

Année : 2020



Thèse N° : 193/ST2I

جامعة محمد الخامس بالرباط  
Université Mohammed V de Rabat

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes  
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

## THÈSE DE DOCTORAT

# CONTRIBUTION A LA MODELISATION NUMERIQUE ET THEORIQUE DES PROPRIETES THERMIQUES ET MECANIQUES DU COMPOSITE TERRE PAILLE

Présentée par  
**Fatima-Ezzahra EL MABCHOUR**  
Le 01/12/2020

**Formation doctorale :** Sciences de l'Ingénieur - Génie Énergétique

**Structure de recherche :** Laboratoire de Mécanique Appliquée et Technologies (LAMAT), Équipe Procédés et Contrôles Mécaniques et Thermiques (PCMT)

### JURY

<b>Professeur Khalid EL BIKRI</b> PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	<b>Président</b>
<b>Professeur Mourad TAHA-JANAN</b> PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	<b>Directeur de thèse</b>
<b>Professeur Khalid EL HARROUNI</b> PES, École Nationale d'Architecture de Rabat	<b>Rapporteur</b>
<b>Professeur Moha CHERKAOUI</b> PES, École Nationale Supérieure des Mines de Rabat	<b>Rapporteur</b>
<b>Professeur Abedelouahhab SALIH</b> PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	<b>Rapporteur</b>
<b>Professeur Rajaa NECHAD</b> PES, EMI, Université Mohammed V de Rabat	<b>Examineur</b>
<b>Professeur Hamid ABOUCHADI</b> PESA, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	<b>Invité</b>
<b>Professeur Mohamed Zeriab ES-SADEK</b> PESA, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	<b>Invité</b>



## DÉDICACE

*À mon très cher père, que Dieu ait son âme dans son vaste paradis.*

*À ma très chère mère pour l'amour, la tendresse et pour les efforts qu'elle a consentis pour moi durant tous ces années.*

*À mon agréable mari pour l'amour et le soutien que j'ai toujours reçu de sa part.*

*À ma chère tante et mes chères sœurs, pour leur affection, leur soutien et leurs encouragements*

*À mes précieux beaux Parent*

*À mes merveilleuses princesses : Assia et Hiba*

*À toute ma famille*

*À tous mes professeurs*

*À tous mes ami(e)s*

*Je vous dédie en signe de reconnaissance et de considération cet humble travail.*

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je débute ce mémoire par remercier Dieu de m'avoir entouré de toutes les personnes, qui par leur soutien et leurs encouragements, ont contribué à l'aboutissement de cette thèse de doctorat.

Je remercie Monsieur EL Bikri Khalid, directeur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers UM5-Rabat, pour avoir présidé le jury de ma thèse.

Je remercie chaleureusement Monsieur CHERKAOUI Moha, professeur à l'École Nationale Supérieure des Mines de Rabat (ENSMR), Monsieur EL HARROUNI Khalid, professeur à l'École Nationale d'Architecture de Rabat (ENA) et Monsieur SALIH Abdelouahhab, professeur à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers UM5 Rabat, pour avoir accepté d'être rapporteurs, pour leur investissement dans l'évaluation du mémoire et pour m'avoir permis de défendre ma thèse oralement. Je remercie aussi Madame Rajaa NECHAD, professeur ayant examiné mon travail. Leurs contributions, critiques et suggestions constructives ont permis d'alimenter la soutenance et d'ouvrir de nouvelles perspectives. J'en suis honorée.

Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance envers mon encadrant de thèse, professeur Mourad TAHA-JANAN. Je vous remercie, monsieur, d'avoir cru en moi, d'avoir accepté de diriger ce travail en me faisant bénéficier de votre expertise et de vos connaissances. Je vous remercie également pour tous nos partages fructueux et agréables, pour votre soutien et enthousiasme permanent, pour votre grand sens de la responsabilité, pour votre grande disponibilité malgré vos nombreuses occupations. Je tiens encore à vous remercier pour vos idées toujours pertinentes, pour votre organisation, particulièrement pour votre flexibilité et vos qualités humaines vis-à-vis de ma situation comme mère étudiante. Je vous remercie monsieur, pour votre rigueur et votre intégrité qui m'ont permis d'avancer sans relâche dans ce travail de thèse. Je tiens aussi à vous remercier pour la conviction et l'autonomie que vous m'avez accordées dans la définition des orientations et les jugements nécessaires à ces travaux de thèse.

Je remercie particulièrement professeur Hamid ABOUCHADI pour ses divers conseils, son dynamisme, pour avoir partagé avec moi sa vision et réflexion. Je le remercie pour sa disponibilité, sa gentillesse et son apport précieux et pour l'aide qu'il m'a apportée tout au long de ce travail de thèse.

Je remercie de manière spéciale, professeur Mohamed Zeriab ES-SADEK pour son accompagnement durant mes années de thèse. Ses qualités humaines et ses nombreuses connaissances mathématiques et plus largement scientifiques qui m'ont permis de progresser et de prendre confiance.

J'exprime ma profonde gratitude au professeur Mohamed Oubreki, chef de Département Génie mécanique à l'ENSAM-Rabat. Je le remercie pour son assistance et son aide précieuse, pour ses conseils et sa contribution technique dans la mise au point de mon dispositif expérimental.

Je remercie professeur Abdelouhab SALIH pour m'avoir fait profiter de son expérience aussi bien pratique que théorique, de m'avoir donné l'occasion de réaliser mes essais mécaniques au sein du Centre National d'études et de Recherches Routières.

Je remercie spécialement Monsieur Othmane HNIED responsable du Laboratoire Génie civil au sein de l'École Mohammadia des Ingénieurs, qui m'a permis de réaliser une grande partie des essais d'identifications du sol.

Un très grand merci à tous les membres du Centre National d'études et de Recherches Routières (C.N.E.R) pour leurs conseils, leur soutien et leur sympathie pour une meilleure réussite de mes travaux de recherches.

Je tiens aussi à remercier le laboratoire de mécanique appliquée et technologies (LAMAT) de m'avoir permis d'être l'une des leurs pendant mes années de recherche. Un grand merci s'adresse à toutes les personnes que j'ai pu côtoyer pendant mon parcours d'études, à mes collègues et amis de l'ENSAM-Rabat de m'avoir soutenu pendant ce travail.

Je ne pourrais finir mes remerciements sans exprimer ma gratitude et mon grand amour à ma mère qui m'a aidé énormément en prenant soin de mes filles afin que je puisse avancer dans ma thèse. Un grand merci s'adresse en particulier à mes amies : Awatif KHBIZI, Karima TOUIHAR, ainsi qu'à mes deux amies d'enfance Salima EL BIAD et Manal KHALID qui m'ont soutenu quotidiennement par leurs encouragements.

Mais surtout merci à toi Kamal MOUDDEN pour ton soutien, pour le bonheur que tu m'apportes, pour m'avoir aidé à prendre du recul aux moments les plus difficiles, ainsi que pour ton appui indéfectible. Merci aussi de faire de notre famille une famille heureuse. Merci à vous mes princesses Assia et Hiba pour tous vos sourires, pour savoir me (ré) apprendre aussi tant de choses si merveilleuses de la vie qu'on aurait tort de les oublier...

## RÉSUMÉ

Les constructions en terres attirent de plus en plus l'attention des acteurs de la construction à l'échelle du pays. Cet intérêt vient dans une perspective de réduction de la consommation d'énergie et de l'utilisation des matériaux écologiques et renouvelables. Toutefois, la prise de décision concernant l'utilisation de la terre de construction constitue un défi majeur. Cette étude vise, essentiellement, à développer un modèle numérique pour prédire les propriétés thermiques et mécaniques du composite terre-paille, afin de renforcer son utilisation dans le système constructif.

Notre méthodologie repose essentiellement sur l'utilisation de modèles théoriques, basés sur le principe d'homogénéisation des matériaux composites afin de pouvoir étudier, analyser et vérifier les propriétés thermiques et mécaniques du composite « terre-paille ». Sur cette base, nous avons développé un modèle basé sur la modélisation d'une matrice en terre à répartition aléatoire en fibres paille. Ce modèle permet la génération de positions aléatoires du renfort dans la matrice tout en contrôlant le taux de remplissage en fibres à « 5 %, 10 % et 15 % ». Le modèle ainsi créé est implémenté dans le logiciel Ansys Mechanical APDL<sup>1</sup> pour une simulation numérique avec différentes hypothèses de calcul, des conditions initiales et des conditions aux limites. Pour valider notre modèle numérique, nous avons effectué une étude comparative des résultats obtenus avec ceux générés par les modèles théoriques, ainsi que les résultats recensés à l'état de l'art et ceux déterminés par la voie de notre protocole expérimental.

Les résultats théoriques et numériques obtenus dans le cadre de cette étude contribueront davantage dans la prise de décision sur l'usage du matériau « terre paille », en amont, par les constructeurs et d'aboutir à des résultats approchés à ceux obtenus par les études expérimentales, tout en minimisant le temps et le coût des essais.

**Mots clés :** Capacité thermique, conductivité thermique effective, distribution aléatoire, matériau composite, modèle théorique, module de Poisson, module d'Young.

---

<sup>1</sup> APDL: Ansys Parametric Design Language

## ABSTRACT

Land-based constructions are increasingly attracting the attention of construction industry players across the country. With a view to reducing energy consumption and increasing using ecological and renewable materials. However, decision-making regarding the use of construction land is a major challenge. This study aimed mainly to develop a numerical model to predict the thermal and mechanical properties of the earth-straw composite, in order to encourage its use in the construction system.

Our methodology was based on the use of theoretical models, based on the principle of homogenization of composite materials leading to study, analyze and verify the thermal and mechanical properties of the "earth-straw" composite. A model based on the modeling of an earth matrix with random distribution of straw fibers was developed. Which allowed the generation of random positions of the reinforcement in the matrix while controlling the rate of fiber filling at "5%, 10% and 15%". Thus, the developed model was processed by the Ansys Mechanical APDL software for a numerical simulation with various calculation assumptions, initial conditions and boundary conditions. A comparative study was conducted to validate our numerical model results with those generated by theoretical models, as well as the results identified in the state of the art and those determined by our experimental protocol.

The theoretical and numerical results obtained using our study framework will contribute significantly in decision-making on the use of the material "straw soil", upstream, by the manufacturers and will allowed to have approximatively the same results to those generated by experimental studies while enhancing both the time and cost of testing.

**Keywords:** Composite material, effective thermal conductivity, Poisson's ratio, random distribution, theoretical model, thermal capacity, Young's modulus.

# TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	3
REMERCIEMENTS .....	4
RÉSUMÉ.....	6
ABSTRACT .....	7
TABLE DES MATIÈRES .....	8
LISTE DES FIGURES.....	13
LISTE DES TABLEAUX.....	17
NOMENCLATURE.....	18
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	20
CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART.....	23
1.1 Introduction .....	23
1.2 Construction en terre .....	23
1.2.1 Matériau terre au cœur du développement durable .....	23
1.2.2 Rappel historique.....	25
1.2.3 Principaux modes de construction en terre .....	26
1.2.4 Propriétés du matériau terre .....	29
1.2.5 Avantages et inconvénients de la construction en terre .....	31
1.3 Stabilisation de la terre .....	32
1.3.1 Intérêt de la stabilisation .....	33
1.3.2 Procédés de stabilisation .....	33
1.3.3 Propriétés de la stabilisation de la terre.....	36
1.4 Terre-paille : un matériau composite .....	40
1.4.1 Classification suivant la nature des constituants ou composants .....	41
1.4.2 Classification suivant la forme des constituants .....	42
1.4.3 Fibres .....	43

1.5	Conclusion.....	49
CHAPITRE 2 ÉTUDE THÉORIQUE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET MÉCANIQUES DU COMPOSITE TERRE PAILLE.....		
		50
2.1	Introduction .....	50
2.2	Généralités sur le transfert de chaleur .....	50
2.2.1	Conduction thermique .....	51
2.2.2	Convection thermique .....	52
2.2.3	Rayonnement.....	52
2.3	Propriétés thermiques de la terre .....	52
2.3.1	Conductivité thermique .....	53
2.3.2	Inertie thermique .....	56
2.3.3	Autres paramètres d'intérêt.....	59
2.4	Méthodes de prédiction des propriétés thermiques du matériau composite « terre paille »60	
2.4.1	Homogénéisation des matériaux composites .....	61
2.4.2	Conductivité thermique effective .....	61
2.4.3	Modèles de prédiction de la conductivité thermique effective .....	63
2.4.4	Capacité thermique du composite .....	70
2.5	Propriétés mécaniques de la terre .....	73
2.5.1	Généralités sur le comportement mécanique .....	73
2.5.2	Loi de Hooke généralisée .....	73
2.5.3	Détermination du module de Young .....	74
2.6	Méthodes de prédiction des propriétés mécaniques .....	75
2.6.1	Principe d'homogénéisation.....	75
2.6.2	Aperçu sur le micro et macro du composite.....	75
2.6.3	Évaluation de Voigt et Reuss .....	78
2.6.4	Méthodes variationnelles.....	78

