre, lin), graines (coton), feuilles (sisal), fruits (coir), ou bois.
2. La longueur : dépendant de la méthode d'extraction, avec des fibres longues (>120-150 mm) issues principalement de feuilles et de tiges, et des fibres courtes (20-60 mm) comme le coton.
3. Les propriétés fonctionnelles : distinguant les fibres souples à faible teneur en lignine (coton, chanvre) des fibres plus rigides à forte teneur en lignine (bois, sisal).

L'utilisation des fibres végétales, abondantes dans la nature, s'est étendue à de multiples secteurs industriels. La production mondiale annuelle de fibres végétales, issues du bois et d'autres sources, est considérable. Une analyse économique (Figure II.2), montre que le prix des fibres végétales est nettement inférieur à celui des fibres synthétiques, avec des variations significatives selon le type de fibre. Par exemple, les fibres de palmier dattier sont environ 60 fois moins coûteuses que les fibres de chanvre, illustrant l'impact des volumes de production sur les prix du marché.

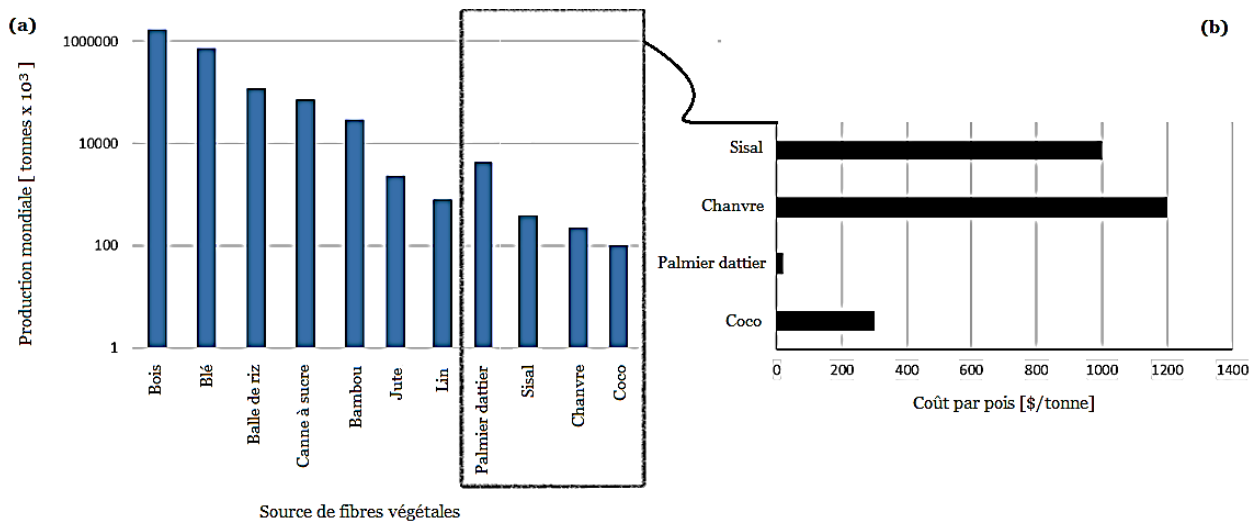


Figure II.2 (a) Production annuelle de FV. (b) Prix des produits FV sélectionnés. ¹¹⁰

II.2.2 Morphologie et descriptif de la fibre végétale

L'analyse morphologique des fibres végétales revêt une importance capitale pour la compréhension des mécanismes de transfert de contraintes aux interfaces fibre-matrice dans les

composites. La morphologie des fibres végétales présente une hétérogénéité significative, influencée par des facteurs tels que l'origine botanique, le stade de développement et les conditions environnementales de croissance. Cette variabilité se manifeste notamment dans les dimensions des fibres, avec des fluctuations importantes du diamètre observable le long d'une même fibre. ¹¹¹

Du point de vue biochimique et structural, les fibres végétales se divisent en deux catégories principales. La première, de type xylane, se caractérise par un angle microfibrillaire élevé et une forte teneur en lignine et en xylane. La seconde, de type gélatineux, comme le lin et le chanvre, se distingue par une richesse en polymères à base de galactose et une teneur élevée en cellulose, pouvant atteindre 85%. ¹¹²

La structure des fibres végétales (Figure II.3-b) est comparable à un empilement de couches composites. Elle comprend une paroi primaire et une paroi secondaire, cette dernière étant constituée de trois couches distinctes (S_1 , S_2 , S_3). La couche S_2 , la plus épaisse, détermine largement le comportement mécanique de la fibre. Cette structure multicouche confère une anisotropie au matériau. Dans la plante, les fibres sont généralement regroupées en faisceaux, formant des structures polygonales. Les parois primaire et secondaire contiennent un cadre de microfibrilles de cellulose enrobé d'une matrice d'hémicellulose et de lignine.

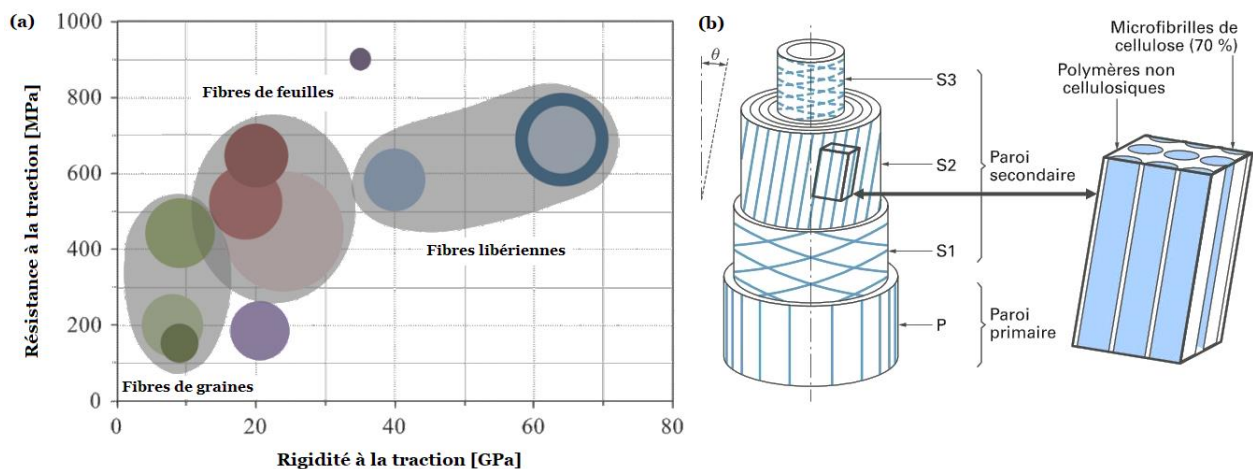


Figure II.3 (a) Propriétés de traction absolues de différentes séries de fibres ¹¹³

(b) Représentation schématique de la structure des fibres de lin et de chanvre.

Les propriétés mécaniques des fibres végétales sont influencées par leur teneur en cellulose et leur angle microfibrillaire. Un angle microfibrillaire faible, associé à une teneur élevée en cellulose, confère généralement un module d'élasticité élevé. ¹¹⁴ Cette organisation structurale complexe et multi-échelle des fibres végétales explique leur comportement mécanique anisotrope et leur potentiel en tant que renfort dans les matériaux composites. La compréhension approfondie

de ces caractéristiques morphologiques et structurales est essentielle pour optimiser l'utilisation des fibres végétales dans le développement de nouveaux matériaux biosourcés aux propriétés contrôlées. Cette analyse souligne l'importance croissante des fibres végétales dans le développement de matériaux composites durables et performants, répondant aux exigences environnementales et économiques actuelles.

II.2.3 Structure et composition chimique de la cellule végétale

Les composants structurels des fibres végétales, illustrés dans la Figure II.4, comprennent principalement la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les pectines, chacun jouant un rôle crucial dans les propriétés physicochimiques et mécaniques de ces matériaux biologiques.

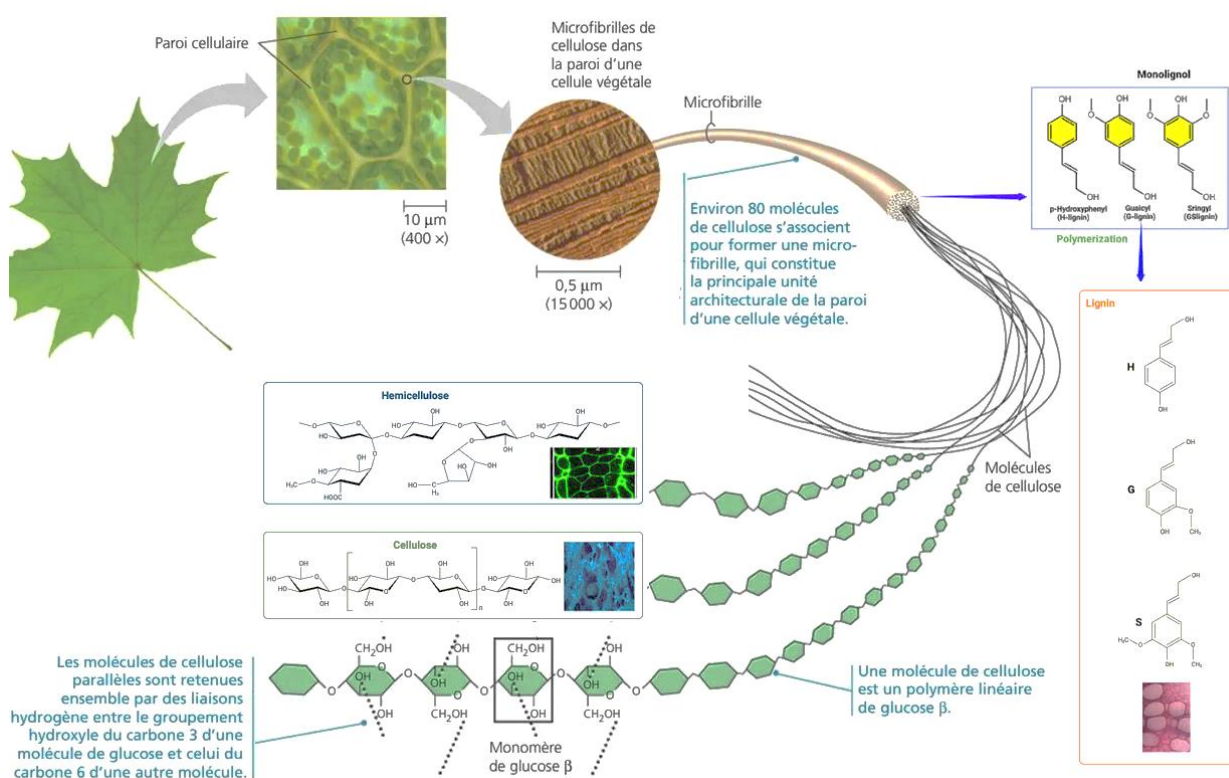


Figure II.4 Organisation des composants de la fibre dans la paroi cellulaire d'une fibre végétale typique.

II.2.3.1 cellulose

La cellulose, biopolymère le plus abondant sur Terre, se caractérise par sa structure linéaire composée d'unités de glucose anhydride liées par des liaisons β (1,4). Sa configuration moléculaire confère à la cellulose une disposition linéaire, avec un degré de polymérisation atteignant environ

10 000 pour la cellulose de bois.¹¹⁵ Cette macromolécule constitue l'élément structural principal des parois cellulaires végétales, formant des microfibrilles qui contribuent significativement à la résistance mécanique des fibres.

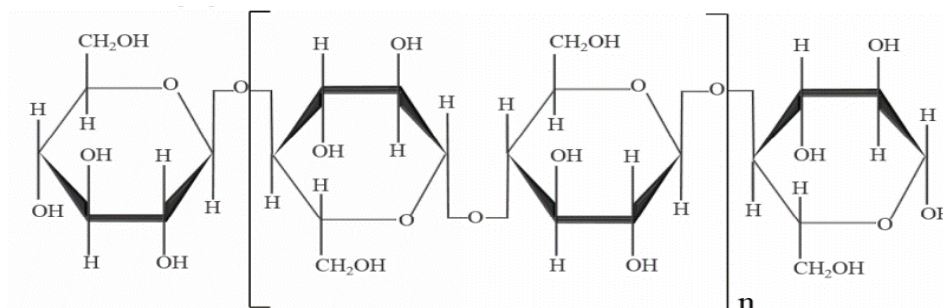


Figure II.5 Molécule de cellulose.¹¹⁵

II.2.3.2 Hémicellulose

L'hémicellulose, polymère naturel apparenté à la cellulose, se distingue par sa composition hétérogène en monomères de carbohydrates. Sa structure ramifiée et non cristalline lui confère une plus grande hygroscopicité que la cellulose. Le degré de polymérisation de l'hémicellulose dans le bois varie de 100 à 200, nettement inférieur à celui de la cellulose. La proportion d'hémicellulose diffère selon l'origine botanique, avec une teneur pouvant atteindre 40% dans certaines graminées, contre 25-35% dans les fibres ligneuses.¹¹⁵

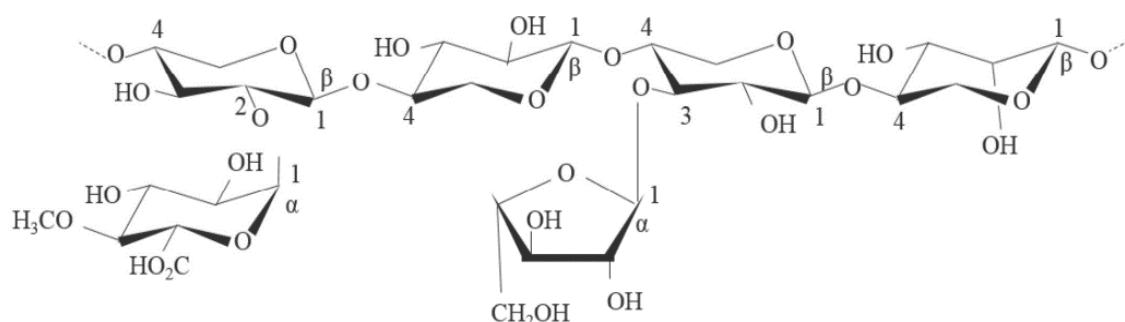


Figure II.6 Structure de l'hémicellulose.¹¹⁵

II.2.3.3 Lignine

La lignine, macromolécule extrêmement hétérogène, représente environ 30% du carbone organique de la biosphère. Contrairement à la cellulose et à l'hémicellulose, la lignine est totalement amorphe et joue un rôle crucial dans la cohésion des parois cellulaires. Sa structure

aromatique complexe dérive de trois précurseurs principaux : les alcools p-coumarylique, sinapylique et coniférylique. La teneur en lignine des fibres végétales varie considérablement, de 2% à 45%, influençant significativement leurs propriétés mécaniques et leur résistance à la dégradation biologique. ^{115 116}

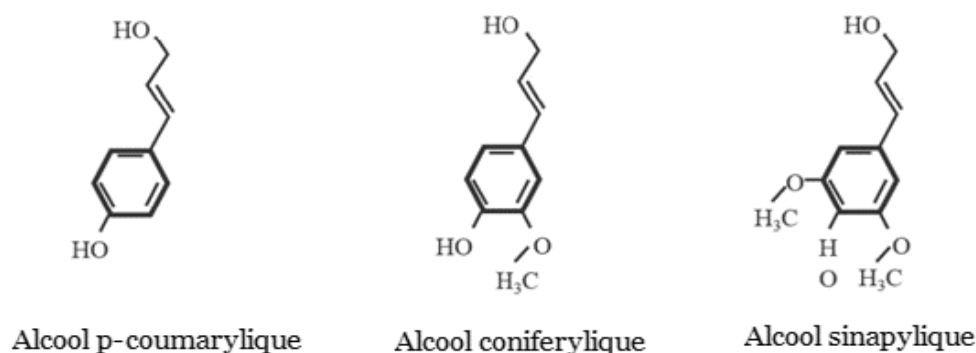


Figure II.7 Structure des précurseurs de la lignine. ¹¹⁵

II.2.3.4 Pectine

Les pectines, famille de polysaccharides complexes, jouent un rôle essentiel dans l'architecture de la paroi végétale. Leur structure principale consiste en un enchaînement d'unités d'acide α -D-galacturonique liées en α (1-4), interrompu par la présence d'unités de L-rhamnopyranose. Les pectines contiennent également des substituants non glucidiques, tels que le méthanol et l'acide acétique, qui influencent leurs propriétés physicochimiques, notamment leur capacité à former des gels. ¹¹⁷

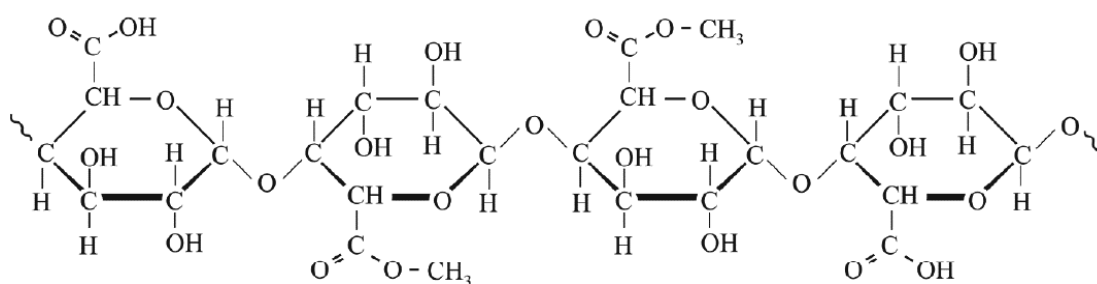


Figure II.8 Structure de la pectine. ¹¹⁵

II.2.3.5 Extractibles

Les substances extractibles, molécules de faible poids moléculaire présentes dans la structure poreuse du bois, représentent 2 à 5% de la masse sèche. Ces composés, généralement

solubles dans l'eau ou les solvants organiques, incluent des tanins, des pectines et divers composés organiques qui influencent les propriétés organoleptiques et la durabilité naturelle du bois. ¹¹⁸

Cette composition complexe et variable des fibres végétales explique leur diversité de propriétés et leur potentiel d'application dans de nombreux domaines industriels, de la construction aux biomatériaux avancés.

II.3 Méthodes d'extraction des fibres

L'extraction et le traitement des fibres végétales constituent un domaine de recherche en constante évolution, visant à optimiser l'obtention de matériaux fibreux à haute valeur ajoutée pour diverses applications industrielles. Les processus d'extraction se divisent en plusieurs catégories, chacune adaptée à la nature spécifique de la plante source et aux propriétés désirées des fibres finales. La littérature scientifique identifie quatre approches principales pour cette opération : mécanique, chimique, biologique et physique. Le choix de la méthode optimale dépend de multiples facteurs, notamment la nature et la maturité de la plante source, ainsi que l'organe végétal ciblé. Dans certains cas, une combinaison de ces techniques peut s'avérer nécessaire pour obtenir des résultats optimaux. ¹¹⁹



Figure II.9 Machine d'extraction de jute, la fibre de chanvre, le sisal, le hurde et la palme.

La recherche actuelle s'oriente vers l'optimisation de ces processus d'extraction, visant à améliorer la qualité des fibres tout en minimisant l'impact environnemental. Des études comparatives entre différentes méthodes d'extraction, comme celles menées par Kengkhetkit et al. ¹²⁰ Sur les feuilles d'ananas, mettent en lumière les avantages et inconvénients de chaque approche en termes de rendement, de qualité des fibres et d'efficacité énergétique.

II.3.1 Procédé mécanique

Le procédé mécanique peut être mis en œuvre manuellement ou par l'intermédiaire de dispositifs automatisés. La méthode manuelle implique l'utilisation d'outils rudimentaires tels que des lames et des peignes, précédée d'une étape de battage. L'approche mécanisée fait appel à des technologies plus sophistiquées, comme le pressage ou le laminage, ou une combinaison de ces techniques, visant à séparer efficacement les fibres tout en préservant leur intégrité structurelle. ¹²¹ Pour les fibres extraites des feuilles, telles que celles de l'ananas ou du sisal, des innovations récentes ont conduit au développement de machines spécialisées. Par exemple, Banik et al. ¹²² ont conçu un dispositif d'extraction pour les feuilles d'ananas intégrant des rouleaux d'alimentation, de grattage et de décortiquage. Cette approche mécanisée améliore significativement l'efficacité et le rendement de l'extraction par rapport aux méthodes manuelles traditionnelles.

II.3.2 Procédé chimique

Le traitement chimique repose sur l'utilisation de solutions alcalines ou acides diluées pour faciliter le processus de rouissage. L'introduction d'enzymes spécifiques peut catalyser la libération des fibres. L'hydroxyde de sodium (soude caustique) est fréquemment employé comme agent alcalin principal. Des acides faibles, tels que l'acide oxalique ou sulfurique, en association avec des agents tensioactifs, sont également utilisés. La composition précise de la solution de traitement influence significativement la qualité des fibres obtenues. ¹²³

Les méthodes d'extraction chimique offrent une alternative aux procédés mécaniques, particulièrement pour les fibres difficiles à extraire. Ces techniques impliquent généralement l'immersion des matières végétales dans des solutions alcalines ou acides sous conditions contrôlées de température et de durée. Par exemple, Ben Brahim et Ben Chikh ont développé un protocole d'extraction pour les fibres d'Alfa utilisant une solution de NaOH à température élevée, suivi d'un blanchiment. ¹²⁴

II.3.3 Procédé biologique

Le procédé biologique, ancré dans la tradition, exploite les mécanismes naturels de dégradation. Diverses méthodes sont employées, incluant le rouissage au champ, enzymatique, ou à l'eau (rouissage en étang). Ces techniques s'appuient sur l'activité de microorganismes environnementaux pour dégrader sélectivement les composés non cellulotiques. La durée du rouissage est variable, allant de quelques jours à plusieurs semaines, en fonction de l'espèce végétale et de la méthode employée. Bien que ces méthodes nécessitent généralement une durée de traitement plus longue, elles présentent l'avantage d'être écologiquement plus durables.

Des espèces bactériennes spécifiques, telles que *Bacillus* et *Clostridium*, ainsi que des champignons comme *Pusillus* et *Fusarium lateritium*, ont démontré une efficacité particulière dans l'élimination des substances non cellulosiques et la libération des fibres.¹²⁵ L'efficacité du rouissage peut être évaluée par des indicateurs visuels, tels que le changement de couleur des tiges, passant du vert-jaune au gris foncé, témoignant de l'activité microbienne.

II.3.4 Procédé physique

Le procédé physique emploie des méthodes non chimiques pour la séparation des fibres. Une technique particulièrement efficace consiste à utiliser la pression de vapeur pour provoquer des micro-éclatements au sein des cellules les plus fragiles. Ce processus, répété typiquement entre 8 et 11 fois, entraîne la rupture des lamelles moyennes, structures intercellulaires agissant comme liant. La séparation finale des fibres est généralement parachevée par un rinçage à l'eau courante. D'autres méthodes physiques innovantes, telles que l'utilisation d'ultrasons ou de micro-ondes, sont également en cours d'exploration et de développement.¹²⁶

Cette évolution constante des techniques d'extraction reflète l'importance croissante des fibres végétales dans le développement de matériaux composites écologiques et performants, ouvrant de nouvelles perspectives pour des applications industrielles diversifiées. Ces différentes approches d'extraction des fibres végétales font l'objet de recherches continues visant à optimiser leur efficacité, leur rendement et leur impact environnemental, dans le contexte d'une demande croissante pour des matériaux biosourcés dans divers secteurs industriels.

II.4 Propriétés des fibres végétales

Les fibres d'origine végétale présentent un ensemble de caractéristiques physico-chimiques et mécaniques qui en font des matériaux d'intérêt croissant pour diverses applications industrielles. Leur structure moléculaire, dominée par la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, confère à ces fibres des propriétés uniques, modulées par des paramètres tels que le degré de cristallinité, le facteur de forme, et l'orientation des chaînes polymériques.

Ces biomatériaux offrent plusieurs avantages comparatifs. Leur origine renouvelable et leur extractibilité relativement aisée en font des ressources abondantes et accessibles. Leur impact environnemental réduit, notamment en termes de consommation énergétique et d'émissions atmosphériques tout au long de leur cycle de vie, les positionne favorablement par rapport aux fibres synthétiques comme celles de carbone ou de verre.

II.4.1 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des fibres végétales, notamment leur résistance et leur module d'Young, sont fortement influencées par leur composition chimique, leur morphologie, et leur degré de polymérisation. Des corrélations ont été établies entre les dimensions cellulaires, la teneur en cellulose, et l'angle des microfibrilles, paramètres qui varient selon l'espèce, l'origine géographique, et les conditions de croissance. Du point de vue des performances mécaniques, certaines fibres végétales rivalisent avec les fibres de verre, bien que leurs propriétés varient significativement selon l'espèce botanique et l'organe d'origine. Leur faible densité, couplée à un coût de production compétitif.

La structure moléculaire de ces fibres, notamment la configuration cristalline de la cellulose, confère des propriétés mécaniques spécifiques. Le module d'élasticité des fibres végétales, évalué à environ 136 GPa, surpasse celui des fibres de verre.¹²⁷

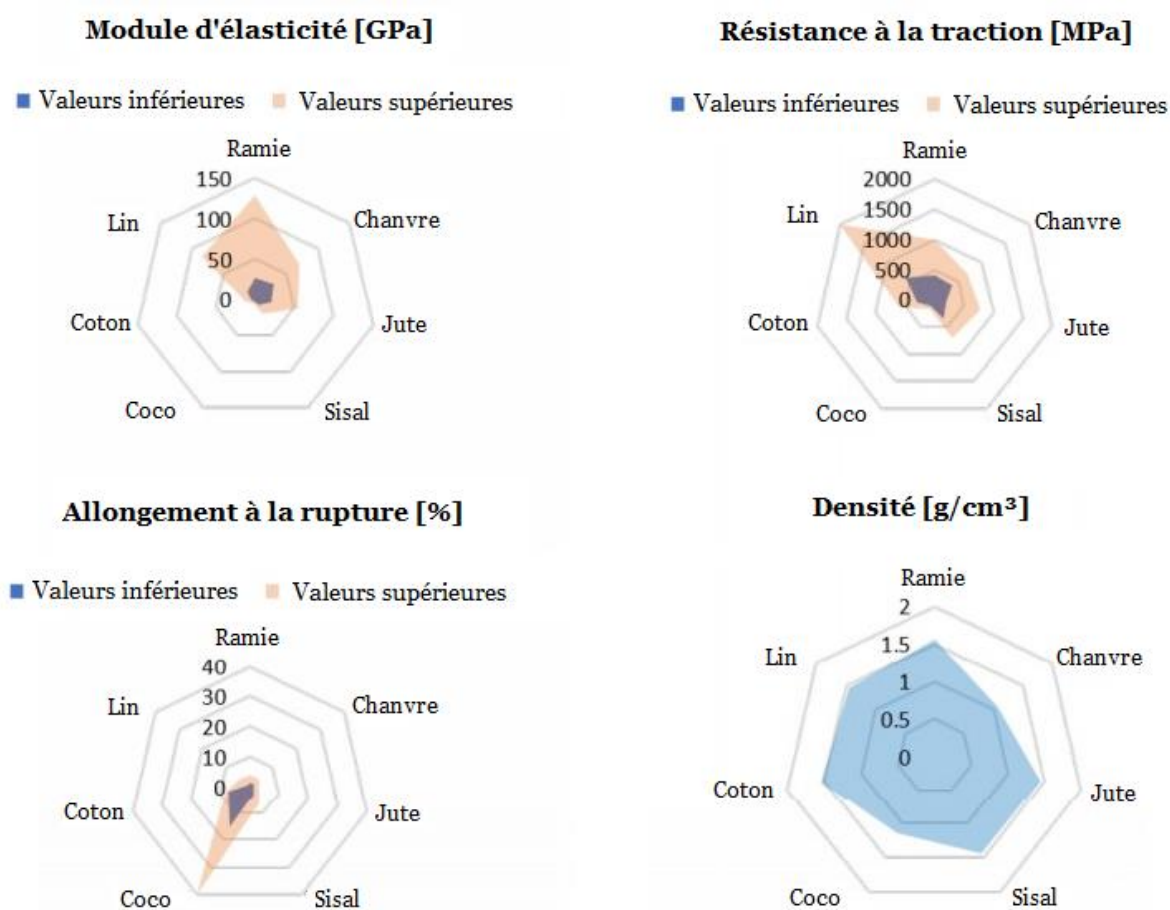


Figure II.10 Propriétés mécaniques moyennes de différentes fibres végétales.¹²⁸

L'orientation hélicoïdale des fibrilles de cellulose, quantifiée par l'angle microfibrillaire, influence significativement la rigidité de la fibre. Au niveau moléculaire, la cellulose, polymère linéaire de β -1,4-glucopyranose, forme des régions cristallines hautement ordonnées, entrecoupées de zones amorphes. Cette alternance confère aux fibres une combinaison unique de rigidité et de flexibilité. Les hémicelluloses, polysaccharides ramifiés, et la lignine, polymère phénolique tridimensionnel, forment une matrice qui lie les microfibrilles de cellulose, assurant ainsi la cohésion structurelle et influençant les propriétés mécaniques globales (Figure II.10). L'angle microfibrillaire, paramètre structural clé, décrit l'orientation des microfibrilles de cellulose par rapport à l'axe longitudinal de la fibre. Un angle faible correspond généralement à une rigidité accrue et une élongation réduite, tandis qu'un angle plus important favorise la flexibilité et l'extensibilité. Ce paramètre varie considérablement entre les espèces et même au sein d'une même plante, reflétant l'adaptation fonctionnelle des tissus végétaux.

II.4.2 Propriétés physiques

Un aspect crucial des fibres végétales réside dans leur nature hygroscopique. Cette caractéristique, particulièrement prononcée dans le bois, se manifeste par une instabilité dimensionnelle en présence d'humidité (%). L'eau, présente sous forme libre dans les cellules ou liée aux polymères structurels, joue un rôle de plastifiant. La teneur en humidité, exprimée par le rapport entre la masse d'eau et la masse anhydre, influence significativement les propriétés du matériau. ¹²⁹

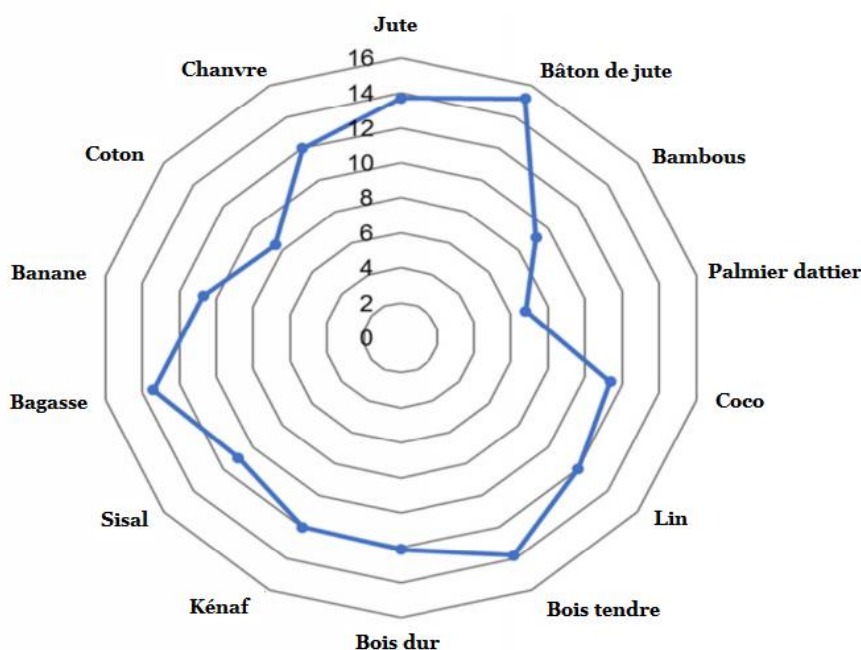


Figure II.11 Teneur en humidité de certaines fibres végétales sélectionnées. ¹³⁰

Les propriétés hygroscopiques des fibres végétales résultent de la présence de groupements hydroxyles dans leurs constituants, principalement la cellulose et les hémicelluloses. Ces groupes forment des liaisons hydrogène avec les molécules d'eau, entraînant des phénomènes de gonflement et de rétraction. La cinétique d'absorption et de désorption de l'humidité est gouvernée par des mécanismes de diffusion complexes, influencés par la structure poreuse des fibres et la disponibilité des sites de liaison.

Le processus de déshydratation des fibres s'effectue en deux phases : l'évaporation de l'eau libre suivie de celle de l'eau liée. Le point de saturation des fibres, atteint à environ 30% d'humidité, marque une transition importante dans les propriétés du matériau. La teneur en humidité à l'équilibre, comme illustré dans la Figure II.11, varie selon les espèces végétales, oscillant généralement entre 25 % et 35 %.

Le point de saturation des fibres (PSF) représente un seuil critique dans le comportement hygroscopique. Au-delà de ce point, l'eau additionnelle s'accumule dans les lumens cellulaires sans provoquer de gonflement supplémentaire. Ce phénomène a des implications significatives pour la stabilité dimensionnelle et les propriétés mécaniques des matériaux composites à base de fibres végétales.

Néanmoins, ces matériaux présentent certaines limitations. Leur nature hygroscopique induit des variations dimensionnelles et une altération des propriétés physico-mécaniques en présence d'humidité, ce qui peut compromettre la durabilité des composites. Leur sensibilité thermique, due à la dégradation des composants non cellulotiques à des températures relativement basses ($< 400^{\circ}\text{C}$), restreint leur plage d'utilisation. ¹³¹

II.4.3 Propriétés chimiques

La composition chimique des fibres végétales (Figure II.12) varie considérablement selon leur origine botanique. La teneur en cellulose oscille généralement entre 22% et 85%, tandis que les concentrations de lignine et d'hémicelluloses fluctuent respectivement de 7% à 24% et de 12% à 27%. Cette variabilité chimique impacte directement les propriétés physiques et mécaniques des fibres.

L'anisotropie prononcée des fibres végétales, résultant de leur structure orientée, se traduit par des propriétés mécaniques et physiques directionnelles. Cette caractéristique peut être exploitée avantageusement dans la conception de matériaux composites aux propriétés ajustables, mais requiert une compréhension approfondie des relations structure-propriétés pour optimiser les performances.

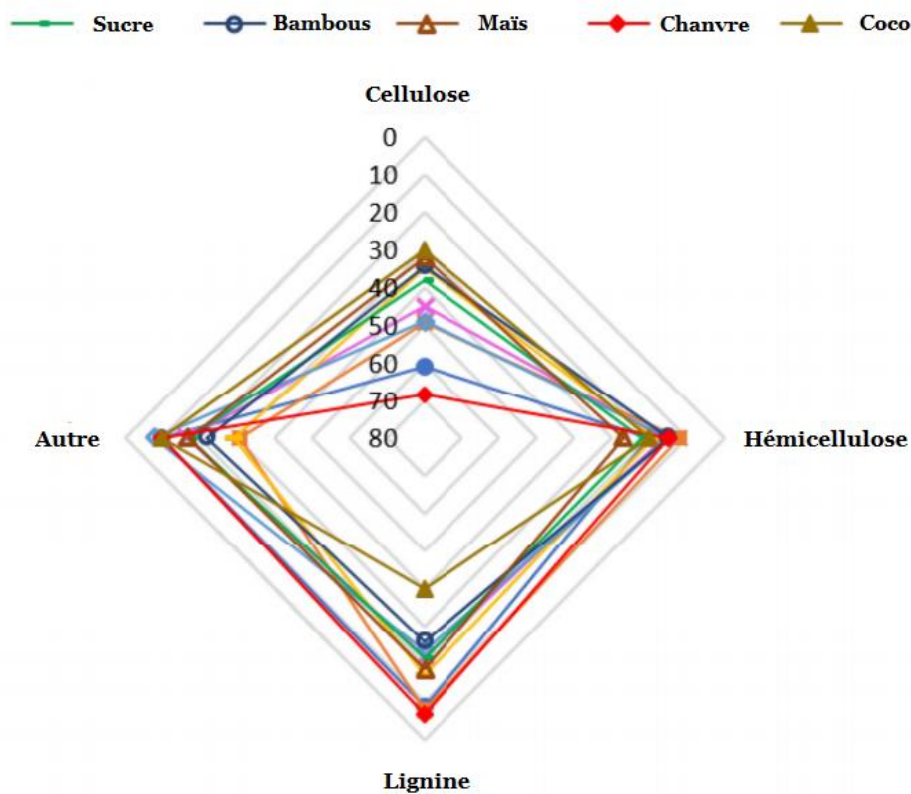


Figure II.12 Analyse chimique de certaines fibres végétales. ¹³²

La recherche actuelle s'oriente vers le développement de méthodes de modification chimique et physique des fibres végétales pour améliorer leur compatibilité avec diverses matrices polymériques et étendre leur gamme d'applications. Ces approches visent à moduler l'hydrophilie, la stabilité thermique et les propriétés interfaciales des fibres, ouvrant de nouvelles perspectives pour leur utilisation dans des secteurs technologiques avancés.

II.5 Traitements des fibres végétales

L'optimisation de l'interface fibre-matrice dans les composites à base de fibres végétales constitue un enjeu majeur pour l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques. La nature hydrophile des fibres naturelles, due à la présence de groupements hydroxyles issus principalement de l'hémicellulose et de la pectine, contraste avec le caractère hydrophobe des matrices polymériques couramment utilisées. Cette incompatibilité intrinsèque nécessite des stratégies de modification des fibres pour améliorer l'adhésion interfaciale et, par conséquent, les performances globales du composite. ¹³³

II.5.1 Méthodes chimiques

Les approches de modification des fibres peuvent être classées en trois catégories principales : les traitements de dissolution, les traitements par agents de couplage, et les traitements de revêtement. Chacune de ces méthodes vise à altérer la surface des fibres de manière spécifique pour optimiser leur compatibilité avec la matrice. ¹³⁴

Les traitements de dissolution, typiquement réalisés en milieu alcalin ou acide, visent à éliminer sélectivement les composants non cellulotiques de la surface des fibres. Le traitement à l'hydroxyde de sodium (NaOH) est particulièrement répandu dans cette catégorie. Son efficacité repose sur l'élimination partielle de la lignine, des hémicelluloses et des substances pectiques, ce qui conduit à une augmentation de la rugosité de surface et à une meilleure accessibilité des groupements réactifs de la cellulose. Ces modifications structurales favorisent l'ancrage mécanique et l'interaction chimique avec la matrice polymère, améliorant ainsi le transfert de charge à l'interface fibre-matrice. ¹³⁵

Les traitements de dissolution, notamment l'alcalinisation au NaOH, induisent des modifications structurales et chimiques significatives. Au niveau moléculaire, ce traitement provoque la rupture des liaisons hydrogène intra et intermoléculaires dans la structure lignocellulosique, entraînant une augmentation de la cristallinité de la cellulose et une réduction de l'angle microfibrillaire. Ces changements se traduisent par une amélioration des propriétés mécaniques intrinsèques des fibres, notamment leur résistance à la traction et leur module d'Young. La cinétique de ces transformations dépend de paramètres tels que la concentration en NaOH, la température et la durée du traitement, qui doivent être optimisés pour chaque type de fibre. Par exemple, des études ont montré qu'une concentration de 5% de NaOH pendant 1 heure est optimale pour les fibres de cactus d'*Opuntia ficus-indica*, ¹³⁶ tandis que les fibres de sisal nécessitent une concentration de 7% pour des résultats optimaux. ¹³⁷

Les agents de couplage, tels que les silanes, jouent un rôle crucial dans l'établissement de liaisons chimiques entre les fibres et la matrice. Ces molécules bifonctionnelles possèdent une extrémité réactive avec les groupements hydroxyles des fibres et une autre compatible avec la matrice polymère. Le traitement au silane implique généralement une réaction d'hydrolyse suivie d'une condensation, formant des liaisons covalentes stables à l'interface. La sélection du type de silane dépend de la nature de la matrice polymère, permettant une optimisation fine de l'interface pour des systèmes composites spécifiques. ¹³⁴

Les traitements de revêtement visent à modifier la surface des fibres pour la rendre plus hydrophobe, améliorant ainsi sa compatibilité avec les matrices polymériques. L'acétylation, par exemple, substitue les groupements hydroxyles par des groupes acétyles, réduisant l'hydrophilie des fibres et améliorant leur stabilité dimensionnelle. Ce processus modifie non seulement la chimie de surface mais aussi la topographie à l'échelle nanométrique, influençant ainsi les mécanismes d'adhésion mécanique. L'efficacité de l'acétylation est généralement quantifiée par le degré de substitution, qui peut être modulé en ajustant les paramètres de réaction tels que la concentration en anhydride acétique, la température et le temps de réaction. ¹³⁸

II.5.2 Méthodes physiques

Les méthodes physiques, comme les traitements Corona et Plasma, offrent des avantages uniques en termes de modification de surface. Le traitement Corona, basé sur une décharge électrique à pression atmosphérique, génère des espèces réactives qui oxydent la surface des fibres, créant ainsi des groupes fonctionnels polaires. ¹³⁹

Le traitement Plasma, réalisé sous vide partiel, permet une modification plus profonde et uniforme de la surface. Ces traitements peuvent augmenter l'énergie de surface des fibres, améliorant ainsi leur mouillabilité par la matrice polymère. ¹⁴⁰ Des études ont montré que des traitements Corona de courte durée (10-15 minutes) peuvent augmenter significativement la résistance à la traction et le module de Young des composites, par exemple de 32% et 13% respectivement pour des composites chanvre/polypropylène. ¹⁴¹ Les considérations environnementales et économiques jouent un rôle croissant dans le développement de nouvelles méthodes de traitement. Des approches innovantes, telles que l'utilisation d'enzymes pour la modification de surface ou l'emploi de solvants verts, émergent comme alternatives potentielles aux traitements chimiques conventionnels. Ces méthodes visent à réduire l'impact environnemental tout en maintenant ou améliorant l'efficacité des traitements.

II.6 Évaluation de la disponibilité des fibres végétales

L'évolution de la production mondiale de fibres végétales destinées à des applications industrielles au cours du premier quart du 21^{ème} siècle révèle, comme illustré dans la Figure II.13, une tendance à la hausse significative. Cette croissance, bien que non linéaire, témoigne d'un intérêt grandissant pour ces matériaux biosourcés dans divers secteurs industriels.

Une analyse quantitative de la production mondiale de fibres végétales, excluant le coton et le bois, sur la période 2001-2021, estime un volume annuel moyen de 6,2 millions de tonnes. Cette estimation englobe une diversité de fibres, dont la répartition est détaillée dans la Figure II.14. Il

est notable que le jute et ses fibres apparentées dominent ce secteur, représentant environ 51% de la production totale. Cette prédominance du jute se traduit par un impact socio-économique considérable, avec une industrie employant, directement et indirectement, près de 11 millions de personnes à l'échelle mondiale.

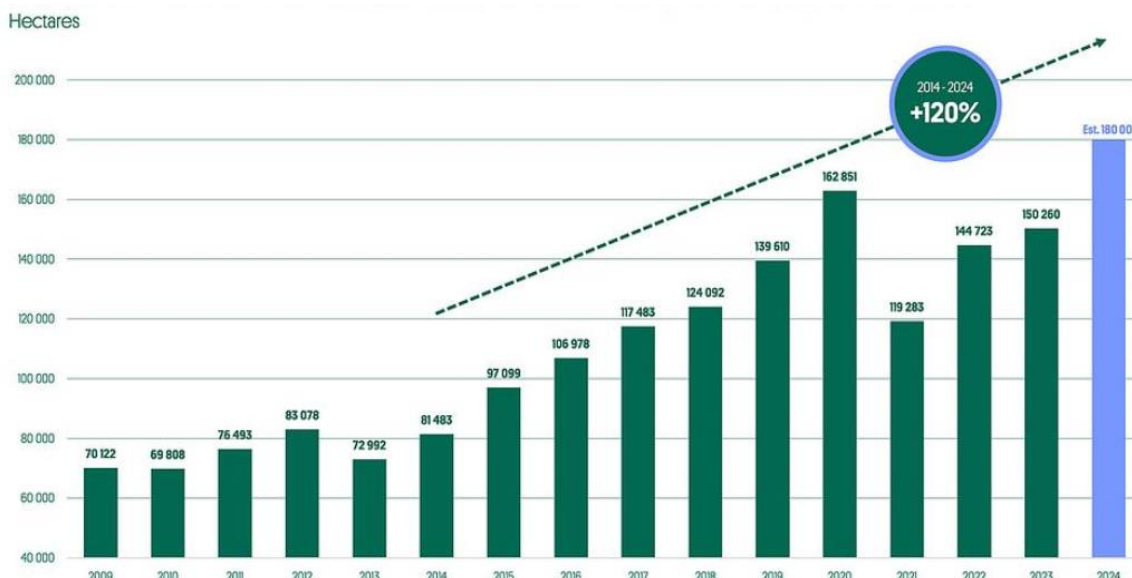


Figure II.13 Superficie cultivée en lin fibre (2009-2024). ¹⁴²

La hiérarchie des fibres végétales en termes de volumes de production place le coco et le lin en deuxième et troisième positions, contribuant respectivement à 16% et 13% de la production globale. Cette diversité de sources fibreuses s'étend à de nombreuses autres espèces végétales, offrant un potentiel d'extraction de fibres à partir de différentes parties anatomiques : tiges (chanvre, ramie, kenaf, bambou, ortie, miscanthus), feuilles (sisal, abaca) ou graines (kapok).