2.6.5	Démarche d'homogénéisation auto cohérente .....	80
2.6.6	Méthode de loi des mélanges .....	81
2.7	Conclusion.....	82
<b>CHAPITRE 3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE ET MÉCANIQUE DU COMPOSITE TERRE PAILLE .....</b>		<b>83</b>
3.1	Introduction .....	83
3.2	Procédure de modélisation suivie.....	83
3.2.1	Volume élémentaire représentatif : .....	84
3.2.2	Échelle macroscopique :.....	85
3.3	Approche en éléments finis .....	85
3.3.1	Présentation de l'approche en éléments finis .....	86
3.3.2	Approximation par éléments finis .....	88
3.3.3	Détermination d'éléments P1 .....	88
3.3.4	Base de Lagrange .....	89
3.3.5	Écriture du problème approché .....	90
3.4	Conception du modèle composite en terre paille .....	91
3.5	Géométrie et maillage .....	93
3.6	Détermination des propriétés thermiques effectives du composite en terre paille... 96	
3.6.1	Application et mise en équation .....	96
3.6.2	Conditions initiales et aux limites en régime permanent .....	97
3.6.3	Conditions initiales et aux limites en régime transitoire .....	98
3.7	Détermination des propriétés mécaniques du composite en terre paille .....	99
3.7.1	Hypothèses du calcul des propriétés mécaniques .....	99
3.7.2	Conditions initiales et aux limites .....	101
3.8	Conclusion.....	101
<b>CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE</b>		<b>102</b>

4.1	Introduction .....	102
4.2	Essais d'identifications.....	102
4.2.1	Masse volumique absolue .....	102
4.2.2	Limites d'Atterbrg.....	103
4.2.3	Essai au bleu de méthylène .....	105
4.2.4	Teneur en eau optimale de la terre compactée .....	107
4.2.5	Analyse granulométrique par tamisage .....	107
4.3	Préparation des éprouvettes.....	108
4.3.1	Confection des blocs du composite.....	108
4.3.2	Préparation des mélanges .....	109
4.3.3	Compactage des briques.....	109
4.3.4	Conservation des briques .....	110
4.4	Essais mécaniques .....	110
4.5	Conclusion.....	111
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....		113
5.1	Introduction .....	113
5.2	Résultats des propriétés thermiques du composite en terre paille.....	113
5.2.1	Détermination de la conductivité thermique effective du composite.....	113
5.2.2	Validation des résultats numériques.....	117
5.2.3	Détermination de la capacité thermique effective du composite .....	118
5.2.4	Validation des résultats numériques.....	119
5.3	Résultats des propriétés mécaniques du composite en terre paille.....	120
5.3.1	Résultat de simulation des propriétés mécaniques du composite « terre paille » 120	
5.3.2	Validation des résultats numériques.....	124
5.4	Résultats de l'approche expérimentale pour la détermination des propriétés mécaniques .....	127

5.4.1	Résultats des essais d'identifications .....	127
5.4.2	Résultats des essais de compression simple .....	130
5.4.3	Comparaison des résultats numériques et expérimentaux.....	131
5.5	Conclusion.....	132
CONCLUSION ET PERSPECTIVES .....		133
BIBLIOGRAPHIE .....		136
ANNEXE 1 : ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE NF-P18-592 .....		152

## LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Ksar Aït-Ben-Haddou (Photo de Gauche) Volubilis (Photo de Droite).....	26
Figure 1-2: Cycle géologique [10] .....	30
Figure 1-3: Coupe dans la couche de terre [19] .....	30
Figure 1-4 : Nomogrammes de granularité montrant les zones recommandées pour la distribution granulométrique des sols pour les blocs d’adobe, pisé et les blocs de terre comprimée [31] [32] [33] [20] [34].....	37
Figure 1-5: Les zones des limites d’Atterberg de la construction en terre [37].....	39
Figure 1-6 : Matériaux composites.....	41
Figure 1-7 : Matériaux composites à base de fibres naturelles .....	43
Figure 1-8 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine [31].....	44
Figure 1-9 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin [50] .....	45
Figure 1-10 : Photographie en microscopie électronique à balayage d’une fibre de coton [52] .....	45
Figure 1-11: Schéma de la microstructure d’une fibre végétale Baleya, [54] .....	46
Figure 1-12 : Fibre Paille .....	48
Figure 1-13 : La paille dans la construction : de la production agricole à la mise en œuvre [66]. .....	49
Figure 2-1 : Ordre de grandeur pour la conductivité thermique de la matière sous ses différentes formes [68].....	53
Figure 2-2 : Ordre de grandeur de la conductivité thermique de la terre [69] .....	54
Figure 2-3 : Ordre de grandeur de la capacité thermique de la terre [69] .....	58
Figure 2-4 : Modèles de conductivité thermique de premier ordre [109] .....	63
Figure 2-5: Assemblage de sphères ou de cylindres dans un composite selon Hashin pour $k_{ch} > k_m$ . La matrice est représentée en blanc et la phase dispersée en noir [95] [113] [118]. .	66
Figure 2-6 : Propagation du flux dans le cas d’une ellipse [95].....	66
Figure 2-7 : Distribution de fibres courtes orientées dans différentes directions dans la matrice [119] .....	67

Figure 2-8 : Inclusion sphérique simple dominée par un gradient unitaire (G) .....	69
Figure 2-9 : Courbe générale de réponse à un échelon d'un système du 1er ordre [30].....	72
Figure 3-1 : Brique de terre stabilisée par la fibre paille.....	84
Figure 3-2 : Modélisation de la section d'un composite section- motif carrée- motif hexagonal .....	85
Figure 3-3 : Discrétisation.....	89
Figure 3-4 : Fonction affiniée par morceaux.....	89
Figure 3-5 : Fonction de base de Lagrange .....	90
Figure 3-6 : Matrices de taille « (3 x 3) ».....	92
Figure 3-7 : neuf matrices élémentaires « 3 x 3 ».....	92
Figure 3-8 : Différentes distributions de fibre dans une matrice à grandes dimensions « 30×30 » .....	93
Figure 3-9 : Géométrie 2D $L_x \times L_y$ .....	94
Figure 3-10 : Maillage quadrilatères de 1600 éléments et 1681 nœuds.....	95
Figure 3-11 : Distribution aléatoire de renfort avec différent taux de remplissage 5 %, 10 % et 15 % pour une matrice « 40×40 ».....	95
Figure 3-12 : Conditions aux limites en régime permanent .....	98
Figure 3-13 : Conditions aux limites en régime transitoire.....	99
Figure 3-14 : Conditions aux limites de l'essai de traction.....	101
Figure 4-1 : Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau.....	103
Figure 4-2 : Essai permettant la détermination de la masse absolue du matériau.....	103
Figure 4-3 : Limite de liquidité à la coupelle .....	105
Figure 4-4 : Limite de plasticité au rouleau .....	105
Figure 4-5 : Appareillage permettant la réalisation de l'essai au « bleu de méthylène ».....	106
Figure 4-6 : Dispositif de l'essai de Proctor.....	107
Figure 4-7 : Série de tamis pour l'analyse granulométrique .....	108
Figure 4-8 : Moule utilisé pour la fabrication des briques terre paille.....	109

Figure 4-9 : Compactage des briques dans une presse hydraulique.....	110
Figure 4-10 : Essai de compression simple à la machine CBR.....	111
Figure 5-1 : Cartographie des températures .....	114
Figure 5-2 : Cartographie de densité de flux .....	115
Figure 5-3 : Profil de température pour différents taux de remplissage de fibres en paille « 5 %, 10 % et 15 % ».....	116
Figure 5-4 : Conductivité thermique effective du composite « terre paille » en régime permanent.....	117
Figure 5-5 : Comparaison des modèles théoriques avec les résultats de simulation.....	117
Figure 5-6 : Conductivité thermique en fonction des fibres.....	118
Figure 5-7 : Cartographie de densité de flux au temps $t=14400s$ .....	119
Figure 5-8 : Capacité thermique en fonction des fibres 5 %, 10 % et 15 % .....	120
Figure 5-9 : Résultat cartographie des déplacements 5 % .....	121
Figure 5-10 : Résultat cartographie des déplacements 10 % .....	122
Figure 5-11 : Résultat cartographie des déplacements 15 % .....	122
Figure 5-12 : Courbe « contrainte déformation » .....	123
Figure 5-13 : Module de Young selon différents taux de remplissage de fibres en paille.....	123
Figure 5-14 : Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats de loi des mélanges .....	124
Figure 5-15 : Module de Young effective selon les Bornes de Voigt et Reuss .....	125
Figure 5-16 : Module de Young effective selon les Bornes de Hashin et Strikman .....	125
Figure 5-17 : Comparaison entre modèles théoriques et résultats de simulation.....	126
Figure 5-18 : Coefficient de Poisson.....	126
Figure 5-19 : Fuseau du diagramme de plasticité des terres [159].....	128
Figure 5-20 : vue du papier filtre et des tâches auréolées .....	128
Figure 5-21 : Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau.....	129
Figure 5-22 : Analyse granulométrique de la terre étudiée .....	130

Figure 5-23 : Courbe « Contraintes-Déformation » des différentes formulations 5 %, 10 % et 15 %.....	130
Figure 5-24 : Module de Young selon l'essai de compression. ....	131
Figure 5-25 : Comparaison des résultats .....	132

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Critères Critères d'adéquation pour la construction en terre.....	37
Tableau 2 : Classification des fractions des grains référent aux normes (A.S.T.M, [3] [35]) .	38
Tableau 3 : Grandeurs mesurées des conductivités thermiques .....	55
Tableau 4 : Valeurs moyennes de conductivité thermique pour plusieurs masses volumiques de terres [83] .....	56
Tableau 5 : Valeurs de 'A' pour différents types d'inclusions [122].....	68
Tableau 6 : Propriétés thermophysiques de la terre et de la paille .....	94
Tableau 7 : Propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre en paille .....	100
Tableau 8 : Coefficient de Poisson de la matrice et de la fibre .....	100
Tableau 9 : Classification des sols selon leurs sensibilités au bleu de méthylène. ....	106
Tableau 10 : Valeur de la constante de temps pour différentes concentrations .....	118
Tableau 11 : Limites d'Atterberg de la terre étudiée .....	127

## NOMENCLATURE

- $\Delta Lx$  : Allongement longitudinale relatif
- $k_{inf}$  : Borne inférieure de la conductivité effective du composite [W/m.K]
- $k_{sup}$  : Borne supérieure de la conductivité effective du composite [W/m.K]
- $C$  : Chaleur spécifique massique à pression constante en [J/kg.K]
- $A$  : Coefficient de Nielson
- $\nu^M$  : Coefficient de Poisson de la matrice
- $\nu^I$  : Coefficient de Poisson de l'inclusion
- $\varphi_{ch}$  : Concentration volumique de la charge.
- $\varphi_m$  : Concentration volumique de la matrice.
- $k_{eff}$  : Conductivité effective du composite [W/m.K]
- $k$  : Conductivité thermique [W/m.K]
- $k_{ch}$  : Conductivité thermique de la charge [W/m.K]
- $k_m$  : Conductivité thermique de la matrice [W/m.K]
- $C_{ij}$  : Constantes de rigidité
- $\sigma^K$  : Contraintes moyennes
- $\varepsilon_c$  : Déformations du composite
- $\varepsilon_f$  : Déformations de fibre
- $\varepsilon_m$  : Déformations de la matrice
- $\varepsilon^K$  : Déformations moyennes
- $\underline{u}(\partial V)$  : Déplacements
- $D$  : Diffusivité thermique [m<sup>2</sup>/s]
- $L_X L_Y$  : Dimensions de la matrice respectivement selon l'axe x et l'axe Y
- $\underline{\sigma}_n(\partial V)$ : Efforts
- $e$  : Effusivité thermique [J/m<sup>-2</sup>.s<sup>-1/2</sup>. K<sup>-1</sup>]
- $S_{ij}$  : Facteur spécifique à la géométrie des inclusions
- $\emptyset$  : Flux de chaleur [W]
- $V_f$  : Fraction volumique des fibres
- $V_m$  : Fraction volumique de la matrice
- $f_I$  : Fraction volumique de la phase I

$\varphi_{max}$  : Fraction volumique maximale de l'empilement des inclusions  
 $I_P$  : Indice de plasticité  
 $G$  : Gradient de température sur le matériau homogène  
 $W_L$  : Limite de liquidité  
 $W_P$  : Limite de plasticité  
 $L_c$  : Longueur caractéristique de diffusion  
 $\rho$  : Masse volumique en [kg/m<sup>3</sup>]  
 $S^I$  : Matrice de souplesse de la phase I  
 $K^M$  : Module de compressibilité de la matrice  
 $K^I$  : Module de compressibilité de l'inclusion  
 $\mu^M$  : Module de cisaillement de la matrice  
 $\mu^I$  : Module de cisaillement de l'inclusion  
 $E^M$  : Module de Young de la matrice  
 $E^I$  : Module de Young de l'inclusion  
 $R_1$  : Rayon de l'inclusion sphérique  
 $\Delta Ly$  : Rétrécissement transversal relatif  
 $\partial V$  : Surface extérieure du composites  
 $t$  : Temps [s]  
 $t_c$  : Temps caractéristique de diffusion  
 $\Delta T_{RP}$  : Temps qu'il faut pour atteindre le régime permanent  
 $C^{eff}$  : Tenseur d'élasticité effective  
 $\underline{\Sigma}$  : Tenseurs de contraintes  
 $E$  : Tenseurs de déformations  
 $C^I$  : Tenseur d'élasticité de l'inclusion  
 $C^M$  : Tenseur d'élasticité de la matrice  
 $P$  : Terme de production d'énergie volumique en [W/m<sup>3</sup>]  
 $VBS$  : Valeur au bleu de méthylène

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Aujourd'hui, au Maroc, « le bâtiment est le deuxième secteur consommateur d'énergie après les transports » [1]. Il est à 25 % de la demande totale d'énergie finale et de plus de la moitié de la demande finale d'électricité, laquelle a quadruplé depuis 1990 [1]. Parmi les remédiations à l'usage coûteux des énergies primaires et par conséquent aux émissions importantes de CO<sub>2</sub>, le Maroc a pris à travers la COP22<sup>2</sup> l'engagement de lutter contre le changement climatique en se fixant comme objectif principal la stabilisation de la concentration des « gaz à effet de serre » dans l'atmosphère. L'une des solutions consiste à développer de nouvelles pratiques de construction en déployant des matériaux écologiques permettant d'apporter une réponse adéquate aux effets indésirables du changement climatique. En effet, la capacité à construire, à rénover ou à conserver des bâtiments est une préoccupation importante et essentielle pour assurer des conditions de vie satisfaisante pour les générations futures. Cela implique une prise en compte de nombreuses contraintes afin d'avoir des bâtisses plus saines, consommant peu ou pas d'énergie et moins polluantes.

Face aux pénuries des énergies de chauffage et de climatisation, spécialement dans les zones rurales et désertiques, et aux prix qui restent très élevés ; le Maroc a donc adopté une politique qui valorise les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Par conséquent, la revalorisation des matériaux de construction locaux et naturels pourrait être opportune. L'une des idées les plus prometteuses est la nouvelle attention que connaissent les « matériaux en terre crue ». Ils permettent de réduire l'empreinte environnementale des bâtiments [2] [3] [4] tout en améliorant leur confort thermique [5] [6] [7]. Néanmoins, dans cette vision, les matériaux en « terre crue » nécessitent plus de caractérisations scientifiques pour une meilleure utilisation par tous les intervenants du domaine de la construction.

La motivation fondamentale de ce travail est l'usage des richesses naturelles de notre planète. En effet, la présence de matériaux et de techniques de production néfaste à l'environnement nous encourage à utiliser la terre dans un véritable enjeu technique, économique et écologique. Par ailleurs, la caractérisation « thermique et mécanique » de ce matériau va permettre d'atteindre les objectifs suivants :

---

<sup>2</sup> COP : Conférence of Parties ou Conférence des Parties

- Promouvoir l'emploi de la terre stabilisée.
- Réduire la demande en énergie dans les bâtisses ;
- Améliorer le confort thermique au sein des constructions ;
- Baisser les émissions en CO<sub>2</sub>.

Dans cette optique, la qualité d'une construction est tributaire de la qualité celle des matériaux qui la constituent. Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a toujours tenté d'éviter les inconvénients de la terre.

En conséquence, la « terre crue » exploitée en tant que matériau de construction est toujours mal présentée au corps scientifique, défaut de carence de paramètres fiables sur ses propriétés. Effectivement, les normes sont peu nombreuses. Pourtant les bâtisseurs ont réussi à percer les secrets de ce matériau et ont pu atteindre de très bonnes réussites techniques. De ce fait, le diagnostic entre science fondamentale et science appliquée n'est toujours pas évident. Les travaux menés sur le matériau « terre » témoignent que la science de ce matériau est une science « Jeune », souvent appliquée et concerne un domaine plus empirique.

Toutefois, parmi les problèmes des constructions en terre, il y a le déficit en résistance, les fissures systématiques dues au retrait et leur sensibilité vis-à-vis de l'eau. Toutefois, pour profiter pleinement des avantages du matériau terre et chercher à éviter ses inconvénients, il est fondamental de procéder à l'une des techniques de stabilisation qui aident à améliorer ses performances pour obtenir de meilleures caractéristiques thermiques et mécaniques.

Ainsi, ce travail de thèse se donne pour objectif la valorisation des matériaux naturels et locaux pour faire baisser les dépenses énergétiques est le souci de toute personne qui s'intéresse au développement durable. D'ailleurs, l'objectif général de cette étude est de prédire le comportement du matériau « terre paille », puis d'estimer l'impact d'intégration des fibres en paille au sein du composite. Nous proposons d'apporter notre contribution par la simulation numérique des propriétés thermiques et mécaniques effectives d'un matériau composite « terre-paille », d'une part, par la distribution aléatoire des fibres en « paille » et d'autre part, par la variation de la teneur volumique des fibres paille entre « 5 %, 10 % et 15 % ». De ce fait, l'élaboration d'une démarche théorique et numérique sera effectuée en vue d'une caractérisation des propriétés thermiques et mécaniques du composite « terre-paille » qui va être complétée par une étude expérimentale.

Le présent rapport est organisé en cinq chapitres :

- Le premier chapitre est un état de l'art sur les constructions en terre. D'abord, les distincts pratiques de construction en « terre » sont exposés, ensuite, une revue historique est alors abordée sur son utilisation en particulier son impact énergétique et économique par souci d'établir une identification des avantages et des inconvénients de la construction en terre. Par conséquent, ce chapitre expose les procédés de stabilisation de la « terre » ainsi que leurs intérêts. Par ailleurs, la terre seule ou bien stabilisée est considérée comme un matériau composite, donc, une présentation des matériaux composites est alors abordée.
- Le second chapitre décrit les fondements théoriques du transfert de chaleur. Il présente également toutes les grandeurs obtenues d'après la littérature sur les « propriétés thermiques de la terre ». Ce chapitre présente également les modèles théoriques de prédiction des propriétés mécaniques du « matériau composite », ainsi que les grandeurs du « module de Young » recensé dans la littérature. Ce chapitre présente aussi les lois de comportement homogénéisées des « matériaux composites ».
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du comportement thermique par éléments finis d'une matrice à inclusions réparties aléatoirement avec différents taux de remplissage de « 5 % ; 10 % et 15 % ». Par ailleurs, ce chapitre présente aussi la simulation numérique du comportement mécanique du matériau « terre-paille ».
- Le quatrième chapitre est dédié à la réalisation d'une campagne d'essais menée pour la caractérisation mécanique du matériau terre-paille ainsi que la mise au point des différentes formulations en fibres paille « 5 % ; 10 % et 15 % ».
- Dans le cinquième chapitre, le modèle numérique est confirmé par des modèles théoriques et expérimentaux. Dans ce chapitre, une confrontation des résultats numériques et expérimentaux est présentée pour la validation des propriétés mécaniques du composite.

# CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART

## 1.1 Introduction

Le projet de construction d'un bâtiment est un sujet de conception multicritère nécessitant la considération de performance d'usage, d'économie, d'architecture et d'environnement. Ce chapitre est dédié à l'état de l'art des constructions en « terre ».

La première partie référence l'intégration de la construction en terre dans un contexte de développement durable. Ensuite, nous présentons un rappel sur l'utilisation du matériau « terre » par le passé de l'humanité. De plus, nous énumérons et détaillons les différents modes de constructions en terre. De même, nous définissons l'état physique du matériau « terre ». Finalement, dans cette première, nous décrivons les principaux atouts du matériau « terre » ainsi que les freins à son développement dans le domaine de la construction.

La deuxième partie de ce chapitre expose les divers procédés de stabilisations de la terre crue afin de remédier aux grands problèmes rencontrés lors de son usage dans la construction.

Enfin, la dernière section introduit la classification des « matériaux composites », en particulier les composites constitués à partir de fibres naturelles « terre-paille » qui sont l'objet de recherche de ces travaux de thèse.

## 1.2 Construction en terre

L'homme contemporain bénéficie d'une considérable diversité de matériaux dans le secteur de la construction jamais connue précédemment. D'ailleurs, une orientation croissante vers les constructions en « terre crue » voit le jour dans plusieurs pays, incluant même les états développés. Profitant des différentes techniques de production de la terre et appuyées par les recherches scientifiques, ce type de matériau reprend de plus en plus sa place parmi cette multitude de matériaux.

### 1.2.1 Matériau terre au cœur du développement durable

De nos jours, il est difficile de fermer les yeux sur l'impact du secteur de l'énergie sur « l'économie et l'environnement ». D'une part, la consommation des ressources fossiles est souvent en accroissement continu, d'où la hausse du prix du baril du pétrole et la limitation des stocks face à ces ressources. D'autre part, ce secteur participe remarquablement aux « émissions

des gaz à effet de serre » qui représente une tâche de premier plan dans les changements climatiques.

En effet, utilisant principalement le travail manuel, la construction en « terre » a aussi l'avantage socio-économique de créer localement des emplois. Certes, face aux retentissements alarmants du « changement climatique » en cours des dix dernières années et face aux présomptions de l'épuisement éventuel des « ressources naturelles » ; le « développement durable » est au centre des pensées dans tous les domaines. Par conséquent, les sujets les plus considérables sont liés « à l'énergie et aux déchets », cependant tous les secteurs ouvrent à baisser l'impact environnemental de leurs travaux. À ce titre, il est communément admis que le domaine de la construction est lui seul responsable, de 19 % des « émissions des gaz à effet de serre » et de 40 % de l'énergie demandée à l'échelle mondiale, ce qui constitue un enjeu de taille [8]. La COP 22, accueillie par le Maroc en novembre 2016 à Marrakech, a mis en avant les avancées et les prétentions du royaume en matière de rationnement des « émissions des gaz à effet de serre » et la prévention contre les perturbations climatiques, notamment en termes de demande d'énergie dans le secteur de la construction de bâtiment.

En fait, il est généralement estimé qu'un édifice qui possède une bonne « efficacité énergétique » durant la phase d'utilisation est un bâtiment de faible demande énergétique. La demande énergétique durant la vie d'un bâtiment se partage en trois groupes élémentaires :

- L'énergie de fabrication des éléments porteurs (des poteaux, des poutres, des planchers, des fondations...) et non porteurs (des murs, des portes, des fenêtres, des isolations...). Généralement, cette phase se constitue des étapes suivantes pour les matériaux conventionnels : l'extraction de la matière, le transport, la transformation, le transport des produits finis et la mise en œuvre in situ.
- L'énergie consommée durant l'usage du bâtiment : la climatisation, le chauffage, la ventilation, l'éclairage, etc.
- L'énergie de destruction et de traitement des déchets : après la démolition.

Bien que l'enjeu du secteur du bâtiment dans le développement durable réside dans la diminution de l'emploi des énergies abordées au-dessus, la majorité des gens estiment qu'un bâtiment ayant une bonne « performance énergétique » est un bâtiment qui a une bonne performance thermique pendant la période d'habitation. C'est pourquoi, dans cette étape, les règles actuelles exigent seulement une bonne « performance thermique » des bâtiments (demande d'isolations thermiques...), mais, pas encore aux autres phases. En mars 2014, le

Maroc a rendu publique sa stratégie nationale d'efficacité énergétique à l'horizon 2030, qui confirme l'ambition du Plan national pour l'efficacité énergétique, avec une diminution des consommations finales d'énergie de 12 % en 2020 et de 15 % en 2030. [1].

Enfin, pour estimer l'énergie essentiel pour la production de tout bien ou service durant leur cycle de vie complet, le recours au concept de « l'énergie grise » est souvent utilisé. Cette dernière est la somme de toutes les énergies, qu'elles soient « animales, humaines, thermiques, électriques, etc ». En effet, tel qu'il est cité précédemment, la terre crue est un matériau prélevé directement du sol et facilement préparé pour être utilisé dans la construction. Elle est prélevée seulement à quelques kilomètres du chantier en vue de diminuer les frais de transport, par ailleurs, la terre étant composée de sol naturel, il ne libère pas des éléments nocifs.