Une analyse de la répartition géographique de la production de fibres végétales révèle une concentration significative dans certaines régions du globe. Les nations asiatiques, notamment l'Inde et la Chine, ainsi que le Brésil en Amérique du Sud, se distinguent comme les principaux producteurs à l'échelle mondiale.

Dans le contexte spécifique du Maghreb, l'Algérie se démarque par un potentiel considérable en termes de biodiversité végétale exploitable pour la production de fibres. Les zones montagneuses, les hauts plateaux et les régions sahariennes abritent une flore diverse incluant des espèces telles que le chêne-liège, l'alfa, le Diss, le Doum, le palmier dattier, ainsi que diverses essences de pins, de cotonniers et de lin. La production annuelle de liège, estimée à environ 6000 tonnes, positionne l'Algérie au sixième rang mondial des producteurs de cette matière. ¹⁴⁴ Par

ailleurs, la culture de l'alfa s'étend sur approximativement 4 millions d'hectares, tandis que le pays abrite une population estimée à 10 millions de palmiers dattiers. ¹⁴⁵

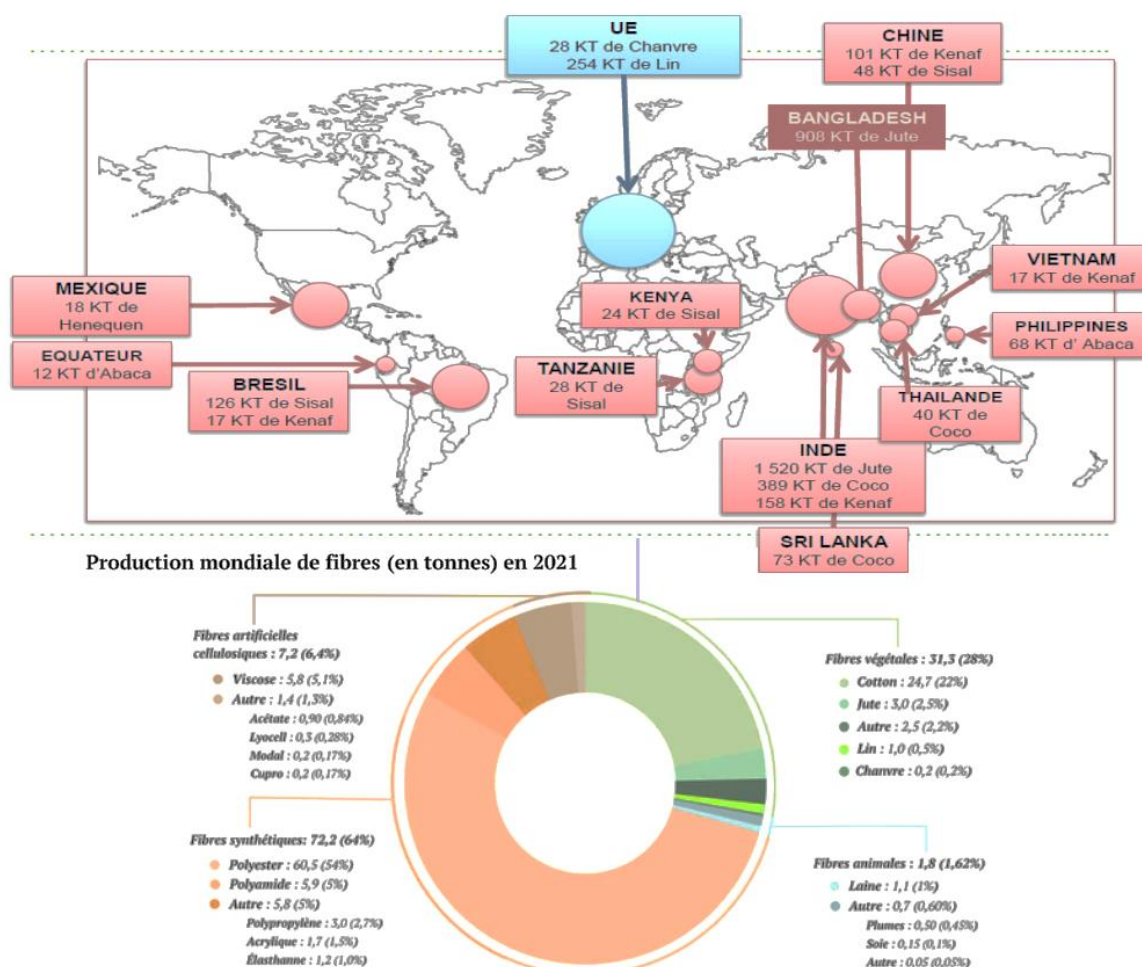


Figure II.14 Gisement mondial de fibres végétales (2001-2021). ¹⁴³

L'Algérie possède également un patrimoine végétal riche en espèces fibreuses telles que le Diss et le Doum, couvrant des dizaines de milliers d'hectares. L'exploitation industrielle de ces ressources, notamment pour la production de crin végétal à partir des fibres de Doum, remonte à l'ère coloniale française au début du XXe siècle. Malgré cette abondance en ressources fibreuses, force est de constater que le potentiel algérien demeure largement sous-exploité à l'heure actuelle.

II.7 Avantages et inconvénients des fibres végétales

L'utilisation des fibres végétales dans les matériaux composites présente un ensemble d'avantages et d'inconvénients qu'il convient d'examiner attentivement. Parmi les atouts majeurs, on peut citer leur caractère renouvelable et biodégradable, leur bilan carbone favorable (absorption

nette de CO₂), leurs propriétés mécaniques spécifiques intéressantes (notamment en termes de résistance et de rigidité), ainsi que leur capacité de régulation hygrothermique. De plus, ces matériaux se distinguent par leur faible abrasivité, leur production peu énergivore, et leur innocuité lors de la manipulation.

Cependant, plusieurs défis technologiques persistent. La variabilité intrinsèque des propriétés des fibres naturelles, leur sensibilité à l'humidité et aux températures élevées, ainsi que leur compatibilité limitée avec certaines matrices polymériques constituent des obstacles à surmonter. De plus, la gestion des stocks et la maîtrise des variations dimensionnelles (gonflement/rétractation) représentent des enjeux logistiques non négligeables pour une utilisation industrielle à grande échelle.

La structure complexe et la composition chimique hétérogène des fibres végétales, fortement influencées par les conditions environnementales et génétiques, rendent leur caractérisation et leur standardisation particulièrement ardues. Néanmoins, leurs propriétés intrinsèques, notamment en termes d'isolation thermique et acoustique, ouvrent des perspectives prometteuses dans divers domaines d'application, tant civils que militaires. Il est important de noter que les composants chimiques principaux des fibres végétales - cellulose, lignine et pectine - jouent des rôles distincts dans la détermination de leurs propriétés mécaniques et physiques. La teneur en cellulose, par exemple, influence directement la résistance à la traction, tandis que l'angle microfibrillaire affecte l'élasticité et la ductilité de la fibre.

Ces caractéristiques dichotomiques soulignent la nécessité d'une approche nuancée dans l'intégration des fibres végétales au sein des matériaux composites, tenant compte à la fois de leurs avantages intrinsèques et des défis technologiques qu'elles présentent.

II.8 L'importance des fibres végétales dans les briques de terre

L'incorporation de fibres végétales dans les blocs de terre crue (BT) a fait l'objet de nombreuses investigations scientifiques, révélant des effets significatifs sur les propriétés mécaniques et la durabilité de ces matériaux de construction. L'amélioration des propriétés mécaniques a été attribuée à l'inhibition de la propagation des fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. Les chercheurs ont souligné que l'effet positif sur la résistance à la flexion résulte de la résistance à la traction élevée des fibres et de leur adhérence à la matrice argileuse. Dans une étude connexe, Vergas et al. ¹⁴⁶ ont observé une augmentation de la résistance à la compression des BT avec l'ajout de 0,5-8,0% en masse de paille de 100 mm de longueur. Ce phénomène a été expliqué par l'effet de pontage des fissures créées dans le BT par les fibres, limitant ainsi la formation et la propagation des microfissures produites par le retrait de séchage.

Stulz et Mukerji, ¹⁴⁷ ont identifié divers types de stabilisants physiques, incluant la paille (blé, orge, etc.) et les fibres végétales (sisal, chanvre, coco et bagasse) comme des additifs importants pour les BT. Sallehan et Yaacob ont constaté qu'un ajout de 3% de fibres de palmier améliorerait la résistance à la compression des briques fibrées.

Namango, ¹⁴⁸ dans ses travaux sur les matériaux de construction en terre crue renforcée par des fibres de sisal, a observé une augmentation considérable de la résistance à la compression et à la flexion à l'état sec avec l'augmentation du taux de fibres de sisal ou de poudre de manioc. Cependant, au-delà de certaines valeurs limites, la présence des fibres de sisal a montré un effet défavorable sur la résistance du bloc de terre comprimé (BTC).

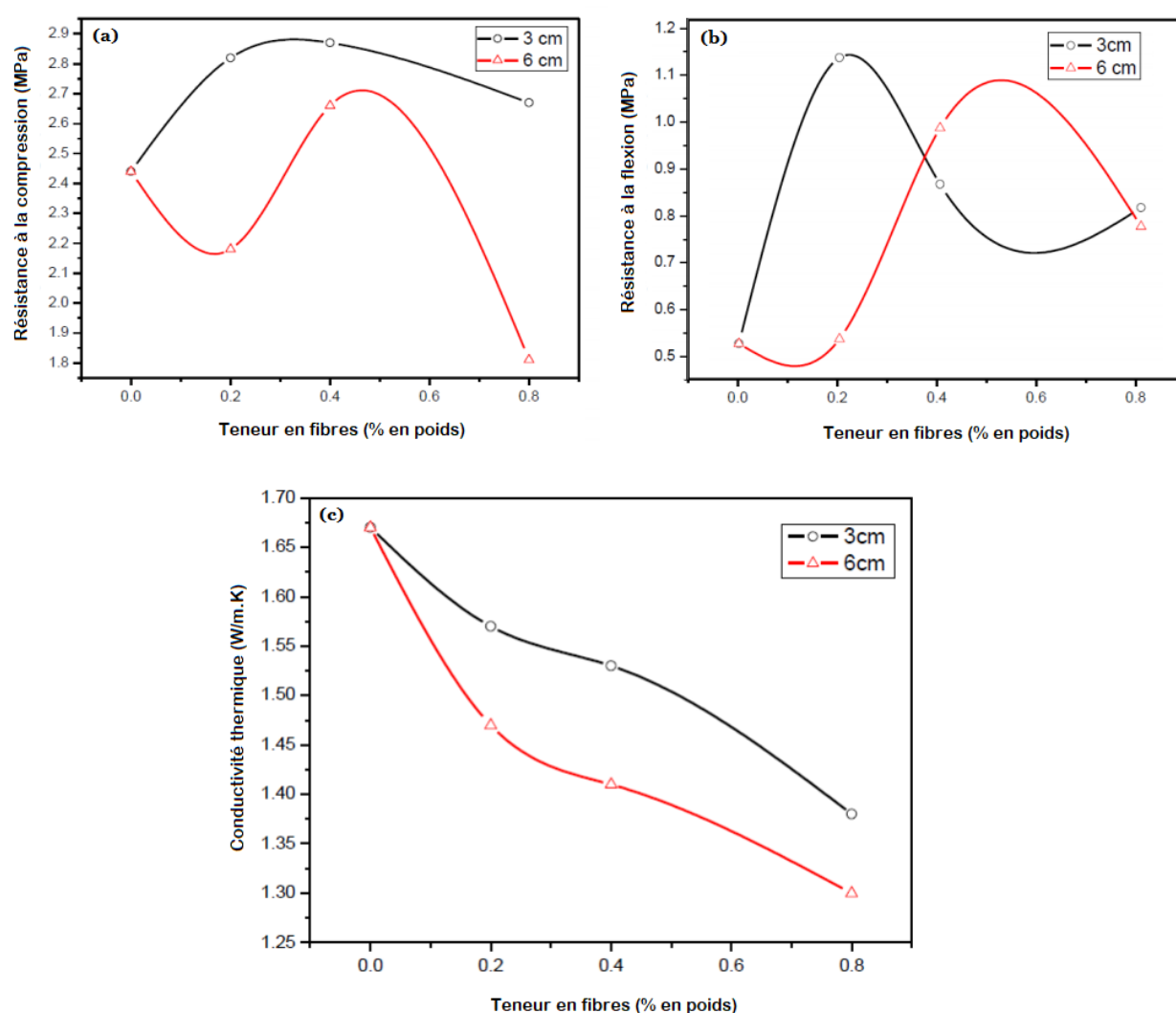


Figure II.15 (a) La résistance à la compression, (b) La résistance à la flexion et (c) la conductivité thermique tous en fonction de la quantité et de la longueur des fibres. ¹⁴⁹

Une étude menée par Millogo et al. ¹⁴⁹ a examiné l'impact des fibres de kénaf sur la stabilisation d'un sol latéritique au Burkina-Faso, dans le contexte de la fabrication de blocs d'adobe compressés. L'incorporation de fibres, à des concentrations variant de 0,2 à 0,8 % en masse, avec des longueurs de 30 mm et 60 mm, a démontré une amélioration notable des caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Les résultats optimaux ont été obtenus avec des fibres de 30 mm de longueur, comme l'illustrent les Figures II.15.

Les propriétés thermiques des BT sont également significativement influencées par l'ajout de fibres. Khedari et al. ¹⁵⁰ ont démontré une réduction substantielle de la conductivité thermique des blocs stabilisés par des fibres de coco, atteignant jusqu'à 50% de diminution. Cette tendance a été confirmée par Millogo et al. ¹⁴⁹ pour les fibres d'hibiscus cannabinus, comme illustré dans la Figure I.14(c), soulignant l'impact de la teneur et de la longueur des fibres sur la conductivité thermique des blocs d'adobe compressés.

Minke ¹⁵¹ a noté que l'ajout de fibres diverses (poils d'animaux ou humains, coco, sisal, agave, bambou, paille) peut réduire le retrait en diminuant la teneur en argile et en absorbant une certaine quantité d'eau.

Villamisar et al. ¹⁵² ont démontré que l'utilisation de pelures de manioc accroît considérablement la résistance à sec des mélanges, ce qui est bénéfique pour réduire les dommages liés à la manipulation des BT.

Rigassi, ¹⁵³ dans son manuel sur la production des blocs de terre comprimée, a souligné que l'introduction de fibres dans le matériau terre crée un réseau omnidirectionnel, améliorant ainsi la résistance à la traction et au cisaillement tout en réduisant le retrait. Néanmoins, il a émis des réserves quant à la compatibilité des fibres végétales avec le mode de compactage des BTC, suggérant qu'elles pourraient rendre le mélange trop élastique.

Khedari et al. ¹⁵⁰ ont étudié des briques à base d'argile latéritique comprimée et stabilisée par des fibres de coco. Leurs résultats indiquent une légère diminution de la résistance à la compression, attribuée à l'effet des dimensions, des conditions de surface et du nombre de fibres présentes dans un volume donné. L'augmentation de la teneur en fibres de noix de coco a conduit à une diminution de la contrainte d'adhérence, entraînant une réduction de la résistance à la compression.

Olivier et El Gharbi ¹⁵⁴ ont mené une étude sur les blocs de terre stabilisée avec des fibres de sisal, identifiant l'interface entre le mortier de terre et les blocs de terre comme le point faible.

Ils ont tenté d'améliorer cette interface en renforçant les blocs de terre comprimés avec des fibres de sisal, tout comme le mortier de terre.

Mesbah et al. ¹⁵⁵ ont mené une étude approfondie sur l'impact des fibres naturelles dans les BT, se concentrant particulièrement sur leur comportement en traction directe. Leurs résultats, mettent en évidence deux avantages principaux : une amélioration significative de la ductilité en traction comparativement aux blocs non renforcés, et une inhibition notable de la propagation des fissures post-formation initiale. Il est intéressant de noter que les chercheurs n'ont pas observé d'effet significatif des fibres sur le comportement du matériau avant sa fissuration, suggérant que leur influence se manifeste principalement dans les phases post-rupture.

Parallèlement aux fibres naturelles, l'utilisation de fibres synthétiques ou artificielles a également été explorée. Eko et al. ¹⁵⁶ ont notamment étudié l'incorporation de fibres dans un sol latéritique stabilisé au ciment (6%). Leur protocole expérimental a évalué l'impact de trois teneurs en fibres (1,7%, 2% et 2,7%) et trois longueurs (20 mm, 35 mm et 50 mm) sur les propriétés mécaniques des BT. Les résultats, démontrant une corrélation positive entre la teneur en fibres et la résistance à la traction jusqu'à un seuil optimal, au-delà duquel une diminution de la résistance est observée.

L'absorption d'eau des BT renforcés de fibres constitue un paramètre critique, compte tenu du caractère hydrophile inhérent aux fibres végétales. Cette propriété, qui contraste avec l'hydrophobicité de certaines fibres synthétiques comme le polypropylène, représente un défi majeur pour l'application des fibres végétales dans les constructions en terre crue. Sallehan et Yaacob. ⁷⁵ ont quantifié ce phénomène, rapportant une légère augmentation de l'absorption d'eau proportionnelle à la teneur en fibres de palmier. Ces observations ont été corroborées par Ravishankar et Raghavan dans le contexte des sols latéritiques stabilisés par des fibres de coco. ⁷⁶

II.9 Conclusion

En conclusion, l'abondance et la diversité des ressources en fibres végétales à l'échelle mondiale offrent des opportunités significatives pour le développement de matériaux composites biosourcés. Cependant, la réalisation de ce potentiel nécessite une approche multidisciplinaire, intégrant des avancées en sciences des matériaux, en ingénierie des procédés et en agronomie, pour surmonter les défis techniques et économiques actuels. L'utilisation des fibres végétales comme renfort dans les matériaux de construction à base de terre présente un potentiel considérable, mais également des défis significatifs. La littérature scientifique révèle un consensus sur l'efficacité des liants minéraux (ciment et chaux) pour améliorer la résistance mécanique et réduire la sensibilité à l'eau des BT. Cependant, l'incorporation de fibres végétales suscite des débats au sein de la

communauté scientifique. Certains chercheurs émettent des réserves quant à leur compatibilité avec les procédés de compactage des BTC, tandis que d'autres reconnaissent leur potentiel comme stabilisants naturels. La diversité des fibres étudiées et leur influence variable sur les propriétés des BT soulignent la nécessité d'une approche nuancée. Les recherches ont principalement porté sur les aspects mécaniques et hygrométriques, laissant en suspens des questions cruciales concernant l'impact des fibres sur briques de terre l'adobe. Cette lacune dans la littérature met en évidence le besoin d'investigations plus approfondies sur les propriétés mécaniques de l'adobe renforcé de fibres végétales. Ces enjeux constituent le cœur de la présente thèse, visant à élucider les implications multidimensionnelles de l'incorporation de fibres végétales dans les briques d'adobe.

Partie 02 : Méthodes expérimentales et analyses

Chapitre III : Matières premières et matériaux utilisés

III.1 Introduction.....	63
III.2 Matières premières : Description, origine et échantillonnage.....	63
III.2.1 Les argiles et leurs préparations	63
III.2.2 Présentation de nouvelle fibre végétale	65
III.3 Matériels utilisés et méthodes expérimentales	67
III.3.1 Les fibres végétales de Bassia Indica (BI)	67
III.3.1.1 Extraction des fibres	67
III.3.1.2 Analyse morphologique	68
III.3.1.3 Analyse chimique.....	68
III.3.1.4 Analyse physique	69
III.3.1.5 Analyse thermique	70
III.3.1.6 Analyse cristalline.....	71
III.3.1.7 Analyse des propriétés mécaniques	72
III.3.1.8 Analyses statistiques de Weibull	74
III.3.2 Sols initiaux	75
III.3.2.1 Caractérisation minéralogique et chimique	75
III.3.2.2 Évaluation des propriétés géotechniques	75
III.3.2.3 Caractérisation de la fraction argileuse.....	77
III.3.2.4 Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG)	78
III.3.3 Composites Terre-Fibre (L'adobe).....	79
III.3.3.1 Méthodologies de fabrication des échantillons	79
III.3.3.2 Mesure du pH selon le protocole d'Eades-Grim	80
III.3.3.3 Essai de Compression simple	81
III.3.3.4 Essai de Flexion 3 points.....	81
III.3.3.5 Mesure du retrait des échantillons.....	82
III.4 Conclusion.....	83

III.1 Introduction

Les matériaux composites à base de terre et de fibres naturelles connaissent un regain d'intérêt significatif dans le domaine de la construction durable. Ce chapitre présente de manière exhaustive les protocoles expérimentaux et les méthodologies analytiques déployés pour caractériser les matières premières et évaluer les performances des composites Terre-Fibre développés dans le cadre de cette étude.

La démarche expérimentale adoptée s'articule autour de trois axes majeurs. Dans un premier temps, nous nous attachons à la caractérisation physicochimiques approfondies des matières premières, en particulier les argiles et leurs méthodes de préparation. Une attention particulière est portée à l'introduction d'une nouvelle fibre végétale, le *Bassia indica*, dont les propriétés singulières feront l'objet d'une analyse détaillée.

La méthodologie expérimentale adoptée comprend une série d'analyses complémentaires visant à établir une caractérisation complète des propriétés physicochimiques et mécaniques des matériaux. Pour les fibres végétales, nous avons procédé à des analyses morphologiques, chimiques, physiques, thermiques et cristallines, complétées par une étude des propriétés mécaniques et une analyse statistique de Weibull. Les sols utilisés ont également fait l'objet d'une caractérisation exhaustive, incluant l'étude des compositions minéralogiques et chimiques, ainsi que des analyses granulométriques et de surface spécifiques. Enfin, la méthodologie de fabrication des composites Terre-Fibre est détaillée, suivie des essais de compression et de flexion. Ces analyses contribuent à évaluer les propriétés mécaniques et microstructurales des composites, fournissant des données essentielles pour la validation de leur performance en tant que matériaux de construction durables.

Ainsi, ce chapitre vise à établir une base solide de connaissances pour le développement de matériaux innovants et écologiques, tout en jetant les bases pour une compréhension plus large des interactions entre les fibres végétales et les sols dans les composites Terre-Fibre.

III.2 Matières premières : Description, origine et échantillonnage

III.2.1 Les argiles et leurs préparations

L'étude des argiles et de leurs préparations, particulièrement dans le contexte de l'analyse géotechnique, revêt une importance cruciale dans l'évaluation de leur potentiel d'utilisation pour des applications spécifiques telles que la fabrication de briques d'Adobe.

Dans ce cadre, la présente recherche se concentre sur six échantillons de sols prélevés à M'Sila (Figure III. 1), une région dont les caractéristiques géologiques peuvent influencer significativement les propriétés des matériaux de construction. Les sites de prélèvement, à savoir Hammam Dalaa et Chaaba El Hamra, Cité Boukhemissa, ont été choisis en raison de leur diversité géologique et de leur accessibilité.

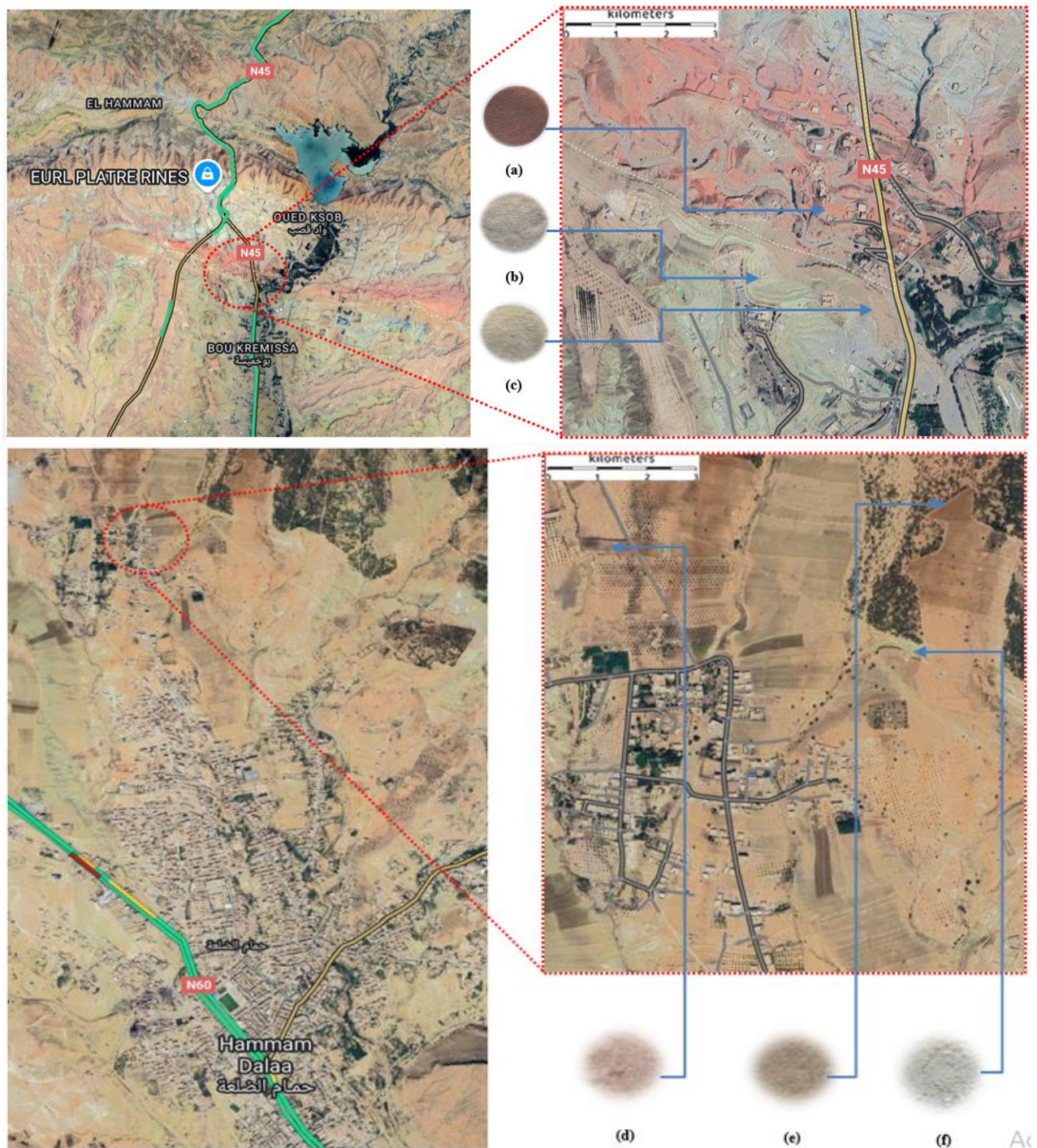


Figure III.1 Site d'échantillonnage.

L'analyse géotechnique de ces échantillons implique une série de tests visant à déterminer les propriétés physiques et mécaniques des argiles, telles que la plasticité et la résistance à la compression. Ces propriétés sont essentielles pour évaluer la capacité des argiles à être mélangées avec d'autres matériaux, afin de produire des briques d'Adobe durables et efficaces. En outre, l'étude examine également la composition minéralogique des échantillons.

Les résultats de cette analyse permettront non seulement d'identifier les échantillons les plus adaptés pour la fabrication de briques d'Adobe, mais aussi d'optimiser les formulations de mélanges pour améliorer la qualité et la durabilité des produits finis. Cette recherche s'inscrit dans une démarche de valorisation des ressources locales et de promotion de pratiques de construction durable, en phase avec les enjeux environnementaux contemporains.

La caractérisation granulométrique des échantillons a été réalisée conformément aux normes la norme XP P94-041 (1995). Afin que Les résultats obtenus permettent de classer les sols selon leur distribution granulaire et leur teneur en particules fines.

III.2.2 Présentation de nouvelle fibre végétale

Une nouvelle fibre cellulosique a été extraite des tiges de plantes de *Bassia Indica*. Les plantes *Bassia Indica* (BI), également connues sous le nom de *Kochia indica*, appartiennent à la famille des *Amaranthaceae*. Ce sont de petits arbustes trouvés dans les régions tropicales et subtropicales, s'étendant de la Méditerranée occidentale à l'Asie orientale.



Figure III.2 Plante de *Bassia Indica*.

Les feuilles de ces plantes, reconnues pour leurs vertus thérapeutiques, sont également fréquemment utilisées à des fins ornementales. Les tiges, légères et ramifiées, affichent une coloration allant du brun au jaunâtre, avec de nombreuses branches émergeant de la base et des feuilles espacées. ^{157, 158}

Une quantité considérable de tiges de *Bassia Indica* a été collectée en novembre, dans la région de Hodna à M'Sila, Algérie (Figure III. 3). Les coordonnées géographiques précises du site de collecte étaient $4^{\circ} 32' 49''$ E, $35^{\circ} 42' 7''$ N. Les tiges de BI, souvent jaunes ou parfois rougeâtres, présentent un diamètre variant de 0,3 à 0,9 cm et une longueur de 0,4 à 1,8 m. Cette plante est typiquement rencontrée dans les sols arides des forêts et les bordures des chemins.

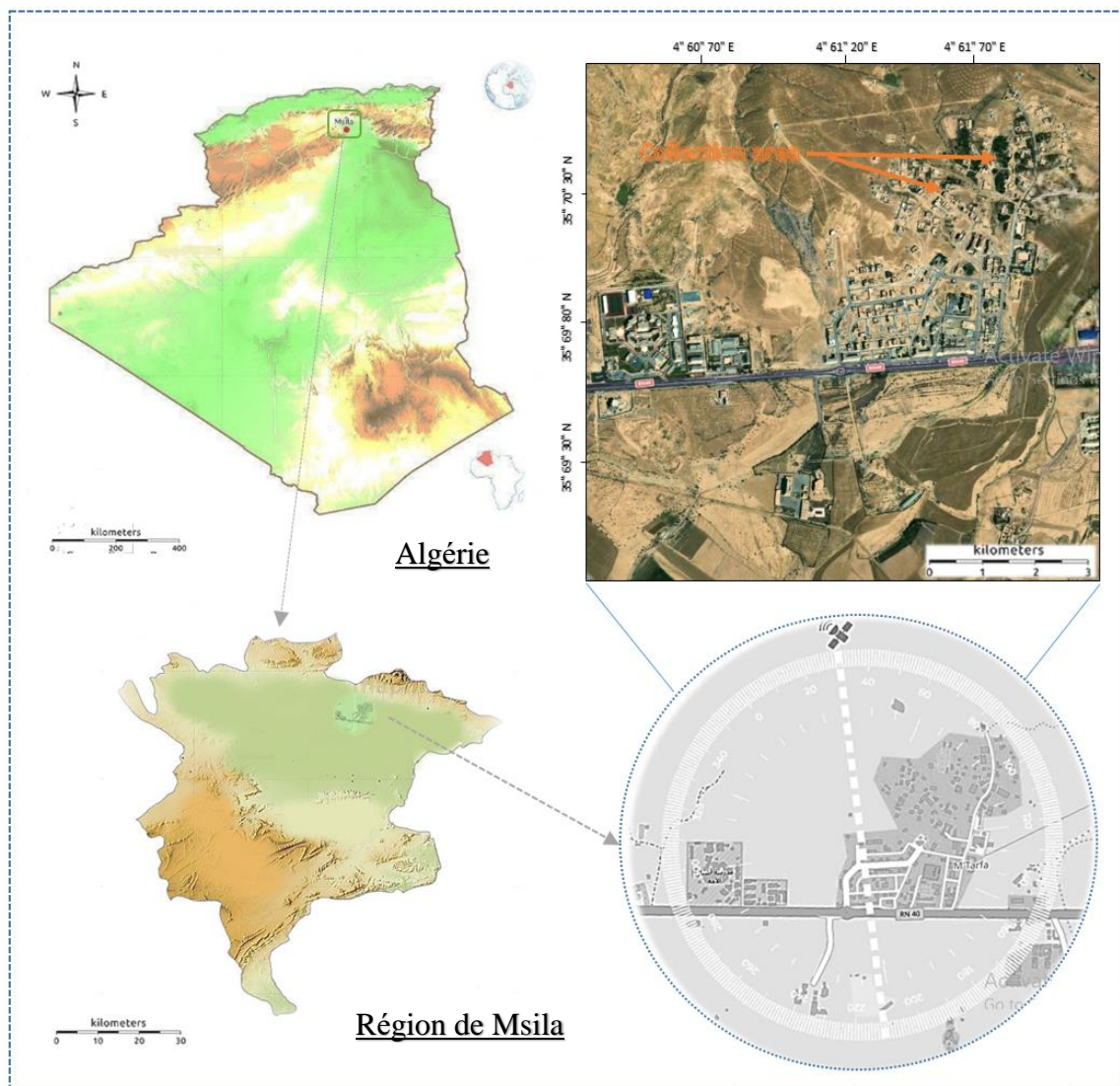


Figure III.3 Plan de la zone de collecte.

III.3 Matériels utilisés et méthodes expérimentales

III.3.1 Les fibres végétales de *Bassia Indica* (BI)

III.3.1.1 Extraction des fibres

Comme illustré dans la Figure III. 4, les fibres de *Bassia Indica* (FBIs) ont été extraites en utilisant un processus de dégradation microbienne. Suite à la récolte, les tiges de BI ont été initialement débarrassées de leurs branches et feuilles. Elles ont ensuite été nettoyées de toutes impuretés à l'aide d'eau distillée, avant d'être immergées dans une cuve remplie d'eau du robinet (voir Figure III. 4b). Ce procédé a permis une décomposition microbienne durant quatre semaines à température ambiante, favorisant l'activité des bactéries anaérobies qui a entraîné la dégradation de la pectine et des tissus cellulaires environnants. Ce processus a facilité l'extraction manuelle des fibres (voir Figure III. 4c). Enfin, les FBIs ont été lavés plusieurs fois à l'eau distillée, puis séchées à l'étuve à 70 °C pendant sept heures. Cette méthode, moins gourmande en eau comparée à la technique traditionnelle de rouissage à l'eau, est également plus économique, car elle réduit le besoin en eau purifiée et les coûts associés. ^{159, 160}

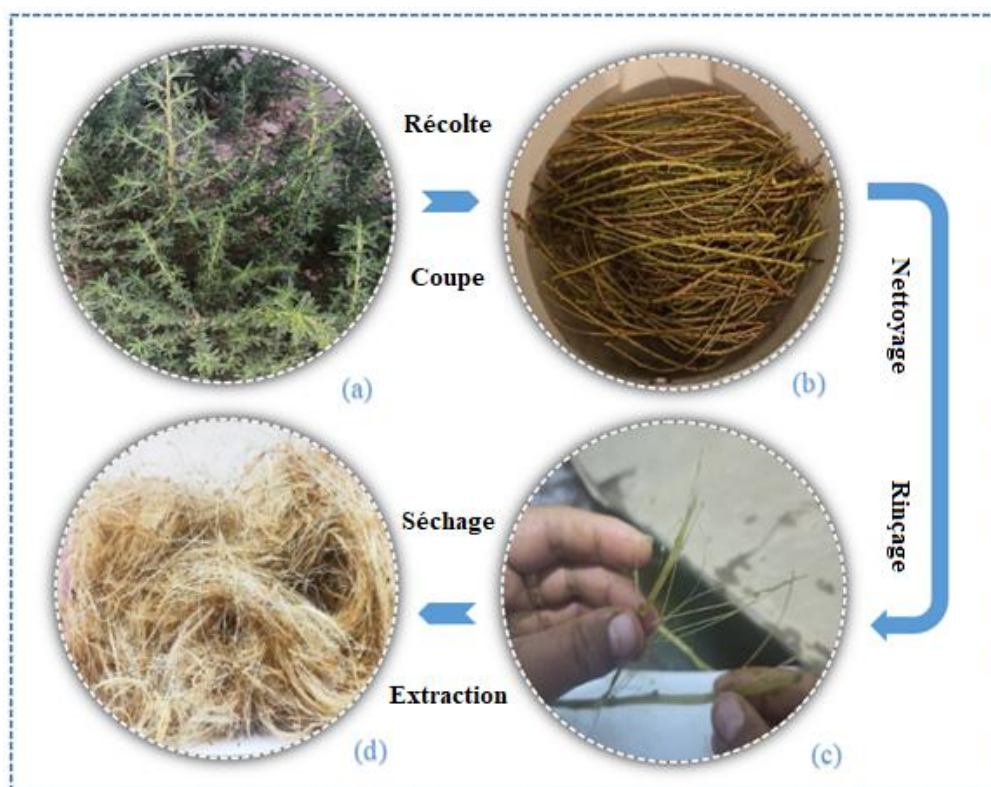


Figure III.4 Étapes d'obtention de la fibre : (a) Plante BI, (b) rouissage à l'eau, (c) extraction des FBIs et (d) FBIs.

III.3.1.2 Analyse morphologique

- *Anatomie de la tige de BI*

L'étude de l'anatomie des plantes est essentielle pour décrypter la structure interne des plantes. Dans le cadre de cette recherche, une analyse détaillée de la coupe transversale de la tige de *Bassia Indica* (BI) a été effectuée. Les sections transversales, d'une épaisseur variant de 10 à 25 μm , ont été préparées à l'aide d'un microtome cylindrique à main. Pour améliorer la clarté des observations, plusieurs sections de la tige de BI ont été colorées puis fixées sur des lames de verre. Un mélange de bleu de méthylène a été utilisé pour la coloration, assurant ainsi l'obtention d'images précises et détaillées. Les lames préparées ont été ensuite scrutées sous un microscope OPTIKA B-350. Un grand nombre de photographies ont été prises lors de cette observation, et les plus représentatives ont été sélectionnées pour être incluses dans cette étude.

- *Morphologie des FBIs*

Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) sont cruciales pour examiner la morphologie de surface, la porosité, la rugosité, ainsi que la structure des parois cellulaires, entre autres. Cette technique d'imagerie de haute résolution offre une vue exhaustive des surfaces et de la topographie des matériaux. Un microscope électronique à balayage, modèle TESCAN VEGA3, a été utilisé pour explorer la morphologie de surface de la fibre de BI. L'analyse morphologique a été réalisée sous un vide poussé, avec un potentiel d'accélération du faisceau d'électrons de 5 kV. Une couche d'or-palladium (Au-Pd) a été appliquée sur les échantillons pour garantir une imagerie de haute résolution et pour prévenir les effets de charge électrique pendant l'examen. Des images ont été capturées à différents grossissements, avec une distance de travail fixée à 10 mm. La spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX) est utilisée pour quantifier les poids et les pourcentages atomiques des éléments présents sur la surface externe des fibres naturelles. Chaque élément de la fibre se manifeste par un pic distinct, permettant une comparaison détaillée des éléments. Un appareil de spectroscopie à dispersion d'énergie, modèle INCA PentaFETx3, a été intégré à la configuration MEB pour étudier la répartition des éléments sur la surface des FBIs.

III.3.1.3 Analyse chimique

Les composants principaux des fibres végétales sont la cellulose, l'hémicellulose, la pectine et la lignine, dont les proportions varient selon les types de fibres. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier avec réflectance totale atténuée (RTA-IRTF) est devenue un outil

analytique essentiel en recherche scientifique, offrant la capacité d'analyser pratiquement n'importe quel échantillon, indépendamment de son état. Cette méthode est largement utilisée pour identifier les groupes fonctionnels chimiques et évaluer leurs applications potentielles dans divers domaines.

Des tests expérimentaux ont été conduits en utilisant le système IRTF PerkinElmer RXI. Un spectromètre RTA-IRTf, offrant une résolution de 2 cm^{-1} et effectuant 32 balayages par minute dans une gamme de nombres d'onde de 4000 à 500 cm^{-1} , a été employé pour identifier et classifier les liaisons chimiques présentes sur les FBIs. Les différents groupes chimiques présents dans les échantillons de grain de FBIs vibrent de manière unique lorsqu'ils absorbent le rayonnement infrarouge, produisant des fréquences distinctes proportionnelles à leur force. Le logiciel Origin a été utilisé pour décomposer les bandes spectrales et effectuer des ajustements fondamentaux afin de traiter et analyser les spectres obtenus. Les tests standards ont permis de déterminer la composition chimique des FBIs, incluant la cellulose, l'hémicellulose, la lignine, la cire, les cendres et le contenu en humidité, des constituants cruciaux pour évaluer les caractéristiques mécaniques et la biodégradabilité de la fibre. Diverses méthodes ont été suivies, notamment la norme ASTM E1755-01 pour le contenu en cendres, ¹⁶¹ la méthode de lignine Klason (APPTA P11s-78) pour la lignine, ¹⁶² la méthode Conrad pour la cire, ¹⁶³ le traitement acide suivi d'une solution alcaline (méthode de fibre détergente neutre) pour l'hémicellulose, ¹⁶⁴ et la méthode Kurshner et Hofer pour la cellulose. ¹⁶⁵

III.3.1.4 Analyse physique

- *Mesure de la densité*

La densité des fibres naturelles est un paramètre déterminant dans le choix des fibres pour des applications structurelles spécifiques. La méthode standard pour mesurer la densité des fibres naturelles utilise un pycnomètre, conformément aux directives de l'ASTM D 2320-9. Pour assurer l'exactitude des mesures, la quantité nécessaire de FBI a été préalablement séchée à $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 20 minutes pour éliminer toute trace d'humidité. Des segments courts de FBIs ont été placés dans un pycnomètre de 50 ml, et environ 1 g de ces fibres a été immergé dans de l'éthanol, un liquide dont la densité est connue ($0,79\text{ g/cm}^3$). Les mesures ont été prises dans un environnement contrôlé à $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une humidité relative de 50–60 %. Les tests de densité ont été effectués en utilisant l'équation (1) :

$$\rho_{FBI} = \frac{\Delta m_1}{\Delta m_2 - \Delta m_3} \times \rho_{ethanol} \quad (1)$$

Où Δm_1 représente la différence de poids entre le pycnomètre vide et rempli de FBI, Δm_2 est la différence de masse entre le pycnomètre avec la solution d'éthanol et vide et Δm_3 est la variation de masse entre le pycnomètre avec et sans FBI dans la solution d'éthanol.

- *Mesure du diamètre*

La connaissance du diamètre des fibres est essentielle, car elle influence directement leur résistance à la traction. La mesure du diamètre des fibres, cependant, est compliquée par la variabilité de forme et de taille parmi les fibres extraites. Les profils ont été définis et le diamètre a été mesuré à quatre endroits aléatoires sur chaque fibre BI, en utilisant un total de 30 échantillons. La microscopie optique (MOTIC) a été cruciale pour déterminer les valeurs précises de diamètre, facilitant ainsi une caractérisation fiable des fibres. Le diamètre nominal a été déterminé comme étant la valeur moyenne des mesures de diamètre sur la fibre BI. Bien que cette méthode puisse paraître rudimentaire, elle fournit une estimation rapide et efficace du diamètre de la fibre. Les résultats obtenus ont été validés par une méthode computationnelle, supposant une forme cylindrique de la fibre, selon la formule suivante présentée en équation (2) :

$$D_{BI}(\mu m) = \sqrt{4 * \frac{M}{\pi \rho_{BIF} L}} \quad (2)$$

Où L représente la longueur de la fibre (en cm), D_{BI} le diamètre de la fibre (en μm), M la masse de la fibre (en grammes), et ρ_{BIF} la densité de la fibre (en g/cm^3).

III.3.1.5 Analyse thermique

- *Comportement thermique*

Pour évaluer la résistance des fibres naturelles dans des composites exigeant une haute résistance à la chaleur, il est indispensable d'analyser leur stabilité thermique. L'analyse Thermogravimétrique (ATG) s'est avérée être une méthode précieuse pour quantifier les constituants majeurs d'un matériau, étudier ses phases de décomposition, et évaluer sa stabilité thermique. Pour cette étude, l'analyse TGA des fibres BI a été effectuée à l'aide d'un appareil SDT Q600 V20.9 Build. Les faisceaux de fibres ont été coupés en petits morceaux, séchés pendant une heure à 70 °C, puis réduits en fine poudre à l'aide d'un broyeur Spex Mixer Mill. Un creuset en alumine contenant un échantillon séché de FBI de 36.8 mg a été placé dans l'analyseur thermique. Le spectre a été enregistré sur une plage de température allant de 26.79 °C à 600 °C, à un taux de chauffage constant de 10 °C/min. Un flux continu de gaz N_2 de haute pureté a été maintenu à un

débit de 20 ml/min pour préserver une atmosphère inerte à l'intérieur du four pendant toute la durée de l'expérience, réalisée dans des conditions atmosphériques contrôlées à une température de 30 °C et une humidité relative de 65 %.