### **1.2.2 Rappel historique**

La « terre » est employée comme matériau de construction depuis onze millénaires sur tous les continents [9]. En effet, il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. D'après l'UNESCO, « 20 % de l'ensemble des zones enregistrées comme patrimoine mondial sont totalement ou en partie construits en terre » [9]. Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'homme, car bâtir en « terre crue » permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds [9]. De même, tirer profit des matériaux locaux afin de bâtir son logement est une pratique universelle et souvent la terre est le seul matériau disponible [10]. Par ailleurs, des études évaluent « qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre. Ainsi, 17 % des constructions enregistrées sur le répertoire du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des réalisations architecturales en terre » [11]. Ceci atteste du riche capital architectural en terre crue, d'autant plus que la terre est relativement simple à extraire et à employer : de simples instruments comme une pelle ou des planches en bois sont considérablement suffisants dans la plupart des cas.

En effet, au Maroc quatre villes sont classées au patrimoine mondial de l'humanité « Fès, Marrakech, Meknès et Rabat ». Du fait de leurs médinas traditionnelles édifiées en adobe et pisé. Le pays recèle d'autre part d'extraordinaires citadelles en terre ocre appelées Ksour et Kasbahs. D'ailleurs, le Ksar d'Aït-Ben-Haddou (Figure 1-1- Gauche) constitue un exemple emblématique de l'architecture traditionnelle du Sud marocain. Certes, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et

babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau. Certains étaient même monumentaux tout comme Volubilis à Meknès au Maroc (Figure 1-1- Droite). Cependant, dans les pays émergents, la « terre crue » est généralement jugée comme signe de pauvreté. « La construction en terre est remplacée par des constructions en béton, tôle et parpaing, considérées comme modernes et durables » [9] [10].



Figure 1-1 : Ksar Ait-Ben-Haddou (Photo de Gauche) Volubilis (Photo de Droite)

### 1.2.3 Principaux modes de construction en terre

Le diagramme établi par le groupe CRATERRE en 1986 [3] présente douze techniques de maniement de la « terre » pour les constructions. On propose d'effectuer un rappel sur les huit procédés de construction les plus propagés dans le monde. En effet, dans ce rapport, nous allons présenter les « techniques de construction » en : adobe, pisé, la bauge, terre comprimée, terre-paille, torchis, terre façonnée et terre extrudée [12] [13].

- **Adobe :**

L'adobe est de l'argile malaxée à l'eau et à une faible quantité de paille coupée. L'adobe (ou banco) est la brique de « terre crue » modelée, séchée au soleil et employée comme matériau de construction. Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens. En effet, les premières cités connues étaient bâties en briques de terre crue. L'adobe est encore l'un des plus employés au monde. Pour sa mise en œuvre, les briques d'adobe sont coulées dans un cadre ouvert rectangulaire. Le coffrage est enlevé, la brique d'adobe est mise au séchage pendant quelques heures, puis elle est disposée sur un support pour terminer le séchage. Pendant le séchage, les briques peuvent être mises à l'ombre pour éviter la survenue de fissures.

- **Pisé :**

Le pisé est un procédé de réalisation de mur en terre crue. Compactée en masse dans des moules à l'aide d'une dame couche par couche. Le mur est décoffré immédiatement après le compactage de la terre.

- **Bauge :**

La bauge est une terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, placées en boules, ces dernières sont empilées les unes sur les autres et entassées faiblement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à bâtir des murs monolithiques. Dans d'autres cas, la bauge est intégrée dans un système en bois. Les murs sont composés d'un enchaînement de lits de terre dit levée, en général de soixante centimètres de hauteur. Montée la plupart du temps à la fourche encore meuble, la levée est compactée au bâton, finie par être taillée au paroir, avant d'être lissée ou recomptée. Suivant le modèle de pose, la bauge a besoin par la suite d'une à quatre semaines de séchage avant d'avoir la possibilité de placer la levée suivante pour laquelle un nouveau malaxage d'eau, de terre et de fibres doit être effectué. La hauteur des levées peut varier entre cinquante centimètres et un mètre vingt, la largeur entre cinquante et quatre-vingts centimètres, selon l'élasticité du mélange, la granularité de la terre et l'expérience du bâtisseur.

- **Terre paille :**

La terre est éparpillée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille en vue de composer un film sur chaque brin. Le matériau alors obtenu garde l'apparence de la paille et il est banché pour édifier un mur monolithique qui exige un système porteur.

- **Blocs de terre comprimée (BTC) :**

Les BTC sont des modes de construction progressive, moderne des briques d'adobe et font partie des procédés de construction en terre crue les plus novateurs. Par conséquent, à défaut d'être modelés à la main dans un coffrage en bois, les blocs sont obtenus par damage de la terre faiblement humide dans un moule métallique à l'aide d'une presse. Ainsi, la mise en contraste aux adobes, les BTC montrent une meilleure résistance à la compression et une insensibilité à l'eau plus élevée [24] [25] [26]. En effet, ils ont été pour la première fois conçue en Colombie vers les années 50 dans le cadre d'un projet de recherche sur l'habitat rural. Par contre, la volonté de compactée la terre en vue de faire évoluer sa résistance mécanique s'est ressentie il y a longtemps à travers la formulation des blocs de terre modelée compressée à l'aide de pilon

de bois. Cette méthode est toujours utilisée dans le milieu rural. Les premières machines à comprimer la terre auraient été pensées au XVIIIe siècle. Cependant, les premières presses mécaniques ont vu le jour, au début du XXe siècle. À l'heure actuelle, ces presses ont été modernisées. La manufacture de la brique en terre a utilisé ensuite des presses à compression statique dans lesquelles la terre était contenue au sein de deux plateaux. L'essor pertinent de l'usage des presses et l'utilisation du bloc de terre comprimée n'ont pas été entrepris que depuis 1952. À la suite de la conception de la fameuse petite presse CINVA-RAM, pensée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie, d'autres familles de presses (presse manuelle, mécanique, hydraulique, motorisée) ont été introduites sur le marché dès les années 1970 et 1980. À l'heure actuelle, un vrai progrès du marché de la fabrication et de l'utilisation des blocs de terre comprimée est en cours [22].

- **Torchis :**

Le torchis est une méthode de remplissage en terre crue, c'est un système porteur en bois garni de terre sous la forme plastique, généralement malaxée avec des fibres de paille. Le mot torchis provient de « tordre » ou de « torche », puisque sa réalisation traditionnelle consiste à déposer de la paille ou du foin torsade dans une boue ou pâte de limon argileux sur des gouttières entre les madriers. On peut citer deux genres de mélange :

- Le torchis lourd : beaucoup de terre et un peu de paille constituant une armature. Sa conductivité thermique est de  $k = 1,05 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$ . Sa masse volumique entre  $1400 \text{ kg/m}^3$  et  $1800 \text{ kg/m}^3$ . Il favorise l'inertie et l'accumulation thermique : la chaleur l'hiver ou la fraîcheur l'été.
- Le torchis allégé : plus de paille et un peu de terre. Sa conductivité thermique est de  $k = 0,12$  à  $0,15 \text{ W/m. } ^\circ\text{C}$ . Sa masse volumique de  $300$  à  $400 \text{ kg/m}^3$ . Il favorise l'isolation et il a neuf fois plus d'isolation que le torchis traditionnel, puisqu'il emprisonne une forte porosité.

- **Terre façonnée :**

La terre façonnée amendée souvent de paille ou autres fibres, la terre est modelée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans l'usage d'outil.

- **Terre extrudée :**

La terre extrudée par un efficace engin proche ou dérivée de l'équipement employé pour la production de produits destinés à être cuits.

## 1.2.4 Propriétés du matériau terre

La « terre crue » indique un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols et les sédiments, extrêmement hétérogène et dont les caractéristiques sont très diverses d'une région à l'autre. La terre résulte de l'altération « physique (fragmentation sans aucune modification de la nature des minéraux), chimique et biologique d'une roche mère sous l'action du climat, de l'érosion ou des organismes vivants » [14] [15].

### 1.2.4.1 Matériau géologique

Durant des millénaires, cette terre a été façonnée par la nature. Les roches mères sont soumises jour après jour à la dégradation du temps (soleil, pluie, vent, cycles de gel-dégel...) et à des modifications diverses qui les réduisent en morceaux (altération par des matières organiques par exemple). En effet, ces grains de différentes tailles (appelés les sédiments) s'accumulent et forment le sol. De ce fait, on appelle ce processus la « pédogenèse ». Pourtant, ces sédiments sont éphémères : ils constituent un état intermédiaire de la matière. En effet, ils finiront par une transformation en roche après multiples altérations et voyages dus au vent. Ce phénomène s'appelle la « diagenèse ».

Le sol est constitué de grains (des cailloux, des graviers, des sables, des silts et des argiles). Cependant, les matériaux granuleux sont connus par la présence de pores. Des « vides » sont retenus au sein des grains. Ces « vides » sont souvent comblés par la présence de fluides. Pour la terre, on retrouve donc « de l'air et de l'eau entre les grains ». Donc, à partir de ces trois éléments « grains, air et l'eau » il nous est possible d'ériger un édifice en ayant un matériau rigide : « c'est ainsi que l'on passe du grain à l'architecture » [16].

De ce fait, le concepteur intervient dans le cycle géologique (Figure 1-2) : il récupère les grains du sol pour les transformer en murs. Ainsi, cela crée des habitations s'intégrant parfaitement dans le paysage. Ces maisons de terre seront délaissées à un moment par leurs occupants. Donc, la terre retournera ainsi à son état initial et les grains feront à nouveau partie du cycle géologique [10].

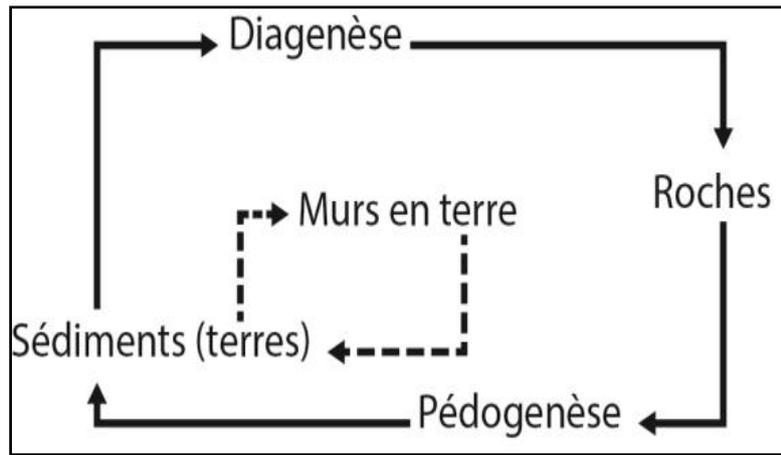


Figure 1-2: Cycle géologique [10]

### 1.2.4.2 Matériau granulaire

Bien qu'on ait parlé de « terre » pour désigner un « matériau sédimentaire naturel utilisé pour la construction », néanmoins ce matériau résulte de « l'altération d'une roche mère ». Cependant, la terre peut être résiduelle (Sol) ou avoir été transportée par l'eau ou le vent c'est-à-dire un dépôt sédimentaire. En effet, ce matériau sédimentaire est principalement constitué d'une fraction solide inorganique constituée de particules de taille variable « gravier > 2 mm, sable > 63 $\mu$ m, limon ou silt 63-2 $\mu$ m, argile <2 $\mu$ m » [17]. De plus, il est également composé de constituants organiques (matière organique fraîche ou transformée). En outre, la fraction solide, la terre possède également « une phase aqueuse et gazeuse présente dans les pores du matériel » [15]. Par conséquent, dans les sols, « seuls les niveaux situés sous les couches riches en matière organique peuvent être utilisés comme matériau de construction » [18] [19] (Figure 1-3).

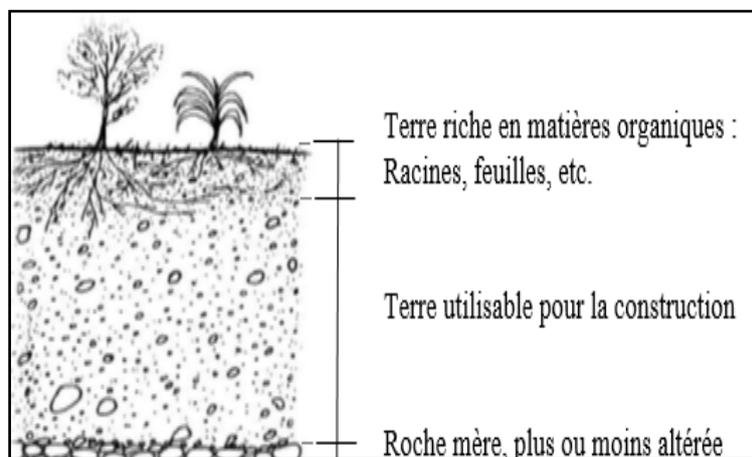


Figure 1-3: Coupe dans la couche de terre [19]

Quoique, la terre est un matériau granulaire composé de plusieurs catégories de grains. En raison de leurs provenances, les grains confèrent à la terre un large panel de couleurs, textures et aspects. Néanmoins, la terre ne s'altère pas avec le temps si elle est suffisamment protégée de l'eau contrairement aux autres matériaux de construction qui eux rouillent, pourrissent ou bien sont agressés chimiquement. De ce fait, le « matériau terre » présente un atout considérable relativement aux autres matériaux. Une fois, l'édifice au terme de vie, la terre peut être soit récupéré pour construire un autre édifice, soit remis au sol d'où elle provenait [10]. Enfin, l'importance relative des éléments constitutifs, c'est qu'ils agissent sur « les propriétés physiques (plasticité, pouvoir absorbant) » et « conditionnent les applications techniques de chaque type de terre » [20].

### **1.2.5 Avantages et inconvénients de la construction en terre**

En considérant, les exigences écologiques actuelles. La terre crue regagne son éclat et son émergence en profitant de ses nombreux avantages. En fait, la « terre crue » a la possibilité d'être utilisée en bâtiment neuf, en restauration et pour la réhabilitation de façon traditionnelle ou bien contemporaine. La « terre crue » présente de considérables avantages et crée un matériau « d'avenir ».

En effet, la « terre » est originaire d'une ressource locale ce qui réduit les difficultés liées au transport. Elle demande peu d'énergie d'extraction, de modification et de fabrication. Son emploi « crue » permet d'éviter l'abattage des arbres comme c'est le cas dans certaines régions de la planète Terre où l'on utilise le bois pour les constructions en terre cuite [21] [13] [22]. Par ailleurs, sa transformation est peu coûteuse et fait souvent appel à une main d'œuvre locale. Quant à sa fabrication, la terre se prête à l'auto-construction. En outre, la terre n'exige que des moyens simples et largement accessibles pour « son extraction, sa transformation et sa mise en œuvre » [23].

Cependant, la terre joue un rôle « d'amortissement acoustique, régule la température et l'humidité ambiante ». La terre crue « purifie l'air ambiant en filtrant quelques toxiques et en absorbant les odeurs » [10]. Pendant sa confection, ce matériau ne génère aucun rejet de déchets, son emploi assure également l'absence d'effets nuisibles dans le cadre de la vie quotidienne. La terre a en plus l'atout d'être intégralement réutilisable après son utilisation initiale.

Cependant, en dépit de tous les gains que peut donner le matériau terre, ce dernier comporte également des inconvénients majeurs [21] :

- Il est détérioré facilement, ce qui rend son usage difficile dans les régions à pluviométrie importante ;
- Employée en couverture, elle est exposée à l'eau, la terre peut donc s'alourdir et entraîner des affaissements ;
- Ne s'attachant pas au bois, ce qui fait émerger des décollements aux alentours des ouvertures ;
- Présente une modeste résistance à « la flexion et à la traction » ;
- Les liaisons entre les « particules du matériau terre » sont de nature physique. Une fois touché par l'eau, les liaisons se fragilisent, elles se neutralisent ce qui dégrade le matériau et fait chuter sensiblement ces propriétés mécaniques et sa stabilité dans le temps.

Ces inconvénients sont principalement liés à la sensibilité à l'eau, qui provoque des désordres dans les constructions qu'on nomme pathologies de vieillissement qui changent, selon les climats et dont la maîtrise peut être assurée grâce à des mesures préventives [21].

### **1.3 Stabilisation de la terre**

Les constructions en terre présentent une fragilité considérable vis-à-vis aux phénomènes d'érosions liées aux « pluies, vents ou gels ». Le défi est donc de les préserver en employant des procédés de stabilisation. Cependant, un stabilisant ne remplace pas l'action du liant principal qui est l'argile [20]. En effet, le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant la modification des propriétés d'un système « terre, eau et air » [24]. L'objectif est d'avoir des propriétés permanentes convenables avec une application particulière [24]. Pourtant, la stabilisation est un problème complexe puisque de très nombreux paramètres interviennent. En réalité, il est essentiel de connaître : « les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie projetée, les techniques de mise en œuvre choisies et le coût de la maintenance à réaliser » [3].

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont selon [25] :

- Améliorer les propriétés mécaniques de la terre « augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement »,

- La diminution de la porosité et les variations de volume « réduire le retrait et le gonflement à l'eau ».
- Diminuer l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau.

### **1.3.1 Intérêt de la stabilisation**

Pour une amélioration des différentes propriétés du matériau terre, on peut la renforcer par un stabilisant. Néanmoins, il convient d'en choisir un approprié à la variété de terre employée. En effet, un grand nombre de stabilisants pouvant être employés dans la construction en terre, qu'ils soient rajoutés soit dans la masse ou dans l'enduit. Bien qu'il soit connu depuis les années 1920, la stabilisation ne connaît toujours pas de « recette miracle » pouvant répondre à tous les besoins. Les techniques les plus exercées sont celles de : la densification par compression, l'addition de fibres au mélange, l'ajout de ciment ou de chaux à la terre ou même le mélange de la terre avec du bitume. Tandis que la stabilisation de façon automatique est proscrite, car celle-ci coûte relativement cher et peut compliquer la production du matériau en ajoutant des études préalables. La terre comporte déjà de multiples caractéristiques intéressantes à l'état naturel. Par conséquent, les stabilisants ne sont donc pas souvent utilitaires. Ils doivent être employés de manière réfléchie pour répondre à des besoins faisant défaut. Ainsi, pour la réalisation d'un projet de construction en terre, il existe trois façons de procéder : soit on construit avec la terre présente sur site en appropriant le projet à cette terre, soit on importe de la terre afin d'assurer les exigences du projet, soit on modifie la terre présente sur site afin qu'elle puisse correspondre au projet souhaité [26].

### **1.3.2 Procédés de stabilisation**

D'après l'étude bibliographique, on peut découvrir diverses classifications, selon : la nature, la forme, etc. Il y a six modes de stabilisations selon Rigassi [20] : densifier ; armer ; enchaîner ; liasonner ; imperméabiliser ; hydrofuger. Toutefois, chaque stabilisant n'agit pas nécessairement selon un procédé exclusif, cependant il peut cumuler plusieurs procédés : physique et chimique [3]. Au fil des ans pour donner suite aux nombreuses recherches employées et développées sur la stabilisation, plusieurs procédures sont possibles. Les principales techniques sont reprises et détaillées ci-dessous [26]. Trois modes de stabilisation sont définies [25] :

- **Stabilisation mécanique :**

La stabilisation mécanique est l'expression générale utilisée pour la stabilisation du sol par compactage. C'est un procédé qui change les caractéristiques de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure. D'une part, il y a la densification par compression qui agit sur la porosité du matériau. Elle assure la distribution de manière homogène des pores dans la terre et modifie leur grosseur afin de rendre le matériau plus compact et plus résistant à la compression.

D'autre part, quatre méthodes de compression ont été mises au point : « la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact, la compression statique, et la compression par pétrissage » [26]. Chacune a sa propre teneur en eau optimale à laquelle correspond une masse volumique sèche optimale. De ce fait, afin d'obtenir la meilleure compacité possible, plusieurs paramètres sont pris en compte. Pour cela, il est préférable d'utiliser une énergie de compactage appropriée au type de terre. Alors, plus l'énergie de compactage sera élevée, plus la teneur en eau optimale diminuera, engendrant ainsi une augmentation de la masse volumique sèche, mais une énergie trop importante entraînera le laminage des blocs. Par conséquent, pour être efficace, il faut trouver la juste énergie à déployer. De même, une attention est également portée à la courbe granulométrique de la terre utilisée. En effet, pour atteindre un compactage maximum la granularité doit être étalée. Par conséquent, une granularité serrée ne permettra pas d'atteindre une bonne compacité. Or, si le compactage de la terre est réalisé dans de bonnes conditions, on obtiendra une perméabilité moindre, une compressibilité diminuée ainsi qu'une absorption d'eau et un gonflement hydrique plus faibles. Les résistances mécaniques seront quant à elles augmentées, que ce soit initialement ou à long terme [26].

- **Stabilisation physique :**

La stabilisation physique de la terre est la modification des propriétés en agissant sur la texture. Un mélange contrôlé de fractions de grains différents (argile et sable), des fibres naturelles ou des fibres industrielles. En effet, la technique la plus utilisée dans le monde est l'ajout de fibres dans la terre comme stabilisant. Ces derniers sont employés pour apporter une armature à la terre. Toutefois, la plus employée étant la paille qui renforce la structure. La fibre paille s'adapte aux différents modes de mise en œuvre de la terre, à savoir à l'état plastique, visqueux ou encore dans le cas de la compression. D'ailleurs, les fibres jouent plusieurs rôles, elles permettent :

- De prévenir contre les fissurations dues au séchage en distribuant les tensions causées par le retrait de l'argile dans toute la quantité du matériau ;
- Le drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres et permettent d'accélérer le séchage.
- L'augmentation de l'absorption en présence d'eau.
- D'alléger la masse volumique du matériau en améliorant ses propriétés d'isolation ;
- D'augmenter la résistance à la traction [26].

Pour assurer une très bonne résistance à la fissuration ainsi qu'à la propagation des fissures. La terre stabilisée en fibres est un remède essentiel, car elles résistent au clivage quand la contrainte augmente selon :

- La résistance au cisaillement sera augmentée d'un certain degré, grâce à la résistance à la traction des fibres utilisées.
- La quantité de fibres employées et leur résistance à la traction.
- La résistance à la compression de la terre et le frottement intérieur présent entre les fibres et la terre,

On pourra alors obtenir une bonne résistance à la compression grâce à l'armature de fibres mise en place. Or, en comparant, la résistance d'un matériau renforcé avec des fibres à celle d'un matériau sans fibre, cela permet d'observer une résistance supérieure d'environ 15 % pour le matériau contenant les fibres. Alors que dans le cas d'un matériau trop sableux les fibres peuvent avoir un impact négatif.

D'ailleurs, on observe une augmentation de la résistance en compression d'environ 37 % pour l'ajout des fibres en laine de mouton à la terre. De plus, dans le cas de déformations, on constate également une capacité à absorber une énergie plus grande dans le cas de la terre renforcée en fibres, paramètre très intéressant dans les zones parasismiques. Cela s'explique par le fait que les fibres modifient le comportement de la terre au-delà du point de rupture [26] [27].

Enfin, pour éviter d'avoir une perte de résistance, il existe une quantité optimale de fibres à ajouter. En effet, l'ajoute de quantité exagérée de fibres, diminue la masse volumique. Il y aura une insuffisance de points de contact entre les fibres et la terre. D'où la diminution de la résistance de la terre, car les déformations ne seront plus transmises correctement.

- **Stabilisation chimique :**

La stabilisation chimique est garantie par l'ajout de matériaux ou de produits chimiques qui modifient les caractéristiques de la terre. Elle est garantie soit par une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté, soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut mentionner, principalement du ciment, de la chaux, du bitume et des sous-produits industriels.

### **1.3.3 Propriétés de la stabilisation de la terre**

Les propriétés sont variables d'une terre à l'autre. Ils dépendent de la nature et de la combinaison complexe des fractions granulaires qui les constituent. En effet, le pourcentage principal granulaire d'une terre détermine souvent ses propriétés fondamentales et gouverne son comportement. Certes, on distingue des propriétés chimiques liées à la présence des « sels, oxydes, carbonates ou sulfates ». De plus, diverses propriétés physiques sont considérées. On note : « la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité, le pouvoir adsorbant, la perméabilité, le retrait linéaire, la diffusion capillaire, la résistance sèche et d'autres encore ». Cependant, la connaissance de ses propriétés « chimiques et physiques » aide à préciser la qualité et le comportement d'une terre pour usage en construction [20]. En revanche, on observe que la connaissance exhaustive des propriétés chimiques et physiques d'une terre n'est pas toujours nécessaire.

Pour guider le choix des constructions en terre, plusieurs essais en laboratoire doivent être entrepris. Le « Règlement parasismique des constructions en terre » marocain RPCT [28] et « le traité de la construction en terre » fixes des valeurs typiques appelées « critères d'aptitude » que le laboratoire doit vérifier pour valider le choix du matériau. Le Tableau 1 résume les critères à vérifier pour une construction en pisé [29].