- *Énergie d'activation cinétique*

L'énergie d'activation (E_a) représente l'énergie minimale nécessaire pour la décomposition des fibres et peut être déterminée mathématiquement en analysant la pente dérivée du tracé de la courbe selon l'équation (3). L'équation de Coats-Redfern est utilisée pour exprimer l'énergie d'activation cinétique (E_a) pour les FBIs non traitées comme suit ¹⁶⁶:

$$\log \left[\frac{-\log(1 - \alpha)}{T^2} \right] = \log \frac{AR}{\beta E_a} \left[1 - \frac{2RT}{E_a} - \frac{E_a}{2.303 RT} \right] \quad (3)$$

Où α est l'échantillon se décomposant au moment t fourni $\alpha = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W_f}$.

W_0 est le poids initial de l'échantillon (avant que la réaction de décomposition ne commence), W_t est le poids de l'échantillon à une température donnée, W_f est le poids final de l'échantillon après la fin de la réaction, A est le facteur de fréquence, β est le taux de chauffage le long d'une ligne droite, R est la constante des gaz et T est la température en degrés absolus.

III.3.1.6 Analyse cristalline

L'usage de la diffraction des rayons X (DRX) est crucial pour déterminer la nature cristalline et amorphe des matériaux au sein des fibres naturelles. Cette technique a été employée pour identifier la taille des cristaux (TC) et l'indice de cristallinité (IC) des fibres étudiées. Un spectromètre X'Pert-PRO PANalytical équipé d'une source de rayonnement $\text{CuK}\alpha$ fonctionnant à 30 mA et à une vitesse de balayage de 2 min^{-1} a été utilisé pour mener ces analyses.

Avec une tension appliquée de 40 kV, en utilisant une taille de pas de $0,05^\circ$ et une température constante de 25 °C, la plage de 2θ est comprise entre 10° et 80° . Le spectre de diffraction aux rayons X (DRX) et le traitement des données des fibres BI ont été analysés en identifiant les pics cristallins et amorphes individuels à travers un processus d'ajustement de courbe appliqué au profil d'intensité de diffraction. L'indice de cristallinité (IC) de FBI a été déterminé en appliquant l'équation (4) ¹⁶⁷ et en utilisant le logiciel Origin (2021) pour localiser le pic. En supposant une fonction gaussienne pour chaque pic, avec un nombre F supérieur à 1000, correspondant à un R^2 supérieur à 0,9559. Ces facteurs sont importants car ils ont une grande influence sur les propriétés mécaniques des fibres.

$$CI = \left\{ 1 - \left(\frac{I_{amorphous}}{I_{crystalline}} \right) \right\} * 100 \quad (4)$$

$I_{crystalline}$ correspond à l'intensité la plus élevée observée dans le pic cristallin à des angles 2θ de $21-22^\circ$, tandis que $I_{amorphous}$ indiquent l'intensité la plus basse observée dans le pic amorphe dans la plage des angles 2θ de 16 à 17° . En appliquant la formule de Scherrer, qui est représentée dans l'Équation (5) ¹⁶⁷, il a été possible d'estimer la Taille de Cristal (TC) des fibres BI. Le facteur de correction de Scherrer ($k = 0,94$), la longueur d'onde du rayonnement X incident ($\lambda = 0,1542$ nm), l'angle de Bragg (θ) ont tous été utilisés dans ce calcul et la largeur à mi-hauteur du pic (β).

$$TC = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (5)$$

III.3.1.7 Analyse des propriétés mécaniques

- *Test mécanique*

La paroi cellulaire des fibres végétales comprend deux sections distinctes : la paroi cellulaire primaire, marquée par un réseau irrégulier de microfibrilles de cellulose densément emballées, et la paroi secondaire, composée de trois couches désignées S_1 (externe), S_2 (moyenne), et S_3 (interne).

168

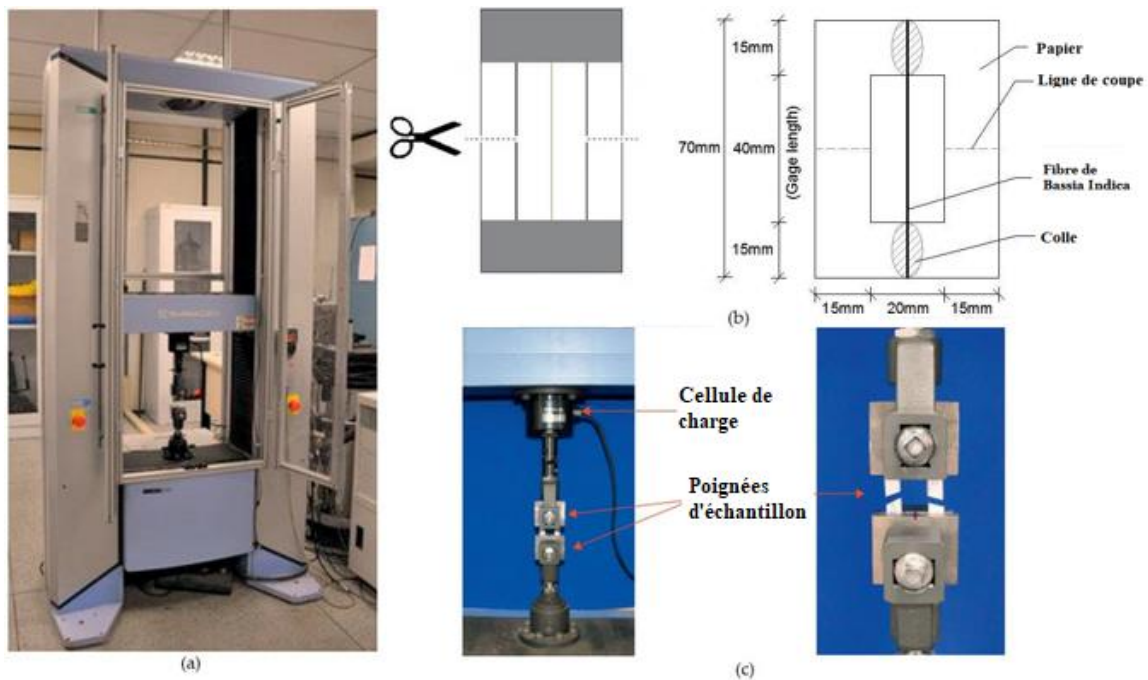


Figure III.5 Test mécanique des FBIs : (a) machine de traction universelle, (b) préparation de l'échantillon et (c) détail de la pince.

Les variations observées dans les résultats des tests de traction des fibres végétales peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, incluant la méthode d'extraction des fibres, l'âge de la plante, les conditions de test, les variations de diamètre, et la présence de défauts de surface. Afin de garantir la fiabilité et la reproductibilité des mesures, 30 échantillons de FBIs ont été sélectionnés pour l'analyse des propriétés de traction. Les essais de traction ont été conduits conformément aux directives de la norme ASTM C1557-14 (Figure III. 5), utilisant une longueur de jauge de 40 mm pour les fibres uniques, une vitesse de traverse de 2.5 mm/min et une cellule de charge de 2.5 kN. Ces tests ont été effectués dans des conditions contrôlées, avec une température constante de 25 °C et un niveau d'humidité de 62 %, afin d'assurer une configuration expérimentale stable et précise.

- *Test micro-gouttelette*

Le test micro-gouttelette est une technique micromécanique répandue pour évaluer les caractéristiques interfaciales entre la matrice de résine et les filaments uniques, comme le montre la Figure III. 6a. Avant le test, la géométrie de la gouttelette a été examinée sous un microscope optique (MOTIC), représentée à la Figure III.6b.

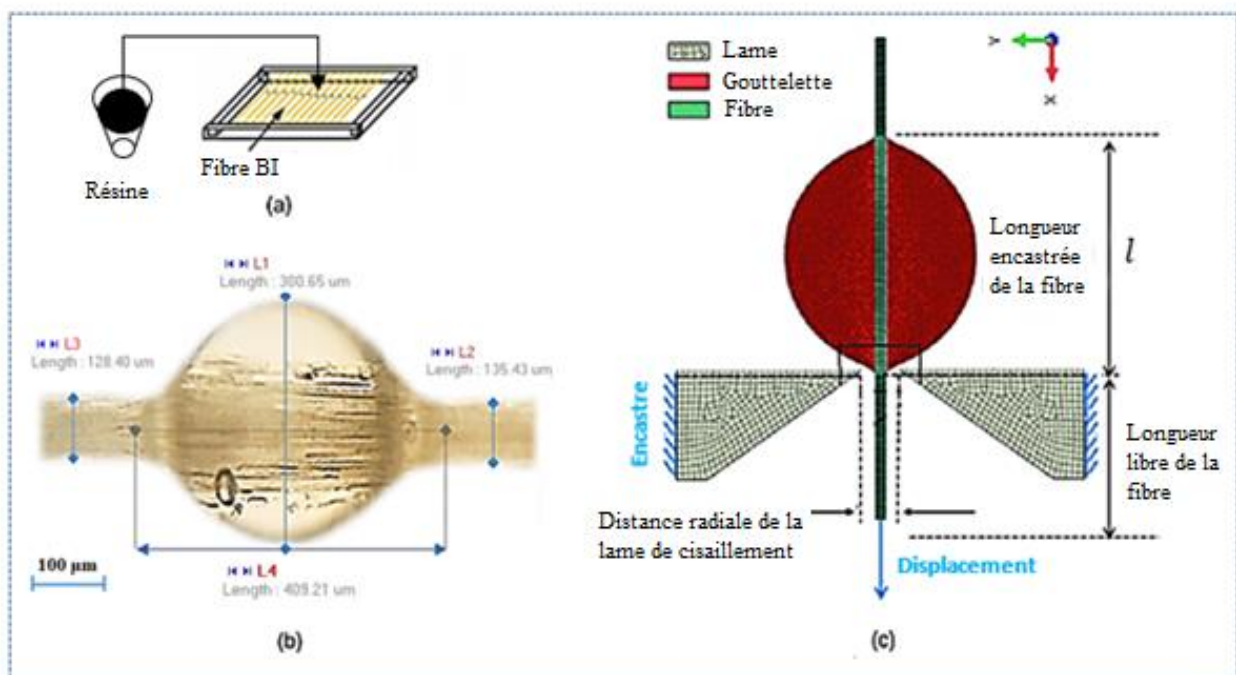


Figure III.6 Test mécanique et test de gouttelette des FBIs : (a) Imprégnation de fibre, (b) Spécimen micrographique et (c) Test microgouttelette.

Les tests micro-gouttelettes sur les fibres BI ont été effectués à l'aide de la machine universelle de résistance à la traction Instron ZWICK Z005. Une paire de couteaux a été positionnée de chaque côté de la fibre, près de la gouttelette, afin de restreindre son mouvement. Les lames ont

ensuite été tirées à un rythme de 0,5 mm/min jusqu'à ce que la gouttelette se détache, comme illustré à la Figure III. 6c. Pour l'estimation de la force de cisaillement interfaciale (IFSS), un minimum de 10 échantillons a été utilisé et la valeur moyenne a été ensuite rapportée. La force de cisaillement interfaciale moyenne est calculée selon l'équation suivante (6), en utilisant les données de la charge maximale et de la zone incorporée :

$$\tau_c = IFSS = \frac{F_{max}}{2 \pi r l} \quad (6)$$

Ici τ_c représente la force de cisaillement interfaciale, F_{max} est la force de traction la plus élevée, $2r$ est le diamètre de la fibre, et l est la longueur incorporée.

III.3.1.8 Analyse de la distribution de Weibull

Les résultats expérimentaux obtenus à partir des tests sur les fibres lignocellulosiques révèlent des défis significatifs en raison de la dispersion naturelle des résultats, typique de ce type de fibre. Cette variation est souvent attribuée à des défauts présents dans ou sur la fibre elle-même, ce qui rend nécessaire l'utilisation de méthodes statistiques pour évaluer avec précision les propriétés mécaniques moyennes. Récemment, l'analyse de Weibull s'est imposée comme un outil statistique prédominant dans l'évaluation des propriétés mécaniques des fibres naturelles. Cette analyse a été effectuée en utilisant des modèles à deux et trois paramètres pour estimer la dispersion des résultats expérimentaux de traction.

Le modèle à deux paramètres inclut des paramètres d'échelle et de forme, tandis que le modèle à trois paramètres ajoute un paramètre de localisation, permettant ainsi à la distribution de se déplacer le long de l'axe des x . Les tracés de distribution de Weibull ont été générés et examinés pour représenter les valeurs moyennes des propriétés mécaniques et apprécier la variation de la résistance, de la déformation et du module d'Young des fibres. Cette analyse statistique a été conduite à l'aide du logiciel Minitab 19. La fonction de distribution cumulative à trois paramètres de Weibull est donnée par l'équation (7) suivante :

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - k_0}{k} \right)^n \right] \quad (7)$$

Où n est le module de Weibull, $k > 0$ est le paramètre d'échelle, et k_0 , qui indique la valeur moyenne de x , est également pris en compte. Il est important de noter que x , k , k_0 et n sont tous des nombres réels supérieurs à zéro. Pour garantir la validité des résultats, les évaluations des variables ont été

menées avec un niveau de confiance de 95 % et un modèle de Weibull à deux paramètres a été développé, supposant que le seuil est zéro, ce qui signifie que k_0 est équivalent à zéro.

III.3.2 Sols initiaux

Les propriétés physico-chimiques et géotechniques des échantillons ont fait l'objet d'une caractérisation approfondie. Cette démarche visait à établir une classification des matériaux et à évaluer leur impact potentiel sur les processus de fabrication et les performances des briques d'adobe.

III3.2.1 Caractérisation minéralogique et chimique

- *Diffraction des rayons X (DRX)*

Réalisée sur un diffractomètre à dispersion d'énergie X'Pert Pro PW3209, PANalytical, France, cette technique a permis d'identifier et de quantifier les phases cristallines présentes dans les échantillons.

III3.2.2 Évaluation des propriétés géotechniques

- *Taux d'humidité*

Le taux d'humidité est mesuré selon la norme NF P94-050, en calculant la perte de masse d'un échantillon avant et après étuvage à 105°C pendant 24 heures :

$$\omega (\%) = \left[\frac{(M1 - M2)}{M1} \right] * 100 \quad (8)$$

- *Perte au feu (PF)*

La perte au feu (PF) est déterminée en chauffant un échantillon préalablement étuvé (M_2) à 1000 °C. Puis en mesurant la masse résiduelle (M_3). Elle représente la réduction de poids due des réactions thermique :

$$PF (\%) = \left[\frac{(M2 - M3)}{M3} \right] * 100 \quad (9)$$

- *Densité :*

La densité d'un matériau argileux est mesurée à l'aide d'un pycnomètre rempli d'eau permutée à 20°C. Une masse de 5 g d'argile (M4) est ajoutée au pycnomètre, et son volume est complété avec de l'eau jusqu'au repère. Les masses avant (M3) et après ajout (M5) sont mesurées pour calculer la densité selon la formule :

$$d = \left[\frac{M4}{M3 + M4 - M5} \right] * \rho_{eau} \quad (10)$$

Avec $\rho_{eau} = 1(g/cm^3)$

- *Limites d'Atterberg*

Déterminées selon la norme NF P94-051 (1993), ces mesures ont permis d'évaluer la plasticité et la liquidité des échantillons, paramètres essentiels pour prédire leur comportement lors de la mise en forme des briques.



Figure III.7 Limites d'Atterberg : (a) Limite de plasticité au rouleau, (b) Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande.

- *Analyse granulométrique*

Combinant le tamisage (norme NF P 94-056) pour les particules supérieures à 0,08 mm, sédimentométrie (NF P 94-057) de la fraction inférieure à 0.08 mm et la granulométrie laser

(COULTER LS 230) pour les fractions plus fines < 63 µm, cette analyse a fourni une distribution précise de la taille des particules, cruciale pour l'optimisation des formulations.



(a)



(b)

Figure III.8 Analyse granulométrique : (a) Tamisage par voie humide, (b) Granulomètre Laser COULTER LS 230.

III.2.3 Caractérisation de la fraction argileuse

- *Essai au bleu de méthylène*

Réalisé conformément à la norme NF P94-068 (1998), cet essai a permis de quantifier la capacité d'adsorption de la fraction argileuse, indicateur de sa réactivité et de son potentiel de gonflement.

- *Surface spécifique*

Évaluée par deux méthodes complémentaires :

- Méthode au bleu de méthylène : Calculée selon l'équation de Santamarina (2002), elle prend en compte la surface totale d'échange ionique.

$$S_S = VBS \times m_{BM} \times \frac{N_a}{319.86} \times A_{BM} \quad \left(\frac{m^2}{g}\right) \quad (11)$$

Avec : VBS la valeur au bleu de l'échantillon ; m_{BM} : teneur en bleu de la solution de titrage (=10g/ml) ; N_a : nombre d'Avogadro (6.02×10^{23} atomes/mol) ; A_{BM} : aire couverte par une molécule de bleu de méthylène (130 \AA^2)

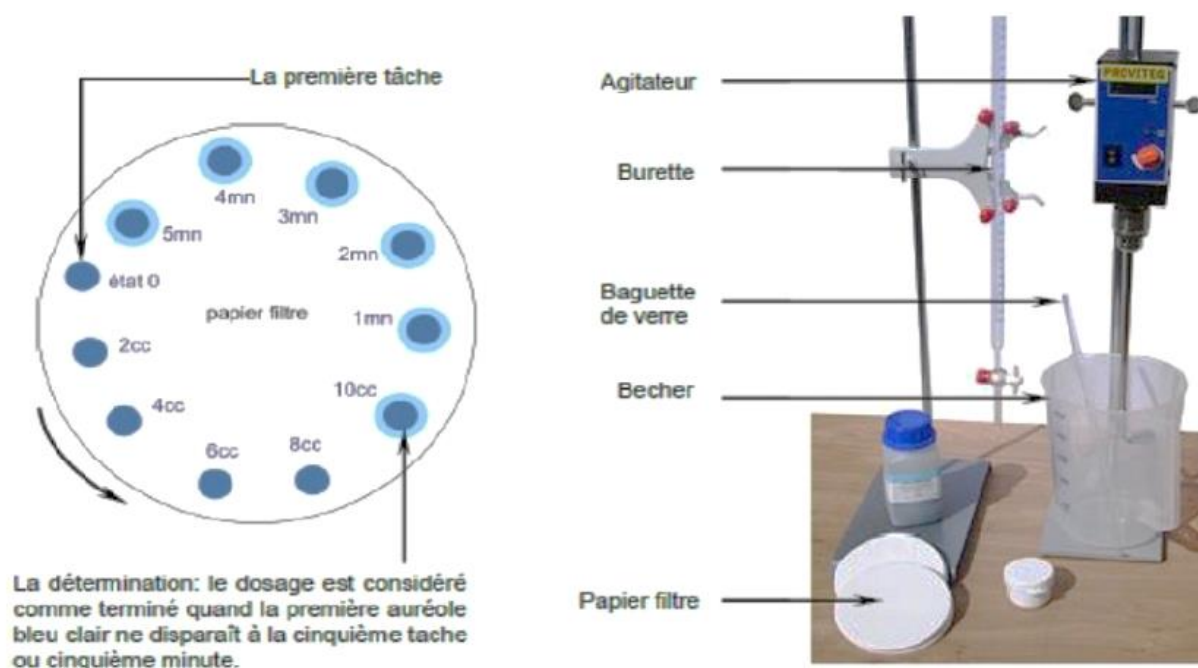


Figure III.9 Essai au bleu de méthylène.

III3.2.4 Analyse thermogravimétrique (ATG/DTG)

Réalisée sur un analyseur SETSYS Evolution ATG-ADT/DSC, cette analyse a suivi un protocole thermique spécifique :

- Rampe de chauffe de 30°C à 1000°C à 10°C/min
- Refroidissement rapide pour permettre des analyses successives
- Acquisition simultanée des courbes ATG (perte de masse) et DTG (dérivée de la perte de masse)

Les thermogrammes obtenus ont permis de :

- Identifier les températures critiques de transformation
- Quantifier les pertes de masse associées à chaque étape de décomposition
- Étudier la cinétique des réactions thermiques

L'analyse approfondie de la courbe DTG a révélé avec précision les points d'inflexion de la courbe ATG, mettant en évidence les températures exactes de début des transformations significatives. Cette information est cruciale pour optimiser les cycles de cuisson et prédire le comportement des matériaux lors de la fabrication des briques.



Figure III.10 Analyse thermogravimétrique SETSYS Evolution ATG-ADT.

Cette approche méthodologique multidisciplinaire fournit une caractérisation exhaustive des matières premières, établissant une base solide pour la formulation optimale des mélanges et la prédiction des propriétés finales des briques d'adobe. Les résultats obtenus permettent non seulement de classer les matériaux selon leur aptitude à la fabrication de briques, mais aussi d'anticiper leur comportement tout au long du processus de production et d'utilisation.

III.3.3 Composites Terre-Fibre (L'adobe)

III.3.3.1 Méthodologies de fabrication des échantillons

Dans le cadre d'une étude approfondie sur les composites terre-fibres (adobe), une analyse préliminaire a été menée sur six échantillons, dont trois ont démontré un potentiel significatif pour la fabrication de briques d'adobe. Ces échantillons, prélevés sur différents sites, ont fait l'objet d'une analyse comparative rigoureuse suivant un protocole standardisé englobant l'échantillonnage, la préparation et l'analyse. La méthodologie de préparation des spécimens a été soigneusement élaborée, comprenant un processus de séchage contrôlé et un tamisage précis, suivi d'une incorporation méticuleuse de fibres végétales selon un protocole reproduisant fidèlement les conditions de fabrication in situ. Des échantillons parallélépipédiques ont été confectionnés à l'aide de moules spécifiques par compactage manuel, avec une attention particulière portée à la quantité de matériau à compacter en fonction de la teneur en eau.

Le conditionnement des échantillons a été réalisé selon quatre protocoles distincts visant à évaluer les propriétés mécaniques et hydriques du matériau composite. Une vigilance accrue a été maintenue concernant la prévention du développement fongique sur les fibres végétales pendant la période de cure, notamment par un contrôle strict de l'exposition lumineuse et de l'humidité ambiante. Cette démarche expérimentale méthodique permet ainsi une caractérisation complète et précise des propriétés mécaniques et physiques des composites terre-fibres, établissant une base solide pour l'évaluation de leur performance en tant que matériau de construction alternatif.

III.3.3.2 Mesure du pH selon le protocole d'Eades-Grim

L'essai de caractérisation pH, fondé sur le protocole d'Eades et Grim et normalisé par l'ASTM D6276-99a, constitue un outil fondamental dans l'optimisation des traitements des sols à la chaux. Cette méthodologie permet de déterminer avec précision le Point de Fixation de la Chaux (PFC), comme illustré dans la Figure III.11, seuil critique en deçà duquel les réactions pouzzolaniques ne peuvent s'initier. Le PFC, qui représente la concentration minimale nécessaire à la saturation complète des sites d'échange cationique des minéraux argileux par les ions calcium, marque la transition entre deux phases distinctes du traitement.

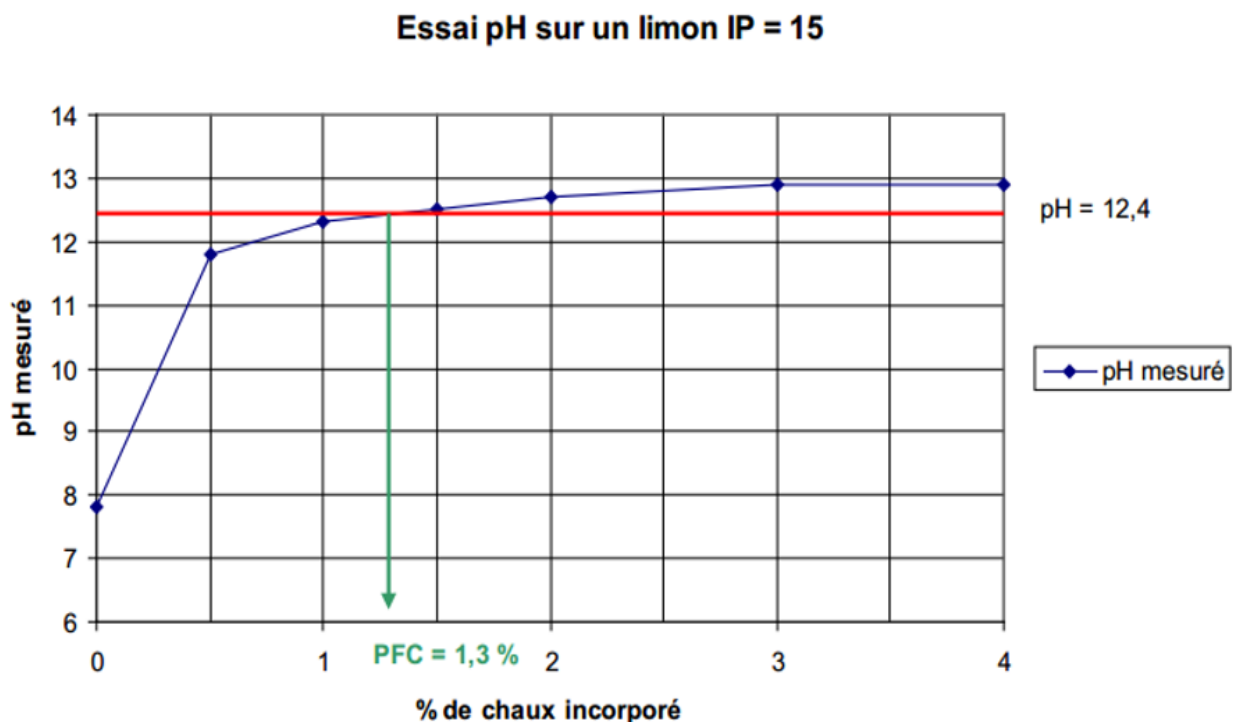


Figure III.11 Evolution du pH d'une suspension de sol+chaux dans l'eau. ¹⁶⁹

Le surplus de chaux se répartit entre la finalisation des échanges cationiques et le développement des réactions pouzzolaniques, essentielles à la formation des phases cimentaires.

Les dosages peuvent dépasser 2% selon les caractéristiques minéralogiques du sol et les objectifs de performance visés, notamment en termes de durabilité. Cette approche scientifique permet ainsi d'optimiser le traitement tout en garantissant l'efficacité des modifications physico-chimiques recherchées dans la matrice sol-chaux.

III.3.3.3 Essai de Compression simple

Le deuxième protocole consiste en un essai de compression uniaxiale. Cet essai est réalisé sur des éprouvettes de géométries variées (cubiques et prismatiques) à l'aide d'une presse à capacité de 250 kN. La vitesse de chargement est fixée à 0,05 kN/s et la déformation est mesurée via un capteur de déplacement de 20 mm. Un facteur de correction de 0,87, basé sur la norme ASTM C39M-03, est appliqué pour compenser le ratio hauteur/diamètre non standard des échantillons. La résistance à la compression est calculée en divisant la force maximale par la surface transversale de l'éprouvette. La résistance à la compression (R_c) est calculée en divisant la charge maximale (F_c , max) par la surface transversale (S) de l'éprouvette.

III.3.3.4 Essai de Flexion 3 points

Le troisième protocole évalue le comportement en flexion des composites. Un essai de flexion 3 points est préféré à l'essai 4 points pour sa distribution de contraintes plus concentrée et uniforme. Les essais sont effectués sur des éprouvettes parallélépipédiques de taille (40x40x160 mm) conformément à la norme ASTM C67-07. La vitesse de déplacement est fixée à 0,25 mm/min pour permettre l'analyse post-rupture.

La résistance en flexion est calculée selon l'expression :

$$\sigma_f = \left[\frac{3FL}{2bh^2} \right] \quad (12)$$

Où σ_f représente le module de rupture en MPa, F la charge maximale en N, L la distance entre appuis en mm, b la largeur et h la hauteur de l'éprouvette à la section de rupture en mm. L'analyse intègre également le calcul du moment d'inertie de la section pour l'évaluation des contraintes à mi-portée sous charge maximale.

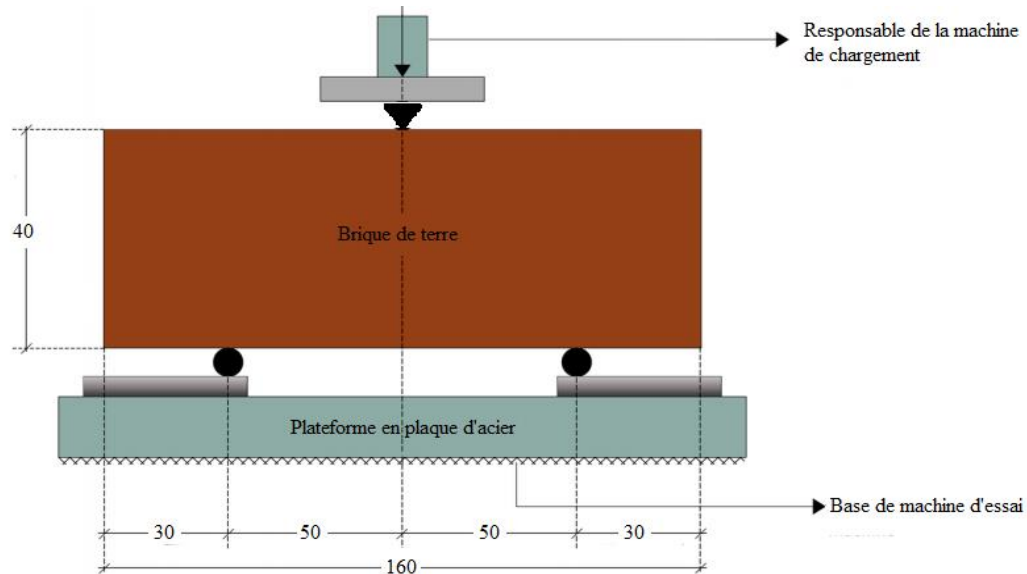


Figure III.12 Configuration d'essai de flexion pour la brique de terre.

III.3.3.5 Mesure du retrait des échantillons

Le quatrième protocole concerne la mesure du retrait. Un dispositif spécifique a été conçu, comprenant des comparateurs de précision 10^{-2} mm montés sur une plaque en bois. Les mesures sont effectuées sur des échantillons de $40 \times 40 \times 160$ mm, deux jours après leur fabrication. Pour assurer la précision des mesures, la surface de contact est lubrifiée et l'échantillon est protégé par des plaques en plastique rigide. Un échantillon de briques d'adobe au retrait connu est utilisé pour la calibration. Les relevés sont effectués deux fois par jour pendant les 5 premiers jours, puis quotidiennement jusqu'à stabilisation du retrait.



Figure III.13 (a) Dispositif d'expérimentation pour évaluer le retrait. (b) Mesure du retrait d'un échantillon.

III.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de présenter de manière approfondie les matériaux étudiés, leur origine, ainsi que les méthodes de prélèvement et de caractérisation utilisées. Une attention particulière a été accordée aux argiles et leurs propriétés physico-chimiques, géotechniques et minéralogiques, qui sont déterminantes pour évaluer leur potentiel dans des applications comme la fabrication de briques d'Adobe. La collecte et l'étude des tiges de " Bassia Indica " ont également mis en évidence leur rôle potentiel comme renforcement fibreux, offrant une perspective innovante pour améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité des briques.

Les différentes analyses méthodologiques décrites, qu'il s'agisse de tests géotechniques, de caractérisations minéralogiques ou des essais de décomposition thermique (ATG/DTA), fournissent une base scientifique solide pour comprendre et optimiser les matériaux naturels et composites étudiés. Ces approches multidisciplinaires permettent de répondre aux enjeux de durabilité et de valorisation des ressources locales dans une optique de construction respectueuse de l'environnement. Ainsi, ce chapitre constitue un socle fondamental pour les travaux des chapitres suivants, qui se concentreront sur l'interprétation des résultats et leur application concrète dans le processus de fabrication.

Partie 02 : Méthodes expérimentales et analyses

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1 Introduction	84
IV.2 Propriétés des fibres de Bassia Indica (BI)	84
IV.2.1 Analyse anatomique	84
IV.2.2 Analyse du diamètre et densité	85
IV.2.3 Analyse de la composition chimique	86
IV.2.4 Analyse par spectroscopie infrarouge a transformee de fourier (RTA-IRFT)	87
IV.2.5 Analyse thermogravimétrique (ATG)	89
IV.2.6 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)	90
IV.2.7 Analyse de traction	91
IV.2.8 Analyse Statistique des resultats du test de traction.....	93
IV.2.9 Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB).....	95
IV.2.10 Analyse par Rayons X Dispersive en Énergie (EDX).....	96
IV.3 Propriétés des sols	97
IV.3.1 Granulométrie des sols.....	97
IV.3.2 Abaque triangulaire de Taylor du sol	100
IV.3.3 Diagramme de plasticité.....	102
IV.3.4 Classification des sols	106
IV.3.5 Analyse chimique par spectrométrie infrarouge des sols.....	107
IV.3.6 Analyse thermogravimétrique différentielle des sols.....	109
IV.3.7 Analyse minéralogique par Diffractogrammes des rayons X des sols	110
IV.4 Comportement mécanique des briques d'Adobes	113
IV.4.1 Formulation des briques d'adobes.....	113
IV.4.2 Analyse de la courbe contrainte-déformation	116
IV.4.3 Effet de l'ajout des fibres sur le module d'Young	118
IV.4.4 Effet des fibres sur la résistance à la compression simple	120
IV.4.5 Effet des fibres sur la résistance à la flexion trois points	122
IV.4.6 Effet des fibres sur l'évolution du retrait et perte de masse	124
IV.4.7 Effet de la stabilisation sur les briques d'adobes renforcées par les fibres.....	126
IV.5 Conclusion	133

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente une étude académique approfondie sur l'utilisation des fibres de *Bassia Indica* (BI) comme renfort dans les briques d'adobe. Il examine minutieusement les propriétés morphologiques, physiques, chimiques et thermiques des fibres BI à l'aide de techniques avancées telles que la RTA-IRFT, ATG, DRX et MEB-EDX. Parallèlement, il analyse les caractéristiques essentielles des sols, notamment la granulométrie, la plasticité et la composition minéralogique. L'étude évalue ensuite la performance mécanique des briques renforcées, en considérant le comportement contrainte-déformation, le module de Young, ainsi que la résistance à la compression et à la flexion. Enfin, elle investigate l'impact de l'ajout de fibres et des méthodes de stabilisation pour optimiser la durabilité et les capacités structurelles des briques.

IV.2 Propriétés des fibres de *Bassia Indica* (BI)

IV.2.1 Analyse anatomique

La tige d'une plante est souvent riche en fibres, communément appelées phloème, où elles sont présentes en faisceaux de fibres élémentaires entourant les tissus centraux, connus sous le nom de fibres végétales. Un examen minutieux de la tige mature de BI a été réalisé à l'aide d'un microscope optique, comme illustré à la Figure IV.1, pour analyser sa structure anatomique. L'agencement anatomique de la tige de BI montre une structure typique de tige, avec une couche épidermique périphérique moins distincte, suivie d'un cortex contenant un phloème et un xylème bien définis, illustrés à la Fig IV. 1a. La structure de la tige présente un périderme fortement ondulé à l'extérieur, suivi par un épiderme et un cortex de différentes épaisseurs. La couche la plus externe, l'épiderme, est recouverte d'une fine cuticule.

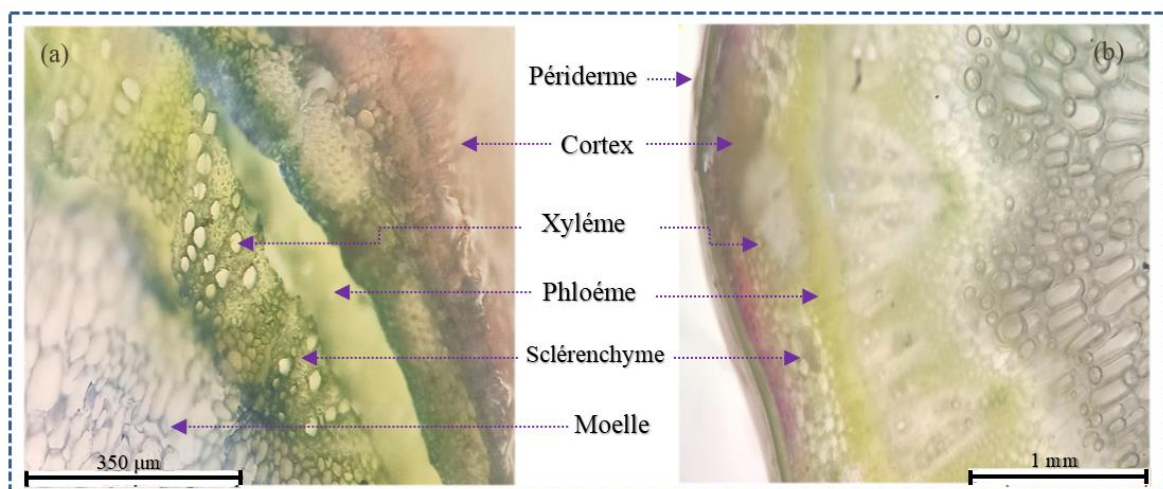


Figure IV.1 Micrographies optiques transversales de la tige BI capturées à : (a) 10 x, et (b) 40 x.

L'épiderme et le sclérenchyme sont clairement visibles, voir Fig IV. 1a et b, avec des fibres de cellulose regroupées autour de tubes de phloème au milieu et de xylème. Ils apparaissent sous forme de cellules circulaires connectées par des couches de sclérenchyme, incluant les composants fondamentaux comme l'hémicellulose, la pectine, et la lignine, tandis que le xylème forme un segment conique interne. Le composant phloème est large et compact, contenant des éléments de tamis et des cellules parenchymateuses, comme le montre la Fig IV. 1a.

IV.2.2 Analyse du diamètre et densité

L'évaluation du diamètre et de la densité des fibres naturelles est cruciale pour comprendre leurs propriétés physiques. Mesurer le diamètre des bio-fibres est particulièrement complexe en raison de leur variabilité de forme externe. Par conséquent, effectuer des mesures à quatre positions différentes sur chaque fibre permet d'obtenir une estimation plus précise. Le diamètre des fibres BI a été mesuré à l'aide d'un microscope optique, comme le montre la Fig IV. 2, révélant un diamètre moyen de $145,58 \pm 7,897 \mu\text{m}$. Cette donnée est essentielle car elle influence directement les propriétés mécaniques des fibres. De plus, cette mesure facilite la sélection de nouvelles fibres naturelles possédant des densités plus faibles, ce qui est avantageux pour la création de matériaux composites légers.

La densité des FBIs a été trouvée à $1,065 \pm 0,025 \text{ g/cm}^3$, une valeur légère par rapport à d'autres sources de fibres naturelles, tant nouvelles que traditionnelles. Cette densité est comparable à celle des fibres de *Syagrus Romanzoffiana* ($1,23 \text{ g/cm}^3$)¹², et de *Centaurea melitensis* ($1,26 \pm 0,018 \text{ g/cm}^3$)¹⁷⁰ mais inférieure à celle des fibres d'*Acacia leucophloea* ($1,385 \text{ g/cm}^3$)¹⁷¹ et de la tige de *Derris scandens* ($1,43 \pm 0,018 \text{ g/cm}^3$)¹⁷² ainsi qu'à celle de l'*Aloe vera* saharien ($1,325 \text{ g/cm}^3$)¹³⁶. En revanche, elles présentent une densité supérieure à celle des fibres d'*Areca catechu* L. ($0,75 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$)¹⁷³ et de *Dracaena reflexa* ($0,79 \text{ g/cm}^3$)¹⁷⁴ tout en étant inférieures aux fibres synthétiques telles que les fibres de verre et de carbone.¹⁷⁵

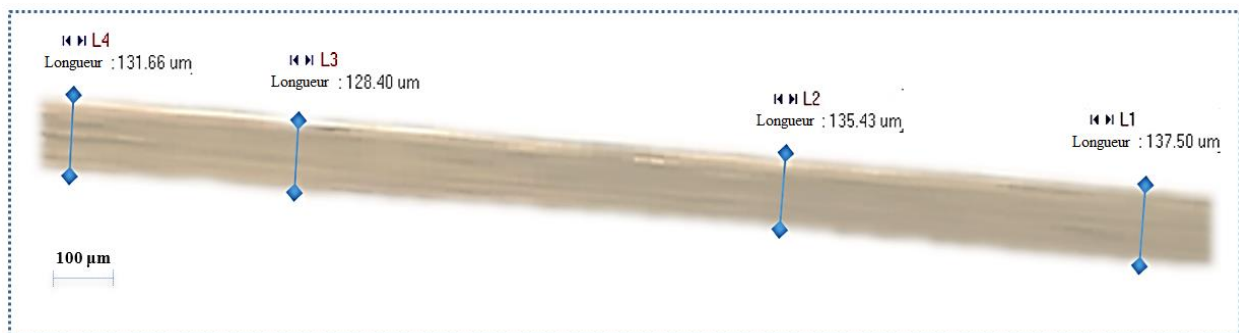


Figure IV.2 Image idéale au microscope pour la mesure du diamètre.

IV.2.3 Analyse de la composition chimique

Les caractéristiques thermo-mécaniques des fibres naturelles sont étroitement liées à leur composition chimique, comme le soulignent diverses études. ^{161, 176} Le tableau IV. 1 récapitule la composition chimique des FBIs et la compare à celle d'autres nouvelles fibres naturelles. Il ressort que les FBIs possèdent une concentration de cellulose de 67,37 %, supérieure à celle de nombreuses autres fibres naturelles. Cette haute teneur en cellulose confère aux fibres BI un caractère cristallin accru, leur octroyant ainsi une nature plus hydrophobe, ¹⁷⁷ ce qui a un impact bénéfique sur leurs performances mécaniques, notamment en termes de résistance à la traction et de module de Young. Les teneurs élevées en lignine dans les FBIs sont bénéfiques pour la rétention d'eau et offrent une protection contre les attaques biologiques ; cependant, un excès de lignine peut entraîner une dégradation structurelle. ¹⁷⁸

Les FBIs contiennent un modeste 10,02 % de lignine, de plus, il a été montré que cette nouvelle fibre contient 12,23 % d'hémicellulose. De plus, comme indiqué dans le tableau IV.1, la quantité de cire était de 0,9 %. Ce rapport peut ne pas vraiment affecter la qualité de l'adhésion fibre/matrice. Manimaran et al. ont montré que lorsque la quantité de cire est très limitée (c'est-à-dire 0,18 %), une meilleure liaison entre ces fibres et les matrices polymères peut être favorisée. La nature thermiquement stable des FBIs est assurée par la teneur en cendres de 1,8 % et la teneur en humidité de 7,48 %.

Fibre Naturelle	Cellulose (poids %)	Hémicellulose (poids %)	Lignine (poids %)	Cire (poids %)	Teneur en Humidité (poids %)	Cendres (poids %)	Références
Bassia indica	67.37	12.23	10.02	0.9	7.48	1.8	Étude actuelle
Perotis indica	68.4	15.7	8.35	0.32	9.54	4.32	¹⁷⁹
Ficus Carica	63.17	12.08	13.7	0.42	9.07	1.05	¹⁸⁰
Trachelospermum jasminoides	62.7	14.5	4.1	2.0	7.8	1.5	¹⁸¹
Dichrostachys Cinerea	72.4	13.08	16.89	0.57	9.82	3.97	¹⁷⁸
Epipremnum aureum (Tige)	66.34	13.42	14.01	0.37	7.41	4.61	¹⁸²
Sida mysorensis	53.36	15.23	9.46	0.86	10.48	3.33	¹⁸³
Pergularia Tomentosa L.	43.8	16	8.6	1.88	8.5	2.74	¹⁸⁴

Tableau IV.1 Composition chimique des nouvelles fibres naturelles.