Propriétés	Facteur	Valeur minimale	Valeur maximale
Granularité	Gravier	2 %	10 %
	Sable	32 %	58 %
	Limon	8 %	16 %
	Argile	8 %	26 %
Plasticité	Ip	7 %	29 %
	W <sub>L</sub>	-	50 %
	W <sub>P</sub>	10 %	-
	W <sub>opt</sub>	7 %	16 %
Compressibilité	D <sub>max</sub>	1,7t.m <sup>-3</sup>	2,1 t.m <sup>-3</sup>
Argile active	VB	1,5	5

Tableau 1 : Critères Critères d'adéquation pour la construction en terre

Il convient en fait de bien connaître quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont [3] :

- **Texture ou granularité :**

Paramètre mesuré par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, silts) et par analyse sédimentométrique pour les fractions fines argileuses. Les éléments résistants du matériau sont les graviers et les sables. Les argiles quant à eux garantissent la cohésion de la totalité et vérifient la plasticité et la façon dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles contrôlent le retrait et le gonflement [30].

Des fuseaux granulaires de référence sont définis d'après les retours d'expérience sur les procédés de construction en « terre ». C'est pourquoi, Il est considérable de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques (Figure 1-4). Toutes les recommandations situent le pourcentage commun d'argile entre 10 % et 22 % pour les briques de terre comprimé et entre 10 % à 15 % pour le pisé.

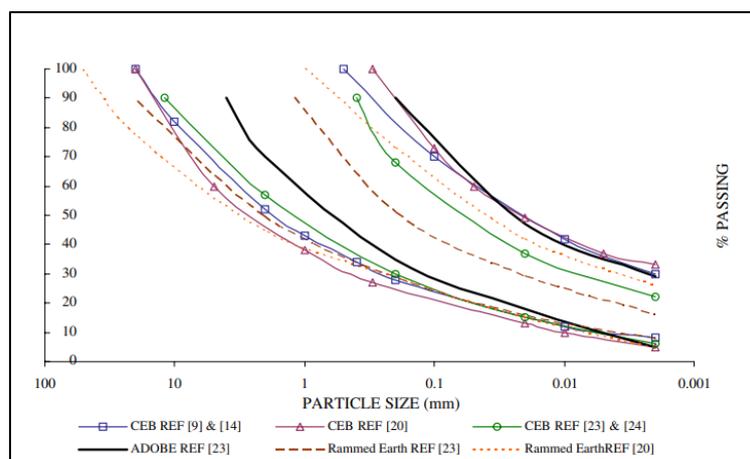


Figure 1-4 : Nomogrammes de granularité montrant les zones recommandées pour la distribution granulométrique des sols pour les blocs d'adobe, pisé et les blocs de terre comprimée [31] [32] [33] [20] [34]

Les silts ont une fonction intermédiaire, moins nette. La classification des fractions des grains adoptés par un grand nombre de laboratoires et référencée aux normes (A.S.T.M, [3] [35]) est la suivante Tableau 2 :

Cailloux	200 mm - 20 mm
Graviers	20 mm - 2 mm
Sables grossiers	2 mm - 0.2 mm
Sables fins	0.2 mm - 0.06 mm
Silts	0.06 mm - 0.02 mm
Silts fins	0.02 mm - 0.002 mm
Argiles	0.002 mm – 0 mm

Tableau 2 : Classification des fractions des grains référencée aux normes (A.S.T.M, [3] [35])

- **La plasticité :**

La plasticité est la propriété de la terre à endurer des déformations sans réponse élastique marquante caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. En effet, la plasticité d'une terre ainsi que les limites entre divers états de consistance sont données par la spécification des « limites d'Atterberg : limite de plasticité LP, limite de liquidité LL, l'indice de plasticité IP ». En outre, les « limites d'Atterberg » sont des propriétés essentielles pour la typologie des « sols fins » et sont employées pour la reconnaissance et la classification des sols. De plus, ces limites sont utilisées pour contrôler le comportement des mélanges de sols ainsi que les propriétés de compressibilité [36]. La (Figure 1-5), représente les zones des « limites d'Atterberg » des bâtisses en terre. Comparativement à des modes d'édification en « terre » plus sèche comme le BTC ou le mur en pisé qui ont une plasticité presque semblable, l'emploi de la « terre en adobe » requiert une limite de liquidité et un indice de plasticité plus considérable. En général, une terre de construction doit avoir une « limite de liquidité LL » comprise entre 32 à 46 % et un « indice de plasticité IP » compris entre 16 à 28 % [37].

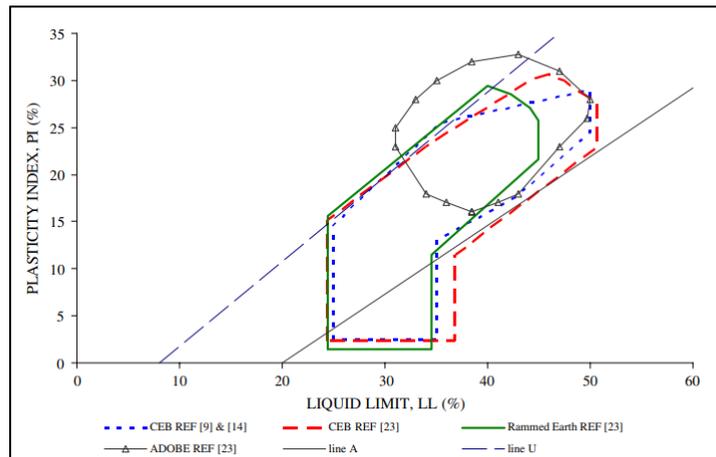


Figure 1-5: Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [37]

Pour un sol à grains fins, ou pour un sol à gros grains contenant une modeste teneur en argile, une faible augmentation de l'humidité au-dessus de la limite plastique endommage les forces d'attraction, qui génèrent la résistance au cisaillement. Cela implique que la différence entre la « limite de plasticité » et la « limite de liquide » est faible et « l'indice de plasticité » est également faible. En revanche, il faut une quantité considérable d'eau pour détruire les forces d'attraction pour un taux élevé d'argile dans un sol, c'est le cas d'un « indice de plasticité » augmenté. Ainsi, pour mesurer indirectement les quantités et les affinités de l'humidité de l'argile dans le sol, on a recours à l'indice de plasticité. La plupart des argiles ont des valeurs élevées de l'indice de plasticité tandis que les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles. Finalement, les sols qui ont des valeurs élevées d'IP sont généralement très compressibles et très cohérents et très plastiques. Un sol plastique est considéré comme cohérent [38].

- **La compressibilité :**

La compressibilité d'une terre est son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donné. Une fois, le matériau terre est comprimé, son indice des vides décroît lorsque le volume est assujéti à l'effet d'une force. En effet, plus la porosité de la « terre » est coincée, moins « l'eau » a la possibilité d'y pénétrer. Ceci implique que la densité de la « terre » pourrait être éventuellement augmentée. La compressibilité est une propriété qui dépend de l'interpénétration plus étroite des particules qui limitent les risques de déséquilibre du système sous l'action de l'eau. Cependant, pour permettre le réarrangement et la lubrification des grains, leurs teneurs en eau doivent être suffisantes afin d'occuper le moins de place possible. De ce fait, les vides seraient remplis d'eau et la « teneur en eau » ne doit pas

non plus être trop importante. L'essai Proctor, l'essai le plus largement utilisé pour évaluer l'aptitude d'un sol à être compacté est beaucoup plus adapté aux sols pulvérulents.

- **La cohésion :**

La cohésion d'une terre est la capacité de ses particules à se maintenir conjointement chaque fois que l'on pratique sur le matériau une contrainte de traction. Certes, la cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier qui connecte les grains inertes entre eux. En effet, cette propriété se mesure par l'essai de traction à l'état humide. Elle est donc tributaire du volume et du caractère collant des argiles. Les mortiers grossiers sont classés de la façon suivante [3] :

- Mortier sableux ;
- Mortier maigre ;
- Mortier moyen ;
- Mortier gras ;
- Argiles.

#### **1.4 Terre-paille : un matériau composite**

Le choix des matériaux appropriés pour la construction est un bon remède pour réduire leur répercussion sur l'environnement et garantir un milieu intérieur confortable. Pour cela, l'emploi des matériaux composites composé principalement de fibres végétales (la paille) est une bonne solution dans l'inquiétude de protéger la santé de l'homme, d'assurer les exigences de bien-être et de commodité et de réduire les impacts environnementaux [39]. L'agencement de fibres naturelles avec d'autres matériaux pour constituer des composites date depuis longtemps. En effet, 1500 ans avant Jésus-Christ un mélange d'argile et de paille pour édifier des bâtiments rigides et durables était déjà manipulé par les colons mésopotamiens et les premiers Égyptiens. La paille a continué à servir de renfort aux produits des composites antiques comptant la poterie et les pirogues [40]. D'ailleurs, la terre crue peut être étudiée comme un matériau composite, car sa cohésion est acquise par la combinaison d'une structure, composée des grains et d'une matrice, constituée de la pâte composée par les argiles et l'eau. Cela justifie de classer ce matériau dans le groupe des bétons (le béton de terre, constitué d'un liant et d'une armature granulaire).

À l'échelle microscopique, les matériaux composites sont souvent des matériaux solides composés d'un mélange de deux ou plusieurs matériaux aux propriétés supplémentaires [41]. Cette union leur attribue des propriétés physiques, que chacun des éléments considérés séparément ne détient pas [41]. Ces caractéristiques dépendent des propriétés des matériaux qui les composent, de leur répartition géométrique et de leurs relations mutuelles.

En général, la « phase discontinue » du matériau composite est plus dure avec des propriétés physiques autres que celles de la « phase continue » [41]. Cette dernière s'appelle « matrice » ; la phase discontinue est nommée « charge ou matériau renforçant » [41].

Enfin, les renforts garantissent le comportement mécanique dans les matériaux composites. Ils sont la plupart du temps en forme de fibres et aident à augmenter la « résistance mécanique et la rigidité » de la composant au sein desquels ils sont intégrés [42]. Ils sont distincts des charges, qui sont sous forme de « composantes fragmentaires, de poudres ou de liquides » et qui font varier une propriété de la substance à laquelle ils sont joints [41] (Figure 1-6). Les matériaux composites peuvent être classifiés, d'après « leur forme ou la nature des composants » [42].

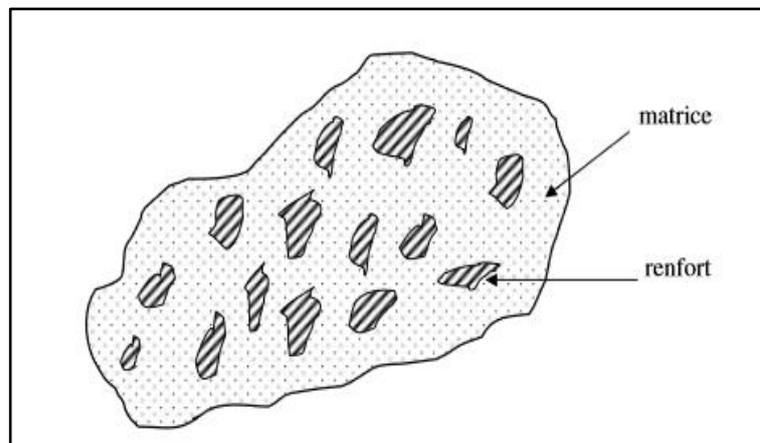


Figure 1-6 : Matériaux composites

### 1.4.1 Classification suivant la nature des constituants ou composants

Les matériaux « composites » peuvent être répartis selon le type de la « matrice ». Soit en composites à matrice « organique, métallique ou minérale » [41]. Plusieurs renforts sont reliés à ces matrices. Aujourd'hui, seulement quelques couples de combinaisons ont un emploi industriel, d'autres font l'objet d'investigation dans les laboratoires de développement et de recherche. Les composites à « matrice organique » sont employés dans les secteurs où les

températures n'excèdent pas « 300 °C », alors que les composites à « matrices métalliques ou minérales » sont employés en dépassant ces températures [43] [44].

## **1.4.2 Classification suivant la forme des constituants**

Les composites sont rangés en deux grands groupes selon l'aspect des constituants : « matériaux composites à fibres et matériaux composites à particules » [45].

- **Composites à particules :**

Lorsque le renfort a un aspect de particules, le matériau est dit composite à particules. Cependant, contrairement aux « fibres » ; une « particule » ne dispose pas de dimension favorisée. En effet, les « particules » sont souvent employées pour faire progresser certaines propriétés des matériaux comme « la tenue à la température, la rigidité, la résistance à l'abrasion, etc ». Par conséquent, la décision d'associer une matrice à des particules provient des caractéristiques souhaitées du composite. Les « particules » ont la possibilité d'être répertoriées selon leur « forme géométrique » [43] [45] :

- **Particules sphériques :**

Pour éviter les concentrations des contraintes, l'utilité de la forme sphérique réside en la réduction de la sensibilité des fissures dans la matrice. Les « sphères » détiennent la plupart du temps un « diamètre compris entre 10 et 150  $\mu\text{m}$  » [41]. Elles ont la possibilité d'être en « verre, en carbone ou en matière organique » [41].