Comparativement à divers résultats de recherche, la teneur en cellulose des FBIs (67,37 %) est comparable à celle de la fibre de Perotis indica (68,4 %) ¹⁷⁹ et de la tige de fibre d'Epipremnum

aureum (66,34 %),¹⁸² mais plus élevée que celle de la fibre de Ficus Carica (63,17 %)¹⁸⁰ En termes de contenu en lignine, les FBIs (10,02 %) ressemblent à la fibre de Sida mysorensis (9,46 %)¹⁸³ mais présentent un contenu inférieur à celui de la fibre de Dichrostachys Cinerea (16,89 %)¹⁷⁸ La présence de niveaux plus élevés de cire et d'humidité peut entraver la liaison entre la fibre et la matrice dans la préparation du matériau composite.¹⁸⁵ Par conséquent, une teneur plus faible en cire est préférée, et les FBIs maintiennent un favorable (0,9 %), en contraste avec la fibre de Trachelospermum jasminoides (2,0 %).¹⁸¹

IV.2.4 Analyse par spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier (RTA-IRFT)

La spectroscopie RTA-IRFT a été mise à contribution pour caractériser les composants fondamentaux des fibres naturelles ainsi que les groupes fonctionnels spécifiques à chaque type. La Fig IV. 3 présente les groupes fonctionnels identifiés dans les FBIs sur la gamme spectrale de 4000 à 500 cm^{-1} . Le spectre obtenu révèle plusieurs bandes d'absorption significatives situées à des nombres d'onde spécifiques. Une large bande d'absorption s'étend de 3125 à 3575 cm^{-1} , avec un pic marqué à 3329 cm^{-1} , ce qui indique la présence de vibrations d'étirement O-H typiques de la structure de cellulose dans les FBIs.¹⁸⁶

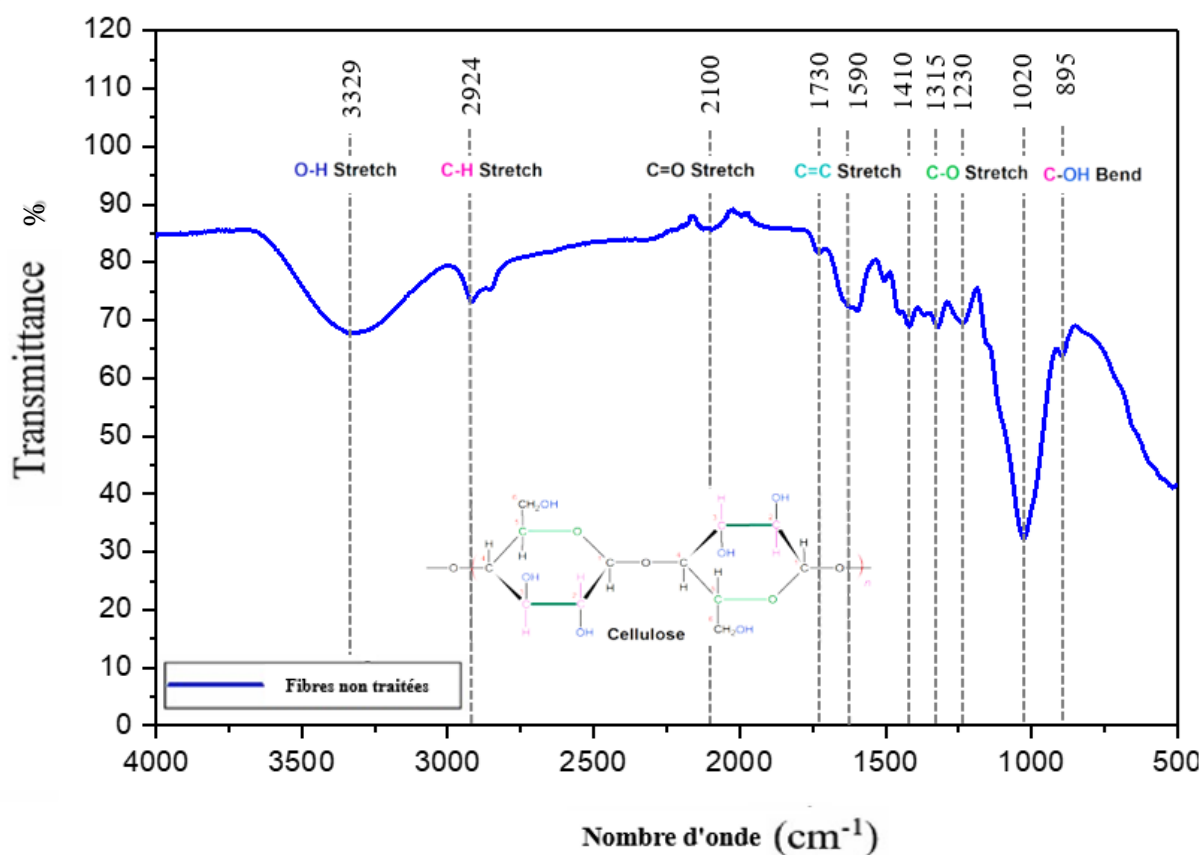


Figure IV.3 Spectre RTA-IRFT pour les FBIs à l'état brut.

Entre 2915 et 2940 cm^{-1} , un pic à 2924 cm^{-1} est observé, attribué aux vibrations d'étirement asymétrique C–H des groupes CH et CH₂.¹⁸⁷ Autour de 2100 à 2140 cm^{-1} , un pic se manifeste à 2100 cm^{-1} , révélant la déformation du plan aromatique et les vibrations d'étirement des liaisons C=C, associées aux composants ligniniques des FBIs.¹⁸⁸ À 1730 cm^{-1} , une bande d'absorbance apparaît, résultant de la vibration d'étirement des groupes carbonyles (C=O) présents dans l'hémicellulose, la lignine et les extraits.¹⁸⁹ Un pic à 1590 cm^{-1} est associé à la vibration d'étirement C=C qui est caractéristique de la lignine.¹⁹⁰ Enfin, une bande d'absorbance à 1410 cm^{-1} est liée à la flexion symétrique des groupes CH₃ et CH₂ trouvés dans la cellulose.¹⁹¹

Vibration de flexion des liaisons C–H et C–O dans les groupes d'anneaux aromatiques des polysaccharides.¹⁹² À 1230 cm^{-1} , situé dans l'intervalle de 1225 à 1265 cm^{-1} , un pic est observé, signifiant la vibration d'étirement caractéristique des liaisons = C–O au sein du groupe acétyle de l'hémicellulose.¹⁹³ Un pic particulièrement intense se manifeste aux alentours de 1020 cm^{-1} , compris entre 1000 et 1040 cm^{-1} , qui est attribué aux vibrations d'étirement causées par les liaisons C–O et O–H présentes dans la lignine de la fibre.¹⁹⁴ Enfin, la bande située à 895 cm^{-1} est associée à la contribution β -glycosidique de la cellulose et de l'hémicellulose.¹⁵ Cette analyse des résultats révèle que les bandes infrarouges présentent des motifs d'absorption similaires à ceux constatés dans la majorité des fibres naturelles étudiées. L'investigation des FBIs et la confirmation de la présence de composants significatifs ont été effectuées grâce à l'application de la spectroscopie infrarouge. Le tableau IV.2 illustre un résumé des principales bandes spectrales et de leurs groupes fonctionnels tels qu'identifiés par l'analyse du spectre RTA-IRFT des FBIs.

Limites Infrarouges	Position des Bandes (cm^{-1})	Mode(s) de Vibration	Sources	Réf.
3125–3575	3329	Étirement O–H lié à l'hydrogène	Cellulose, Hémicelluloses	186
2915–2940	2924	Vibration d'étirement C–H asym.	Cellulose, Hémicelluloses	187
2100–2140	2100	Vibration d'étirement C–H	Hémicellulose	188
1600–1740	1730	Étirement et flexion C=O	Hémicellulose, lignine et extraits	189
1580–1600	1590	Vibration d'étirement C=C	Lignine	190
1400–1420	1410	Vibration de déformation en plan C–H (CH ₂ et CH ₃)	Cellulose	191
1315–1350	1315	Groupe C–O de l'anneau aromatique dans les polysaccharides	Composés de lignine, Cellulose, Hémicelluloses	192
1225–1265	1230	Vibration d'étirement = C–O et C–O–C	Cellulose, Hémicelluloses	193
1000–1040	1020	Étirement du pont C–O–C	Cellulose, Hémicelluloses	194
880–900	895	Liaisons β -glycosidiques entre les monosaccharides	Cellulose, Hémicelluloses	15

Tableau IV.2 Spectres vibrationnels RTA-IRFT pour les FBIs.

IV.2.5 Analyse thermogravimétrique (ATG)

Les composites thermoplastiques renforcés par des biofibres sont généralement produits à des températures élevées. Il est donc essentiel d'évaluer la stabilité thermique des biofibres à différentes températures afin de (I) déterminer la plage de température adéquate pour la fabrication des composites et (II) prévenir toute altération des propriétés des fibres.

Les courbes de mesures thermogravimétriques (ATG) et de première dérivée (DTG) des FBIs sont illustrées à la Fig IV. 4a. À 112.17 °C, la fibre commence à se décomposer légèrement, avec une réduction de poids de 10.62 % due à l'évaporation de l'humidité, ce qui confirme son caractère hydrophile. Notamment, aucune perte de poids n'est perceptible jusqu'à ce que la température atteigne 210 °C, témoignant d'une remarquable stabilité thermique des fibres jusqu'à ce point. Entre 210 °C et 400 °C, une dégradation importante se produit, impliquant la cellulose, l'hémicellulose, et une quantité significative de matériaux instables, avec une température de dégradation maximale à 323.21 °C et une perte de poids de 67.92 %.

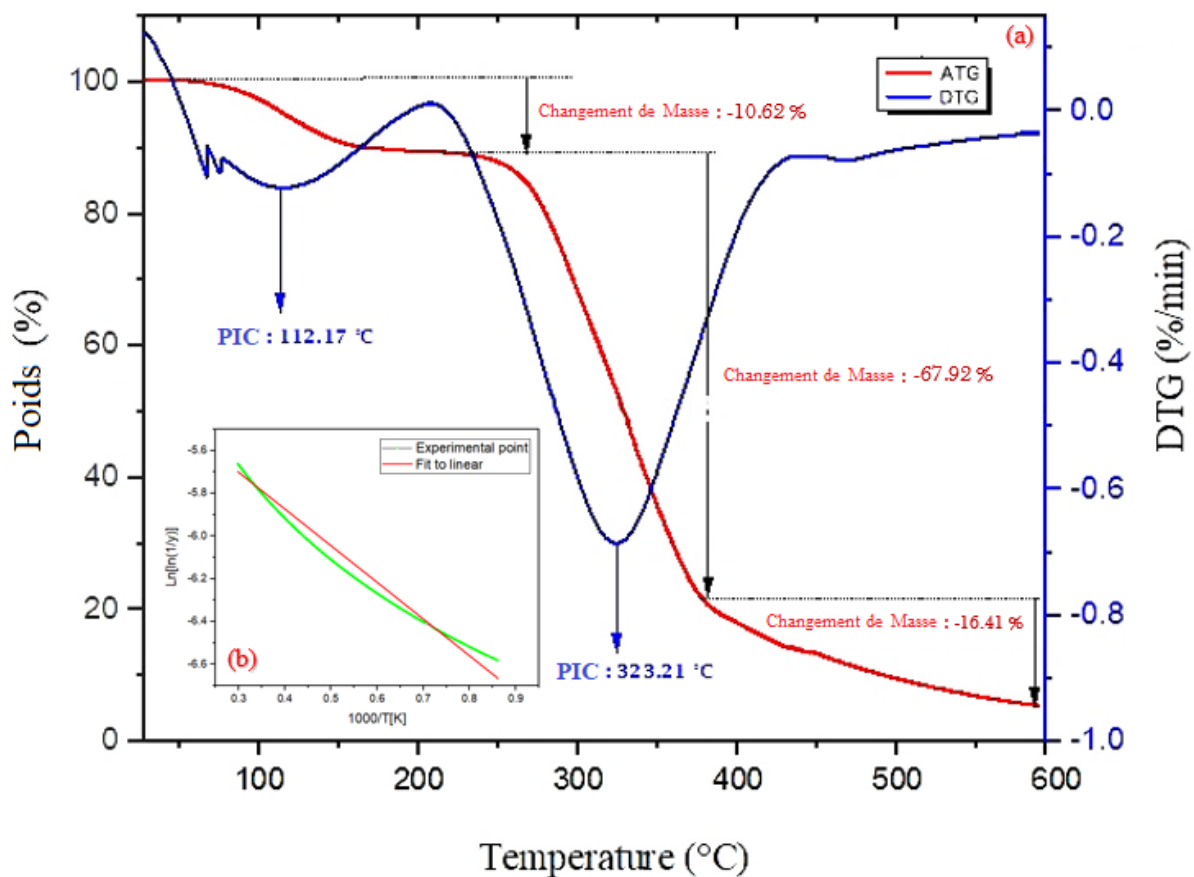


Figure IV.4 (a) Thermogrammes ATG et DTG des FBIs et (b) Graphique de Broido des FBIs.

La perte de poids finale de 16.41 % reflète la décomposition de substances additionnelles présentes dans les FBIs, telles que la cire, la lignine et la dégradation oxydative des résidus carbonisés. La lignine, un polymère particulièrement complexe et robuste, exige davantage de temps et des températures plus élevées pour sa décomposition, qui se produit principalement entre 225 °C et 600 °C. Un résidu de 5.05 % demeure à 600 °C. L'analyse des données ATG peut être utilisée pour déduire les paramètres cinétiques.

À la Fig IV. 4b, l'énergie d'activation est déterminée à partir de la pente, aboutissant à une valeur de 93.78 kJ/mol. De plus, la valeur obtenue de l'énergie d'activation (E_a) des fibres BI se situe dans une fourchette de 60 à 170 kJ/mol¹⁹⁰. Cette analyse détaillée de la décomposition thermique des FBIs indique qu'elles sont appropriées comme matériel de renforcement pour les composites, dans des conditions de température ne dépassant pas 210 °C.

IV.2.6 Analyse par diffraction des rayons X (DRX)

Le spectre de diffraction des rayons X de l'échantillon de FBI, présenté à la Fig IV. 5, révèle deux pics distincts. Le premier pic, situé à $2\theta = 16.15^\circ$ et associé au plan cristallographique 100, représente le pourcentage amorphe de l'hémicellulose et de la lignine, tandis que le second pic, relatif à la cellulose, est observé à $2\theta = 21.71^\circ$, correspondant au plan cristallographique (0 0 2).¹⁹⁵ Ces observations suggèrent que le faisceau de fibres BI possède une structure semi-cristalline, où ces pics peuvent également être associés aux plans cristallographiques (2 0 0) et (1 $\bar{1}$ 0) respectivement. L'augmentation de l'indice de cristallinité résulte d'une amélioration dans l'organisation des chaînes de cellulose, de l'élimination des composants non cellulosiques et de l'extraction de l'eau, facilitée par la rupture des liaisons hydrogène, favorisant ainsi la restructuration des régions cristallines.

L'indice de cristallinité des fibres de cellulose est déterminé par le rapport de la zone totale sur la zone de tous les pics cristallins et est un paramètre essentiel en raison de son impact significatif sur les propriétés mécaniques des fibres. De plus, l'équation de Scherrer est employée pour estimer la Taille des Cristallites, qui représente la dimension moyenne d'un cristal individuel. Pour les FBI, l'indice de cristallinité a été mesuré à 40.12 %, ce qui est supérieur à celui de nombreuses autres bio-fibres telles que la tige de *Cissus vitifolia* (30.5 %),¹⁹⁶ *Cyperus compactus* (37.08 %),¹⁹⁷ mais reste inférieur à celui de *Acacia leucophloea* (51.00 %),¹⁶¹ la tige de *Derris scandens* (58.15 %)¹⁷² et *Typha Augustata* (65.16 %).¹⁹⁸ La taille des cristallites des FBI a été calculée à 2.23 nm, une mesure comparable à celle de la fibre d'*Althaea officinalis* L. (2.40 nm),¹⁹⁹ de la fibre d'*aloe vera* saharienne (5.72 nm),¹³⁶ de la fibre de *Syagrus Romanzoffiana* (11.40 nm),¹² et de la fibre de *Centaurea melitensis* (16.92 nm).¹⁷⁰ Ces caractéristiques cristallines confirment la fiabilité des FBIs comme excellent candidat pour le renforcement de matériaux composites.

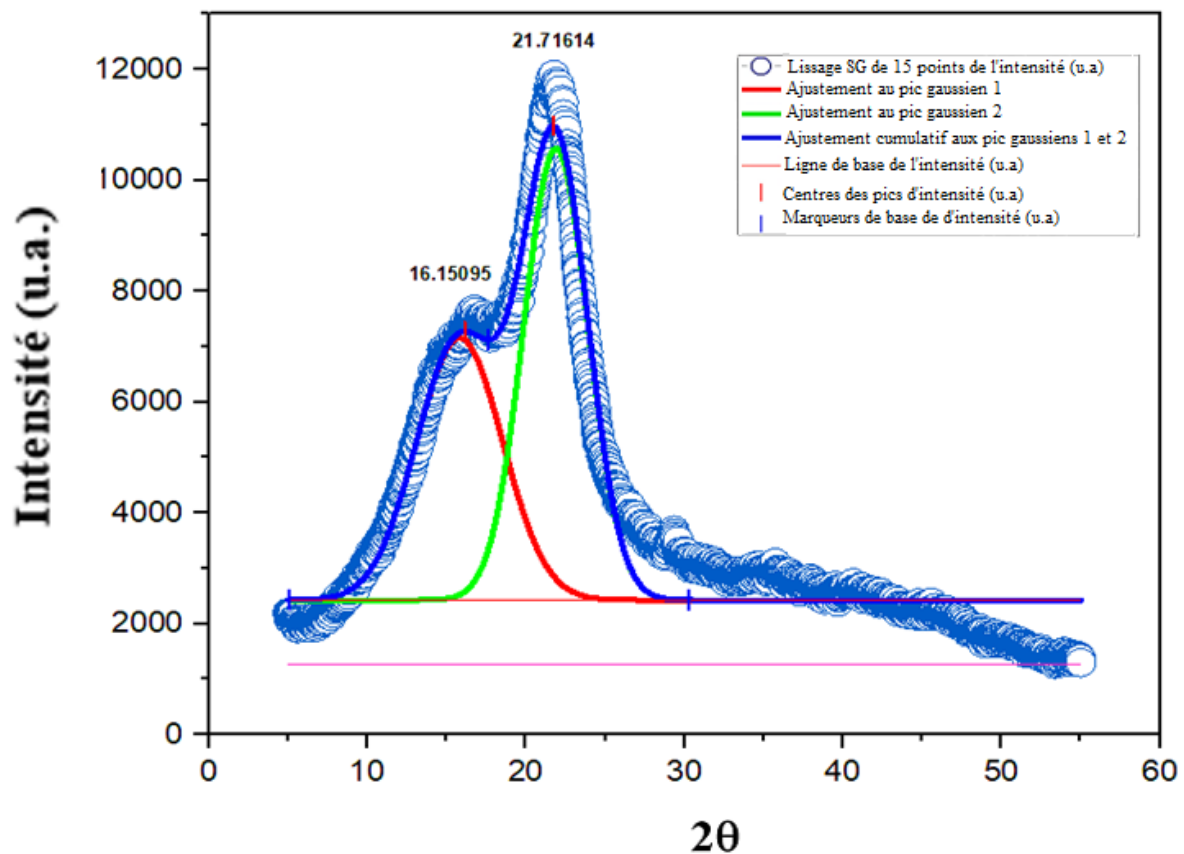


Figure IV.5 Diffraction des rayons X des FBIs.

IV.2.7 Analyse de traction

Pour cette étude, dans le but d'obtenir des évaluations précises des propriétés mécaniques, un total de trente fibres a été sélectionné aléatoirement et soumis à des tests de traction statiques avec une longueur de jauge de 40 mm. La Fig IV. 6a montre une courbe typique contrainte-déformation, illustrant une relation linéaire où la contrainte augmente proportionnellement à la déformation, culminant à une valeur maximale de 1.57 %. Lorsqu'elles parviennent à la rupture, toutes les fibres étudiées manifestent un comportement fragile, caractérisé par une réduction rapide de la contrainte.

La résistance à la traction de la fibre BI a été mesurée à 417.50 ± 7.08 MPa, une valeur inférieure à celle observée pour la fibre de *Dracaena reflexa* (829.60 MPa),¹⁷⁴ mais supérieure à celle de *Areca catechu* L. (322.829 ± 67 MPa),¹⁷³ des fibres de *Hierochloe odorata* (105.70 MPa),²⁰⁰ et approximativement équivalente à celle des fibres d'*Althaea officinalis* L (415.20 MPa).¹⁹⁹ Néanmoins, la fibre BI présente des propriétés acceptables pour des applications économiques. Les résultats ont révélé que le module de Young était de 17.46 ± 1.55 GPa et la déformation à la rupture de 1.17 ± 0.02 %, permettant de comparer les propriétés mécaniques des FBIs avec d'autres fibres

naturelles (voir Tableau IV.3). La corrélation entre la résistance à la traction, le module de Young et le diamètre des fibres utilisées dans les tests est illustrée à la Fig IV. 6b. Cette analyse comparative facilite l'évaluation des propriétés mécaniques des FBIs. Il est à noter que l'augmentation du diamètre des fibres entraîne généralement une diminution de la résistance à la traction et du module de Young.

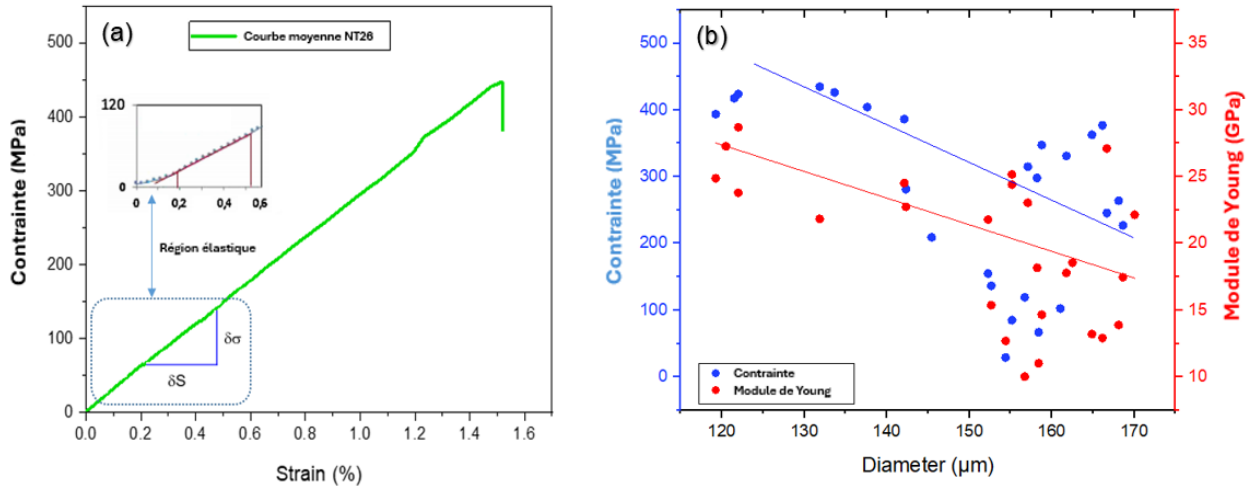


Figure IV.6 (a) Courbe standard de contrainte-déformation des FBIs avec une vue agrandie de la région élastique et (b) Contrainte à la rupture et module de Young en fonction du diamètre des fibres.

La méthode de test des microgouttelettes a été employée pour mesurer la résistance au cisaillement et calculer la force interfaciale entre l'époxy et les fibres de BI, comme démontré à la Fig III. 5b. Les résultats ont été représentés sur un graphique à barres à la Fig IV. 7a, illustrant la résistance au cisaillement interfacial (IFSS) en fonction de la longueur des fibres incorporées dans chaque échantillon. Une variation significative des valeurs d'IFSS a été notablement observée, basée sur la longueur de la gouttelette immergée sur la surface des FBIs. Cette variation est également mise en évidence dans le graphique IFSS dérivé des résultats des tests. La valeur moyenne d'IFSS a été établie à $6,99 \pm 1,10$ MPa (visible à la Fig IV. 7b).

Nos découvertes indiquent que les différences dans la résistance au cisaillement interfacial sont influencées non seulement par la zone adhésive entre la résine et la fibre, mais aussi par plusieurs facteurs incluant le type de fibre naturelle, la rugosité de la surface et les variations de diamètre des fibres ligno-cellulosiques. Ces éléments contribuent conjointement à des modifications dans le comportement mécanique des fibres. D'après les résultats obtenus, il est raisonnable d'affirmer que les FBIs sont adaptés pour renforcer les composites polymères.

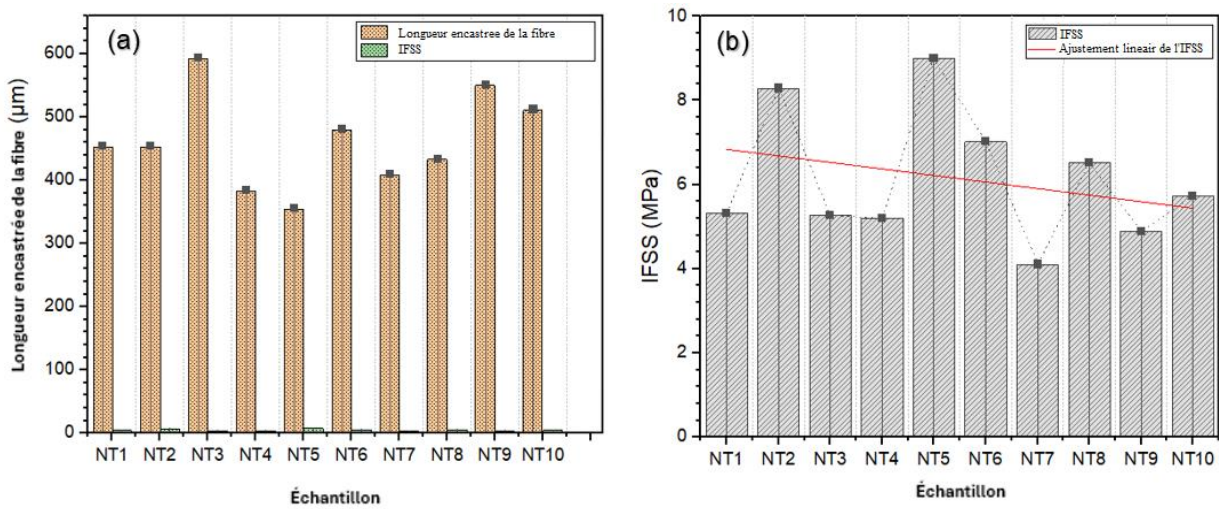


Figure IV.7 (a) La force de cisaillement interfaciale apparente de chaque échantillon et la longueur de la fibre incorporée, et (b) la force de cisaillement interfaciale calculée.

IV.2.8 Analyse Statistique des résultats du test de traction

Étant donné le nombre substantiel d'expériences effectuées (vingt échantillons), des variations dans les propriétés mécaniques ont été constatées, nécessitant une analyse statistique approfondie. Cette méthode a déjà été utilisée par plusieurs chercheurs dans des études antérieures. ^{170, 174, 191, 201} L'examen des propriétés mécaniques a été réalisé à l'aide du logiciel commercial Minitab 19, en appliquant la distribution de Weibull à deux et trois paramètres pour déterminer la distribution la plus adéquate. La Fig IV. 8 illustre les distributions de contrainte, de module de Young et de déformation à la rupture des FBIs selon les modèles de Weibull. Plus spécifiquement, les Figs IV. 8a, b, et 8c, ainsi que les Figs IV. 8d, e, et 8f, présentent une comparaison des types de distributions de probabilité.

Des courbes de distribution statistique de Weibull à deux et à trois paramètres (moindres carrés LSXY) ont été employées pour analyser les propriétés mécaniques à un niveau de confiance de 95 %. Il est crucial de souligner que la distribution de Weibull à deux paramètres a estimé que le module de Young et la déformation étaient respectivement de 23,9 GPa et de 0,82 %.

En revanche, avec la distribution à trois paramètres, ces valeurs ont été évaluées à 16,15 GPa et à 1,18 %. Les résultats des tests de traction sont en étroite concordance avec la distribution de Weibull, affichant une valeur de corrélation d'environ $R^2 = 0,98$, indiquant une forte cohérence. Manifestement, la distribution de Weibull à trois paramètres fournit des propriétés mécaniques qui se rapprochent davantage des valeurs moyennes obtenues expérimentalement, la rendant plus appropriée pour estimer la contrainte dans les FBIs. À titre d'exemple, les propriétés de traction

prédites correspondent étroitement aux résultats expérimentaux, avec une valeur d'environ 419,10 MPa comparée à la valeur expérimentale de 417,50 MPa. Cette concordance entre les données prédites et expérimentales démontre clairement l'utilité de la fonction de Weibull dans la caractérisation statistique des défaillances mécaniques des fibres ligno-cellulosiques.

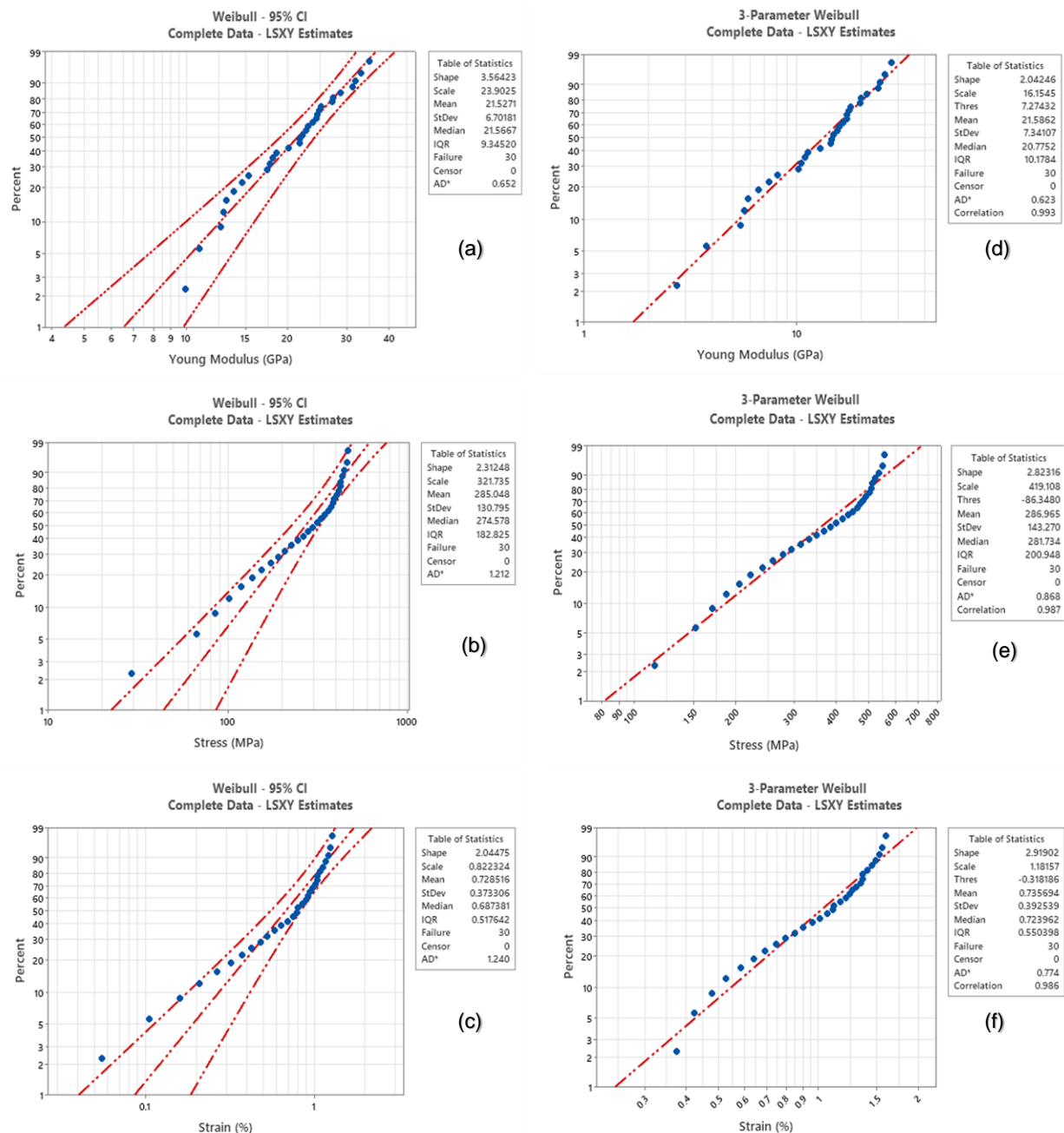


Figure IV.8 Distribution de Weibull avec deux paramètres et trois paramètres pour la résistance à la traction, le module de Young et la déformation à la rupture.

Fibre Naturelle	Propriétés Physiques		Propriétés Thermiques			Référence
	Diamètre (μm)	Densité (g/cm ³)	Stabilité Thermique (°C)	Température Maximale de Dégradation (°C)	Énergie d'Activation Ea (kJ/mol)	
<i>Bassia Indica</i>	145.58 ± 7.89	1.06 ± 0.025	260.24	321.23	32.74	Étude actuelle
<i>Syagrus Romanzoffiana</i>	142	1.23	220	352	64.53	12
<i>Acacia leucophloea</i>	168.50	1.385	100	387	73.10	171
<i>Centaurea melitensis</i>	187.11 ± 60.41	1.26 ± 0.018	210	317.86	-	170
<i>Derris scandens stem</i>	158-169	1.43 ± 0.018	230	332	73.2	172
<i>Saharan Aloe vera</i>	80.61	1.325	225	350	60.20	136
<i>Areca catechu L</i>	395 ± 17	0.75 ± 0.05	240	325.80	64.54	173
<i>Dracaena reflexa</i>	176.20	0.790	232.32	348.78	68.78	174
<i>Althaea officinalis L.</i>	156-194	1.180	220	344	-	199
<i>Typha Augustata</i>	105 ± 10.15	1.015	298.48	450	67.99	198
<i>Hierochloe Odarata</i>	136.71 ± 4.34	1.16 ± 0.02	-	352.20	-	200

Fibre Naturelle	Propriétés Cristallines			Propriétés de Traction			Référence
	Position de Pic (°)	Indice Crystalline (%)	Taille de Crystallite (nm)	Résistance à la Traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Allongement à la Rupture (%)	
<i>Bassia Indica</i>	16.15/21.72	40.12	22.08	417.50 ± 7.08	17.46 ± 1.55	1.17 ± 0.02	Étude actuelle
<i>Syagrus Romanzoffiana</i>	15.81/21.80	40.81	11.40	671	415	1.84	12
<i>Acacia leucophloea</i>	14.80/22.20	51.00	15.00	317-1608	8.41-69.61	1.38-4.24	171
<i>Centaurea melitensis</i>	-	47.69	16.92	336.87 ± 59.94	23.87 ± 5.21	1.27 ± 0.36	170
<i>Derris scandens stem</i>	15.34/22.82	58.15	11.92	437-785	4.80-22.07	3.34-9.11	172
<i>Saharan Aloe vera</i>	17.8/22.59	56.50	05.72	805.50	42.29	2.39	136
<i>Areca catechu L</i>	- /20.12	55.50	07.90	322.829 ± 67	3.115 ± 2.31	10.23 ± 2.75	173
<i>Dracaena reflexa</i>	15.58/22.31	57.32	19.01	829.60	46.37	2.95	174
<i>Althaea officinalis L.</i>	15.70/22.30	68.00	02.40	415.20	65.40	3.90	199
<i>Typha Augustata</i>	15.39/23.19	65.16	06.40	665 ± 7	27.45 ± 3	3.12 ± 0.5	198
<i>Hierochloe Odarata</i>	16.12/22.12	63.80	-	105.70	2.56	2.40	200

Tableau IV.3 Propriétés des fibres de *Bassia indica* comparées à celles d'autres fibres naturelles.

IV.2.9 Analyse par Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

L'examen de la morphologie de surface est essentiel car il offre des aperçus précieux sur les applications potentielles des fibres comme renforcement dans divers matériaux composites. Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) révèlent des détails minutieux concernant la topographie de surface des FBIs. Pour les vues longitudinales, les micrographies MEB ont été réalisées à un grossissement de 1000x, tandis que pour les coupes transversales, elles ont été capturées à un grossissement de 4000x. La Fig IV. 9a présente des images MEB qui illustrent la morphologie distincte des FBIs extraites, offrant ainsi une vision claire de leur structure physique. Importamment, ces images révèlent une caractéristique distincte désignée sous le terme de 'motifs ondulés', résultant de fluctuations dans les diamètres des fibres individuelles. Ces motifs sont cruciaux pour faciliter la mesure précise du diamètre du faisceau de FBI, évalué à 124,6 μm. En outre, Ces fibres se caractérisent par des bosses et des inclusions sur leurs surfaces, ce qui améliore significativement leur adhérence dans la matrice polymère.

Selon la Fig IV. 9b, la section transversale de la fibre montre une homogénéité avec de minimales variations. Chaque fibre élémentaire comprend un espace creux central, appelé le lumen, qui adopte une forme légèrement ovale (avec des dimensions de $L = 6 \mu\text{m}$ et $e = 4 \mu\text{m}$) et joue un rôle essentiel dans le transport de l'eau et des nutriments le long de la fibre.²⁰² La Fig IV. 9b illustre aussi une structure de surface multicellulaire distincte, composée de constituants tels que la cellulose, et recouverte de divers composés y compris l'hémicellulose, les grains d'amidon, la lignine, la cire et la pectine, traits fréquents des FBIs. Cette composition complexe influence directement les propriétés mécaniques et le liage interfacial dans les bio-composites.

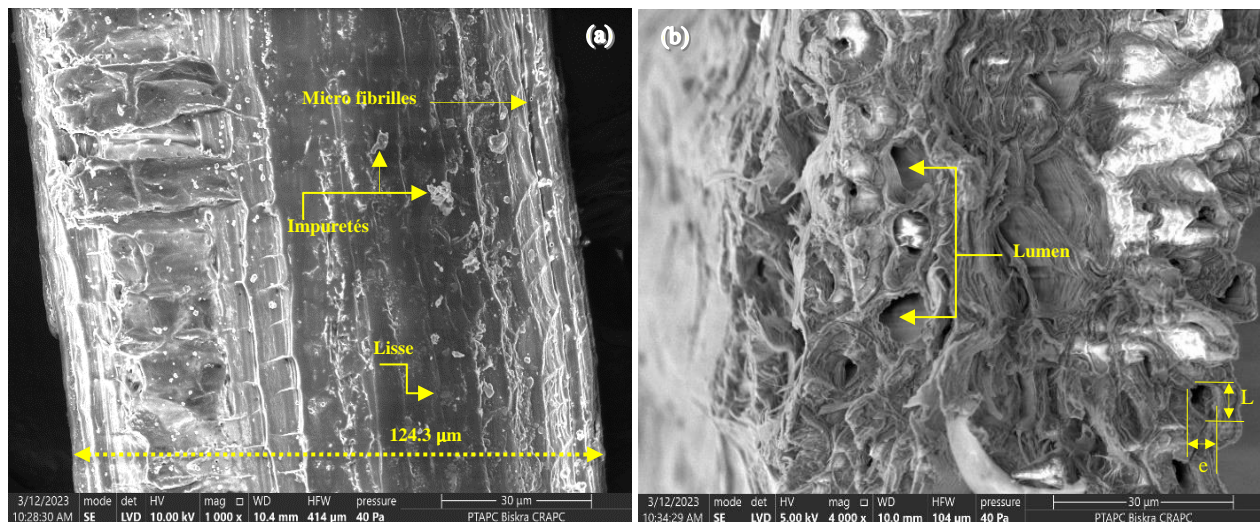


Figure IV.9 Micrographies MEB des FBIs : (a) vue longitudinale (1000x) et (b) vue en coupe transversale (4000x).

IV.2.10 Analyse par Rayons X Dispersive en Énergie (EDX)

L'analyse quantitative élémentaire des FBIs est illustrée à la Fig IV. 10, qui affichent les pourcentages atomiques et massiques obtenus via un spectroscope dispersive en énergie. L'analyse par EDX révèle des pics significatifs, indiquant la présence d'éléments essentiels à la surface des FBIs, tels que le carbone, l'oxygène, et le sodium, reflétant la composition typique des matériaux cellulotiques.¹⁹⁶

Parmi ces éléments, le carbone et l'oxygène se révèlent être les plus prédominants, avec une composition de surface de 56,70 % en poids de carbone (50,07 % at.) et de 42,48 % en poids d'oxygène (49,62 % at.). Cette concentration élevée de carbone et d'oxygène suggère une surface des FBIs avec une teneur réduite en lignine.²⁰³ Les FBIs contiennent également 0,82 % en poids de sodium (0,31 % at.) sur leur surface, ce qui est notable pour l'analyse de leurs propriétés chimiques de surface.

Total des comptes : 149
Comptes intégrés : 1171

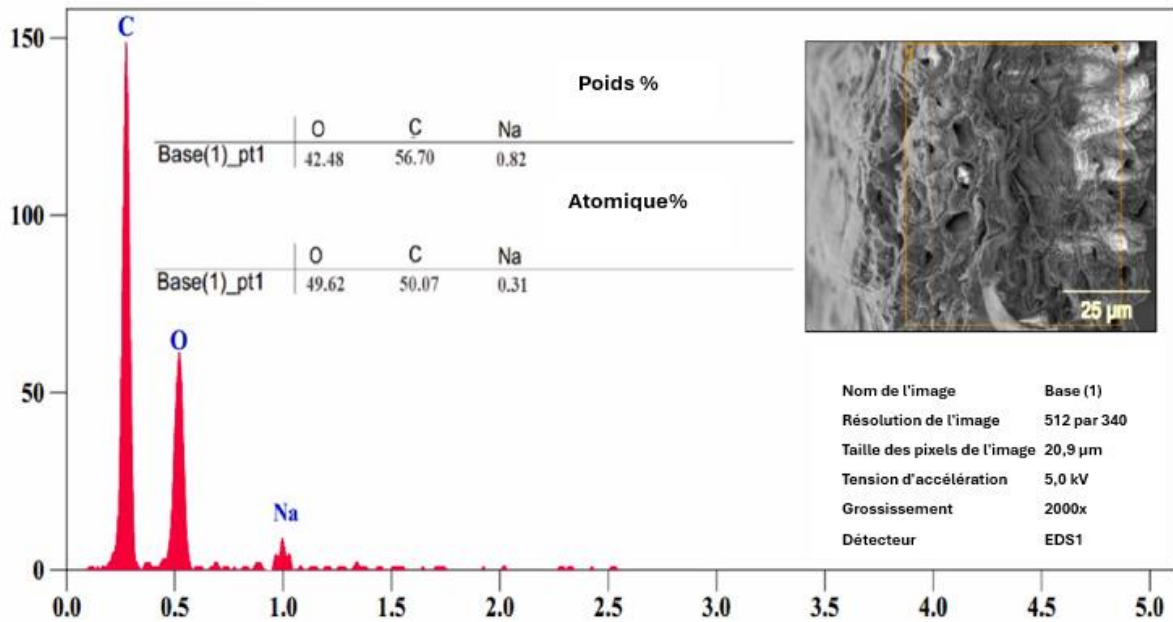


Figure IV.10 Analyse EDX des FBIs.

IV.3 Propriétés des sols

IV.3.1 Granulométrie des sols

La figure IV.11 illustre les courbes granulométriques cumulatives de six échantillons de sol, désignés par les lettres (a) à (f). Ces courbes traduisent la répartition des tailles de particules dans chaque échantillon, exprimée en pourcentage de particules passant à travers un tamis de diamètre donné. Les courbes révèlent une hétérogénéité marquée dans la distribution des tailles de particules entre les différents échantillons. Certains sols sont dominés par des particules fines (argiles et limons), tandis que d'autres contiennent une proportion notable de particules grossières (sables). Cette diversité granulométrique a des implications directes sur les propriétés des sols.

Les courbes associées aux échantillons (b), (c) et (f) se distinguent par leur pente relativement raide. Cela reflète une distribution granulométrique étroite, caractéristique de sols dominés par des particules fines, telles que les argiles et les limons. Ces sols sont probablement de type argileux ou limoneux. À l'inverse, les courbes des échantillons (a), (d) et (e) montrent une pente plus étalée, indiquant une distribution granulométrique large. Ces échantillons présentent une proportion significative de particules de tailles variées, ce qui suggère qu'ils appartiennent à des sols mixtes, tels que les sols argilo-sableux ou limo-sableux.

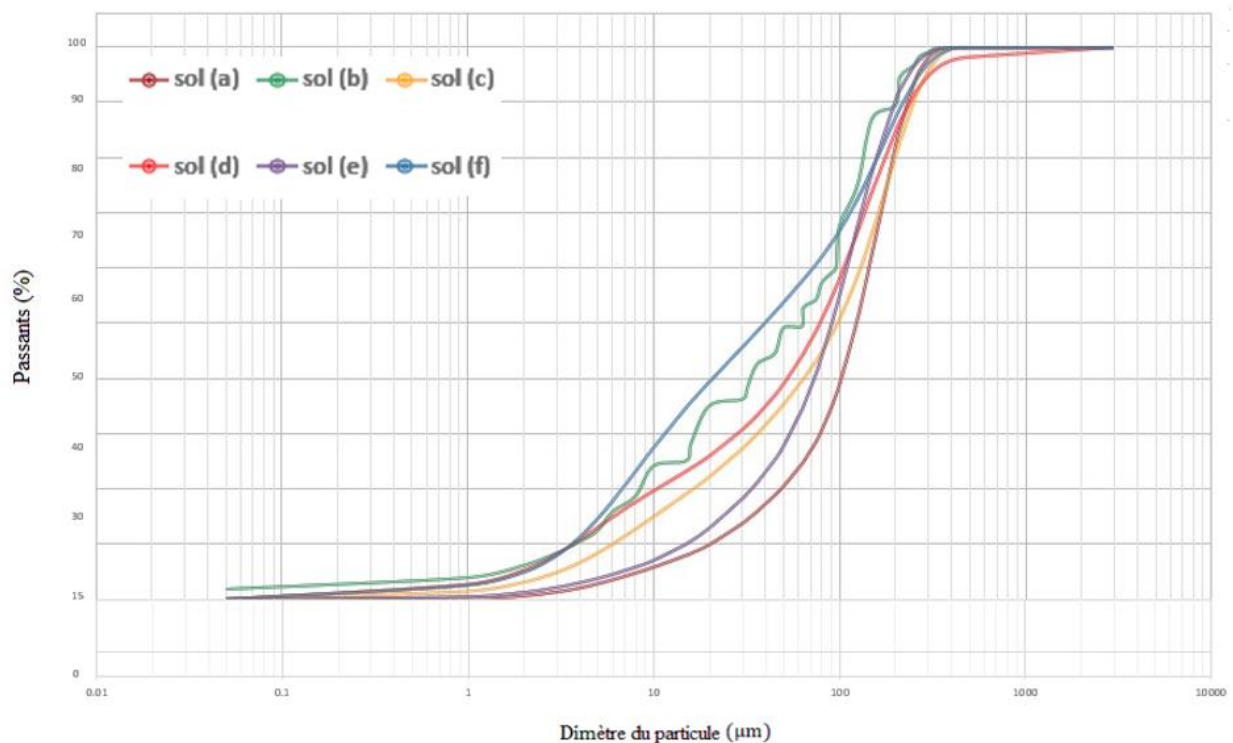


Figure IV.11 Courbes granulométriques des sols.

L'analyse des sols (a, b, c, d, e et f) repose sur plusieurs paramètres granulométriques et physico-chimiques, notamment la concentration, le span (largeur de distribution), l'uniformité, la surface spécifique et les diamètres moyens des particules. Ces résultats permettent une classification précise des sols et fournissent des indications sur leur nature et leurs propriétés.

- Concentration

La concentration représente la quantité de particules en suspension dans l'échantillon. Les sols (a), (d) et (e) affichent des concentrations relativement élevées (respectivement 0,0215 %, 0,0056 % et 0,0111 %), témoignant d'une plus grande quantité de matière en suspension, ce qui est caractéristique des sols riches en particules fines. En revanche, les sols (b), (c) et (f) présentent des concentrations très faibles (< 0,005 %), traduisant une faible densité particulaire.

- Span (largeur de distribution)

Le span, indicateur de la variabilité granulométrique, montre une forte hétérogénéité dans les sols f (5,466) et b (3,217), où les tailles des particules varient largement. Les sols a (1,825) et e (2,016) affichent une distribution plus homogène, reflétant une meilleure classification des particules. Cette observation suggère que les sols (a) et (e) sont mieux triés, probablement sous l'effet d'un processus de sédimentation plus uniforme.

- Uniformité

L'uniformité, définie par le degré de régularité dans la taille des particules, varie considérablement entre les sols. Les sols d (1,083) et b (1,058) sont les plus uniformes, signalant une répartition régulière des tailles. À l'inverse, les sols a (0,544) et e (0,616) montrent une grande variabilité, ce qui peut indiquer la présence d'un mélange de particules fines et grossières.

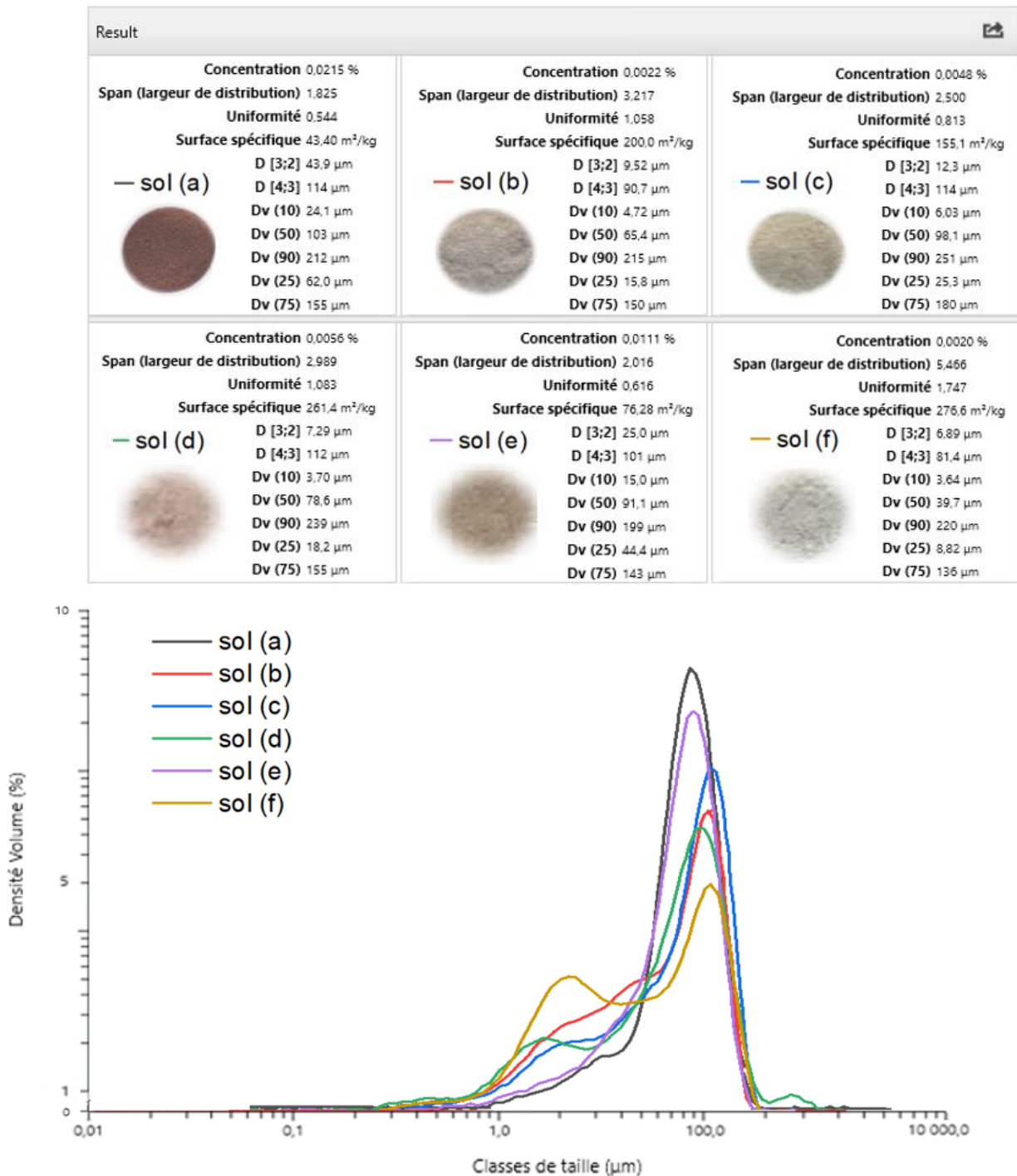


Figure IV.12 Distribution de tailles de particules obtenue par granulométrie laser.

- Surface spécifique

La surface spécifique des particules, indicateur clé des propriétés physico-chimiques, est particulièrement élevée pour les sols b ($200,0 \text{ m}^2/\text{kg}$) et f ($277,6 \text{ m}^2/\text{kg}$). Ces valeurs témoignent d'une forte proportion de particules fines, typique des sols argileux ou limoneux. À l'opposé, les sols e ($76,28 \text{ m}^2/\text{kg}$) et a ($43,40 \text{ m}^2/\text{kg}$) présentent des surfaces spécifiques faibles, correspondant à une texture sableuse avec des particules plus grossières.

- Diamètres moyens des particules (D et D_v)

Les paramètres granulométriques D [3:2], D_{v10} , D_{v50} et D_{v90} offrent des informations détaillées sur la distribution des tailles de particules :

- Sol (a) : Des particules grossières, avec $D [3:2] = 43,9 \text{ }\mu\text{m}$ et $D_{v90} = 212 \text{ }\mu\text{m}$, traduisant un sol principalement sableux.
- Sol (b) : Une distribution intermédiaire avec $D_{v50} = 65,4 \text{ }\mu\text{m}$, suggérant un mélange équilibré entre particules fines et moyennes.
- Sol (f) : Des particules majoritairement fines, comme en témoigne $D_{v10} = 3,64 \text{ }\mu\text{m}$.

IV.3.2 Abaque triangulaire de Taylor du sol

Le diagramme triangulaire permet une classification texturale des sols ((a) à (f)) en fonction de leurs proportions respectives en sable, limon et argile. Chaque sol est positionné dans une catégorie bien définie, ce qui offre une base pour interpréter ses caractéristiques physiques, ses propriétés hydriques et son potentiel d'utilisation.

- ❖ Sol (a) Position dans le triangle : Limon sableux.

Ce sol présente une proportion dominante de limon avec une contribution notable de sable. Cette composition confère au sol une structure relativement perméable. Cependant, la teneur réduite en argile peut limiter la capacité de rétention en eau.

- ❖ Sol (b) Position dans le triangle : Limon proche du limon fin.

Ce sol se caractérise par une teneur élevée en limon, une proportion modérée d'argile et une faible quantité de sable. Ces caractéristiques indiquent un sol fertile avec une bonne rétention d'eau, tout en restant relativement facile à travailler. Cependant, sa texture peut entraîner un risque de saturation en eau.

- ❖ Sol (c) Position dans le triangle : Limon.

La forte dominance du limon dans ce sol confère des propriétés favorables à la rétention d'eau. Avec des proportions faibles de sable et d'argile, ce sol est bien équilibré, mais il peut être sujet à une faible stabilité structurelle et à une érosion rapide.

❖ Sol (d) Position dans le triangle : Limon proche du limon fin et limon sableux.

Ce sol présente une texture intermédiaire, combinant des particules de limon, de limon fin et de sable. Cela lui confère une structure équilibrée, avec une capacité modérée de rétention d'eau. Ce type de sol est adapté à une variété d'usages, bien qu'il nécessite une gestion adaptée pour éviter le compactage et l'érosion.

❖ Sol (e) Position dans le triangle : Limon proche du limon sableux.

Le sol (e) est caractérisé par une proportion importante de limon, associée à une contribution significative de sable. Cette texture offre une bonne stabilité structurelle.

❖ Sol (f) Position dans le triangle : Limon fin.

Le sol (f) a une texture très fine, majoritairement limoneuse. Cela le rend adapté aux applications nécessitant une bonne rétention d'eau. Cependant, une faible teneur en sable réduit sa résistance mécanique et peut entraîner des problèmes de retrait.

L'analyse des sols ((a) à (f)) met en évidence des aptitudes variées pour la fabrication de briques, chaque type de sol présentant des caractéristiques spécifiques influençant ses performances. Les sols limoneux sableux (a, e) se distinguent par leur faible plasticité et leur cohésion limitée, mais leur stabilité au séchage en fait d'excellents additifs pour réduire le retrait et renforcer la résistance des briques à base de sols très plastiques.

Les sols limoneux fins (b, f), en revanche, offrent une excellente plasticité et cohésion, ce qui les rend idéaux pour produire des briques homogènes et résistantes. Toutefois, leur forte tendance au retrait au séchage nécessite des ajustements, comme l'ajout de sable ou une gestion précise des conditions de séchage, afin d'éviter fissures et déformations.

Le sol limoneux équilibré (c), avec sa plasticité modérée, sa cohésion suffisante et son faible retrait, se révèle particulièrement adapté à la production de briques standard, combinant qualité et stabilité. Quant au sol (d), il offre une grande polyvalence et peut être utilisé seul ou en mélange avec d'autres sols pour répondre à des besoins spécifiques. Ainsi, pour maximiser la qualité des briques, il est recommandé d'adopter une approche combinatoire en ajustant les compositions des sols afin d'exploiter leurs propriétés complémentaires, garantissant ainsi des briques performantes, homogènes et adaptées aux exigences industrielles.

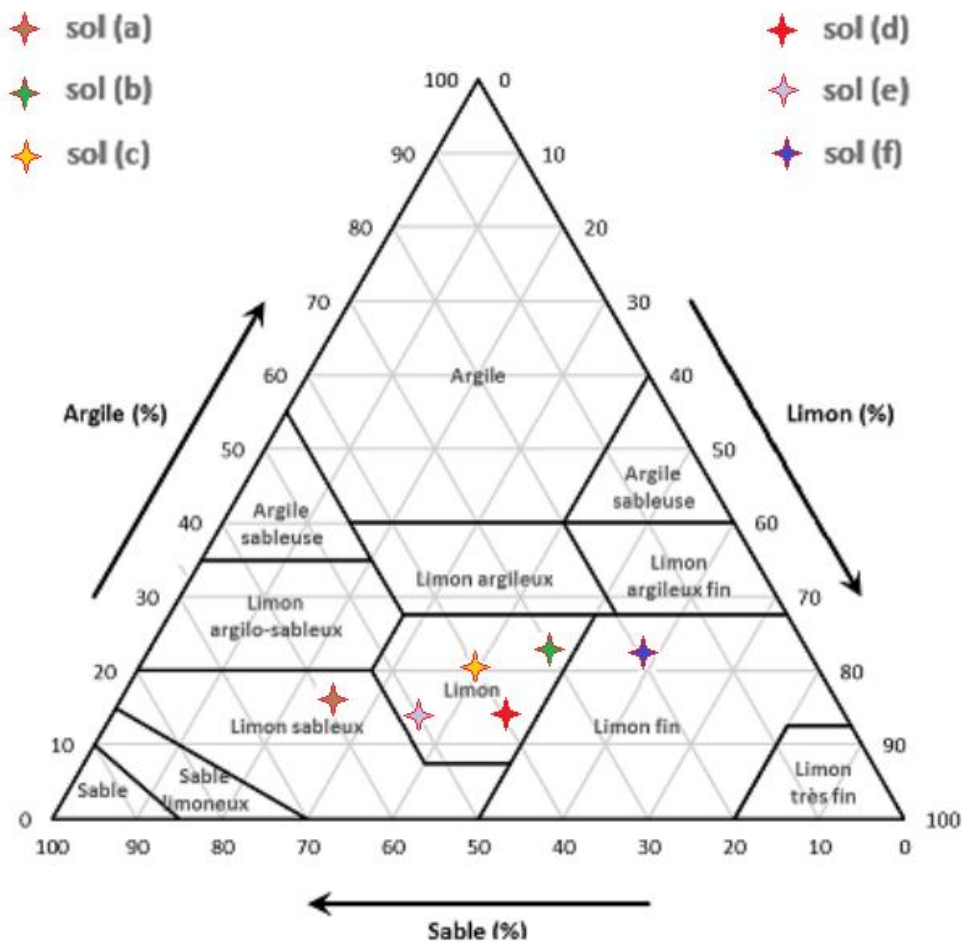


Figure IV.13 Abaque triangulaire de Taylor des sols.

IV.3.3 Diagramme de plasticité

L'étude des limites d'Atterberg, à travers les essais menés sur six échantillons de sol ((a) à (f)), nous offre un aperçu précieux de leur comportement et de leurs propriétés intrinsèques. Ces limites, définies par le passage d'un état physique à un autre en fonction de la teneur en eau, se manifestent par la limite de liquidité (WL), seuil entre l'état liquide et plastique, la limite de plasticité (WP), transition entre l'état plastique et friable, et enfin, l'indice de plasticité (IP), qui quantifie l'étendue de la phase plastique ($IP = WL - WP$).

L'analyse des résultats révèle une diversité notable entre les échantillons. Le sol (a), avec une WL de 15.03%, une WP de 7.00% et un IP de seulement 8.03%, se distingue par une faible plasticité. À l'opposé, le sol (b) affiche des valeurs impressionnantes : WL à 38.01%, WP à 14.10% et un IP culminant à 23.91%. Ce dernier chiffre témoigne d'une plasticité élevée, évoquant une matière malléable, collante, capable de retenir l'eau avec ténacité.

Entre ces deux extrêmes, les autres sols présentent des caractéristiques intermédiaires. Le sol (c), avec un IP de 20.39%, se situe dans la catégorie des sols plastiques, tout comme les sols (d), (e) et (f), dont les IP respectifs de 9.67%, 10.39% et 18.63% nuancent cette plasticité. On observe ainsi une gradation : le sol (d) et (e) présentent une plasticité modérée, tandis que le sol (f) se rapproche davantage du sol (c) en termes de malléabilité.

Les graphiques (figure IV.14) accompagnants ces données, représentations graphiques des essais à la coupelle de Casagrande, illustrent la transition entre l'état liquide et plastique. Chaque courbe, définie par une équation logarithmique ($y = a \ln(x) + b$), traduit la diminution de la teneur en eau en fonction du nombre de coups appliqués à la coupelle. L'intersection de chaque courbe avec la ligne des 25 coups permet de déterminer précisément la WL de chaque sol. L'importance de ces indices réside dans leur capacité à prédire le comportement des sols. Un IP élevé, comme celui du sol (b), suggère une forte cohésion et une grande capacité de rétention d'eau, mais aussi un risque accru de gonflement et de retrait en fonction des variations hydriques. Inversement, un faible IP, à l'image du sol (a), indique une moindre cohésion et une meilleure perméabilité, mais également une moindre aptitude à retenir les nutriments. Cette analyse des limites d'Atterberg révèle une palette variée de comportements au sein des six échantillons. De la faible plasticité du sol (a) à la plasticité marquée du sol (b), en passant par les nuances intermédiaires des autres échantillons, ces données fournissent des informations cruciales pour les études géotechniques et la construction. Elles permettent d'anticiper les réactions des sols face aux contraintes mécaniques et aux variations environnementales et d'adapter les pratiques en conséquence.

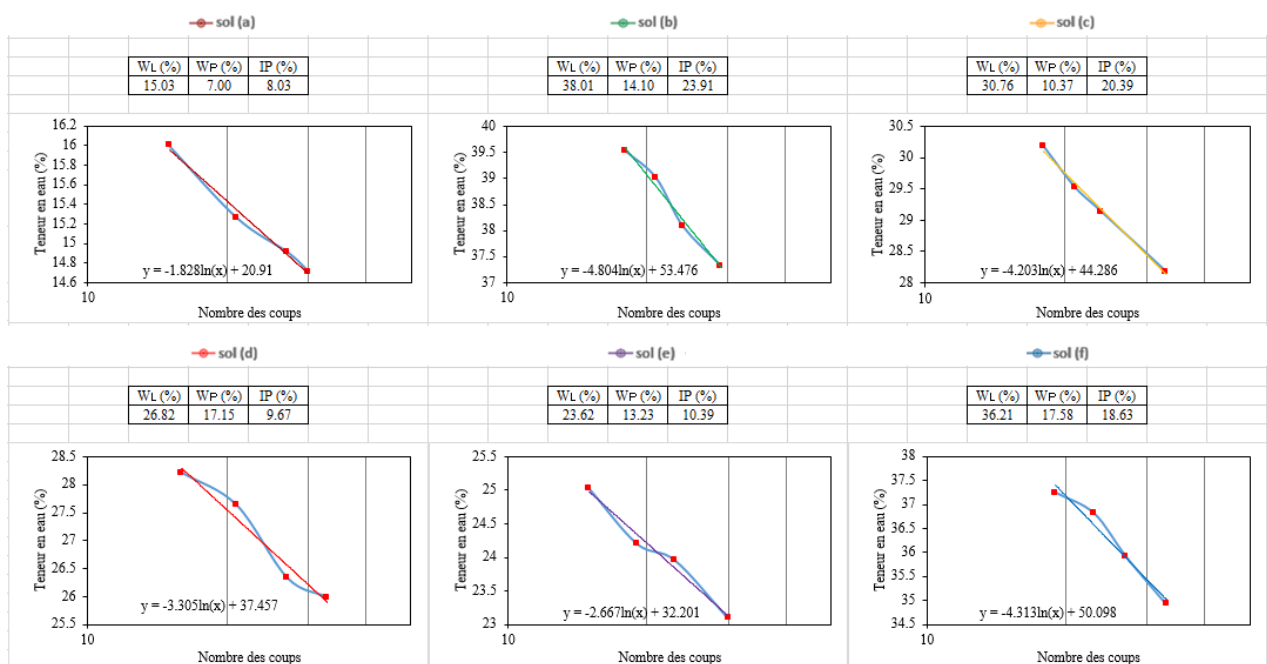


Figure IV.14 Limites d'Atterberg des 6 sols.

L'analyse du diagramme de Casagrande (figure IV.15), en tant qu'outil de classification géotechnique des sols fins, permet une interprétation précise et analytique des propriétés plastiques des six échantillons étudiés ((a) à (f)). Ce diagramme, qui corrèle l'indice de plasticité (IP) et la limite de liquidité (WL), offre une représentation graphique des comportements caractéristiques des argiles (A), des limons (L) et des sols organiques (O), en distinguant différents degrés de plasticité. L'examen de la position des échantillons révèle des distinctions notables. L'échantillon (a), localisé dans la zone des sols sans cohésion, indique un matériau pulvérulent, vraisemblablement un sable limoneux ou un limon sableux, caractérisé par une faible plasticité et une cohésion négligeable, suggérant une prédominance de particules grossières. À l'opposé, l'échantillon (b), positionné nettement au-dessus de la ligne A, dans le domaine des argiles peu plastiques (Ap), témoigne d'une forte proportion d'argile, confirmée par un IP élevé. Cette classification implique une forte cohésion, une plasticité marquée et une susceptibilité significative aux variations volumiques en fonction de la teneur en eau. L'échantillon (c), bien que situé au-dessus de la ligne A, se classe parmi les argiles peu plastiques (Ap), révélant une présence notable d'argile, mais une plasticité inférieure à celle de l'échantillon (b). Les échantillons (d) et (e), localisés au-dessus de la ligne A, dans la zone des limons et sols organiques peu plastiques (Lp et Op), indiquent une prédominance de limons ou de matières organiques, avec une faible plasticité et une cohésion limitée. Enfin, l'échantillon (f), situé à proximité de la ligne A, oscille entre les argiles peu plastiques (Ap) et les sols organiques très plastiques (Ot), suggérant une composition mixte et une plasticité modérée.

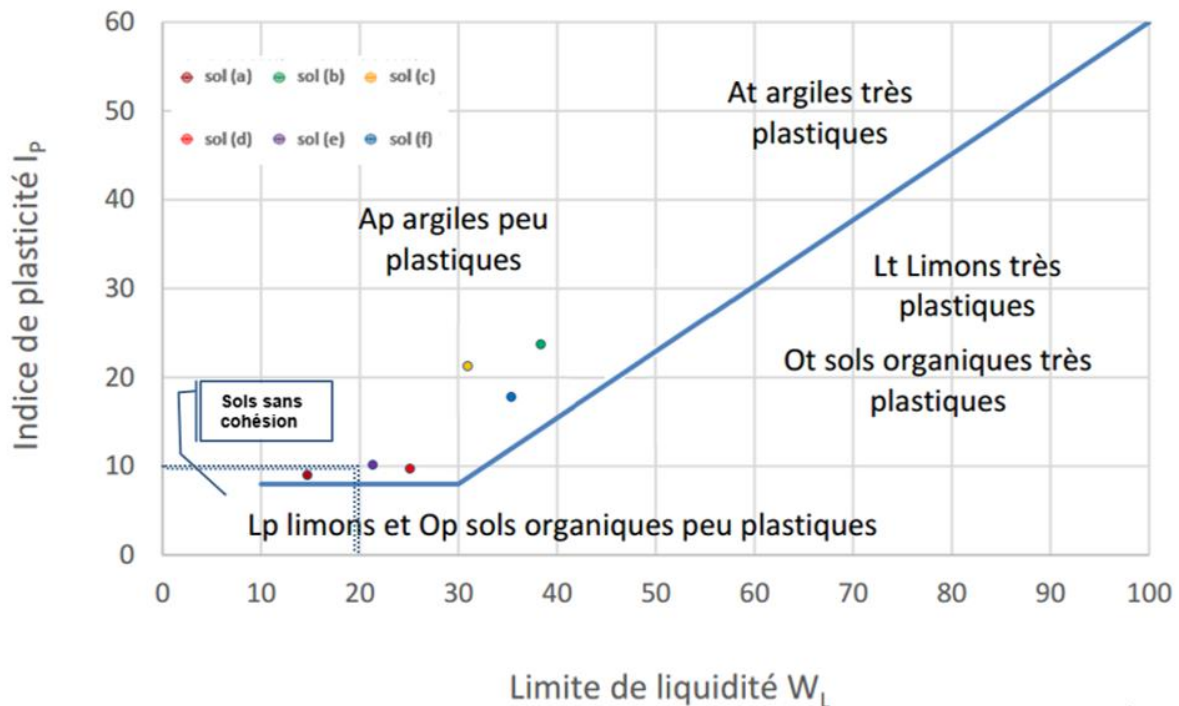


Figure IV.15 Classification des sols sur le diagramme de Casagrande des sols.

Cette classification, cohérente avec les résultats des essais d'Atterberg, permet de déduire des implications géotechniques importantes. Les argiles très plastiques (At), comme l'échantillon (b), présentent un risque élevé de gonflement-retrait, tandis que les sols peu plastiques (Lp, Op et sols sans cohésion) se caractérisent par une plus grande stabilité dimensionnelle, mais peuvent être sujets à l'érosion. En conclusion, l'analyse combinée du diagramme de Casagrande et des limites d'Atterberg fournit une caractérisation complète et rigoureuse des propriétés des sols, essentielle pour la prédiction de leur comportement et la conception d'ouvrages géotechniques.

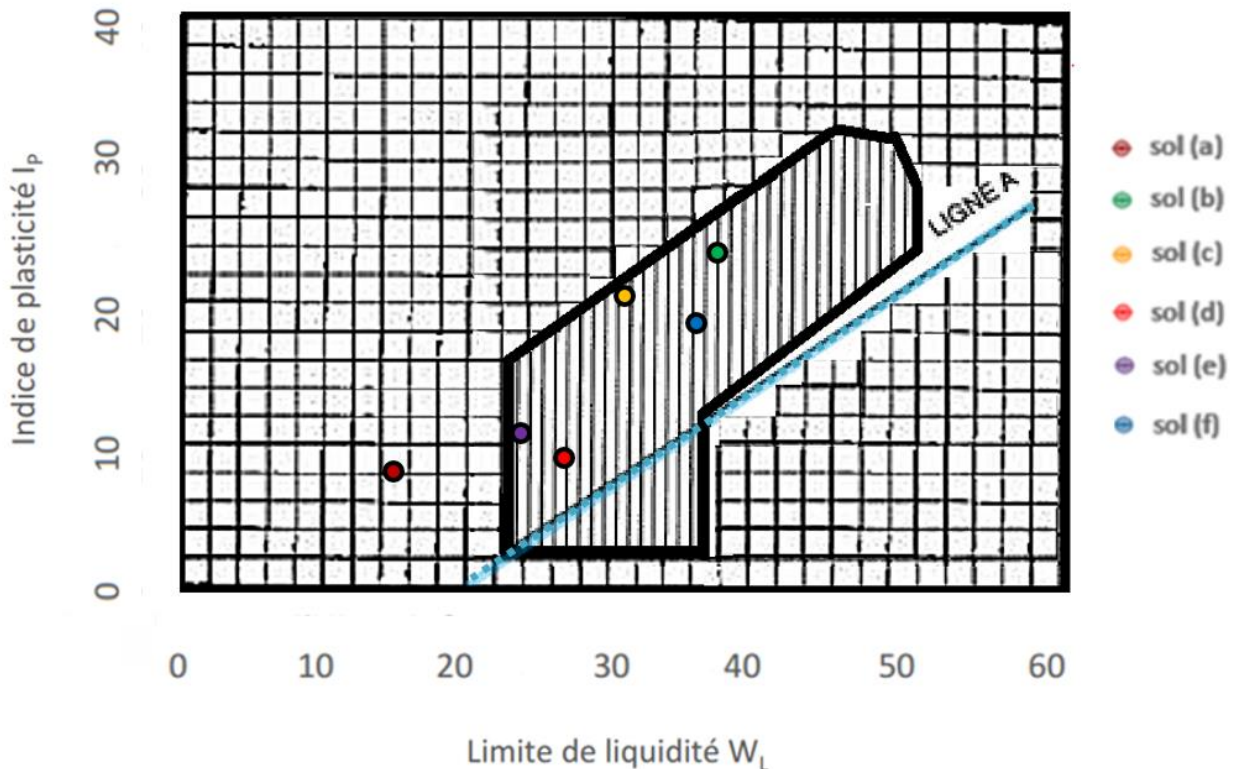


Figure IV.16 Classification des sols sur le diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901).

L'analyse du diagramme de plasticité selon la norme XP P 13-901 révèle des caractéristiques géotechniques distinctives pour les six échantillons de sol étudiés. La zone de référence, délimitée par la ligne A et matérialisée par un hachurage, définit les paramètres optimaux pour la fabrication des briques de Terres. Les sols (b), (c) et (f), positionnés stratégiquement dans cette zone, présentent des indices de plasticité respectifs d'environ 23, 20 et 18, associés à des limites de liquidité comprises entre 30% et 38%, démontrant ainsi leur aptitude intrinsèque à la production de briques de terre. En revanche, le sol (a), caractérisé par un faible indice de plasticité (~ 8) et une limite de liquidité d'environ 15%, ainsi que le sol (d), avec un IP de 10 et une WL de 26%, se situent hors des spécifications requises, indiquant une inadéquation pour une utilisation directe. Le sol (e), positionné à la frontière de la zone acceptable ($IP \approx 10$, $WL \approx 23\%$), nécessite une attention

particulière et potentiellement des analyses complémentaires pour valider son utilisation. Cette distribution des caractéristiques géotechniques suggère que 50% des échantillons analysés satisfont pleinement aux exigences normatives pour la fabrication de briques de terre. Des interventions correctives, telles que l'incorporation d'argile, pourraient être envisagées pour les sols (a) et (d) afin d'améliorer leurs propriétés plastiques et les rendre conformes aux spécifications de la norme. Cette évaluation souligne l'importance cruciale des paramètres de plasticité et de liquidité dans la sélection des matériaux destinés à la production des briques de terre, conformément aux standards techniques établis.

IV.3.4 Classification des sols

La figure IV.17 présente un diagramme de classification des sols selon le Guide de Réalisation des Terrassements (GRT), un outil essentiel en géotechnique routière. Ce diagramme utilise plusieurs paramètres clés pour catégoriser les sols et anticiper leur comportement en travaux de terrassement. Les deux axes principaux sont le passant à 80 μm , qui quantifie la proportion de particules fines (limons et argiles) et permet de distinguer les sols fins (plus de 35% de passant) des sols grenus (moins de 35%), et la valeur au bleu de méthylène (VBS),^f qui mesure la capacité d'absorption du bleu de méthylène par les particules fines et reflète leur activité et donc l'argilosité du sol. Un troisième paramètre important, bien que représenté de manière discrète, est l'indice de plasticité (I_p), qui caractérise la capacité du sol à se déformer plastiquement sans rupture. Le passant à 2 mm, quant à lui, permet de différencier les sols à dominante sableuse (moins de 70% de passant) de ceux à dominante graveleuse (plus de 70%).

Le diagramme divise les sols en quatre grandes classes : A, B, C et D. La classe A regroupe les sols fins, subdivisés en A1, A2, A3 et A4 en fonction de leur indice de plasticité croissant, allant des limons peu plastiques (A1) aux argiles très plastiques (A4). La classe B concerne les sols sableux et graveleux fins, subdivisés en plusieurs sous-classes (B1 à B6) selon la granulométrie (passant à 2 mm) et la VBS. Les sols de classe C, non représentés explicitement sur ce diagramme, correspondent à des sols comportant des fines et des gros éléments. Enfin, la classe D englobe les sols insensibles à l'eau, caractérisés par une très faible teneur en fines et une faible VBS.

L'analyse des points colorés, représentant différents échantillons de sol, permet de les classer selon le GRT. Le sol (d) et (e), situé en A1, est un sol fin peu plastique, probablement un limon peu argileux. Les sols (b) et (c), en A2, sont des sols fins avec une plasticité moyenne, pouvant être des limons argileux ou des argiles limoneuses. Le sol (f), à la limite entre A1 et A2, présente un comportement intermédiaire. Le sol (a), en B5, est un sol granulaire (sable ou graveleux) avec peu de fines et une faible VBS, donc peu argileux.

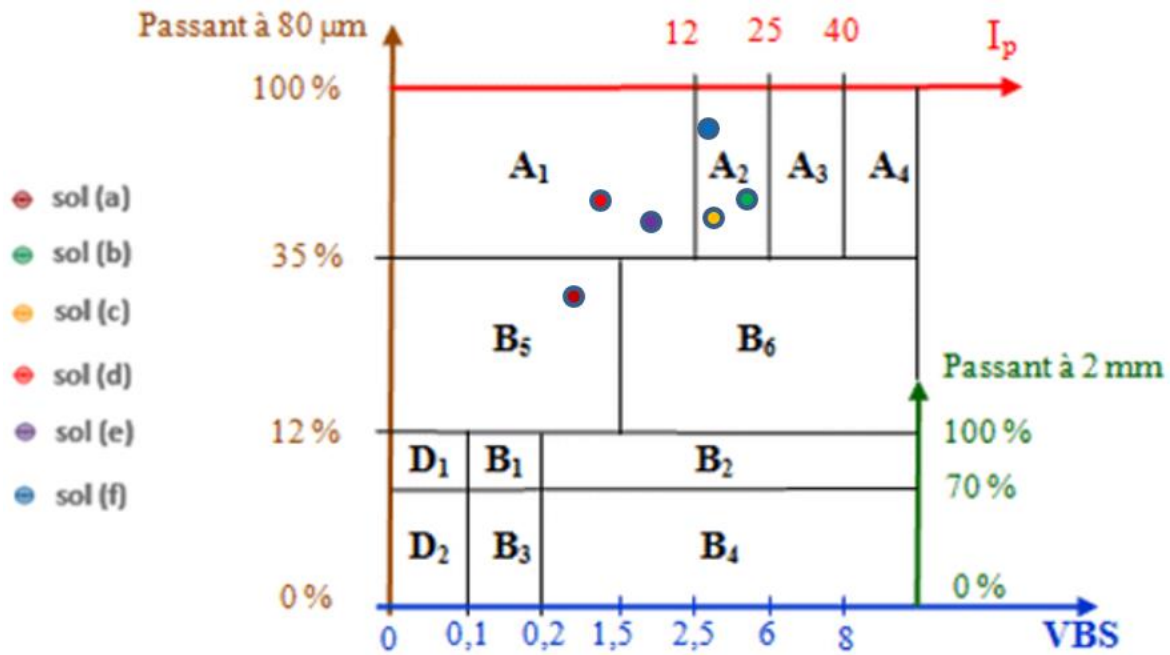


Figure IV.17 Diagramme synoptique des matériaux : Classification des sols selon leur nature d'après le GRT.

Ce diagramme offre une classification pratique des sols basée sur des essais de laboratoire standardisés. Cette classification est cruciale pour le dimensionnement des ouvrages de terrassement, le choix des techniques de construction et l'anticipation du comportement des sols face aux variations de teneur en eau. Une connaissance précise des valeurs numériques des paramètres (passant à 80 µm, passant à 2 mm, I_p et VBS) pour chaque échantillon permettrait une interprétation encore plus fine et quantitative. L'absence de la classe C et le manque d'informations sur la méthode d'obtention des données (nombre d'essais, variabilité) limitent la portée de l'analyse.

IV.3.5 Analyse chimique par spectrométrie infrarouge des sols

La figure IV.18 illustre un ensemble de spectres infrarouges, chacun correspondant à un échantillon de sol distinct ("sol (a)" à "sol (f)"). Ces spectres, obtenus par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), illustrent la transmission du rayonnement infrarouge en fonction du nombre d'onde, exprimé en cm^{-1} . L'axe des abscisses représente le nombre d'onde, une mesure inversement proportionnelle à la longueur d'onde et directement liée à la fréquence de vibration moléculaire. L'axe des ordonnées quantifie la transmission du rayonnement infrarouge à travers l'échantillon, exprimée en pourcentage et en unités arbitraires (ua), où une diminution de la transmission à un nombre d'onde spécifique indique une absorption de l'énergie infrarouge par l'échantillon à cette fréquence. Les bandes d'absorption observées dans ces spectres sont

caractéristiques des vibrations des liaisons interatomiques et des groupements fonctionnels présents dans les composants des sols, fournissant une empreinte spectrale unique pour chaque échantillon.

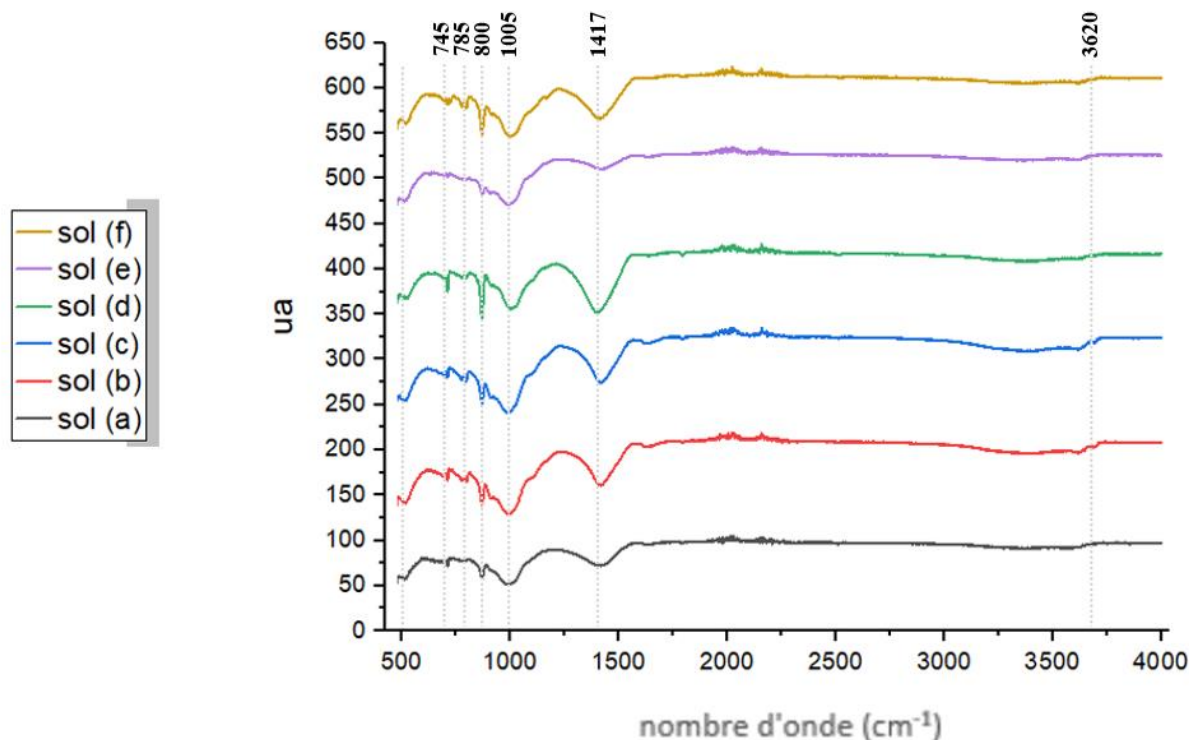


Figure IV.18 Spectres infrarouges des sols.

L'analyse comparative des spectres révèle à la fois des caractéristiques communes et des variations entre les différents échantillons de sols. La présence de lignes verticales pointillées à des nombres d'onde spécifiques (745, 785, 800, 1005, 1417 et 3620 cm^{-1}) suggère l'importance de ces fréquences pour l'identification et la comparaison des composants des sols. Une absorption significative est observée dans la région des nombres d'onde inférieurs à 1200 cm^{-1} pour tous les échantillons, indiquant la présence de composants minéraux communs, tels que les silicates, qui absorbent fortement dans cette zone spectrale en raison des vibrations des liaisons Si-O et Al-O. La bande autour de 1000-1100 cm^{-1} est particulièrement proéminente dans tous les spectres, renforçant l'hypothèse de la présence de minéraux silicatés ubiquistes comme le quartz ou des feldspaths. De même, une bande d'absorption est visible autour de 1417 cm^{-1} dans la majorité des spectres, suggérant potentiellement la présence de carbonates, bien que son intensité relative puisse varier entre les échantillons.

Cependant, des différences subtiles mais notables émergent de la comparaison des spectres. Les variations d'intensité des bandes d'absorption à certains nombres d'onde, ainsi que de légères variations dans la forme globale des spectres, indiquent des différences dans la composition

minéralogique et/ou organique relative des sols (a) à (f). Par exemple, l'intensité relative de la bande à 1417 cm^{-1} semble varier légèrement entre les spectres, ce qui pourrait refléter des différences dans la teneur en carbonates entre les échantillons de sol. De même, des variations dans la région des hautes fréquences, autour de 3620 cm^{-1} , associée aux vibrations O-H, pourraient indiquer des différences dans la teneur en minéraux argileux ou en eau structurale. Il conviendrait de compléter cette analyse avec d'autres méthodes de caractérisation pour obtenir une interprétation précise, qui permettrait de déduire la composition qualitative et potentiellement semi-quantitative de chaque échantillon de sol, offrant ainsi des informations précieuses sur leurs propriétés et leur origine.

IV.3.6 Analyse thermogravimétrique différentielle des sols

L'analyse thermogravimétrique (ATG) des six échantillons de sol, désignés de (a) à (f), révèle des profils de décomposition thermique globalement similaires, indiquant une composition minéralogique qualitativement comparable, tout en mettant en évidence des variations quantitatives significatives entre eux.

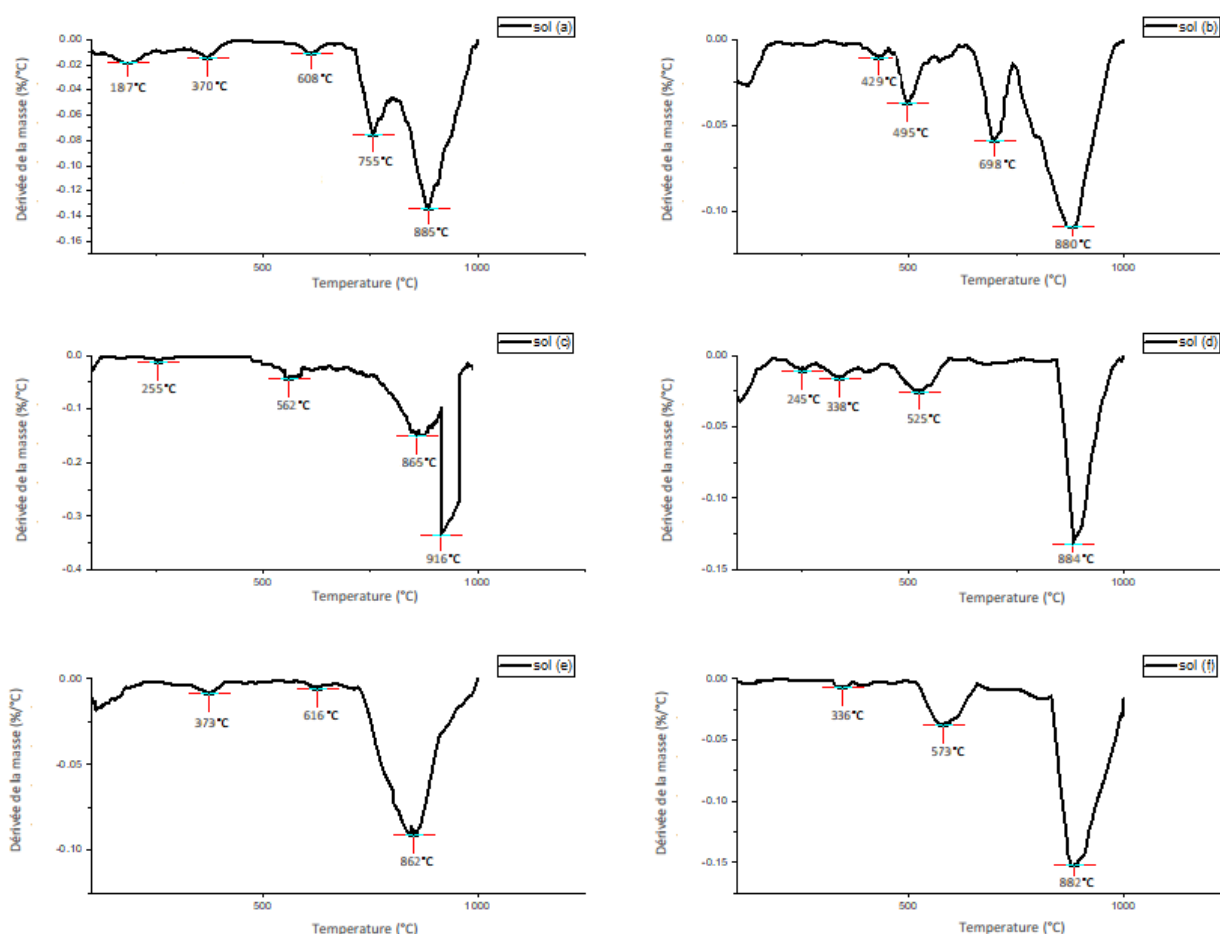


Figure IV.19 Analyse thermogravimétrique des sols.