- **Particules non sphériques :**

Elles sont intégrées sous un aspect en « écailles de dimensions transversales de 100 à 500  $\mu\text{m}$ , et d'épaisseur de 1 à 20  $\mu\text{m}$  » [41].

Le mica est l'un des matériaux les plus explorés. Il est généralement joint à des « résines thermoplastiques ou thermodurcissables » [41]. Ce genre de composite est fréquemment employé dans des applications « électriques ou électroniques ».

- **Composites à fibres :**

Grâce à leurs propriétés mécaniques combinées la plupart du temps à une densité minime, le groupe de matériaux « composites à fibres » n'a pas renoncé à sa progression depuis leurs apparitions. En considérant le rapport positif « qualité-prix » des composites à fibres, une

grande gamme d'applications a été étendue dans plusieurs domaines : « l'automobile, l'industrie aéronautique, le ferroviaire, le maritime, le bâtiment, l'ameublement, la décoration, etc. » [46]. Ainsi, les fibres sont exploitées soit sous forme de « fibres continues : fibres longues », soit sous forme de « fibres discontinues : fibres courtes, coupées, etc. » [41](Figure 1-7).

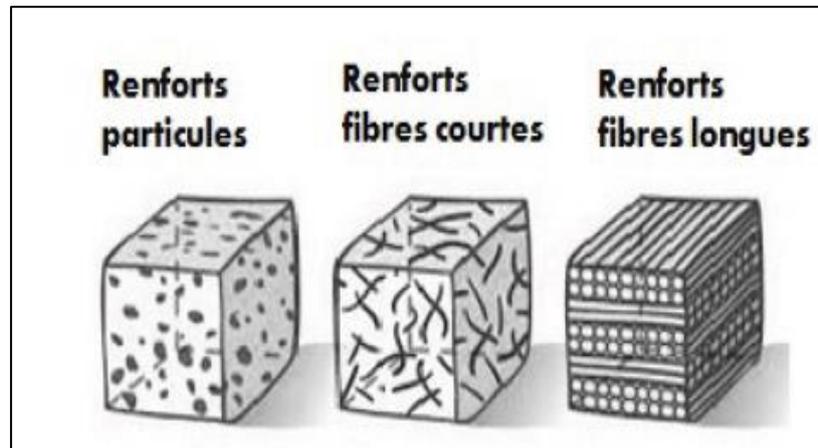


Figure 1-7 : Matériaux composites à base de fibres naturelles

### 1.4.3 Fibres

Les fibres sont caractérisées par un diamètre au moins trois fois inférieure que leurs longueurs. Le nom « fibres » désigne une famille étendue de matériau qui a été introduite dans le commerce comme récentes applications. En effet, elles sont réparties suivant leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc.), leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur dimension (macro ou microfibre) et aussi selon leurs caractéristiques mécaniques. Cependant, pour l'emploi de fibres, il est nécessaire de considérer la compatibilité de la « fibre avec la matrice » et le mode de performance du « matériau composite ». Notre étude s'oriente vers l'étude des fibres d'origine naturelle et plus particulièrement vers la fibre paille.

#### 1.4.3.1 Rappel sur les fibres naturelles

Les fibres d'origine naturelle sont des matériaux renouvelables, neutres vis-à-vis des émissions CO<sub>2</sub>, ont la possibilité de fournir des propriétés de renfort dans les composites. Nous proposons alors de présenter un rappel sur « les fibres naturelles ». Les « fibres naturelles » peuvent être subdivisées en trois partis, d'après leur provenance (Figure 1-8) Baley [47] :

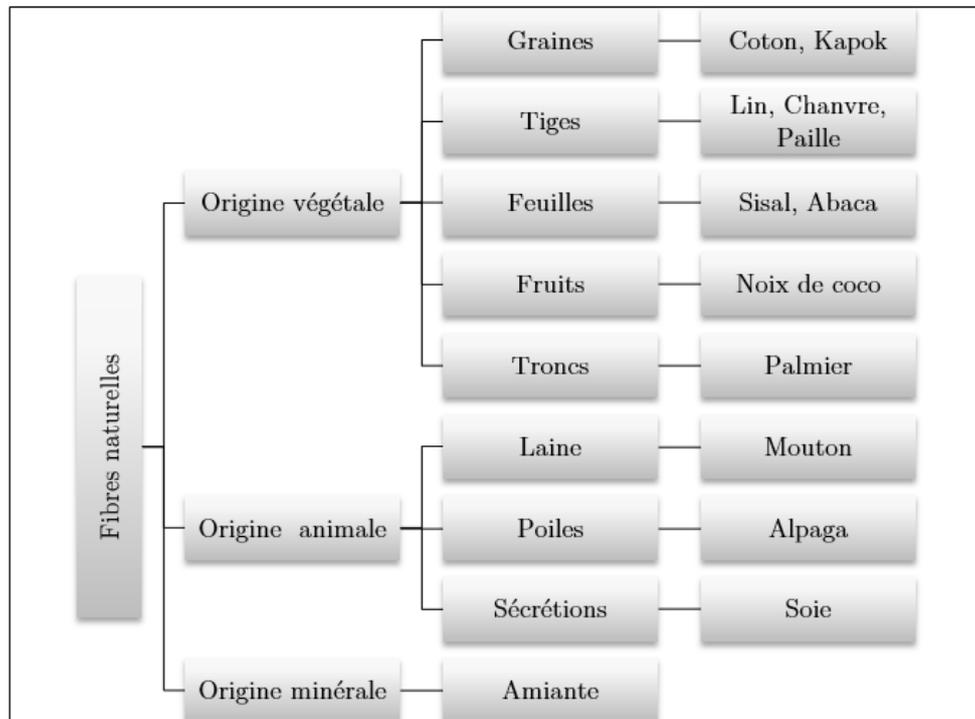


Figure 1-8 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine [31]

L'utilisation des fibres naturelles et en particulier des fibres végétales, comme renfort de matériaux composites présente plusieurs avantages. Tout d'abord, ces fibres sont à faible coût et leur usage en construction représente de nouveaux débouchés pour les matières agricoles et ils sont largement disponibles. D'autre part, intégrées dans les matériaux composites, les fibres végétales permettent de réduire les impacts environnementaux par rapport à des matériaux composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, ayant un bilan carbone neutre et demandant une faible quantité d'énergie pour leur production.

- **Définition de la fibre végétale :**

Étant des « structures biologiques fibrillaires », les fibres végétales sont constituées de « cellulose, hémicelluloses, de pectines et de lignine », en combinaison proportionnellement minime « d'extractible non-azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales ». Les proportions des constituants des « fibres » sont déterminées selon « l'espèce, l'âge et les organes de la plante » [48].

- **Forme de la fibre végétale :**

Les dimensions des « fibres végétales » résultent des conditions de « croissance de la plante et de son état de maturité ». En effet, d'un point de vue « morphologique », la « fibre végétale »

montre une variation conséquente selon son « origine » [49]. Dans une même « fibre végétale », le diamètre à la possibilité de présenter un changement considérable [50] (Figure 1-9). La « fibre végétale » se qualifie également par la variabilité de « l'épaisseur de sa paroi cellulaire » [51].

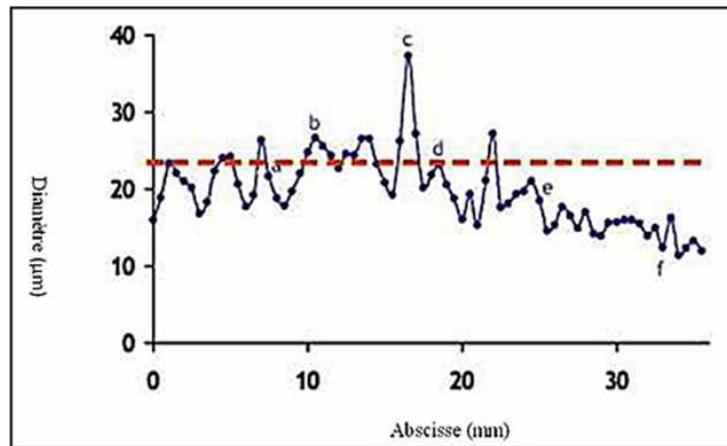


Figure 1-9 : Variation du diamètre le long de la fibre de lin [50]

En effet, la forme des « fibres végétales » peut être une donnée essentielle pour comprendre parfaitement les « transferts de contrainte » aux connexions « fibre-matrice ». La (Figure 1-10) montre l'exemple d'une « structure torsadée » d'une fibre de coton. D'autres fibres ont des morphologies encore plus compliquées. La morphologie des fibres végétales est donc un problème important et péniblement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des matériaux composites renforcés par de telles fibres [52].

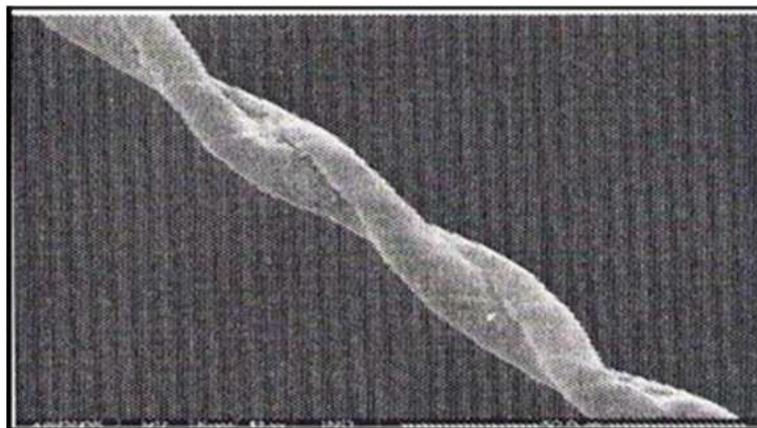


Figure 1-10 : Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [52]

- **Structure de la fibre végétale :**

La « fibre végétale » est considérée comme un « matériau composite ». Les « couches de microfibrilles cellulosiques » partiellement « cristallines » composent le renfort du composite.

Le renfort est entouré d'une « matrice polysaccharidique amorphe » qui est alliée par des « liaisons hydrogène et covalentes à la lignine » [53]. La « fibre végétale » est constituée de diverses surfaces parallèles au pivot de la « fibre » et placées en couches chevauchées dans le « sens radial » [49]. Ce sont ces diverses couches qui composent la « lamelle mitoyenne, la paroi primaire et la paroi secondaire » [49]. Ces couches encadrent un « lumen » de diamètre changeant suivant le type [49]. « La paroi secondaire est composée de trois sous-couches de microfibrilles S1, S2, S3 » [54] (Figure 1-11).

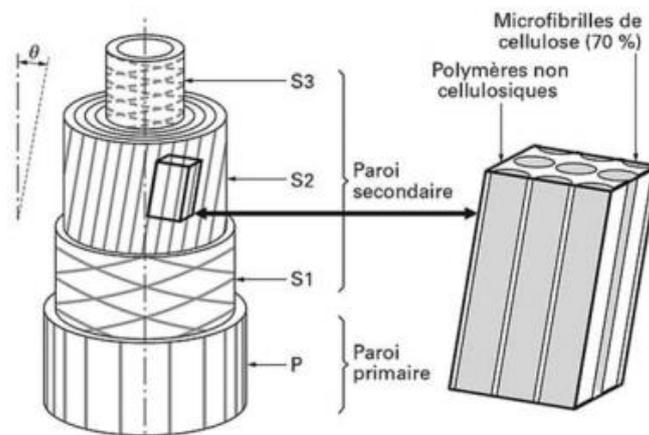


Figure 1-11: Schéma de la microstructure d'une fibre végétale Baley, [54]

#### 1.4.3.2 Effet de la stabilisation par les fibres naturelles

Depuis longtemps, les fibres naturelles ont généralement été employées dans la fabrication et la stabilisation des adobes ainsi que dans d'autres produits de terre [54] [55]. En réalité, les fibres ont un rôle multiple, d'une part le volume qu'elles occupent diminue la densité du mur ce qui améliore ses qualités isothermiques [56] et d'autre part, elles augmentent la « résistance à la traction », par conséquent la souplesse du matériau. En effet, une terre armée sera capable de subir des déformations importantes sans se fissurer, alors qu'une terre ordinaire ne peut supporter que de faibles efforts de flexion. Cette élasticité empêche le craquelier du mur au séchage. Les fibres permettent la répartition des tensions provoquées par le « retrait de l'argile » dans l'ensemble du matériau.

On cite quelques études qui ont visés l'ajout des fibres naturelles :

Ghavami et autres. [55] se sont intéressés à l'étude d'un sol, sans fibre et stabilisé parfois avec des fibres de sisal et d'autres fois avec des noix de coco. Ils ont constaté que la rupture du sol non-fibre est très rapide et presque sans avertissement. En revanche, en cas de sol avec fibres, ils ont constaté qu'une fois la charge de rupture a été atteinte, il y a toujours déformation des

échantillons. Ces chercheurs ont justifié ce phénomène par la répartition des forces internes de la matrice du sol vers les fibres de renforcement.