Les courbes dérivées montrent des étapes de décomposition communes : une déshydratation de l'eau hygroscopique à basse température (variable selon les échantillons), une déshydroxylation de la goéthite autour de 330-370 °C, une déshydroxylation des minéraux argileux entre 500 et 620 °C, et une décarbonatation dominante de la calcite vers 880 °C. Malgré ces similitudes, des variations d'intensité et de température des pics traduisent des différences dans les proportions des phases minérales. Par exemple, le sol (b) présente une complexité accrue dans la zone de déshydroxylation des minéraux argileux, indiquant une plus grande diversité ou proportion de ces phases. Le sol (c) se distingue par un événement thermique intense à 916 °C, probablement lié à la décomposition rapide de carbonates de magnésium ou de minéraux réfractaires. Le sol (e) présente un pic à 373 °C, suggérant une matière organique complexe ou fortement associée aux minéraux. Quant aux pertes de masse entre 600 °C et 900 °C, elles confirment la décarbonatation, avec des pics caractéristiques à 698 °C pour le sol (b) et 862 °C pour le sol (e), indiquant la présence de calcite ou de dolomite. Le sol (a) montre une perte initiale à 187 °C due à l'eau adsorbée, suivie d'une dégradation organique à 370 °C et d'une décarbonatation à 608 °C, reflétant des carbonates cristallisés. Les sols (d), (e) et (f) présentent des décarbonatations marquées à 884 °C et des matières organiques relativement simples.

Ces résultats révèlent que les sols (a), (b) et (c) sont riches en matière organique et en phases carbonatées complexes, tandis que les sols (d), (e) et (f) présentent une dominance des carbonates et une matière organique moins complexe. Ces données permettent de mieux comprendre les propriétés physico-chimiques des sols, leur origine géologique et leur potentiel d'utilisation dans des contextes environnementaux ou agricoles. Une analyse complémentaire, comme la diffraction des rayons X (XRD), serait utile pour confirmer et affiner ces interprétations.

IV.3.7 Analyse minéralogique par Diffractogrammes des rayons X des sols

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) des six échantillons de sols ((a) à (f)) révèle des compositions minéralogiques variées, mais présentant des phases dominantes communes, comme le quartz (Q), la kaolinite (K), l'illite/muscovite (I), la calcite (C) et, dans certains cas, l'albite (A). Ces résultats mettent en évidence la richesse et la diversité minéralogique des sols étudiés, tout en soulignant les spécificités propres à chaque échantillon. Les pics marqués de quartz, présents dans tous les échantillons, traduisent une forte teneur en ce minéral abondant dans les sols, principalement d'origine détritique. Ce caractère commun au quartz reflète sa résistance à l'altération chimique et physique. La présence de kaolinite et d'illite/muscovite indique une composante argileuse significative, essentielle pour comprendre les propriétés physico-chimiques des sols, notamment leur capacité de rétention d'eau et leur comportement mécanique. La kaolinite, souvent associée à des climats tropicaux ou subtropicaux, suggère un processus d'altération avancé, tandis que l'illite/muscovite reflète une altération partielle et une origine plus

proche des matériaux parentaux. La calcite, identifiée par des pics intenses, est également présente dans tous les sols, bien que son intensité varie. Cela témoigne d'un apport carbonaté, probablement dû à des processus pédogénétiques ou à des interactions avec des matériaux géologiques locaux riches en carbonate. Par exemple, les sols (a) et (c) montrent une proportion notable de calcite, renforçant leur caractère carbonaté. L'albite, bien qu'observée à une intensité moindre, pourrait refléter des apports de feldspath sodique, généralement associés à une origine ignée ou métamorphique. Les variations dans les intensités des pics entre les échantillons traduisent des différences dans les proportions relatives des phases minérales, soulignant l'hétérogénéité géologique et pédologique des sols. Par exemple, le sol (b) semble particulièrement riche en quartz et en kaolinite, tandis que le sol (e) présente un équilibre entre les phases argileuses et carbonatées. Le sol (f), en revanche, montre une dominance des carbonates (calcite), indiquant une moindre influence des minéraux argileux.

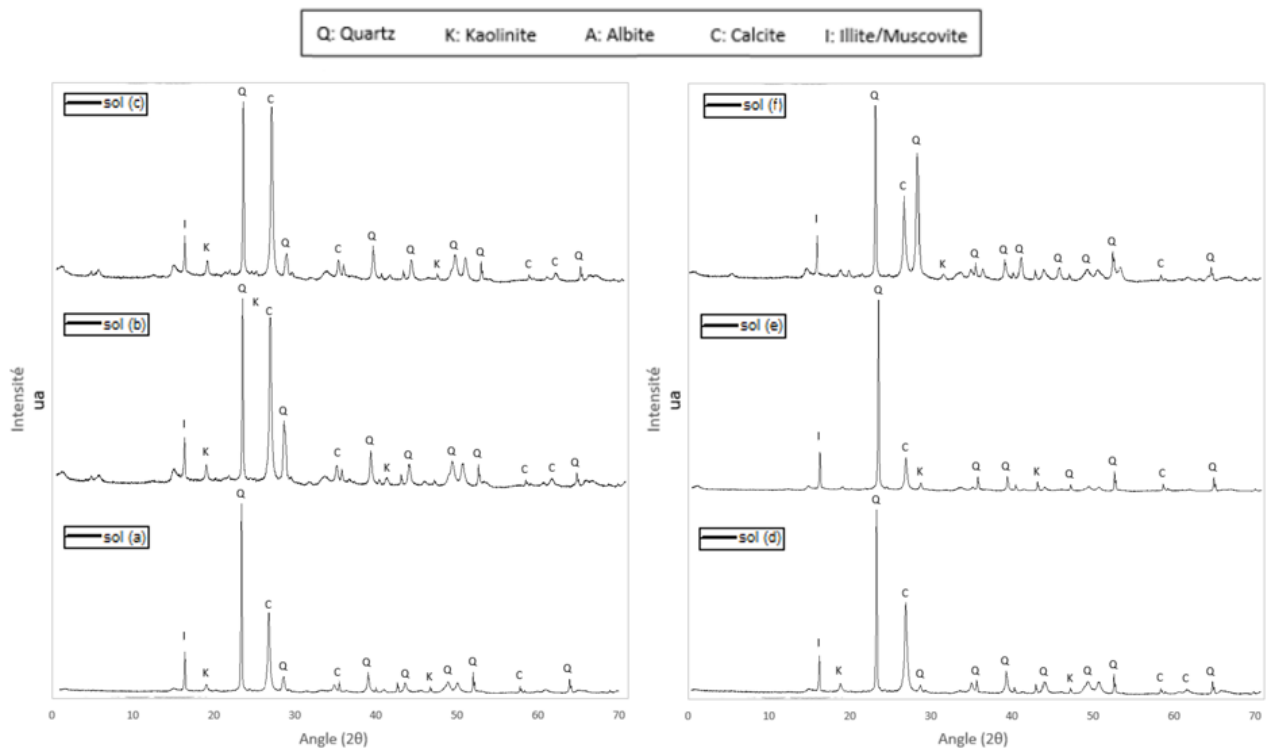


Figure IV.20 Diagrammes de rayons X des sols.

Ces résultats de DRX fournissent une base solide pour interpréter les propriétés des sols, notamment en termes de fertilité, de stabilité mécanique et d'interactions géochimiques. La dominance de certaines phases, comme la calcite ou la kaolinite, oriente les potentiels d'utilisation et les comportements des sols sous différentes conditions environnementales. Une analyse complémentaire, notamment chimique ou morphologique, permettrait d'affiner ces interprétations et de mieux comprendre les processus d'évolution de ces sols.

		sol (a)	sol (b)	sol (c)	sol (d)	sol (e)	sol (f)
Paramètres d'état	Densité (g/cm^3)	2.606	2.524	2.543	2.597	2.594	2.551
	Taux d'humidité (%)	13.52	34.20	27.68	24.13	21.25	32.58
	Perte au feu (%)	13.73	24.74	21.14	16.75	15.57	22.58
	Porosité (n%)	43.06	47.60	46.15	45.36	44.72	47.24
Répartition granulométrique (%)	Argile (<2 μ m)	14.5	23	20	16	15	21
	Limon entre 2 μ m et 63 μ m	24	49	39.5	44	34	57.5
	sable entre 63 μ m et 2 mm	61.5	28	40.5	40	51	21.5
	% < 80 μ m	30.4	54.41	44.66	50.54	43.73	61.93
Limites d'Atterberg	ω_L (%)	15.03	38.01	30.76	26.82	23.62	36.21
	ω_p (%)	7.00	14.10	10.37	17.15	13.23	17.58
	I_p (%)	8.03	23.91	20.39	9.67	10.39	18.63
Bleu de méthylène	VBS ($\frac{g}{100g}$)	0.7	2.9	2.7	1.3	1.8	2.5
	A_{CB} (-)	4.82	12.60	13.50	8.12	12.00	11.90
	Surface spécifique (m^2/kg)	43.40	200.0	155.1	261.4	76.28	276.6
Analyses Chimiques	SiO ₂	39.13	33.95	35.75	35.73	55.15	30.1
	Al ₂ O ₃	5.99	9.9	10.26	6.64	8.51	8.62
	Fe ₂ O ₃	2.47	3.46	3.72	2.83	4.16	2.85
	CaO	25.97	22.96	22.04	28.13	13.09	24.89
	MgO	3.9	3.01	2.59	1.47	1.93	7.34
	SO ₃	0.38	1.34	0.86	0.14	0.11	0.21
	K ₂ O	1.29	2	2.12	1.51	2.51	1.48
	Na ₂ O	0.02	0.08	0.08	0.02	0.02	0.14
Analyses minéralogique	Calcite	41.93	40.7	41.1	49.56	21.6	26.52
	Dolomite	4.75	3.88	2.81	2.23	2.44	11.36
	Ankerite	2.03	5.93	1.54	0.85	1.08	18.21
	Magnesite	0.42	0.04	0.08	0.37	0.01	0.36
	Quartz	34.62	16.21	17.28	29.03	46.62	18.54
	Pyrite	0.14	0.13	0.25	0.05	0.16	0.10
	Illite	11.92	21.7	23.26	11.81	20.77	16.81
	Kaolinite	2	7.61	8.17	2.78	2.43	5.07
	Albite	0.05	0.35	0.89	0.32	0.35	0.9
	Anorthite	0.36	0.32	1.13	0.03	0.24	0.27
	K-Feldspar	1.78	3.13	3.48	2.97	4.31	1.86
	CO ₂ _XRD	21.81	22.36	20.12	23.42	11.13	25.22

Tableau IV.4 Fiche synoptique des échantillons.

IV.4 Comportement mécanique des briques d'Adobes

IV.4.1 Formulation des briques d'adobes

La fabrication des briques d'adobe débute par une phase de préparation du mélange. Les matières premières, constituées d'argiles et de sables, sont séchées en étuve à 110°C pendant 48 heures. Ensuite, l'argile, le sable, la chaux et la fibre de *Bassia indica* sont pesés selon les proportions souhaitées pour la formulation. Cette phase de préparation est suivie d'un malaxage à sec des matières pendant 5 à 10 minutes, puis d'un ajout progressif d'eau sur une quinzaine de minutes, pour obtenir un mélange homogène. Cette pâte d'adobe est ensuite conditionnée dans un sac plastique étanche durant 48 heures.



Les matières premières utilisées pour la formulation de l'adobe



Malaxage à sec et humide des matières premières

Figure IV.21 Préparation du mélange.

L'étape suivante consiste à élaborer les éprouvettes. Le mélange est transféré dans des moules en métal, préalablement recouverts d'un film plastique. Le compactage du matériau est effectué manuellement en 4 ou 5 couches. Une vibration manuelle est appliquée pour finaliser le remplissage des moules. Enfin, les éprouvettes subissent une phase de séchage libre à l'ombre

pendant 28 jours, jusqu'à atteindre une masse constante. Les éprouvettes ainsi obtenues sont ensuite testées en compression et flexion, ce qui permet d'évaluer l'impact des conditions d'élaboration sur le comportement mécanique du matériau.

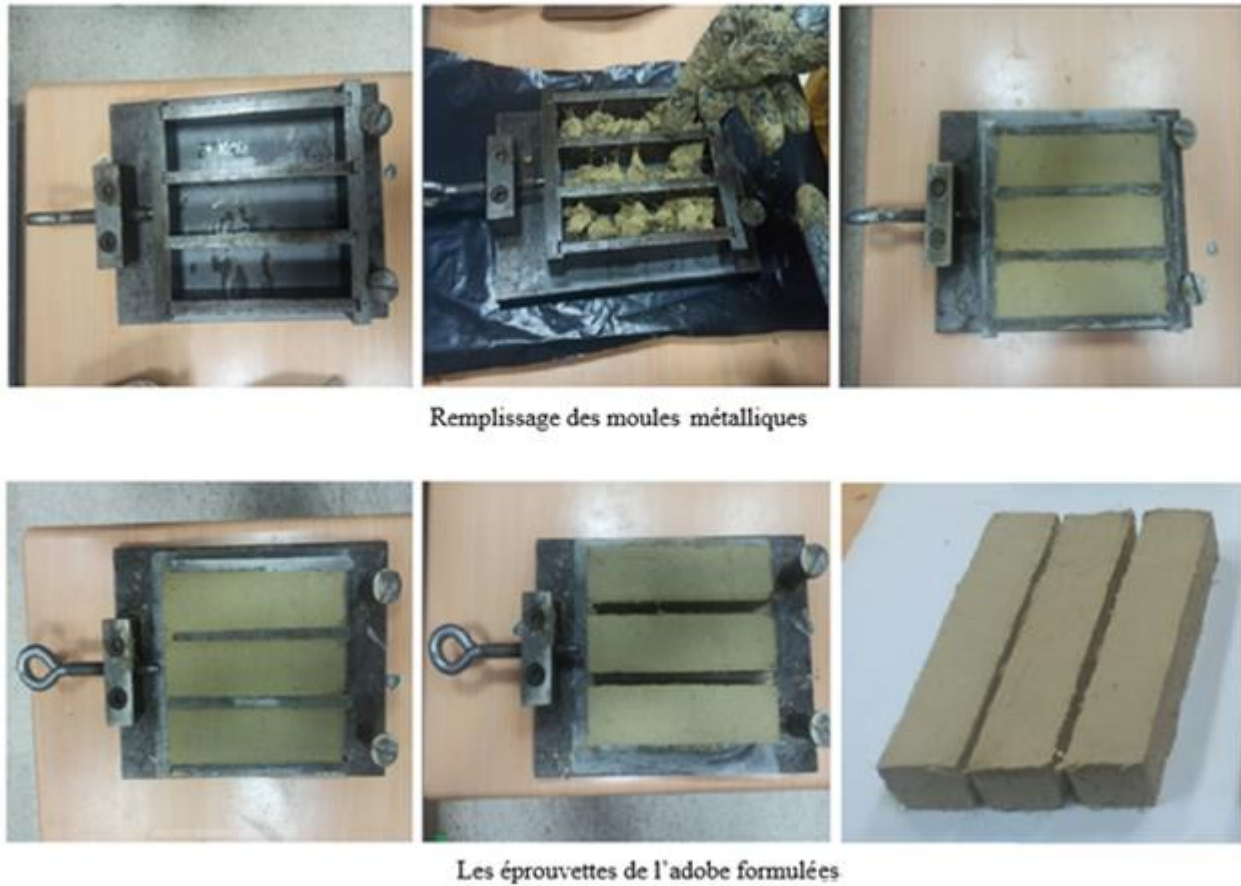


Figure IV.22 Élaboration des éprouvettes.

J'ai sélectionné les types de sols (b) et (f) en raison de leur origine distincte, provenant de deux régions géographiques différentes, ce qui permet d'explorer la variabilité des propriétés des sols en fonction de leur environnement géologique et climatique. Cette diversité régionale enrichit l'étude en offrant une perspective comparative sur les performances des sols dans la fabrication de briques crues. De plus, les caractéristiques physico-chimiques et granulométriques spécifiques de ces deux types de sols répondent aux exigences techniques et mécaniques essentielles pour leur utilisation optimale dans ce domaine. Leur composition en argile, leur plasticité, ainsi que leur capacité à subir un séchage sans fissures ni déformations, les qualifient comme des matériaux de choix pour la fabrication d'Adobe, garantissant ainsi la qualité et la durabilité du produit final.

Un système de codification alphanumérique a été adopté pour identifier de manière unique les différents mélanges étudiés. Chaque code se compose des initiales des constituants et de chiffres indiquant leur proportion respective. Le détail de tous les codes est présenté au Tableau IV.5

Brique d'adobe fabriqué à partir de sol (b)		Brique d'adobe fabriqué à partir de sol (f)	
Code	Désignation	Code	Désignation
A_1	Brique d'adobe (sol (b)) sans aucun ajout.	A_2	Brique d'adobe (sol (f)) sans aucun ajout.
$A_1^{0.7}S_{0.3}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable.	$A_2^{0.7}S_{0.3}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable.
$A_1^{0.6}S_{0.4}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable.	$A_2^{0.6}S_{0.4}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable.
$A_1^{0.5}S_{0.5}$	Brique d'adobe avec 50% d'argile et 50% sable.	$A_2^{0.5}S_{0.5}$	Brique d'adobe avec 50% d'argile et 50% sable.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^{0.5}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 0.5 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}^{0.5}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 0.5 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^1$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 1 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}^1$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 1 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^2$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 2 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}^2$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 2 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}^3$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}^{0.5}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 0.5 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}^{0.5}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 0.5 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_1^1$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 1 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^1$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 1 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_1^2$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_1^3$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 3 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^3$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 3 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}^{0.5}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 0.5 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}^{0.5}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 0.5 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}^1$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 1 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}^1$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 1 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}^2$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 2 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}^2$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 2 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}^3$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 3 cm.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}^3$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1.5% de fibre de longueur 3 cm.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_2$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 2% de chaux.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_2$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 2% de chaux.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_4$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 4% de chaux.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_4$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 4% de chaux.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_6$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 6% de chaux.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_6$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 6% de chaux.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_8$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 8% de chaux.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_8$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 8% de chaux.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_{10}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 10% de chaux.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_{10}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 10% de chaux.
$A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_{12}$	Brique d'adobe avec 70% d'argile et 30% sable renforcé par 0,5% de fibre de longueur 3 cm stabilisé par 12% de chaux.	$A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_{12}$	Brique d'adobe avec 60% d'argile et 40% sable renforcé par 1% de fibre de longueur 2 cm stabilisé par 12% de chaux.

Tableau IV.5 Formulations des éprouvettes (4 x 4 x 16 cm).

IV.4.2 Analyse de la courbe contrainte-déformation

L'analyse des courbes contrainte-déformation des différents types d'adobe, présentées aux Figures IV.23 et IV.24, révèle des différences significatives dans leur comportement mécanique sous charge. Ces matériaux terreux présentent une réponse non linéaire typique, caractérisée par une phase élastique initiale, suivie d'une déformation plastique progressive jusqu'à la rupture.

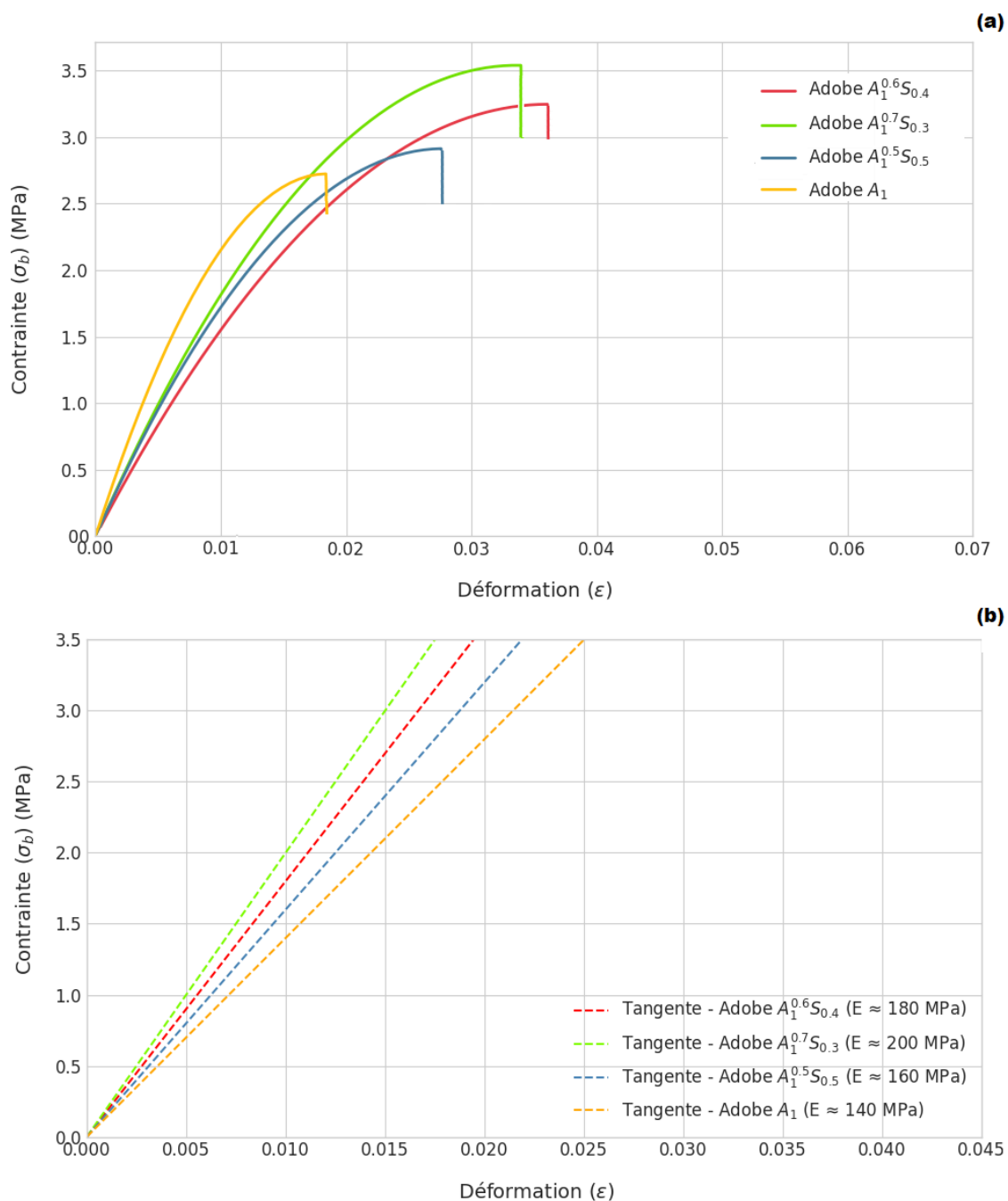


Figure IV.23 Brique d'adobe à base du sol (b) : (a) Courbes contraintes-déformations pour différents type d'adobes, (b) Module de Young pour différents type d'adobes.

La résistance maximale, la limite d'élasticité et la déformation à la rupture varient significativement en fonction de la composition de l'adobe ($A_1 - A_1^{0.7}S_{0.3} - A_1^{0.6}S_{0.4} - A_1^{0.5}S_{0.5} - A_2^{0.5}S_{0.5} - A_2^{0.6}S_{0.4} - A_2^{0.7}S_{0.3}$ et A_2). Notamment, l'adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}$ et $A_2^{0.6}S_{0.4}$ présentent respectivement les plus hautes résistances maximales. L'examen du module de Young, déterminé par la pente initiale des courbes, met en évidence une variabilité notable de la rigidité. Les valeurs varient entre 130 MPa (Adobe A_2) et 200 MPa (Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}$), soulignant l'influence de la composition sur les propriétés élastiques.

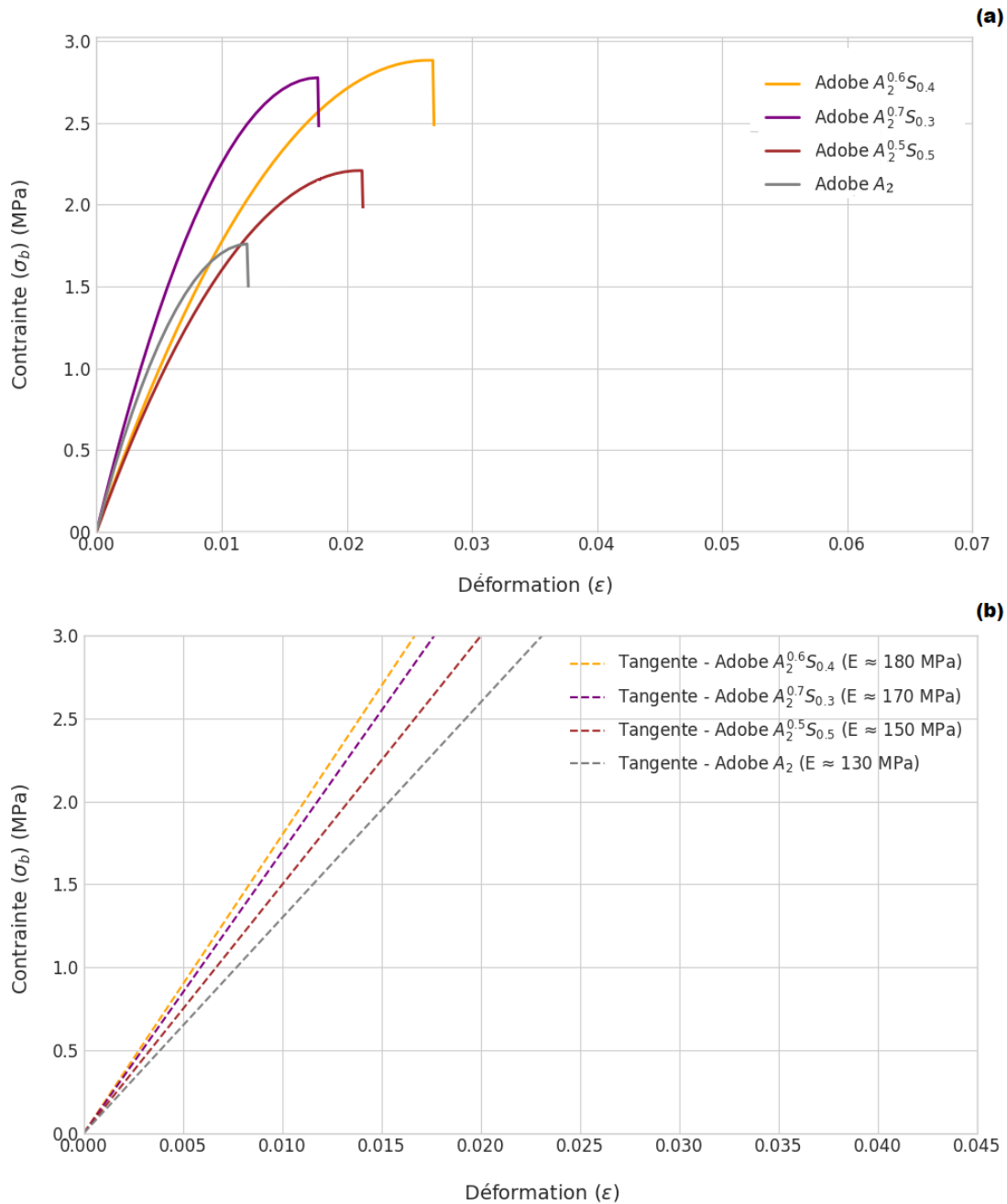


Figure IV.24 Brique d'adobe à base du sol (f) : (a) Courbes contraintes-déformations pour différents type d'adobes, (b) Module de Young pour différents type d'adobes.

Une corrélation positive est observée entre le module de Young et la résistance maximale, indiquant que les adobes plus rigides tendent également à avoir une résistance supérieure. Ces résultats confirment l'importance d'une formulation précise pour optimiser les performances mécaniques des briques d'adobe.

IV.4.3 Effet de l'ajout des fibres sur le module de Young

Les Figures IV.25 et IV.26 illustrent l'évolution du module de Young en fonction de la longueur des fibres pour différentes compositions d'adobe.

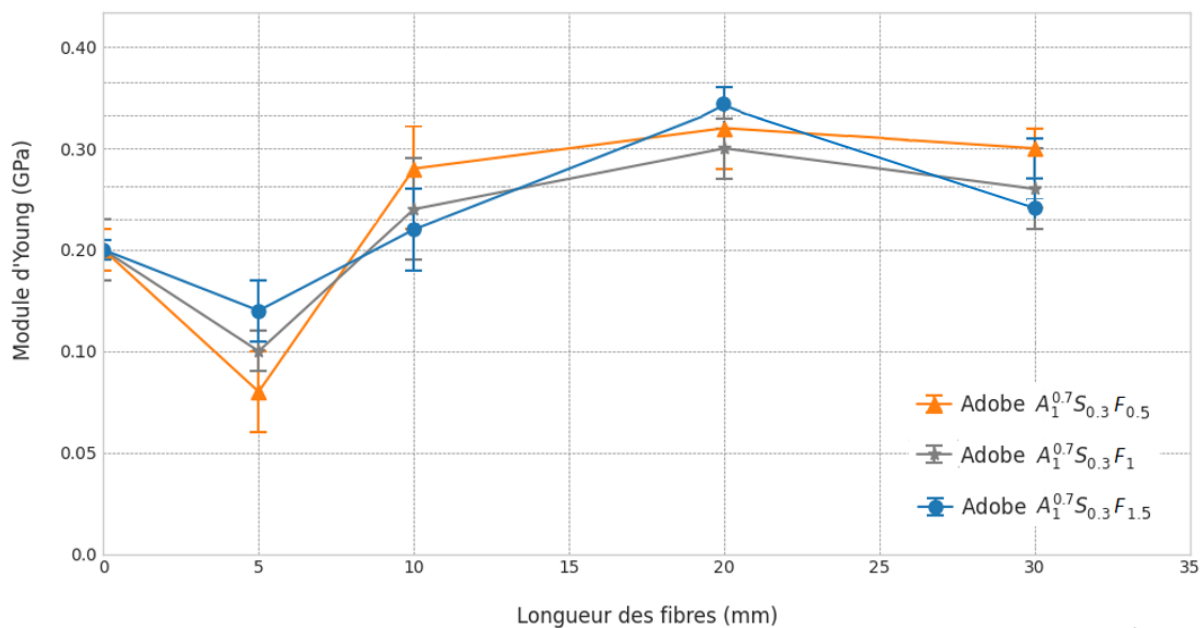


Figure IV.25 Brique d'adobe à base du sol (b) : variation du module d'Young en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

- Influence de la longueur des fibres :

Dans les deux figures, on remarque une augmentation générale du module d'Young avec l'accroissement de la longueur des fibres, jusqu'à une valeur (environ 20 mm). Au-delà de cette longueur, l'effet semble se stabiliser, voire diminuer légèrement. Cela suggère qu'il existe une longueur de fibre optimale pour maximiser le renforcement de l'adobe. Il est notable que la formulation d'adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}$ présente les valeurs les plus élevées. L'adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}$ affiche également des valeurs élevées, suggérant un potentiel d'optimisation du module d'Young par un contrôle conjoint de la longueur et de la proportion des fibres incorporées.

La longueur optimale des fibres observée pourrait être corrélée à l'aptitude des fibres à assurer une interface efficace avec la matrice d'adobe. Des fibres trop courtes (5mm) pourraient présenter un ancrage insuffisant, tandis que des fibres excessivement longues seraient susceptibles de s'entremêler, induisant potentiellement des zones de faiblesse structurale.

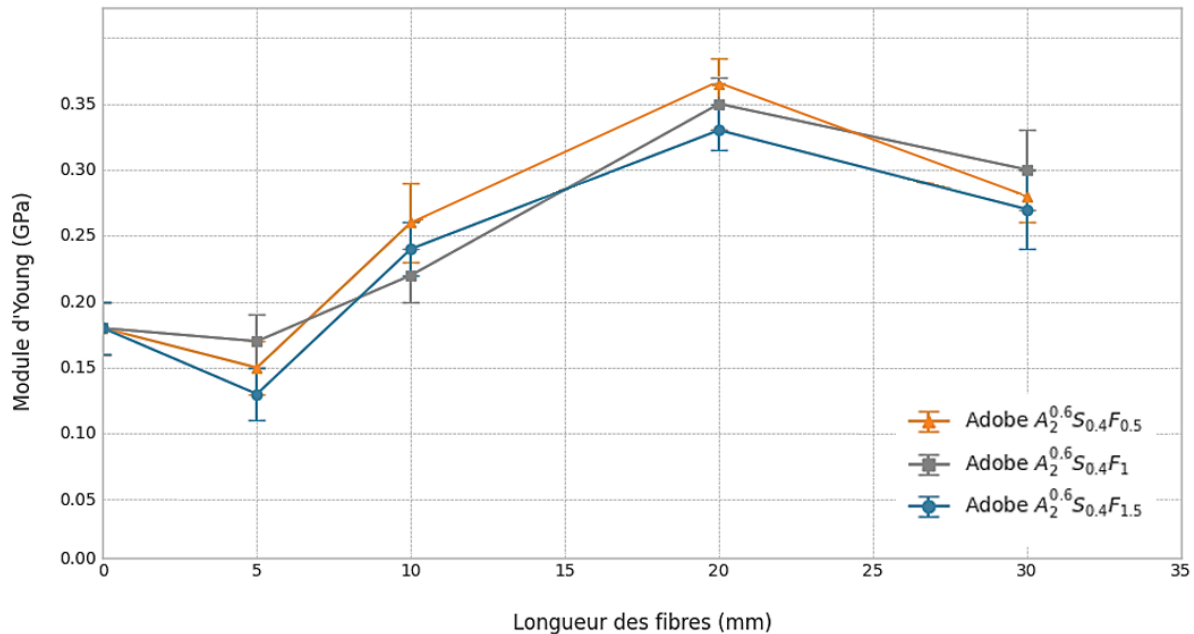


Figure IV.26 Brique d'adobe à base du sol (f) : variation du module d'Young en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

- Effet de la teneur en fibres :

Les différentes courbes illustrent l'influence de la teneur en fibres ($F_{0.5}$ – F_1 – $F_{1.5}$) sur le module d'Young. Il est difficile de tirer des conclusions définitives sur l'effet de la teneur seule, car les courbes se croisent et se superposent. Cependant, il semble que pour chaque longueur de fibre, il existe une teneur optimale qui maximise le module d'Young. L'influence de la teneur en fibres sur les propriétés mécaniques pourrait résulter de facteurs multiples, tels que la distribution spatiale des fibres au sein de la matrice, leur orientation, et les interactions inter-fibres. Il est plausible qu'une concentration excessive en fibres conduise à une agglomération, diminuant ainsi leur efficacité de renforcement et générant des défauts au sein d'Adobe.

- Comparaison entre les briques d'Adobe à base des sols (b) et (f) :

Les deux figures présentent des tendances similaires, mais avec des valeurs de module d'Young légèrement différentes. Cela pourrait être dû aux propriétés spécifiques de chaque sol (b) et (f), telles que leur composition minéralogique, leur granulométrie ou leur plasticité.

IV.4.4 Effet des fibres sur la résistance à la compression simple

Les figures IV.27 et IV.28 présentent les résultats expérimentaux relatifs à l'influence de la longueur des fibres sur la résistance à la compression de briques d'adobe à base de sol (b) et (f). Ces graphiques illustrent l'évolution de la résistance à la compression (R_c , en MPa) en fonction de la longueur des fibres (en mm), en mettant en évidence différentes courbes correspondant aux variations de composition des briques d'adobe.

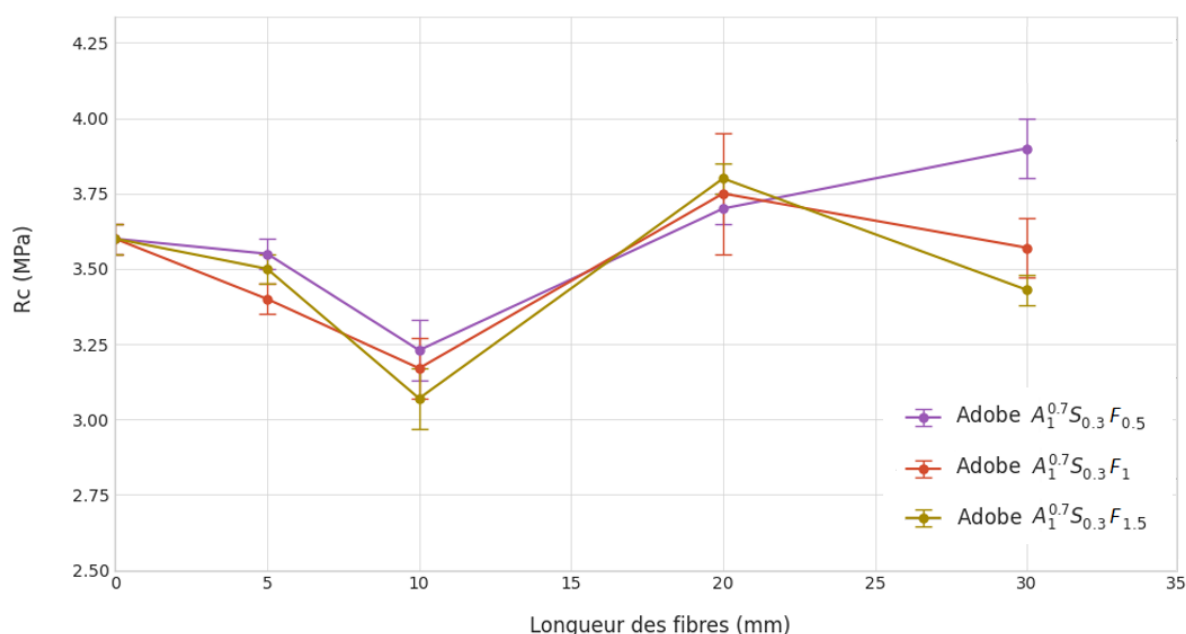


Figure IV.27 Brique d'adobe à base du sol (b) : résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

Dans la figure IV.27, une variation non linéaire de la résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres est observée. Initialement, entre 0 et 10 mm, une diminution de la résistance est constatée, probablement due à une distribution hétérogène des fibres courtes au sein de la matrice. Par la suite, une augmentation de la résistance est enregistrée, atteignant environ 3,75 MPa et 3,80 MPa à 20 mm pour les compositions Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_1$ et Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}$, respectivement. Cette amélioration suggère une meilleure cohésion et interaction entre les fibres et la matrice d'adobe.

Au-delà de 20 mm, la résistance évolue différemment selon la composition : une légère diminution est observée pour Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_1$ et Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}$, tandis qu'une augmentation continue est notée pour Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}$, atteignant environ 3,9 MPa à 30 mm. Cette dernière formulation, représentée par la courbe violette, présente la résistance à la compression la plus

élevée sur l'ensemble des longueurs de fibres testées, en particulier à 30 mm. Les autres compositions, bien que suivant des tendances similaires, affichent des résistances légèrement inférieures, mettant ainsi en évidence l'impact de la concentration en fibres sur les performances mécaniques d'Adobe.

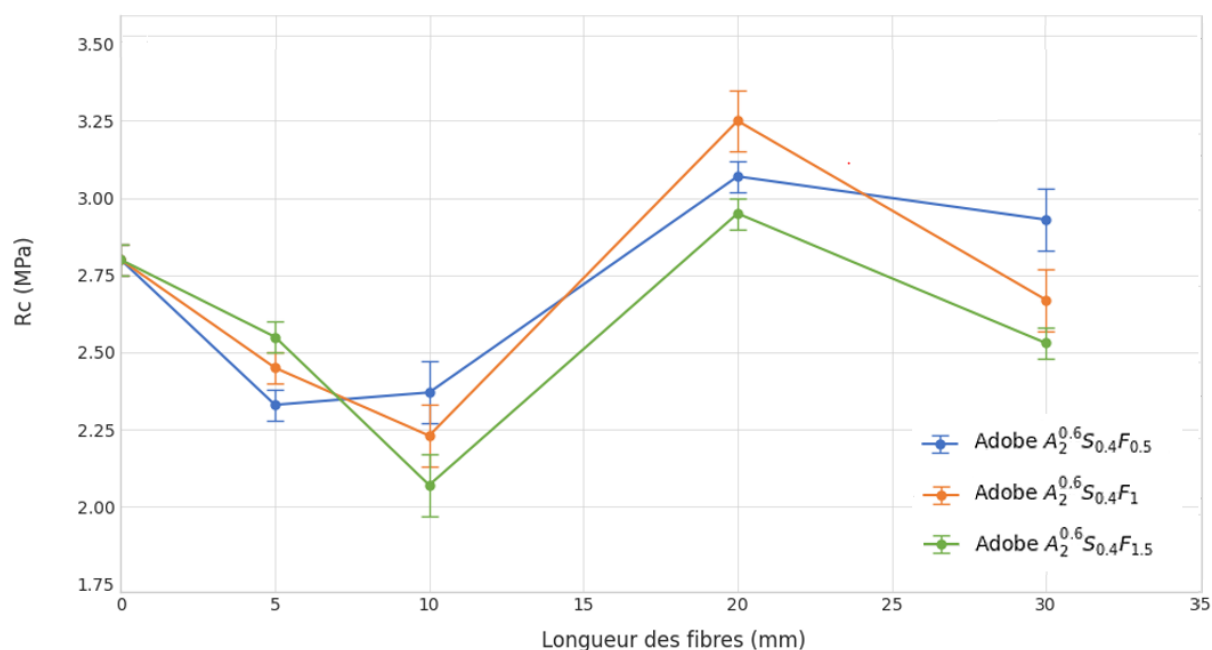


Figure IV.28 Brique d'adobe à base du sol (f) : résistance à la compression en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

Quant à la figure IV.28, une relation non monotone entre la résistance à la compression et la longueur des fibres est également observée. Dans un premier temps, une légère diminution de la résistance est relevée pour des longueurs de fibres comprises entre 0 et 5-10 mm.

Par la suite, une augmentation significative est enregistrée, atteignant un pic de 3,07 MPa et 3,25 MPa à environ 20 mm pour les courbes bleue et orange, respectivement, tandis qu'un maximum de 2,95 MPa est observé pour la courbe verte. Toutefois, au-delà de cette longueur, une baisse de la résistance est notée pour l'ensemble des formulations à 30 mm.

La courbe orange, correspondant à la composition Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_1$, présente globalement les valeurs de résistance les plus élevées, suggérant qu'une teneur optimale en fibres permet d'améliorer la performance mécanique d'Adobe. Les formulations Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}$ (courbe bleue) et Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}$ (courbe verte) suivent des tendances similaires, mais avec des résistances légèrement inférieures, indiquant ainsi que la teneur en fibres joue un rôle déterminant dans l'optimisation des propriétés mécaniques des briques d'adobe.

IV.4.5 Effet des fibres sur la résistance à la flexion trois points

Les figures IV.29 et IV.30 présentent les résultats d'une étude sur l'influence des fibres sur la résistance à la flexion des briques d'adobe. Ces graphiques illustrent l'évolution de la résistance à la flexion (exprimée en MPa) en fonction de la longueur des fibres (en mm) pour différents teneurs en fibres. Chaque figure correspond à un type d'adobe spécifique : la figure IV.29 concerne l'adobe désigné par " $A_1^{0.7}S_{0.3}$ ", tandis que la figure IV.30 représente l'adobe " $A_2^{0.6}S_{0.4}$ ". Les suffixes " $F_{0.5}$ ", " F_1 " et " $F_{1.5}$ " indiquent respectivement des teneurs en fibres de 0,5 %, 1 % et 1,5 %.

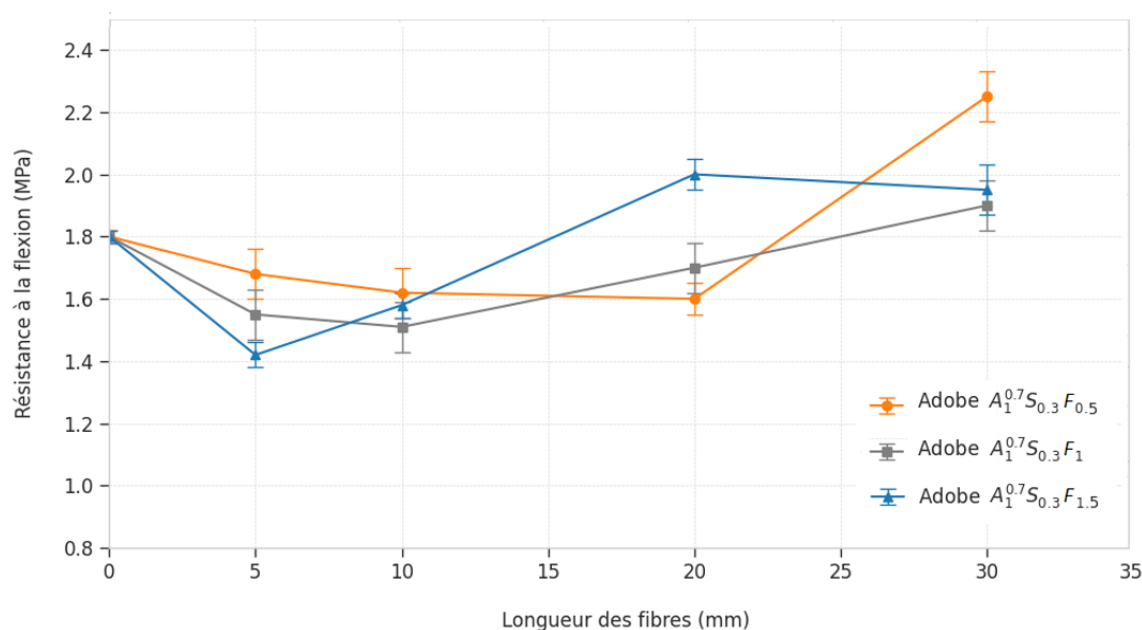


Figure IV.29 Brique d'adobe à base du sol (b) : résistance à la flexion 3 points d'adobe en fonction de la longueur des fibres pour différents teneurs.

Dans la figure IV.29 (Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}$), les résultats montrent que pour les briques à base de sol (b), la résistance à la flexion augmente globalement avec l'allongement des fibres, atteignant un maximum pour des longueurs comprises entre 20 mm et 30 mm. Les formulations à teneur plus élevée en fibres présentent généralement une résistance supérieure, suggérant que l'ajout de fibres améliore la cohésion d'Adobe. Cependant, pour des fibres très courtes (5 mm), une diminution de la résistance est observée, probablement en raison d'une répartition inégale des fibres et d'un effet d'ancrage insuffisant.

- Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}$ (Orange) :

La résistance reste relativement stable jusqu'à une longueur de fibres de 20 mm, puis connaît une augmentation notable à 30 mm.

- Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_1$ (Gris) :
Après une légère diminution initiale, la résistance se stabilise jusqu'à 20 mm avant de croître légèrement à 30 mm.
- Adobe $A_1^{0.7}S_{0.3}F_{1.5}$ (Bleu) :
Une baisse plus marquée est observée pour les longueurs de fibres inférieures à 10 mm, suivie d'une augmentation significative jusqu'à 20 mm, où elle atteint un plateau.

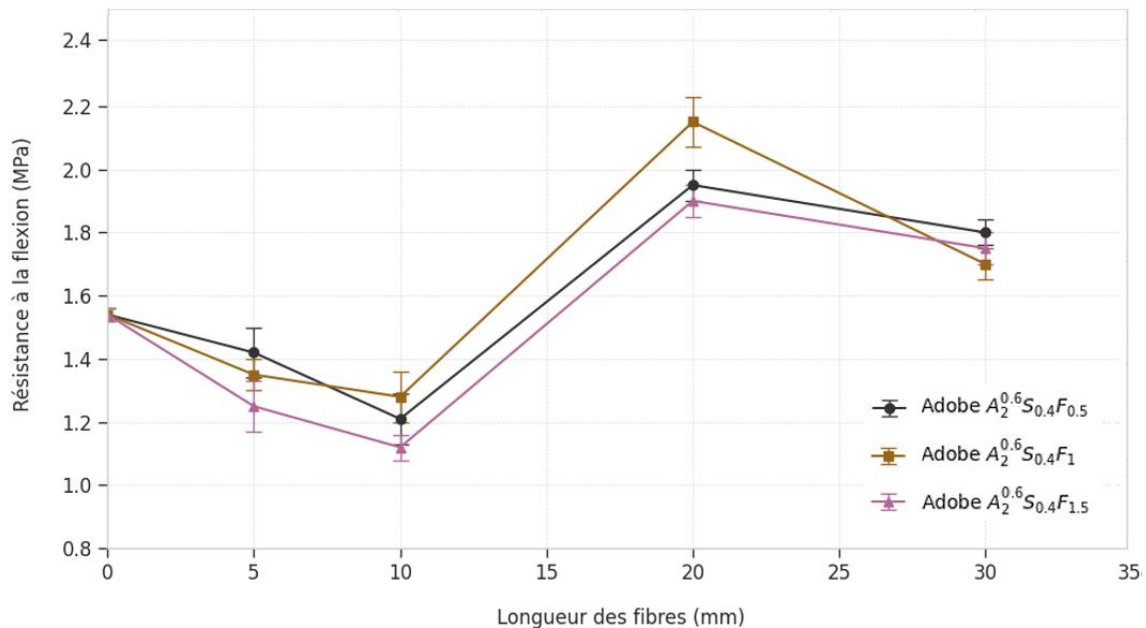


Figure IV.30 Brique d'adobe à base du sol (f) : résistance à la flexion 3 points d'adobe en fonction de la longueur des fibres pour différentes teneurs.

De manière similaire, la figure IV.30 (Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}$) met en évidence une augmentation notable de la résistance à la flexion jusqu'à une longueur de fibres de 20 mm, suivie d'une stabilisation ou d'une légère diminution pour des longueurs supérieures. Cette formulation semble offrir les meilleures performances globales, indiquant une optimisation entre la longueur et la teneur en fibres pour renforcer la matrice.

Bien que les tendances générales soient comparables entre les formulations, les différences deviennent plus marquées pour les fibres longues.

- Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_{0.5}$ (Noir) :
Une légère diminution de la résistance est observée jusqu'à 10 mm, suivie d'une augmentation marquée jusqu'à 20 mm, avant une baisse modérée.
- Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_1$ (Marron) :
Le comportement est similaire, avec des variations moins prononcées.

- Adobe $A_2^{0.6}S_{0.4}F_{1.5}$ (Rose) :

Une diminution plus importante de la résistance est enregistrée jusqu'à 10 mm, suivie d'un pic à 20 mm, avant un léger fléchissement.

Ces résultats confirment que la longueur et la teneur en fibres influencent significativement la résistance à la flexion des briques d'adobe. Toutefois, l'effet de ces paramètres varie selon la composition de l'adobe ($A_1^{0.7}S_{0.3}$ vs. $A_2^{0.6}S_{0.4}$), suggérant des interactions complexes entre les fibres, le sol et les autres composants d'Adobe.

L'étude met en évidence que les fibres jouent un rôle de renforcement au sein de la matrice, améliorant la résistance à la flexion de manière optimale pour certaines longueurs spécifiques. Les fibres trop courtes n'assurent pas une liaison mécanique efficace, tandis que des fibres excessivement longues peuvent altérer l'homogénéité d'Adobe. Ces observations soulignent l'importance d'une optimisation des paramètres de fibres pour maximiser les performances mécaniques des briques d'adobe, un facteur clé pour leur utilisation dans des applications structurelles.

IV.4.6 Effet des fibres sur l'évolution du retrait et perte de masse

Les représentations polaires présentées dans la figure IV.31 illustrent l'évolution temporelle du retrait (à gauche) et de la perte de masse (à droite) en fonction du nombre de jours. Ces graphiques offrent une visualisation synthétique de l'influence des fibres sur le comportement des matériaux Adobe étudiés, mettant en évidence les tendances dynamiques associées à ces phénomènes.

L'analyse des courbes révèle une évolution de type spiralé, suggérant une corrélation directe entre le temps et les paramètres mesurés sur une période de 28 jours. Cette disposition particulière met en lumière une progression continue, traduisant une interaction dynamique entre la présence de fibres et les mécanismes de retrait ainsi que de perte de masse.

Concernant le retrait (sol-f), des différences notables sont observées entre les échantillons renforcés par des fibres ($F_{0.5}$ — F_{1} — $F_{1.5}$). Les courbes correspondant aux formulations contenant des fibres présentent une moindre extension vers l'extérieur, avec des taux de retrait de 2.5 %, 1.5 % et 1 %, respectivement. Cette réduction du retrait suggère que l'incorporation de fibres limite efficacement la déformation volumique due au séchage ou aux variations hygrométriques. Cet effet peut être attribué à la capacité des fibres à restreindre les déformations dimensionnelles d'Adobe, en jouant le rôle d'un squelette interne qui s'oppose aux forces de retrait et réduit ainsi la contraction globale.

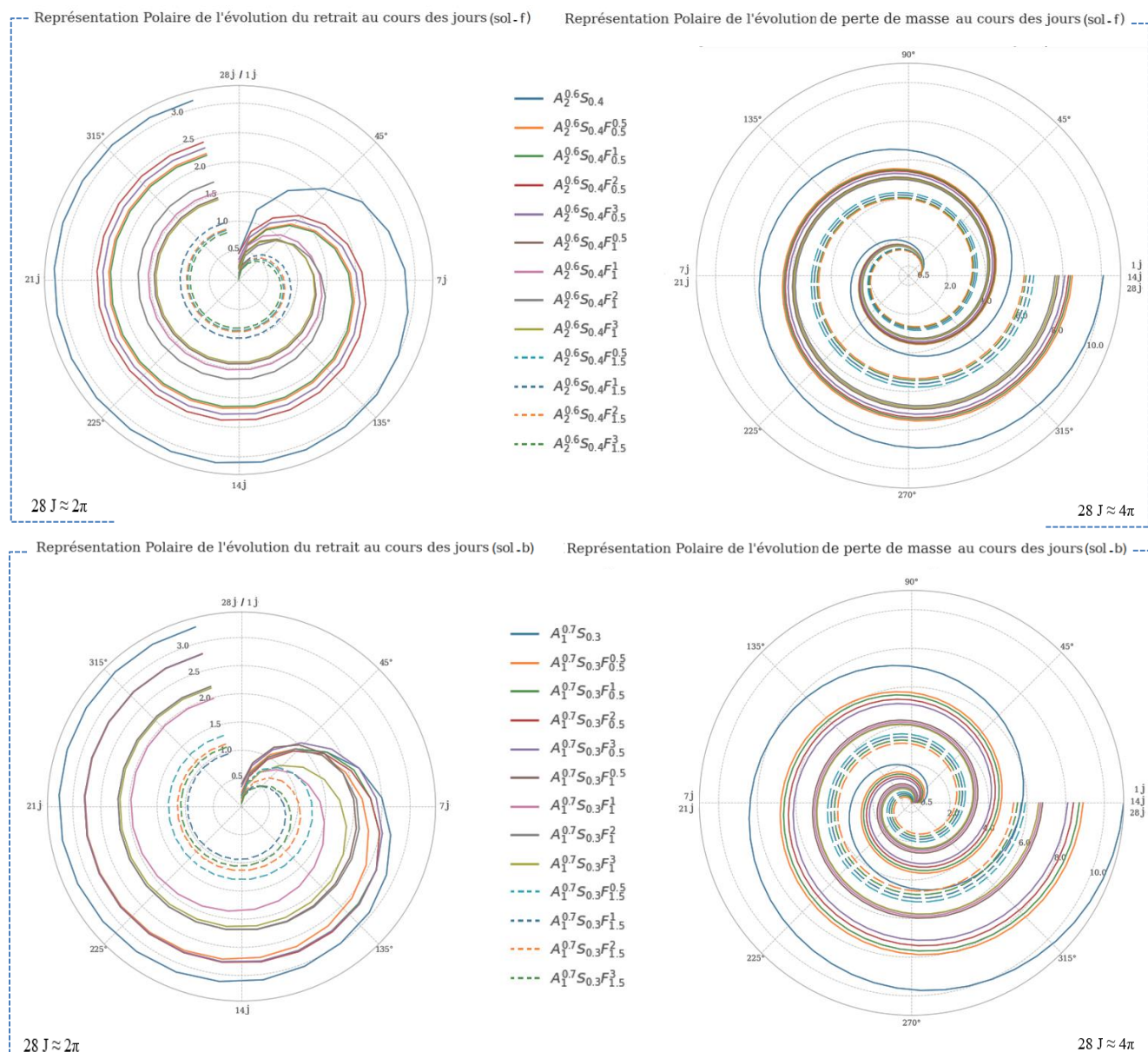


Figure IV.31 influence des fibres sur l'évolution du retrait et perte de masse.

L'examen du retrait (sol-b) met en évidence une augmentation progressive au fil du temps, matérialisée par une expansion en spirale des courbes. Toutefois, des différences subtiles en termes d'amplitude du retrait sont observables selon les formulations. Certaines formulations montrent une stabilisation plus rapide du retrait ($F_{0.5}$ – F_{1} – $F_{1.5}$) avec des valeurs respectives de 2.7 %, 2.2 % et 1.3 %, ce qui témoigne d'une meilleure efficacité des fibres en termes de limitation des contraintes internes et d'amélioration de la cohésion d'Adobe.

En ce qui concerne la perte de masse (sol-f), une évolution similaire est observée entre les différents échantillons, bien que l'influence des fibres soit manifeste. Les échantillons contenant des fibres ($F_{1.5}$ – F_{1} – $F_{0.5}$) présentent une perte de masse plus lente, avec des taux respectifs de 6.1 %, 5.1 % et 4.1 %, ce qui témoigne d'une meilleure efficacité des fibres en termes de limitation des contraintes internes et d'amélioration de la cohésion d'Adobe.

7.8 % et 8.3 %, suggérant un effet stabilisateur attribuable à la rétention d'eau et à la structuration de la matrice par les fibres. De même, l'analyse de la perte de masse (sol-b) révèle une progression en spirale, traduisant une augmentation graduelle de la perte de masse avec le temps. Les différences observées entre les courbes ($F_{1.5}$ – F_1 – $F_{0.5}$) mettent en évidence l'influence significative de la composition fibreuse sur la cinétique de perte de masse, avec des valeurs respectives de 5.8 %, 6.3 % et 8.2 %.

Ces résultats soulignent le rôle stabilisateur des fibres dans la matrice d'Adobe, réduisant à la fois le retrait et la perte de masse. Cette action peut être expliquée par leur capacité à répartir les contraintes internes et à renforcer la cohésion structurale. Par ailleurs, les variations observées entre les différentes formulations indiquent que l'efficacité des fibres est modulée par leur concentration et leurs propriétés spécifiques, notamment leur longueur.

Ainsi, l'incorporation de fibres apparaît comme une stratégie efficace pour contrôler le retrait et la perte de masse des matériaux Adobe étudiés. Toutefois, la longueur et la concentration des fibres restent des paramètres clés influençant significativement leur comportement.

L'utilisation de fibres dans ces matériaux constitue une approche pertinente pour améliorer leur durabilité, en limitant les déformations induites par le retrait et en ralentissant la perte de masse. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour l'optimisation des matériaux composites destinés à des applications nécessitant une stabilité dimensionnelle accrue.

Enfin, l'analyse conjointe des diagrammes polaires met en évidence l'impact significatif des fibres sur les processus couplés de retrait et de perte de masse. Cette représentation graphique facilite l'identification des formulations optimales en fonction des objectifs recherchés, qu'il s'agisse de minimiser le retrait ou de contrôler la perte de masse.

IV.4.7 Effet de la stabilisation sur les briques d'adobes renforcées par les fibres

La chaux a été employée comme agent stabilisant pour les sols (b) et (f) en raison de leurs caractéristiques géotechniques spécifiques. Le sol (b) se distingue par un indice de plasticité élevé (23,91), une teneur importante en argile (23 %) et en limons (49 %), ainsi qu'un taux d'humidité élevé (34,2 %), ce qui le rend particulièrement plastique et peu perméable. De manière similaire, le sol (f) présente un indice de plasticité notable (18,63), une proportion significative d'argile (21 %) et de limons (57,5 %), ainsi qu'un comportement plastique marqué, suggérant une susceptibilité au gonflement et une faible stabilité en présence d'eau.

L'ajout de chaux s'avère pertinent en raison de sa capacité à réduire la plasticité des sols par modification chimique des particules d'argile et formation de composés cimentaires, notamment des hydrates de calcium et d'alumine, contribuant ainsi à l'amélioration de leur stabilité et de leur portance. Par ailleurs, la chaux favorise la réduction de l'humidité naturelle élevée, comme observé dans le sol (b). Selon la figure IV.32, son efficacité est particulièrement notable pour les sols à forte plasticité et à limite de liquidité élevée, à l'instar des sols (b) et (f). L'incorporation de la chaux permet donc d'optimiser leurs propriétés mécaniques tout en atténuant les risques associés au gonflement.

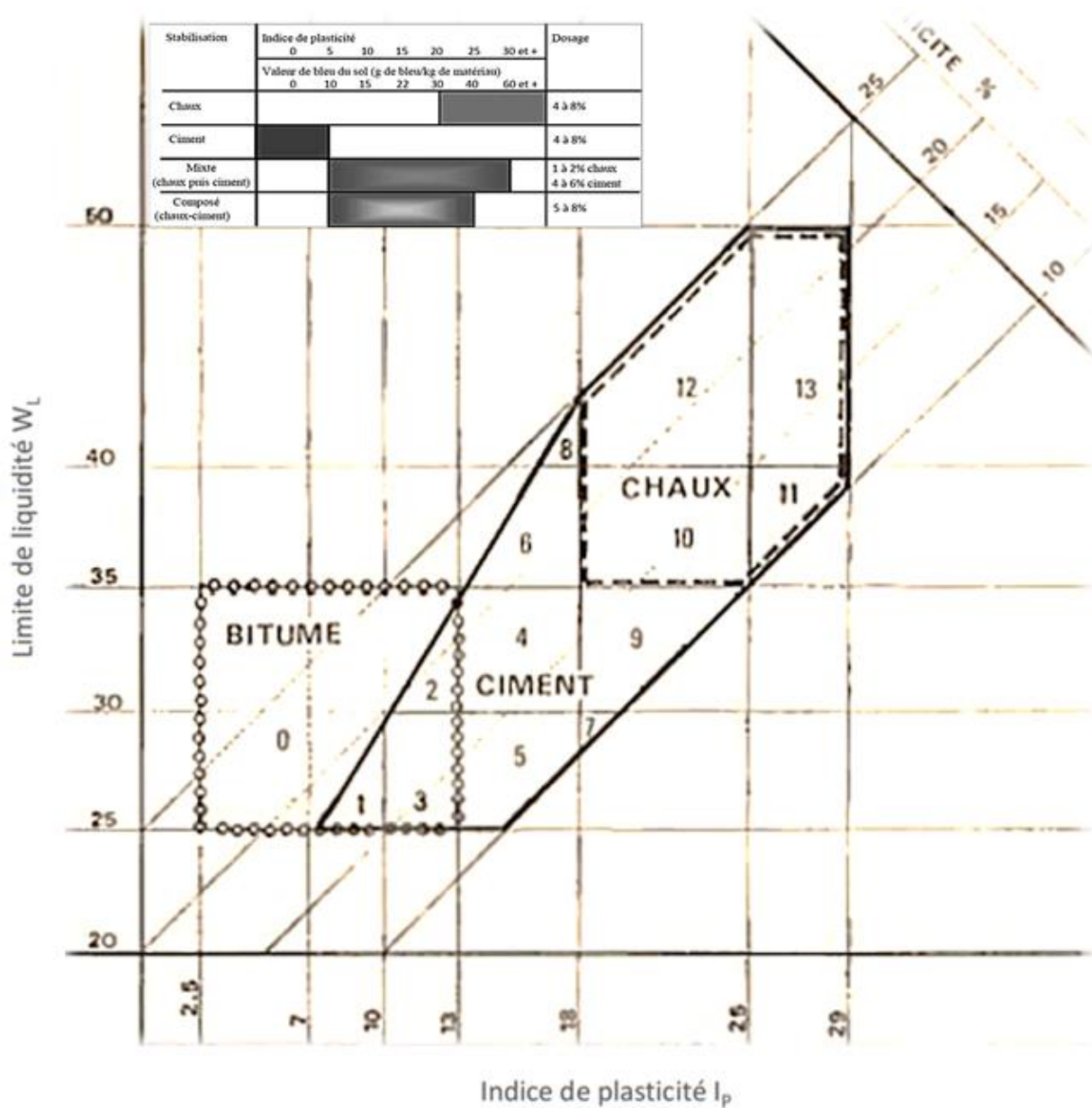


Figure IV.32 Synthèse sur les dosages en stabilisants et limites d'atterberg selon les recommandations du centre de recherches routières en Belgique.¹⁶⁹

La Figure IV.33, composée des graphiques (a) et (b), illustre l'application du protocole d'Eades-Grim pour l'évaluation de la demande en chaux de deux sols distincts, désignés respectivement sol (b) et sol (f). L'analyse des courbes met en évidence deux phases principales dans l'évolution du pH en fonction de la teneur en chaux.

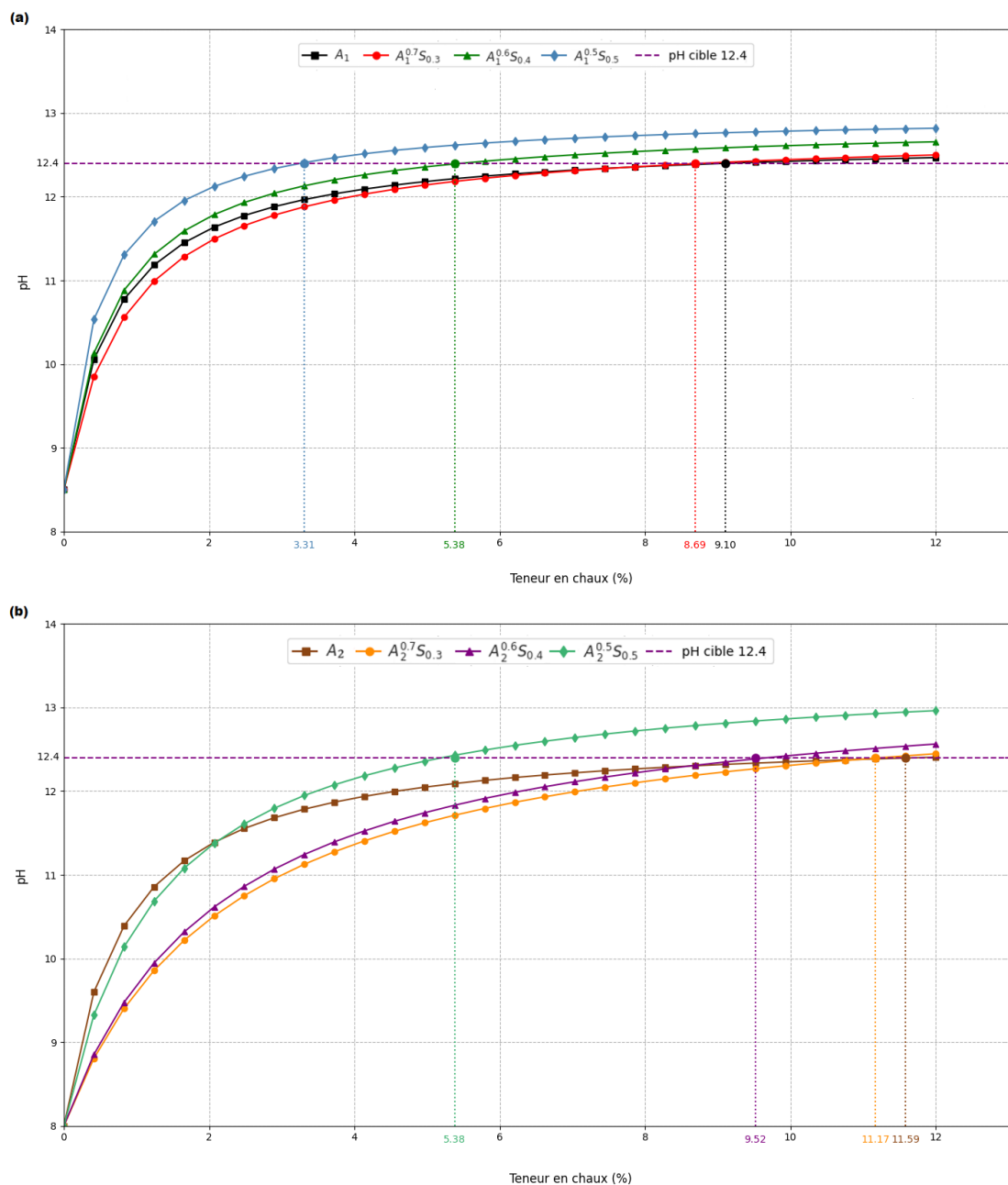


Figure IV.33 (a) Évaluation du pH en fonction du taux chaux avec la méthode Eads-Grim pour le sol (b), (b) pH en fonction de la quantité de chaux ajoutée (méthode Eads-Grim) pour le sol (f).

Dans une première phase, une augmentation rapide du pH est observée pour de faibles pourcentages de chaux, traduisant l'interaction initiale entre les ions calcium et les minéraux argileux. Cette hausse rapide est attribuée à la saturation progressive des sites d'échange

cationique. La seconde phase se caractérise par l'atteinte d'un plateau à un pH avoisinant 12,4, correspondant au seuil requis pour initier les réactions pouzzolaniques, essentielles à la formation de phases cimentaires stabilisantes.

Le Point de Fixation de Chaux (PFC), défini comme la quantité minimale de chaux permettant d'atteindre un pH de 12,4, est matérialisé sur les graphiques par une ligne horizontale pointillée violette. Des lignes verticales pointillées facilitent quant à elles l'interprétation des valeurs correspondantes de la teneur en chaux. L'analyse des figures révèle des variations des PFC selon les courbes examinées. Dans la figure (a), la courbe $A_1^{0.7}S_{0.3}$ (cercles rouges) atteint un pH de 12,4 pour une teneur en chaux de 8,69 %, tandis que la courbe $A_1^{0.6}S_{0.4}$ (triangles verts) atteint ce même seuil à 5,38 %. La courbe $A_1^{0.5}S_{0.5}$ (carrés bleus) présente quant à elle une valeur inférieure de 3,31 %. Dans la figure (b), une tendance similaire est observée, bien que les valeurs absolues soient plus élevées : la courbe $A_2^{0.7}S_{0.3}$ (cercles oranges) atteint le pH cible pour 11,17 % de chaux, suivie de $A_2^{0.6}S_{0.4}$ (triangles violets) à 9,52 %, et de $A_2^{0.5}S_{0.5}$ (carrés verts) à 5,38 %.

Ces résultats soulignent une corrélation entre la composition des mélanges et la quantité de chaux requise pour stabiliser le pH à 12,4, ce qui peut être attribué aux variations des propriétés chimiques et minéralogiques des échantillons. La quantité de chaux nécessaire pour atteindre ce seuil varie selon la nature des sols. Par exemple, certains échantillons affichent une saturation chimique à environ 3,31 %, tandis que d'autres requièrent jusqu'à 8,69 % ou plus. Ces écarts peuvent être expliqués par la composition minéralogique spécifique des sols testés, en particulier la teneur en argiles actives et en matériaux organiques, influençant à la fois la capacité d'échange cationique et la réactivité chimique du milieu.

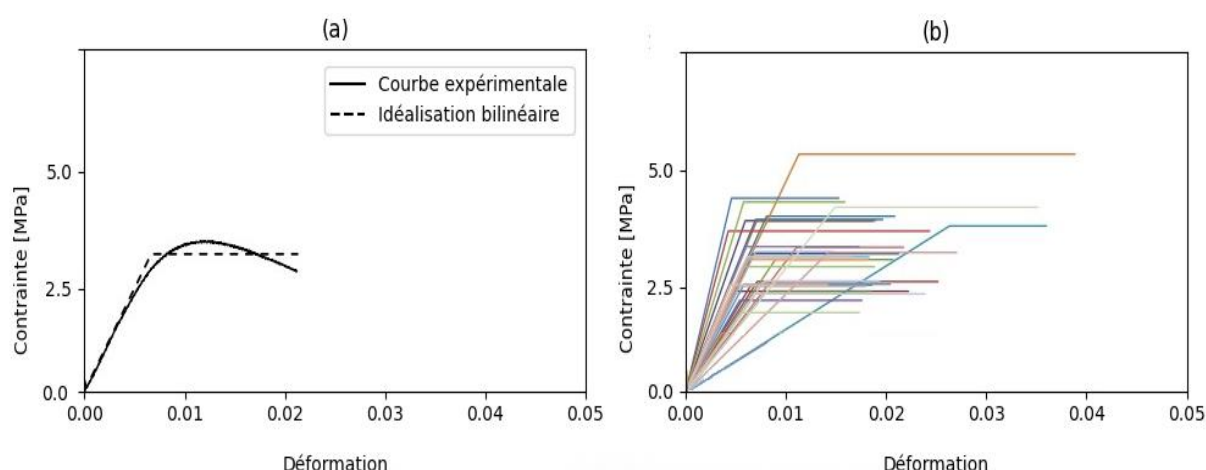


Figure IV.34 (a) Id  alisat  n bilinéaire de la courbe contrainte-déformation typique et (b) courbes contrainte-déformation idéalisées d'éprouvettes.

La figure IV.34 représente l'idéalisation bilinéaire de courbes contrainte-déformation, un concept essentiel dans l'analyse du comportement mécanique d'Adobes. En (a), une courbe contrainte-déformation expérimentale typique est présentée, superposée à son idéalisation bilinéaire. Cette idéalisation simplifie la courbe réelle en deux segments linéaires : un segment initial représente le comportement élastique d'Adobe, tandis que le second segment, horizontal, symbolise le comportement plastique après avoir atteint la limite d'élasticité. Cette simplification permet une analyse plus aisée et rapide des structures, notamment dans les calculs par éléments finis. La figure (b) illustre une série de courbes contrainte-déformation idéalisées pour divers échantillons ("Adobe"). Chaque courbe représente un échantillon différent, montrant une dispersion dans les propriétés mécaniques. On observe que la limite d'élasticité et le palier de contrainte varient d'un échantillon à l'autre, ce qui témoigne de l'hétérogénéité inhérente aux matériaux réels.

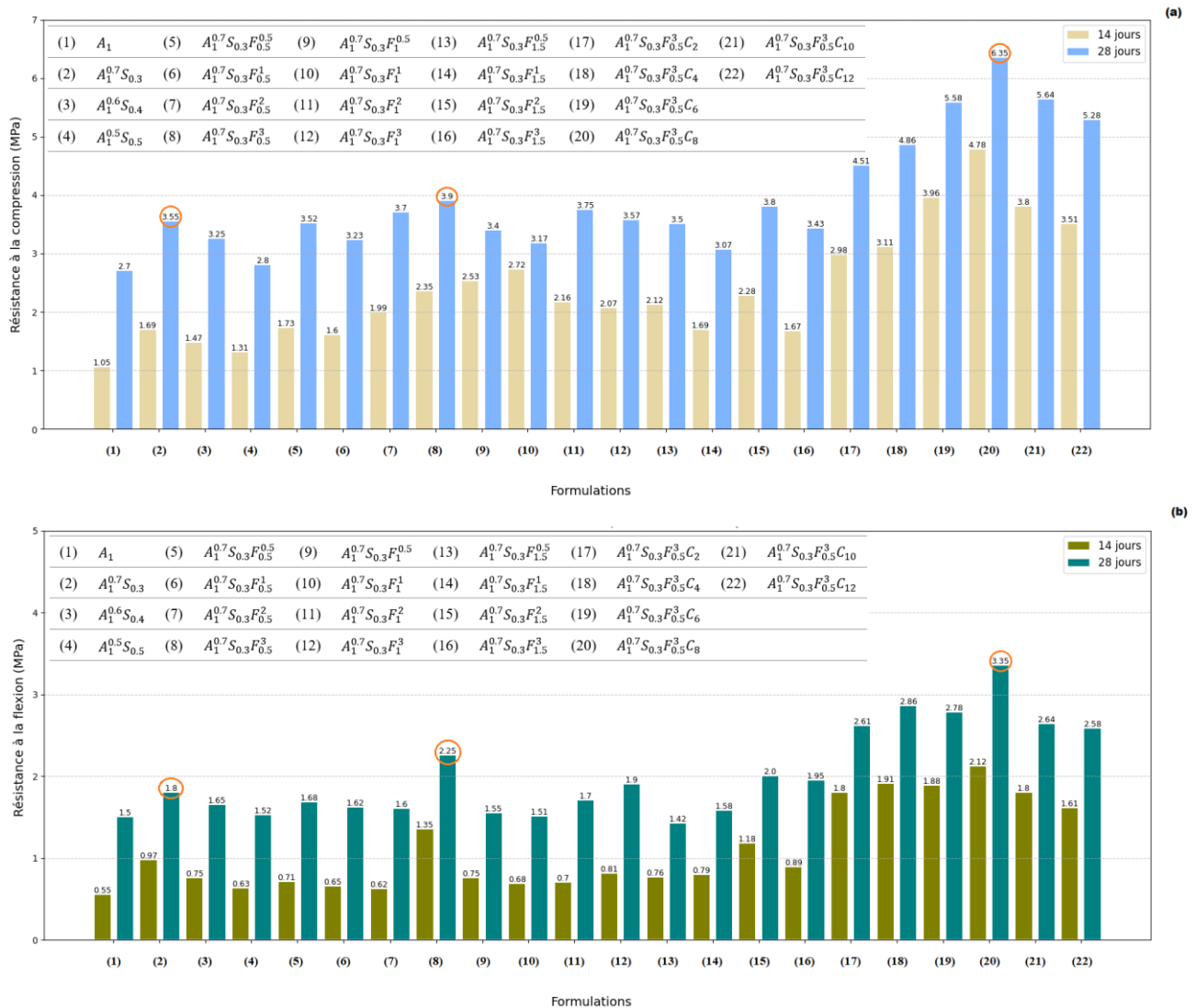


Figure IV.35 Variation de la résistance des briques d'adobe à base du sol (b) : Effet des formulations et influence du temps.

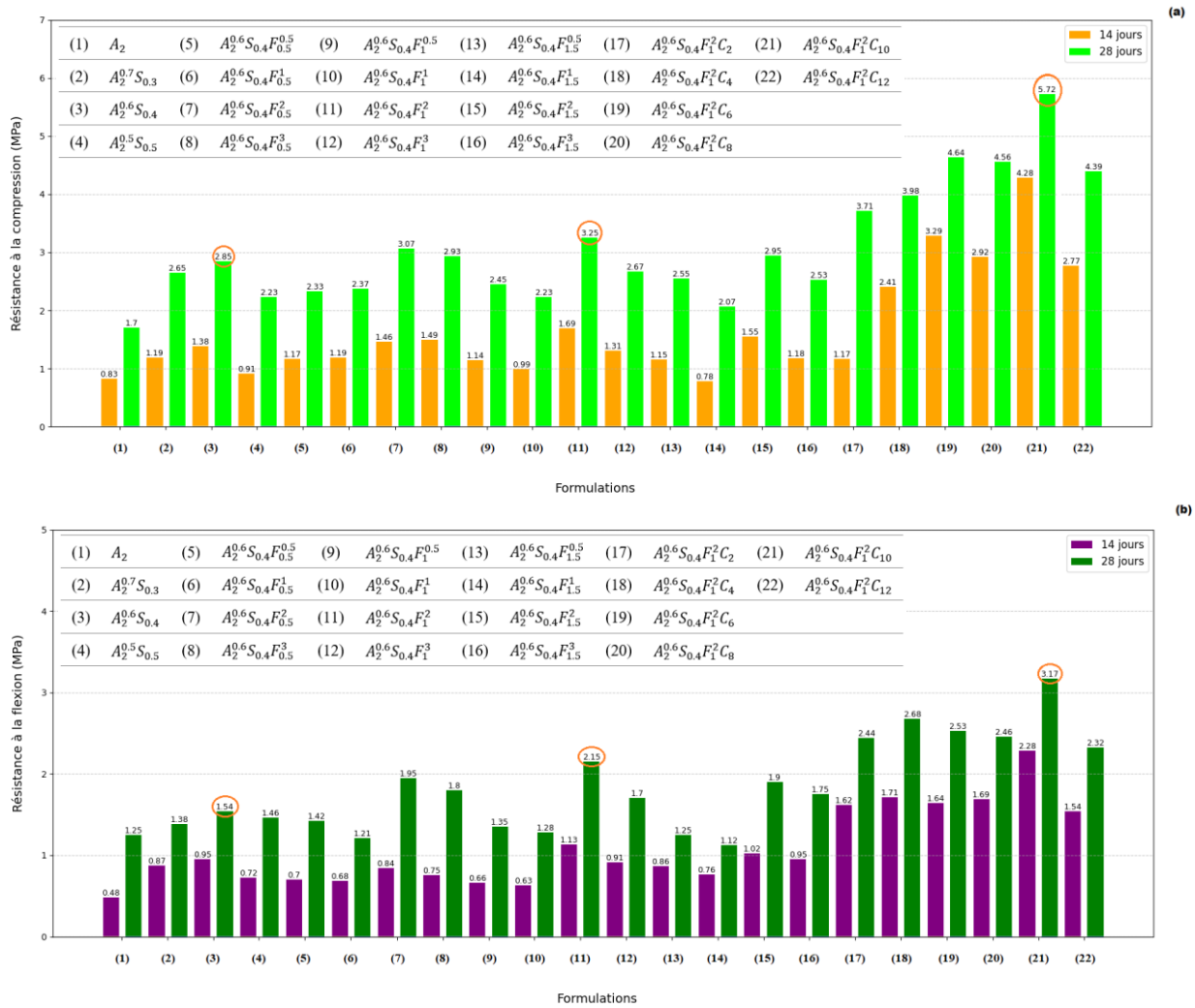


Figure IV.36 Variation de la résistance des briques d'adobe à base du sol (f) : Effet des formulations et influence du temps.

Les figures IV.35 et IV.36 illustrent, sous forme de diagrammes à barres, la comparaison de la résistance des briques d'Adobe à base des sols (b) et (f) pour différentes formulations. L'axe des abscisses représente les diverses formulations, numérotées de 1 à 22, chacune étant désignée par une notation spécifique. L'axe des ordonnées exprime la résistance mécanique, soit à la compression, soit à la flexion, en méga pascals (MPa). Le diagramme compare les résultats de deux périodes de test : 14 jours et 28 jours, représentés respectivement par des barres de couleur différente.

La figure IV.35(a) illustre l'évolution de la résistance à la compression des différentes formulations en fonction du temps. De manière générale, on observe une augmentation de cette résistance avec le temps, comme en témoigne la hauteur des barres bleues, supérieure à celle des barres beiges dans la plupart des cas. Certaines formulations affichent des résistances relativement

élevées, notamment la formulation (20), qui atteint une valeur maximale de 6,35 MPa à 28 jours. D'autres formulations, telles que (18) et (19), présentent également des résistances comprises entre 4,5 et 6 MPa à la même échéance. En revanche, les formulations (1), (4) et (14) enregistrent les valeurs les plus faibles, suggérant que leur composition pourrait ne pas être optimale pour assurer des propriétés mécaniques satisfaisantes. Par ailleurs, certaines valeurs encadrées, telles que 3,55 MPa pour la formulation (2), 3,9 MPa pour la formulation (8) et 6,35 MPa pour la formulation (20), correspondent à des résultats particulièrement significatifs et constituent des points de référence spécifiques, représentant ainsi les formulations les plus performantes.

Dans la figure IV.35(b), l'évolution de la résistance à la flexion suit une tendance similaire à celle de la résistance à la compression, avec une augmentation notable pour l'ensemble des formulations à 28 jours par rapport à 14 jours. Certaines formulations, notamment (8) et (20), atteignent des valeurs maximales de 2,25 MPa et 3,35 MPa, mettant ainsi en évidence l'effet bénéfique des ajouts de fibres et de liants sur la résistance en flexion. En revanche, les formulations sans stabilisation, telles que (1) et (2), affichent des performances relativement faibles, avec une résistance inférieure à 1,8 MPa après 28 jours. À l'opposé, les formulations enrichies en fibres et en chaux, notamment celles comprises entre (17) et (22), enregistrent des résistances supérieures à 2,5 MPa, témoignant ainsi d'une amélioration significative de la cohésion interne d'Adobe et de sa capacité à résister aux efforts de flexion.

La figure IV.36(a) illustre l'évolution de la résistance à la compression des briques d'Adobe formulées avec A_2 (sol-f) en fonction du temps (14 et 28 jours). L'analyse des données met en évidence une augmentation significative de la résistance avec le temps, confirmant ainsi le processus de durcissement progressif d'Adobe.

À 14 jours, la majorité des formulations présentent des résistances comprises entre 0,78 MPa et 4,28 MPa, traduisant un durcissement encore en cours et des performances relativement modestes. Cependant, après 28 jours, une amélioration notable est observée, avec des valeurs atteignant jusqu'à 5,72 MPa pour la formulation (21). Cette évolution confirme l'effet bénéfique du temps sur la consolidation des briques.

Certaines formulations, notamment (11) et (21), affichent des résistances élevées de 3,25 MPa et 5,72 MPa respectivement à 28 jours, témoignant d'une optimisation réussie de la composition grâce à l'ajout de stabilisants tels que les fibres et la chaux. À l'inverse, les formulations (1) et (2) enregistrent des valeurs plus faibles, respectivement 1,7 MPa et 2,65 MPa, soulignant ainsi l'importance de l'incorporation de liants pour améliorer les performances mécaniques d'Adobe.

La figure IV.36(b) présente une analyse comparative des résistances aux flexions mesurées à 14 et 28 jours, mettant en évidence une tendance générale à l'augmentation de cette propriété mécanique avec le temps. À 14 jours, les formulations affichent des résistances variables, allant de valeurs modestes à des niveaux intermédiaires, suggérant un processus de durcissement encore en cours. Toutefois, une amélioration significative est observée après 28 jours pour la majorité des formulations.

En particulier, les formulations (11) et (21) présentent des performances supérieures, atteignant respectivement 2,15 MPa et 3,17 MPa à 28 jours, témoignant de l'efficacité de l'optimisation de leur composition, probablement grâce à l'incorporation de stabilisants. À l'inverse, les formulations de base (1) et (2) affichent des résistances à la flexion plus faibles, soulignant l'importance de l'ajout de liants pour améliorer les caractéristiques mécaniques des briques d'Adobe.

IV.5 Conclusion

Ce chapitre, consacré aux résultats et discussions, a permis d'explorer en profondeur les caractéristiques des fibres de *Bassia Indica*, des sols utilisés et du comportement mécanique des briques d'adobes, notamment renforcées par ces fibres et stabilisées à la chaux. L'analyse morphologique, chimique, thermique et mécanique des fibres de *Bassia Indica* a révélé leur potentiel significatif en tant que renfort biosourcé pour les matériaux composites légers. Leur stabilité thermique remarquable, leur structure cristalline et leur résistance mécanique prometteuse, confirmées par les analyses XRD, EDX, RTA-FTIR et TGA, suggèrent une valorisation pertinente dans le domaine de la construction écologique.

Parallèlement, la caractérisation approfondie des sols a permis d'identifier leurs propriétés intrinsèques, notamment leur granulométrie, leurs limites d'Atterberg et leur composition chimique et minéralogique. La classification selon l'abaque triangulaire et le diagramme de plasticité a mis en évidence la diversité des sols étudiés, certains présentant une plasticité plus marquée que d'autres. Cette compréhension des sols est essentielle pour adapter les techniques de stabilisation et de renforcement, notamment par l'ajout de chaux et de fibres.

L'étude du comportement mécanique des briques d'adobes a démontré l'influence significative de l'ajout de fibres et de la stabilisation à la chaux sur leurs performances. L'analyse de la courbe contrainte-déformation, l'effet sur le module d'Young, la résistance à la compression simple et à la flexion trois points ont révélé une amélioration notable de la résistance mécanique des

formulations enrichies en fibres et/ou stabilisées à la chaux. Notamment, les formulations ($A_1^{0.7}S_{0.3}F_{0.5}^3C_8$) et ($A_2^{0.6}S_{0.4}F_1^2C_{10}$), combinant l'ajout de stabilisants, ont affiché des performances supérieures, soulignant la synergie positive entre fibres et chaux pour optimiser les propriétés mécaniques des briques d'adobes. De plus, l'évolution de la résistance au cours du temps (14 et 28 jours) a confirmé un durcissement progressif du matériau, attestant de l'efficacité de la consolidation des briques.

Conclusions et Perspectives

En conclusion, cette recherche a permis d'explorer en profondeur le potentiel des fibres végétales, et plus particulièrement celles de *Bassia Indica*, en tant que renfort biosourcé pour les briques d'adobe. L'analyse approfondie des caractéristiques de ces fibres a révélé des propriétés mécaniques, thermiques et structurales prometteuses pour l'amélioration des performances des matériaux composites légers. Parallèlement, la caractérisation détaillée des sols argileux utilisés a mis en lumière leur diversité et l'importance de comprendre leurs propriétés intrinsèques pour adapter les techniques de stabilisation et de renforcement. Les essais mécaniques réalisés sur les briques d'adobe renforcées aux fibres de *Bassia Indica*, notamment en compression simple et en flexion trois points, ont démontré l'efficacité de l'ajout de fibres pour accroître significativement la résistance mécanique. L'étude de la synergie entre l'ajout de fibres et la stabilisation à la chaux a également permis d'identifier des formulations optimisées affichant des performances supérieures. Ces résultats ouvrent des perspectives encourageantes pour le développement de matériaux de construction écologiques et durables, valorisant les ressources locales.

Néanmoins, plusieurs axes de recherche méritent d'être approfondis afin d'affiner et d'élargir ces résultats :

- Études de durabilité à long terme : Des investigations approfondies sur la durabilité à long terme des briques d'adobe renforcées de fibres de *Bassia Indica* dans diverses conditions environnementales (cycles d'humidité, cycles de gel-dégel, attaque biologique) sont cruciales.
- Analyse du cycle de vie (ACV) : Une ACV complète comparant l'impact environnemental de l'adobe renforcé de fibres de *Bassia Indica* avec des matériaux de construction conventionnels (par exemple, des blocs de béton) renforcerait davantage ses arguments de durabilité.
- Optimisation du traitement des fibres : L'exploration de diverses méthodes de prétraitement des fibres (chimiques, physiques, biologiques) pourrait potentiellement améliorer l'adhérence fibre-matrice et améliorer encore les propriétés mécaniques du composite.
- Passage à l'échelle et essais sur le terrain : La transition des expériences à l'échelle du laboratoire à la production à l'échelle pilote et la réalisation d'essais sur le terrain dans des projets de construction réels seraient essentielles pour valider l'applicabilité pratique des résultats.

- Exploration d'autres fibres végétales : L'étude du potentiel d'autres fibres végétales disponibles localement comme renforcement dans la construction en adobe pourrait élargir la gamme des options de matériaux de construction durables.
- Étude de faisabilité économique : Le coût associé à la production d'adobes renforcés de fibres de Bassia Indica, et la comparaison avec les adobes classiques.

En conclusion, cette thèse contribue de manière significative à l'ensemble croissant de connaissances sur les matériaux de construction durables. En démontrant l'efficacité des fibres de Bassia Indica pour améliorer les performances des briques d'adobe, la recherche fournit un argument convaincant en faveur d'une adoption plus large des matériaux biosourcés dans l'industrie de la construction, favorisant à la fois la responsabilité environnementale et l'utilisation efficace des ressources. Les perspectives identifiées offrent une feuille de route claire pour la poursuite de la recherche et du développement dans ce domaine prometteur.

Résumé

Cette recherche a étudié le potentiel des fibres de la plante *Bassia indica* comme renfort biosourcé dans les matériaux composites légers, en particulier pour les briques d'adobe. Une caractérisation complète des fibres (MEB, DRX, EDX, RTA-IRFT, ATG) a révélé une cristallinité élevée (40,12%), une stabilité thermique remarquable (jusqu'à 260,24°C) et des propriétés mécaniques prometteuses (résistance à la traction de 417,50 MPa, module d'Young de 17,46 GPa). En parallèle, une analyse des propriétés intrinsèques des sols a été menée. L'étude a exploré l'effet synergique du renforcement par les fibres et de la stabilisation à la chaux sur les performances mécaniques des briques d'adobe, via des essais de compression et de flexion. Les résultats ont démontré une amélioration significative de la résistance mécanique avec l'incorporation de fibres et de chaux, les formulations optimisées présentant des performances supérieures. Globalement, cette recherche souligne le potentiel des fibres de *Bassia indica* comme matériau de renforcement durable pour une construction écologique, favorisant l'utilisation des ressources locales et améliorant les performances des briques d'adobe.

Mots clés : brique de terre ; adobe ; fibres végétales ; agents stabilisants ; traitement chimique.

Abstract

This research investigated the potential of fibers from the *Bassia indica* plant as a bio-sourced reinforcement in lightweight composite materials, particularly for adobe bricks. A comprehensive characterization of the fibers (SEM, XRD, EDX, RTA-FTIR, TGA) revealed a high crystallinity (40.12%), remarkable thermal stability (up to 260.24°C), and promising mechanical properties (tensile strength of 417.50 MPa, Young's modulus of 17.46 GPa). In parallel, an analysis of the intrinsic properties of the soils was conducted. The study explored the synergistic effect of fiber reinforcement and lime stabilization on the mechanical performance of adobe bricks, using compression and flexural tests. The results demonstrated a significant improvement in mechanical strength with the incorporation of fibers and lime, with the optimized formulations exhibiting superior performance. Overall, this research highlights the potential of *Bassia indica* fibers as a sustainable reinforcement material for ecological construction, promoting the use of local resources and improving the performance of adobe bricks.

Keywords: earth brick; adobe; plant fibers; stabilizing agents; chemical treatment.

ملخص

بحثت هذه الدراسة إمكانية استخدام ألياف نبات "*Bassia indica*", كمصدر حيوي لتعزيز المواد المركبة خفيفة الوزن، وخاصة طوب اللبن. حيث كشف التوصيف الشامل للألياف عن تبلور عالٍ (40.12٪)، واستقرار حراري ملحوظ (حتى 260.24 درجة مئوية)، وخصائص ميكانيكية واعدة (قوة شد 417.50 ميجا باسكال، ومعامل يونغ 17.46 جيجا باسكال). وبالتوازي، تم إجراء تحليل كامل للخصائص الجوهرية للتربة. كما كشفت الدراسة عن التأثير التآزري لتعزيز الألياف وتثبيت الجير في الأداء الميكانيكي لطوب اللبن، باستخدام اختبارات الضغط والانثناء. وأظهرت النتائج تحسناً كبيراً في القوة الميكانيكية مع دمج الألياف والجير، حيث أظهرت التركيبات المحسنة أداءً فائقاً. بشكل عام، سلطت هذه الدراسة الضوء على إمكانية استخدام ألياف "*Bassia indica*" كمادة تقوية مستدامة للبناء البيئي، مما يعزز استخدامها كمورد محلي في تحسين أداء طوب اللبن.

الكلمات المفتاحية: طوب الأرض؛ أدوبي؛ الألياف النباتية؛ عوامل التثبيت؛ العلاج الكيميائي.

Références

- [1] A. Vinod, M. Sanjay, S. Suchart, and P. Jyotishkumar, "Renewable and sustainable biobased materials: An assessment on biofibers, biofilms, biopolymers and biocomposites," *Journal of Cleaner Production*, vol. 258, p. 120978, 2020.
- [2] G. Gedik and O. Avinc, "Hemp fiber as a sustainable raw material source for textile industry: can we use its potential for more eco-friendly production?," *Sustainability in the Textile and Apparel Industries: Sourcing Natural Raw Materials*, pp. 87-109, 2020.
- [3] Planetoscope-Statistiques. "Production mondiale de béton." <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-.html> (accessed).
- [4] C. B. Ayyanar *et al.*, "Development and characterization of Hevea brasiliensis particulates filled polyethylene composites," *Polymer Composites*, vol. 43, no. 4, pp. 2047-2054, 2022.
- [5] R. Gopinath, P. Billigraham, and T. Sathishkumar, "Investigation of physico-chemical, mechanical, and thermal properties of new cellulosic bast fiber extracted from the bark of bauhinia purpurea," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 14, pp. 9624-9641, 2022.
- [6] A. Vinod, R. Vijay, D. L. Singaravelu, M. Sanjay, S. Siengchin, and M. Moure, "Characterization of untreated and alkali treated natural fibers extracted from the stem of Catharanthus roseus," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 8, p. 085406, 2019.
- [7] M. Sanjay and B. Yogesha, "Studies on hybridization effect of jute/kenaf/E-glass woven fabric epoxy composites for potential applications: Effect of laminate stacking sequences," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 47, no. 7, pp. 1830-1848, 2018.
- [8] P. Sentharamaikkannan and M. Kathiresan, "Characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fiber from Coccinia grandis. L," *Carbohydrate Polymers*, vol. 186, pp. 332-343, 2018.
- [9] S. M. Rangappa, S. Siengchin, J. Parameswaranpillai, M. Jawaaid, and T. Ozbakkaloglu, "Lignocellulosic fiber reinforced composites: Progress, performance, properties, applications, and future perspectives," *Polymer Composites*, vol. 43, no. 2, pp. 645-691, 2022.
- [10] T. Singh, B. Gangil, A. Patnaik, D. Biswas, and G. Fekete, "Agriculture waste reinforced corn starch-based biocomposites: Effect of rice husk/walnut shell on physicomechanical, biodegradable and thermal properties," *Materials Research Express*, vol. 6, no. 4, p. 045702, 2019.
- [11] R. Vijay *et al.*, "Characterization of raw and alkali treated new natural cellulosic fibers from Tridax procumbens," *International journal of biological macromolecules*, vol. 125, pp. 99-108, 2019.
- [12] O. Ferfari, A. Belaadi, A. Bedjaoui, H. Alshahrani, and M. K. Khan, "Characterization of a new cellulose fiber extracted from Syagrus Romanzoffiana rachis as a potential reinforcement in biocomposites materials," *Materials Today Communications*, p. 106576, 2023.
- [13] M. Ilangoan, V. Guna, B. Prajwal, Q. Jiang, and N. Reddy, "Extraction and characterisation of natural cellulose fibers from Kigelia africana," *Carbohydrate polymers*, vol. 236, p. 115996, 2020.
- [14] R. Muthalagu, V. Srinivasan, S. Sathees Kumar, and V. M. Krishna, "Extraction and effects of mechanical characterization and thermal attributes of jute, prosopis juliflora bark and kenaf fibers reinforced bio composites used for engineering applications," *Fibers and Polymers*, vol. 22, no. 7, pp. 2018-2026, 2021.
- [15] N. Lemita, S. Deghboudj, M. Rokbi, F. M. L. Rekbi, and R. Halimi, "Characterization and analysis of novel natural cellulosic fiber extracted from Strelitzia reginae plant," *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 1, pp. 99-114, 2022.
- [16] M. Kathirselvam, A. Kumaravel, V. Arthanarieswaran, and S. Saravanakumar, "Characterization of cellulose fibers in Thespesia populnea barks: Influence of alkali treatment," *Carbohydrate polymers*, vol. 217, pp. 178-189, 2019.
- [17] M. Sanjay and S. Siengchin, "Exploring the applicability of natural fibers for the development of biocomposites," *Express Polymer Letters*, vol. 15, no. 3, pp. 193-193, 2021.
- [18] H. Houben and H. Guillaud, "Earth Construction. A comprehensive guide, Earth construction series," ed: London: CraTerre-EAG, Intermediate Technology Publications, 1984.
- [19] G. Minke, *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. De Gruyter, 2006.
- [20] N. Unies, "Protocole de Kyoto la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques," *Kyoto, Japon*, 1998.
- [21] G. Habert and N. Roussel, "Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental?," in *XXVIèmes Rencontres Universitaires de Génie Civil AUGC 2008*, 2008, p. 9p.
- [22] J. Bouchet, B. Siberchicot, F. Jollet, and A. Pasturel, "Equilibrium properties of-Pu: LDA+ U calculations (LDA local density approximation)," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 12, no. 8, p. 1723, 2000.
- [23] D. Gay, *Composite materials: design and applications*. CRC press, 2022.

- [24] M. Le Troedec, "Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres végétales," Limoges, 2009.
- [25] G. Tripathi and D. Srivastava, "Effect of carboxyl-terminated poly (butadiene-co-acrylonitrile)(CTBN) concentration on thermal and mechanical properties of binary blends of diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) epoxy resin," *Materials science and engineering: A*, vol. 443, no. 1-2, pp. 262-269, 2007.
- [26] L. Merad, "Etude par Spectroscopie Raman et modélisation d'une résine composite RTM," Université de Metz, 2010.
- [27] M. C. J. Delgado and I. C. Guerrero, "The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review," *Construction and building materials*, vol. 21, no. 2, pp. 237-251, 2007.
- [28] F. Bultel, "Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels," *THESE DE DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, SPECIALITE: GEOTECHNIQUE*, 2001.
- [29] H. Houben and H. Guillaud, *Earth construction primer*. Craterre, 1984.
- [30] M. Dewulf, *Le torchis, mode d'emploi: Connaître la terre crue-Interpréter les désordres-Organiser le chantier-Restaurer et protéger le torchis*. Editions Eyrolles, 2015.
- [31] U. Röhlen and C. Ziegert, *Construire en terre crue: construction, rénovation, finitions*. Editions Le Moniteur, 2013.
- [32] AsTerre. "La terre, un matériau de construction." <https://www.asterre.org/> (accessed).
- [33] K. Dao, M. Ouedraogo, Y. Millogo, J.-E. Aubert, and M. Gomina, "Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement," *Construction and Building Materials*, vol. 158, pp. 84-96, 2018.
- [34] M. Hall and D. Allinson, "Analysis of the hygrothermal functional properties of stabilised rammed earth materials," *Building and Environment*, vol. 44, no. 9, pp. 1935-1942, 2009.
- [35] P. M. Touré, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, and D. Azilinson, "Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB)," *Journal of Building Engineering*, vol. 13, pp. 266-271, 2017.
- [36] L. Zhang, L. Yang, B. P. Jelle, Y. Wang, and A. Gustavsen, "Hygrothermal properties of compressed earthen bricks," *Construction and Building Materials*, vol. 162, pp. 576-583, 2018.
- [37] S. Goodhew and R. Griffiths, "Sustainable earth walls to meet the building regulations," *Energy and Buildings*, vol. 37, no. 5, pp. 451-459, 2005.
- [38] L. Keefe, *Earth building: methods and materials, repair and conservation*. Routledge, 2012.
- [39] B. Minke, "The history of the prolonged depolarizing afterpotential (PDA) and its role in genetic dissection of Drosophila phototransduction," *Journal of neurogenetics*, vol. 26, no. 2, pp. 106-117, 2012.
- [40] M. Hassani and V. Laureau, "La filière terre crue contemporaine," ed, 2018.
- [41] H. Schroeder, "The new DIN standards in earth building—the current situation in Germany," *J. Civ. Eng. Archit*, vol. 12, pp. 113-120, 2018.
- [42] D. Baize, "Guide des analyses en pédologie," 2018.
- [43] Ş. Yetgin, Ö. Çavdar, and A. Çavdar, "The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes," *Construction and Building Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 222-227, 2008.
- [44] B. B. Velde and A. Meunier, *The origin of clay minerals in soils and weathered rocks*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [45] R. E. Grim, "Applied clay mineralogy," *Geologiska Föreningen i Stockholm Förhandlingar*, vol. 84, no. 4, pp. 533-533, 1962.
- [46] G. Brindley and G. Brown, "Crystal Structure of Clay Minerals and their X-ray Identification mineralogical Society, London," *Kaolinite Science*, vol. 143, pp. 244-246, 1980.
- [47] R. Grim, "Clay mineralogy McGraw Hill Book Company," *JOUR GEOL SOC INDIA*, vol. 66, pp. 179-1, 2005.
- [48] F. Salles, "Hydratation des argiles gonflantes," *Laboratoire de modélisation des transferts dans l'environnement*, 2006.
- [49] Y. Chatelin, *Les sols ferrallitiques: Historique, développement des connaissances et formations des concepts actuels*. ORSTOM, 1972.
- [50] M. R. Boudchicha, "Etude de la cristallisation et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques préparés à partir de kaolin-dolomite," UB1, 2010.
- [51] S. Caillère, S. Hénin, and M. Rautureau, *Structure et propriétés physico-chimiques*. Masson, 1982.
- [52] D. MacEwan and A. Ruiz-Amil, "Interstratified Clay Minerals: in Soil Components 2, JE Gieseking, ed," ed: Springer-Verlag, New York, 1975.
- [53] D. K. Gesellschaft, *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft*. Die Gesellschaft, 1922.
- [54] M. Raimondo, M. Cocchi, G. Dircetti, M. Dondi, A. Ulrici, and P. Zannini, "Plasticity of brick clays: comparison of several empirical tests and correlation with mineralogical composition and particle size distribution," *2001. A Clay Odyssey*, vol. 1, p. 301, 2003.

- [55] I. K. Oikonomopoulos, M. Perraki, N. Tougiannidis, T. Perraki, H. U. Kasper, and M. Gurk, "Clays from Neogene Achlada lignite deposits in Florina basin (Western Macedonia, N. Greece): A prospective resource for the ceramics industry," *Applied Clay Science*, vol. 103, pp. 1-9, 2015.
- [56] M. Thiry, N. Carrillo, C. Franke, and N. Martineau, "Technique de préparation des minéraux argileux en vue de l'analyse par diffraction des Rayons X et introduction à l'interprétation des diagrammes," 2013.
- [57] C. Manoharan, P. Sutharsan, S. Dhanapandian, and R. Venkatachalapathy, "Characteristics of some clay materials from Tamilnadu, India, and their possible ceramic uses," *Cerâmica*, vol. 58, pp. 412-418, 2012.
- [58] A. Bennour *et al.*, "Identification and traditional ceramic application of clays from the Chouamekh region in south-eastern Tunisia," *Applied Clay Science*, vol. 118, pp. 212-220, 2015.
- [59] P. Aparicio and E. Galán, "Mineralogical interference on kaolinite crystallinity index measurements," *Clays and Clay minerals*, vol. 47, no. 1, pp. 12-27, 1999.
- [60] M. Mestdagh, L. Vielvoye, and A. Herbillon, "Iron in kaolinite: II. The relationship between kaolinite crystallinity and iron content," *Clay Minerals*, vol. 15, no. 1, pp. 1-13, 1980.
- [61] T. Delineau, T. Allard, J.-P. Muller, O. Barres, J. Yvon, and J.-M. Cases, "FTIR reflectance vs. EPR studies of structural iron in kaolinites," *Clays and clay minerals*, vol. 42, no. 3, pp. 308-320, 1994.
- [62] A. Scheinost, A. Chavernas, V. Barrón, and J. Torrent, "Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soils," *Clays and Clay Minerals*, vol. 46, no. 5, pp. 528-536, 1998.
- [63] M. Abbou, A. Semcha, and F. Kazi-Aoual, "Stabilization of compressed earth block clayey materials from Adrar (Algeria) by lime and crushed sand," *Journal of building materials and structures*, vol. 7, no. 1, pp. 42-50, 2020.
- [64] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, "Performance of compacted cement-stabilised soil," *Cement and concrete composites*, vol. 26, no. 7, pp. 811-820, 2004.
- [65] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche, and R. Chebili, "Durability of lime stabilized earth blocks," 2002.
- [66] A. P'Kla, "Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): application aux maçonneries" BTC-Mortier de terre"| Theses. fr," Lyon, INSA, 2002.
- [67] N. N. MFOUTOU, N. MALANDA, K. B. MANIOUGUI, C. A. C. MALANDA, E. E. N. MADILA, and P. L. KIMBEMBE, "Caractérisation du sol de Nkayi, République du Congo," *Sciences Appliquées et de l'Ingénieur*, vol. 5, no. 1, pp. 113-121, 2023.
- [68] O. Izemmourena and A. Guettala, "Amélioration de la durabilité des briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra," in *MATEC Web of Conferences*, 2014, vol. 11: EDP Sciences, p. 02001.
- [69] J.-M. Gresillon, "ETUDE DE L'APTITUDE DES SOLS A LA STABILISATION AU CIMENT, APPLICATION A LA CONSTRUCTION," *ANN ITBTP*, no. 361 (MATER/54), 1978.
- [70] N. Cabane, "Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: Contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation," Université Jean Monnet-Saint-Etienne, 2004.
- [71] H. Gheddache, "Stabilisation des sols a la chaux et a chaud," Université Mouloud Mammeri TiziOuzou, 2012.
- [72] C. Richard, "Stabilisation thermique des infrastructures routières construites sur pergélisol sensible au dégel à l'aide de surface à albédo élevé," 2018.
- [73] M. Abtahi, N. Okhovat, and M. Hejazi, "Using textile fibers as soil stabilizers–new achievements," in *1st Int and 7th nat conf text eng, Rasht, Iran*, 2009.
- [74] A. Azeem and A. Ati, "Erosion and control techniques for slopes of banks and cuttings," in *Ind geotech conf, Calcutta*, 1992.
- [75] S. Ismail and Z. Yaacob, "Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibres," *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 33-43, 2011.
- [76] U. Ravishankar and S. Raghavan, "Coir stabilised lateritic soil for pavements," in *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference, Ahmedabad, India*, 2004, pp. 45-52.
- [77] Y. Millogo, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, and K. Ghavami, "Experimental analysis of Pressed Adobe Blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 52, pp. 71-78, 2014.
- [78] R. D. Tolêdo Filho, K. Scrivener, G. L. England, and K. Ghavami, "Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites," *Cement and concrete composites*, vol. 22, no. 2, pp. 127-143, 2000.
- [79] K. Ghavami, R. D. Toledo Filho, and N. P. Barbosa, "Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres," *Cement and concrete composites*, vol. 21, no. 1, pp. 39-48, 1999.
- [80] R. Abdeldjebar, A. Hamouine, F. Fouchal, B. Labbaci, and A. Zebair, "Effects of treated date palm fiber on durability of stabilized earth blocks (Seb)," *Int J Civ Eng Technol*, vol. 9, no. 5, pp. 293-305, 2018.
- [81] B. Taallah and A. Guettala, "The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 104, pp. 52-62, 2016.

- [82] M. Islam, K. Iwashita, and M. Rahman, "Performance of natural fiber reinforced soil in earthen houses," in *Proceedings of the sixth Asian young geotechnical engineers conference, Bangalore, India, Paper No. CP*, 2008, vol. 22.
- [83] M. A. Saleem, S. Abbas, and M. Haider, "Jute fiber reinforced compressed earth bricks (FR-CEB)—a sustainable solution," *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016.
- [84] S. Selsiadevi, S. Selescadevi, and V. Varshini, "Earth building blocks reinforced with jute and banana fiber," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 6, pp. 1-4, 2018.
- [85] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, and J. Williams, "Effect of fibre aspect ratio on mechanical properties of soil building blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 83, pp. 314-319, 2015.
- [86] S. Raj, S. Mohammad, R. Das, and S. Saha, "Coconut fibre-reinforced cement-stabilized rammed earth blocks," *World Journal of Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 208-216, 2017.
- [87] M. Shah, H. Patolia, and K. Brahmabhatt, "Vibration analysis of natural fiber composite beam under various end conditions," *differential equations*, vol. 18, p. 19, 2018.
- [88] A. Jesudass, V. Gayathri, R. Geethan, M. Gobirajan, and M. Venkatesh, "Earthen blocks with natural fibres-A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 6979-6986, 2021.
- [89] M. Mostafa and N. Uddin, "Effect of banana fibers on the compressive and flexural strength of compressed earth blocks," *Buildings*, vol. 5, no. 1, pp. 282-296, 2015.
- [90] M. M. Salih, A. I. Osofero, and M. S. Imbabi, "Constitutive models for fibre reinforced soil bricks," *Construction and building materials*, vol. 240, p. 117806, 2020.
- [91] N. KEBAILI and K. YOUCEF, "Attitudes toward earthen architecture: the case of compressed and stabilized earth block architecture in Auroville, India," *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 226, pp. 761-772, 2017.
- [92] B. A. Lejano and K. S. D. Pineda, "Investigation of the effects of different natural fibers on the strength of Compressed Stabilized Earth Blocks (Cseb)," *GEOMATE Journal*, vol. 14, no. 42, pp. 37-43, 2018.
- [93] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, and A. Kriker, "Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers," *Construction and Building Materials*, vol. 59, pp. 161-168, 2014.
- [94] C.-L. Hwang, M. D. Yehualaw, and T.-P. Huynh, "Development of compressed stabilized earth block as an eco-friendly and sustainable wall making material," *Int J Struct Civ Eng Res*, vol. 7, pp. 233-237, 2018.
- [95] K. Q. Tran, T. Satomi, and H. Takahashi, "Effect of waste cornsilk fiber reinforcement on mechanical properties of soft soils," *Transportation Geotechnics*, vol. 16, pp. 76-84, 2018.
- [96] B. Ugwuishiwu, B. Mama, and N. Okoye, "Effects of natural fiber reinforcement on water absorption of compressed stabilized earth blocks," *IJSR Int. J. Sci. Res*, vol. 2, pp. 165-167, 2013.
- [97] H. Danso, D. B. Martinson, M. Ali, and J. B. Williams, "Physical, mechanical and durability properties of soil building blocks reinforced with natural fibres," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 797-809, 2015.
- [98] M. A. Zardari, "Structural behaviour of large size compressed earth blocks stabilized with jute fiber," *Journal of Engineering Research*, vol. 8, no. 2, 2020.
- [99] J. Renard, "Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère," ed: Hermes, 2005.
- [100] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy and Buildings*, vol. 81, pp. 98-104, 2014.
- [101] H. Houben and H. Guillaud, "Earth construction: a comprehensive guide," 1994.
- [102] A. Estabragh, A. Bordbar, and A. Javadi, "Mechanical behavior of a clay soil reinforced with nylon fibers," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 29, pp. 899-908, 2011.
- [103] N. C. Navin Chand and P. Rohatgi, "Natural fibres and their composites," 1994.
- [104] A. Ashori, "Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!," *Bioresource technology*, vol. 99, no. 11, pp. 4661-4667, 2008.
- [105] E. F. Tendero, "Origines biologiques et environnementales de la variabilité de la qualité des fibres de chanvre (*Cannabis sativa* L.) à destination d'agromatériaux," Université de Lille 1, 2013.
- [106] A. Mohanty, M. a. Misra, and G. Hinrichsen, "Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview," *Macromolecular materials and Engineering*, vol. 276, no. 1, pp. 1-24, 2000.
- [107] C. Scarponi, C. Pizzinelli, S. Sánchez-Sáez, and E. Barbero, "Impact load behaviour of resin transfer moulding (RTM) hemp fibre composite laminates," *Journal of biobased materials and bioenergy*, vol. 3, no. 3, pp. 298-310, 2009.
- [108] C. E. Okafor, L. C. Kebodi, C. C. Ihueze, S. M. Rangappa, S. Siengchin, and U. C. Okonkwo, "Development of Dioscorea alata stem fibers as eco-friendly reinforcement for composite materials," *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 2022.
- [109] K. R. Hakeem, M. Jawaid, and U. Rashid, "Biomass and bioenergy," *Suiza: Springer*, 2014.

- [110] S. Ez-Zahraoui, F.-Z. S. A. Hassani, M. El Achaby, and R. Bouhfid, "Natural fiber reinforcements: classification, extraction, treatment, and properties," in *Multiscale textile preforms and structures for natural fiber composites*: Elsevier, 2023, pp. 3-29.
- [111] K. Charlet, C. Morvan, J. Bréard, J. Jernot, and M. Gomina, "Etude morphologique d'un composite naturel. La fibre de lin," *Revue des composites et des matériaux avancés*, vol. 16, no. 1, p. 11, 2006.
- [112] T. Gorshkova *et al.*, "Specific type of secondary cell wall formed by plant fibers," *Russian Journal of Plant Physiology*, vol. 57, pp. 328-341, 2010.
- [113] D. U. Shah, "Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 62, pp. 21-31, 2014.
- [114] A. Bourmaud, J. Beaugrand, D. U. Shah, V. Placet, and C. Baley, "Towards the design of high-performance plant fibre composites," *Progress in Materials Science*, vol. 97, pp. 347-408, 2018.
- [115] D. D. Stokke, Q. Wu, and G. Han, *Introduction to wood and natural fiber composites*. John Wiley & Sons, 2013.
- [116] F. M. Al-Oqla and S. Sapuan, *Materials selection for natural fiber composites*. Woodhead Publishing, 2017.
- [117] B. Sharma, L. Naresh, N. Dhuldhoya, S. Merchant, and U. Merchant, "An overview on pectins," *Times Food Processing Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 44-51, 2006.
- [118] L. Yahiaoui, "Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss)," 2018.
- [119] S. Sathish *et al.*, "A review of natural fiber composites: Extraction methods, chemical treatments and applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, pp. 8017-8023, 2021.
- [120] N. Kengkhetkit and T. Amornsakchai, "Utilisation of pineapple leaf waste for plastic reinforcement: 1. A novel extraction method for short pineapple leaf fiber," *Industrial Crops and Products*, vol. 40, pp. 55-61, 2012.
- [121] R. Tokoro, D. M. Vu, K. Okubo, T. Tanaka, T. Fujii, and T. Fujiura, "How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers," *Journal of materials science*, vol. 43, pp. 775-787, 2008.
- [122] S. Banik, D. Nag, and S. Debnath, "Utilization of pineapple leaf agro-waste for extraction of fibre and the residual biomass for vermicomposting," 2011.
- [123] P. Jagadeesh, M. Puttegowda, S. Mavinkere Rangappa, and S. Siengchin, "A review on extraction, chemical treatment, characterization of natural fibers and its composites for potential applications," *Polymer Composites*, vol. 42, no. 12, pp. 6239-6264, 2021.
- [124] S. B. Brahim and R. B. Cheikh, "Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite," *Composites science and technology*, vol. 67, no. 1, pp. 140-147, 2007.
- [125] G. Henriksson *et al.*, "Identification and retting efficiencies of fungi isolated from dew-retted flax in the United States and Europe," *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 63, no. 10, pp. 3950-3956, 1997.
- [126] G. R. Nair, J. Kurian, V. Yaylayan, D. Rho, D. Lyew, and G. Raghavan, "Microwave-assisted retting and optimization of the process through chemical composition analysis of the matrix," *Industrial Crops and Products*, vol. 52, pp. 85-94, 2014.
- [127] C. Lounis and F. Aissa, "Elaboration et Caractérisation d'un composite Biodégradables à base de Polymère-Cellulose," Université Mouloud Mammeri Tiziouzu, 2023.
- [128] T. Väisänen, A. Haapala, R. Lappalainen, and L. Tomppo, "Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review," *Waste management*, vol. 54, pp. 62-73, 2016.
- [129] G. Almeida, "Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico-mécaniques à des teneurs en humidité élevées," 2006.
- [130] F. Ahmad, H. S. Choi, and M. K. Park, "A review: natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight, and economic properties," *Macromolecular materials and engineering*, vol. 300, no. 1, pp. 10-24, 2015.
- [131] P. Rousset, "Modification des constituants du bois sous l'effet de la chaleur et conséquences sur les propriétés," 1997.
- [132] Y. DJEBLOUN, "Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales," UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 2018.
- [133] O. Faruk, A. K. Bledzki, H.-P. Fink, and M. Sain, "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010," *Progress in polymer science*, vol. 37, no. 11, pp. 1552-1596, 2012.
- [134] M. Kabir, H. Wang, K. Lau, and F. Cardona, "Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview," *Composites Part B: Engineering*, vol. 43, no. 7, pp. 2883-2892, 2012.

- [135] M. Asim, M. Jawaïd, K. Abdan, and M. R. Ishak, "Effect of alkali and silane treatments on mechanical and fibre-matrix bond strength of kenaf and pineapple leaf fibres," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 426-435, 2016.
- [136] A. Balaji and K. Nagarajan, "Characterization of alkali treated and untreated new cellulosic fiber from Saharan aloe vera cactus leaves," *Carbohydrate Polymers*, vol. 174, pp. 200-208, 2017.
- [137] P. Krishnaiah, C. T. Ratnam, and S. Manickam, "Enhancements in crystallinity, thermal stability, tensile modulus and strength of sisal fibres and their PP composites induced by the synergistic effects of alkali and high intensity ultrasound (HIU) treatments," *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 34, pp. 729-742, 2017.
- [138] O. Levasseur, "Étude de la dynamique de croissance de revêtements nanostructurés multifonctionnels sur le bois par plasmas froids à la pression atmosphérique," 2017.
- [139] J. Gassan and V. S. Gutowski, "Effects of corona discharge and UV treatment on the properties of jute-fibre epoxy composites," *Composites science and technology*, vol. 60, no. 15, pp. 2857-2863, 2000.
- [140] N. Graupner, K. Albrecht, D. Hegemann, and J. Müssig, "Plasma modification of man-made cellulose fibers (Lyocell) for improved fiber/matrix adhesion in poly (lactic acid) composites," *Journal of applied polymer science*, vol. 128, no. 6, pp. 4378-4386, 2013.
- [141] M. Ragoubi, D. Bienaimé, S. Molina, B. George, and A. Merlin, "Impact of corona treated hemp fibres onto mechanical properties of polypropylene composites made thereof," *Industrial Crops and Products*, vol. 31, no. 2, pp. 344-349, 2010.
- [142] F.-L. a. H. E. Observatory. "Flax area under cultivation is setting a new record in 2024." <https://allianceflaxlinenhemp.eu/en/flax-linen-hemp-economic-observatory> (accessed).
- [143] M. Dallel, "Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (*Stipa Tenacissima* L.): Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil," Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2012.
- [144] A. Kriker, G. Debicki, A. Bali, M. Khenfer, and M. Chabannet, "Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate," *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, no. 5, pp. 554-564, 2005.
- [145] M. Izard. "Le tour des fibres textiles : les fibres végétales." <https://www.maisonizard.com/blogs/journal/fibres-textiles-vegetales> (accessed).
- [146] J. Vargas, J. Bariola, M. Blondet, and P. Mehta, "Seismic strength of adobe masonry," *Materials and Structures*, vol. 19, pp. 253-258, 1986.
- [147] R. Stulz and K. Mukerji, "Appropriate building materials: a catalogue of potential solutions," (*No Title*), 1988.
- [148] S. Namango, "Development of cost-effective earthen building material for housing wall construction," BTU Cottbus-Senftenberg, 2006.
- [149] R. A. Horn, T. H. Wegner, and D. E. Kugler, "Newsprint from blends of kenaf CTMP and deinked recycled newsprint," *Tappi journal*, vol. 75, no. 12, pp. 69-72, 1992.
- [150] J. Khedari, P. Watsanasathaporn, and J. Hirunlabh, "Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity," *Cement and concrete composites*, vol. 27, no. 1, pp. 111-116, 2005.
- [151] G. Minke, "Construction manual for earthquake-resistant houses built of earth," *Eschborn: Gate-Basin*, 2001.
- [152] M. C. N. Villamizar, V. S. Araque, C. A. R. Reyes, and R. S. Silva, "Effect of the addition of coal-ash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks," *Construction and Building Materials*, vol. 36, pp. 276-286, 2012.
- [153] V. Rigassi, "Compressed earth blocks: manual of production," *Network. GATE/BASIN*, 1985.
- [154] M. Olivier and Z. El Gharbi, "Sisal fibre reinforced soil block masonry," in *4th International Masonry Conference, The British Masonry Society, London, UK*, 1995, pp. 26-28.
- [155] A. Mesbah, J. Morel, P. Walker, and K. Ghavami, "Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers," *Journal of materials in Civil Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 95-98, 2004.
- [156] R. M. Eko and G. Riskowski, "A procedure for processing mixtures of soil, cement, and sugar cane bagasse," 2001.
- [157] A. Othman, Y. Amen, and K. Shimizu, "A novel acylated flavonol tetraglycoside and rare oleanane saponins with a unique acetal-linked dicarboxylic acid substituent from the xero-halophyte *Bassia indica*," *Fitoterapia*, vol. 152, p. 104907, 2021.
- [158] S. Qari, E. Tawfik, and I. Hammad, "Morphological, cytological, physiological and genetic studies of *Bassia indica* (Amaranthaceae)," *Gene Conserve*, vol. 18, no. 73, 2019.
- [159] L. Y. Mwaikambo and M. P. Ansell, "Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. I. hemp fibres," *Journal of materials science*, vol. 41, pp. 2483-2496, 2006.

- [160] J. Zhang, H. Henriksson, I. J. Szabo, G. Henriksson, and G. Johansson, "The active component in the flax-retting system of the zygomycete *Rhizopus oryzae* sb is a family 28 polygalacturonase," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 32, no. 10, p. 431, 2005.
- [161] A. A. M. Moshi, D. Ravindran, S. S. Bharathi, S. Indran, S. Saravanakumar, and Y. Liu, "Characterization of a new cellulosic natural fiber extracted from the root of *Ficus religiosa* tree," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 142, pp. 212-221, 2020.
- [162] T. Yashas Gowda, A. Vinod, P. Madhu, M. Sanjay, S. Siengchin, and M. Jawaid, "Areca/Synthetic fibers reinforced based epoxy hybrid composites for semi-structural applications," *Polymer Composites*, vol. 43, no. 8, pp. 5222-5234, 2022.
- [163] Y. Ran, M. Elsayed, M. Eraky, W. Dianlong, and P. Ai, "Sequential production of biomethane and bioethanol through the whole biorefining of rice straw: Analysis of structural properties and mass balance," *Biomass Conversion and Biorefinery*, pp. 1-13, 2022.
- [164] G. A. Jotiram *et al.*, "Investigating mechanical strength of a natural fibre polymer composite using SiO₂ nano-filler," *Materials Today: Proceedings*, vol. 56, pp. 1522-1526, 2022.
- [165] P. Madhu, M. Sanjay, P. Senthamaraiannan, S. Pradeep, S. Saravanakumar, and B. Yogesha, "A review on synthesis and characterization of commercially available natural fibers: Part II," *Journal of Natural Fibers*, vol. 16, no. 1, pp. 25-36, 2019.
- [166] S. K. Paswan *et al.*, "Optimization of structure-property relationships in nickel ferrite nanoparticles annealed at different temperature," *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, vol. 151, p. 109928, 2021.
- [167] L. Segal, J. J. Creely, A. Martin Jr, and C. Conrad, "An empirical method for estimating the degree of crystallinity of native cellulose using the X-ray diffractometer," *Textile research journal*, vol. 29, no. 10, pp. 786-794, 1959.
- [168] J. Ma, G. Yang, J. Mao, and F. Xu, "Characterization of anatomy, ultrastructure and lignin microdistribution in *Forsythia suspensa*," *Industrial Crops and Products*, vol. 33, no. 2, pp. 358-363, 2011.
- [169] H. Danso, "Use of agricultural waste fibres as enhancement of soil blocks for low-cost housing in Ghana," University of Portsmouth, School of Civil Engineering and Surveying, 2016.
- [170] A. Raouf KHALDOUNE and M. Rokbi, "Extraction and characterization of novel natural fiber from *Centaurea melitensis* plant," *Journal of Composite Materials*, vol. 57, no. 5, pp. 913-928, 2023.
- [171] V. Arthanarieswaran, A. Kumaravel, and S. Saravanakumar, "Characterization of new natural cellulosic fiber from *Acacia leucophloea* bark," *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 20, no. 4, pp. 367-376, 2015.
- [172] R. Sarala, "Characterization of a new natural cellulosic fiber extracted from *Derris scandens* stem," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 165, pp. 2303-2313, 2020.
- [173] J. Binoj, R. E. Raj, V. Sreenivasan, and G. R. Thusnavis, "Morphological, physical, mechanical, chemical and thermal characterization of sustainable Indian Areca fruit husk fibers (*Areca Catechu* L.) as potential alternate for hazardous synthetic fibers," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 156-165, 2016.
- [174] P. Manimaran, S. Saravanan, M. Sanjay, S. Siengchin, M. Jawaid, and A. Khan, "Characterization of new cellulosic fiber: *Dracaena reflexa* as a reinforcement for polymer composite structures," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 1952-1963, 2019.
- [175] S. Indran and R. E. Raj, "Characterization of new natural cellulosic fiber from *Cissus quadrangularis* stem," *Carbohydrate polymers*, vol. 117, pp. 392-399, 2015.
- [176] P. Manimaran, S. Saravanan, M. Sanjay, M. Jawaid, S. Siengchin, and V. Fiore, "New lignocellulosic *aristida adscensionis* fibers as novel reinforcement for composite materials: extraction, characterization and weibull distribution analysis," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, pp. 803-811, 2020.
- [177] A. B. A. Sukmana, I. Widyaningrum, R. K. Lani, and S. Kasmiyati, "Characterization of *Ficus benjamina* and *Artocarpus heterophyllus* proteases as potential rennet alternatives," *Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education*, vol. 12, no. 2, pp. 213-219, 2020.
- [178] P. Baskaran, M. Kathiresan, P. Senthamaraiannan, and S. Saravanakumar, "Characterization of new natural cellulosic fiber from the bark of *dichrostachys cinerea*," *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, no. 1, pp. 62-68, 2018.
- [179] M. Prithiviraj, R. Muralikannan, P. Senthamaraiannan, and S. Saravanakumar, "Characterization of new natural cellulosic fiber from the *Perotis indica* plant," *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, vol. 21, no. 8, pp. 669-674, 2016.
- [180] M. Selvaraj, P. N, R. PT, and B. Mysamy, "Extraction and Characterization of a New Natural Cellulosic Fiber from Bark of *Ficus Carica* Plant as Potential Reinforcement for Polymer Composites," *Journal of Natural Fibers*, vol. 20, no. 2, p. 2194699, 2023.
- [181] G. Gedik, "Extraction of new natural cellulosic fiber from *Trachelospermum jasminoides* (star jasmine) and its characterization for textile and composite uses," *Cellulose*, vol. 28, pp. 6899-6915, 2021.

- [182] M. Maheshwaran, N. R. J. Hyness, P. Sentharamaikannan, S. Saravanakumar, and M. Sanjay, "Characterization of natural cellulosic fiber from *Epipremnum aureum* stem," *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, no. 6, pp. 789-798, 2018.
- [183] M. Maran *et al.*, "Suitability evaluation of *Sida mysorensis* plant fiber as reinforcement in polymer composite," *Journal of Natural Fibers*, vol. 19, no. 5, pp. 1659-1669, 2022.
- [184] N. Sakji *et al.*, "Physico-chemical characteristics of a seed fiber arised from *Pergularia Tomentosa* L," *Fibers and Polymers*, vol. 17, pp. 2095-2104, 2016.
- [185] D. Ravindran, S. B. SR, S. Padma, S. Indran, and D. Divya, "Characterization of natural cellulosic fiber extracted from *Grewia damine* flowering plant's stem," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 164, pp. 1246-1255, 2020.
- [186] S. Amroune *et al.*, "Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (*Phoenix dactylifera* L.)," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 71, pp. 95-106, 2015.
- [187] J. Ahmed, M. Balaji, S. Saravanakumar, and P. Sentharamaikannan, "A comprehensive physical, chemical and morphological characterization of novel cellulosic fiber extracted from the stem of *Elettaria cardamomum* plant," *Journal of Natural Fibers*, vol. 18, no. 10, pp. 1460-1471, 2021.
- [188] N. Saravanan, P. Sampath, T. Sukantha, and T. Natarajan, "Extraction and characterization of new cellulose fiber from the Agrowaste of *Lagenaria Siceraria* (Bottle Guard) plant," *Journal of Advances in chemistry*, vol. 12, no. 9, pp. 4382-4388, 2016.
- [189] R. Kumar, N. R. J. Hynes, P. Sentharamaikannan, S. Saravanakumar, and M. Sanjay, "Physicochemical and thermal properties of ceiba pentandra bark fiber," *Journal of Natural Fibers*, vol. 15, no. 6, pp. 822-829, 2018.
- [190] Z. Belouadah, A. Ati, and M. Rokbi, "Characterization of new natural cellulosic fiber from *Lygeum spartum* L," *Carbohydrate polymers*, vol. 134, pp. 429-437, 2015.
- [191] F. Laifa, M. Rokbi, S. Amroune, M. Zaoui, and Y. Seki, "Investigation of mechanical, physicochemical, and thermal properties of new fiber from *Silybum marianum* bark fiber," *Journal of Composite Materials*, vol. 56, no. 14, pp. 2227-2238, 2022.
- [192] V. Fiore, T. Scalici, and A. Valenza, "Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L. as potential reinforcement of polymer composites," *Carbohydrate polymers*, vol. 106, pp. 77-83, 2014.
- [193] A. Jabbar, J. Militký, J. Wiener, M. U. Javaid, and S. Rwawiire, "Tensile, surface and thermal characterization of jute fibres after novel treatments," *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, vol. 41, no. 3, pp. 249-254, 2016.
- [194] R. Kumar, A. Meena, A. Chopra, and A. Kumar, "Keratin gene expression differences in wool follicles and sequence diversity of high glycine-tyrosine keratin-associated proteins (kaps) in magra sheep of India," *Journal of Natural Fibers*, vol. 17, no. 9, pp. 1257-1263, 2018.
- [195] T. A. Tamanna, S. A. Belal, M. A. H. Shibly, and A. N. Khan, "Characterization of a new natural fiber extracted from *Corypha taliera* fruit," *Scientific reports*, vol. 11, no. 1, p. 7622, 2021.
- [196] S. Chakravarthy, S. Madhu, J. S. N. Raju, and J. S. Md, "Characterization of novel natural cellulosic fiber extracted from the stem of *Cissus vitiginea* plant," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 161, pp. 1358-1370, 2020.
- [197] A. K. Bhunia, D. Mondal, K. R. Sahu, and A. K. Mondal, "Characterization of new natural cellulosic fibers from *Cyperus compactus* Retz.(Cyperaceae) Plant," *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, vol. 5, p. 100286, 2023.
- [198] P. Manimaran *et al.*, "Extraction and characterization of natural lignocellulosic fibres from *Typha angustata* grass," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 222, pp. 1840-1851, 2022.
- [199] M. Sarikanat, Y. Seki, K. Sever, and C. Durmuşkahya, "Determination of properties of *Althaea officinalis* L.(Marshmallow) fibres as a potential plant fibre in polymeric composite materials," *Composites Part B: Engineering*, vol. 57, pp. 180-186, 2014.
- [200] R. Dalmis, S. Köktaş, Y. Seki, and A. Ç. Kılınç, "Characterization of a new natural cellulose based fiber from *Hierochloe Odarata*," *Cellulose*, vol. 27, pp. 127-139, 2020.
- [201] M. Maache, A. Bezazi, S. Amroune, F. Scarpa, and A. Dufresne, "Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Juncus effusus* L," *Carbohydrate polymers*, vol. 171, pp. 163-172, 2017.
- [202] J. P. V. Diaz, F. de Andrade Silva, and J. R. M. d'Almeida, "Effect of peach palm fiber microstructure on its tensile behavior," *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 10140-10157, 2016.
- [203] P. Manimaran, P. Sentharamaikannan, M. Sanjay, M. Marichelvam, and M. Jawaidd, "Study on characterization of *Furcraea foetida* new natural fiber as composite reinforcement for lightweight applications," *Carbohydrate polymers*, vol. 181, pp. 650-658, 2018.