Yetgin et autres. [56] ont étudié cinq différents types de sols stabilisés par la paille. Ils ont constaté qu'avec l'augmentation de la teneur en fibres, il y a une baisse des résistances à « la compression, à la traction et du retrait ».

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité ainsi que la résistance à la traction (Ramaswamy [57] ; Ziegler [58] ; Filho [59]).

D'après les recherches de Stulz et Mukerji sur les types de stabilisants [60]. Ils ont identifié la paille et les autres fibres végétales comme une importante catégorie de stabilisants des BTC. Cependant, ils n'ont pas justifié leurs travaux par des résultats de recherche.

Sallehan et Yaacob [61] ont constaté que la résistance à la compression des briques avec des « fibres de palmier » a été améliorée par l'addition de « 3 % » de fibres.

Quant à Minke [62], il a découvert que l'ajout de fibres tel que coco, sisal, agave, le bambou et la paille, poils d'animaux ou humains, peuvent aider à diminuer le retrait. Par conséquent, le pourcentage en argile est réduit et un volume nécessaire en eau est absorbée par les pores des fibres. Dans le même contexte, Villamizar et autres. [63] ont montré que l'utilisation des pelures de manioc a augmenté considérablement la résistance à sec des mélanges. Ce qui est nécessaire pour diminuer les chutes causées par les problèmes de la manipulation du BTC.

Pour renforcer quatre différents types de sols sans stabilisant chimique Bouhicha et autres. [64], ont employé dans leur recherche différentes teneurs et longueurs de paille d'orge hachée. L'objectif était d'explorer l'éventualité de développer les propriétés des sols. Les constats des essais ont prouvé les effets positifs de l'addition de la fibre en paille notamment pour réduire le retrait et progresser la « résistance à la compression », lorsqu'une teneur optimale du renfort est employée. En somme, les résistances à « la flexion et au cisaillement » ont également grimpé pour les spécimens avec fibres.

### **1.4.3.3 Fibre paille**

La paille est la section de la tige de certaines graminées, nommées céréales à paille (blé, orge, avoine, seigle, riz) (Figure 1-12). Elle est coupée au moment de la récolte et rejetée, débarrassée

des grains sur le champ par la moissonneuse-batteuse sous forme d'andains. En effet, les fibres en paille sont des chaumes tubulaires, en général creux par résorption de la moelle centrale. Ils se présentent comme des conduits creux avec de longs et plusieurs faisceaux conducteurs de sève. Les chaumes sont arrêtés par des nœuds. Finalement dans l'épiderme il existe une concentration de divers amas de silice microscopiques, mais très durs, rendant les chaumes tranchants.



Figure 1-12 : Fibre Paille

La paille est un matériau local, recyclable, sain, renouvelable offrant un excellent bilan énergétique. C'est la matière ligneuse la plus économe en énergie grise et la moins chère, car elle est traitée comme un déchet de culture. Elle est très appropriée à la construction. Or, tout comme le chanvre, elle ne résiste pas trop à l'humidité.

Par ailleurs, la paille est utilisée par plusieurs procédés traditionnels de construction en terre, notamment lors de la fabrication d'adobes ou la préparation d'enduits, de torchis ou de bauge. Toutefois, les bottes carrées sont utilisées pour le remplissage d'une structure ou bien en paille porteuse. Quant à la méthode de la « terre paille banchée », elle exploite de la « paille en vrac ».

La paille comporte des qualités thermiques certaines, elle a un coefficient de conductivité compris entre 0,050 et 0,075 [W/m.k] [65]. En plus du conditionnement, c'est un matériau thermorégulateur et hygrorégulateur. Elle propose de bonnes « performances phoniques » [65]. La paille est valorisable sous forme de bottes de paille, torchis, ou encore mélange terre-paille (Figure 1-13).

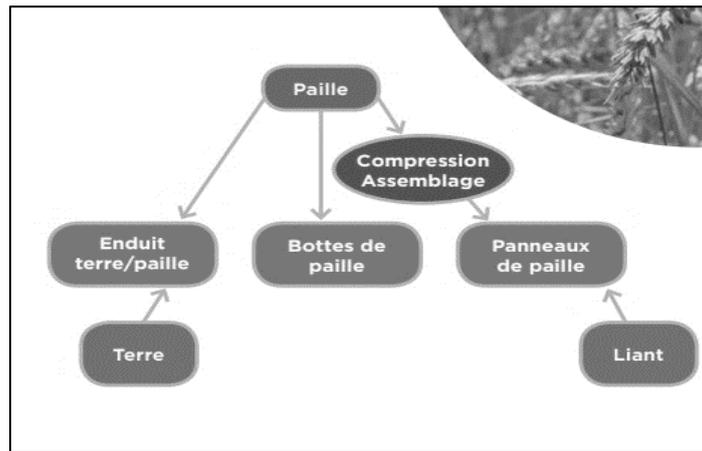


Figure 1-13 : La paille dans la construction : de la production agricole à la mise en œuvre [66].

## 1.5 Conclusion

En conclusion, au vu de l'augmentation continue de la consommation des ressources fossiles et l'envol de leurs prix, le besoin en termes de bâtiment écologique tend nécessairement vers les constructions utilisant des matériaux plus environnementaux, disponibles localement et nécessitant peu ou pas d'énergie. Face à la concurrence des matériaux disponibles sur le marché de construction et ancrés dans les mœurs, la terre doit faire sa place. Plus la terre stabilisée permettra de construire des bâtiments modernes ayant des performances mécaniques et thermiques comparables à ceux du marché de la construction, plus elle gagnera en crédibilité et en compétitivité. Pour cela, la terre doit gagner en connaissance théorique et ingénierie, mais aussi en valorisation. Le chapitre suivant décrit en détail les propriétés thermiques et mécaniques d'un matériau composite.

# **CHAPITRE 2     ÉTUDE THÉORIQUE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET MÉCANIQUES DU COMPOSITE TERRE PAILLE**

## **2.1 Introduction**

Ce chapitre a pour finalité de préparer le lecteur aux problématiques liées à la caractérisation des propriétés « thermiques et mécaniques » du matériau composite en « terre paille ». D'abord, les principes élémentaires du « transfert de chaleur » seront définis de façon à présenter la terminologie et les notations. En second lieu, un état de l'art sur les « modèles de prédiction » de la « conductivité thermique » du matériau composite sera exposé et les « principales méthodes » vont être précisées. En dernier lieu, nous nous préoccupons principalement à la définition d'une « loi de comportement homogénéisée », pour un matériau composite « terre paille » à « élasticité linéaire » composé de deux éléments.

## **2.2 Généralités sur le transfert de chaleur**

La thermique est la discipline de la physique qui traite « les échanges, la génération ou le stockage » de « l'énergie thermique » au sein d'un ensemble, auxquels risquent de s'ajouter des changements à l'échelle de la « matière ». Les « transferts de chaleur » sont le résultat d'un écart de « température » dans un domaine. La détermination de la « température » représente l'une des grandeurs élémentaires de cette discipline. Il existe trois grandes familles de phénomènes physiques qui décrivent les échanges thermiques, à savoir « la conduction thermique, la convection thermique et le rayonnement ». Toutefois, selon « l'état de la matière » et des « conditions expérimentales », un des procédés sera privilégié. Par ailleurs, les « propriétés thermiques » reflètent l'attitude du matériau gouverné par des « transferts stationnaires » à savoir « conductivité thermique, résistance thermique, émissivité, transferts dynamiques, diffusivité thermique et effusivité thermique, etc.... »;

Enfin, les « propriétés thermiques » visent la facilité du matériau à consommer « l'énergie ». Cette « énergie thermique » peut être consommée pour faire monter la température du matériau ou bien générer une transformation des « propriétés physiques » ou bien de « l'état du matériau » tel que « la capacité thermique, l'enthalpie de fusion le coefficient de dilatation thermique ».

## 2.2.1 Conduction thermique

La « conduction thermique » est le mode de « transfert de chaleur » qui domine dans les matériaux solides. En effet, quand une variation de « température » siège au sein d'un système, le regain de la stabilité se reflète par une « uniformisation de la température » : la « chaleur » se répand par contact dans la matière. La conduction a été présentée pour la première fois par Joseph Fourier en 1822 dans son ouvrage « Théorie analytique de la chaleur » [67]. Cette théorie est aujourd'hui connue comme la loi de Fourier et s'écrit :

$$\phi = -k \cdot \nabla T \quad (1)$$

Où «  $\phi$  flux de chaleur en (W) », « (T) température en (K) », «  $\nabla$  correspond à l'opérateur mathématique Nabla » et « (k) conductivité thermique (W/m. K) ».

Cette formule précise le fait que « flux de chaleur » est relatif à la « conductivité thermique » du matériau et donc au « gradient de température ». L'indication du « moins » représente le phénomène du « flux de chaleur » qui se détermine des grandes températures vers les petites températures. La conservation de l'énergie au sein du système, fournie par le « premier principe de la thermodynamique », aboutie sur une formule plus générale nommée « équation de la chaleur » (2) qui domine le fait de la « conduction thermique » dans le milieu [68].

$$K \nabla^2 T + P = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

Où « ( $\rho$ ) masse volumique en [kg/m<sup>3</sup>]; (C) chaleur spécifique massique à pression constante en [J/kg. K<sup>1</sup>]; (P) terme de production d'énergie volumique en [W/m<sup>3</sup>] ».

Cette précédente équation correspond au cas général de conduction thermique dans un matériau anisotrope avec création d'énergie.

En manque du paramètre de « production d'énergie », l'équation antérieure prend donc un aspect fortement plus usuel (l'équation (3)) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C} \nabla^2 T \quad (3)$$

Cette formule combinée à des « conditions initiales » et à des « conditions aux limites », présente la progression « temporelle » et la distribution « spatiale » de la température dans la matière en proportion de ses « propriétés thermo-physiques ».

### **2.2.2 Convection thermique**

La « convection thermique » est le moyen de « transfert thermique » qui se passe plutôt dans les « fluides ». Cependant, deux modèles de convection sont définis : la « convection naturelle » et la « convection thermique forcée ». Ce concept est généralement combiné à des « transferts de chaleur » qui prennent place à « l'interface » entre un « solide et un fluide ». Deux zones sont à distinguer dans le fluide : la fine couche de fluide directement en contact avec le solide, dont la vitesse est proche de zéro « hypothèse de vitesse négligeable aux parois », nommée couche limite et le reste du fluide.

### **2.2.3 Rayonnement**

À la différence des deux mentionnées auparavant, le « rayonnement » est un moyen de « transfert thermique » qui ne requiert pas de matière. En effet, « l'énergie thermique » ne diffuse plus grâce à des porteurs « électrons pour les solides » ou « particules de matière pour les fluides », mais se répand sous l'aspect d'une « onde électromagnétique ». Le « rayonnement thermique » peut donc avoir lieu dans le vide et joue en particulier un rôle prépondérant pour le rayonnement cosmique, notamment pour les applications à très hautes températures.

Enfin, en ce qui concerne notre travail de recherches, notre formule principale sera « l'équation de la chaleur », en considérant le fait que le « transfert thermique » se réalise par « conduction » tout en négligeant les modes de transferts par « convection et rayonnement ».

## **2.3 Propriétés thermiques de la terre**

Un grand intérêt est accordé aux propriétés thermophysiques des matériaux composites. Ce sont des éléments indispensables pour analyser l'attitude des matériaux assujettis à des « transferts thermiques ». De plus, ils décrivent aussi l'aptitude du matériau à « stocker ou à transformer » de l'énergie aidant soit à monter sa température soit à sa transformation « enthalpie de changement d'état, coefficient de dilatation thermique, capacité massique ». Ces éléments découlent bien entendu de la « température » et de la « nature » du corps.

Ainsi, dans ce qui suit, nous allons présenter seulement les paramètres spécifiques au « transfert thermique par conduction ».

### 2.3.1 Conductivité thermique

La « conductivité thermique ( $k$ ) en  $[W/m.K]$  », convient au « flux de chaleur » parcourant un mètre de matériau soumis à un écart de température de « un kelvin » entre la face entrante et la face sortante. En effet, un matériau est classifié comme excellent conducteur de la chaleur pour les grandes « conductivités thermiques ». Ainsi, les matériaux avec «  $k < 0.065 [W/m.K]$  » sont classifiés pour des « isolants », plus la conductivité est basse, mieux le matériau est isolant. La (Figure 2-1), présente les ordres de grandeurs de la « conductivité thermique » pour divers matériaux et différentes formes de la matière selon des modalités normales de « température et de pression ».

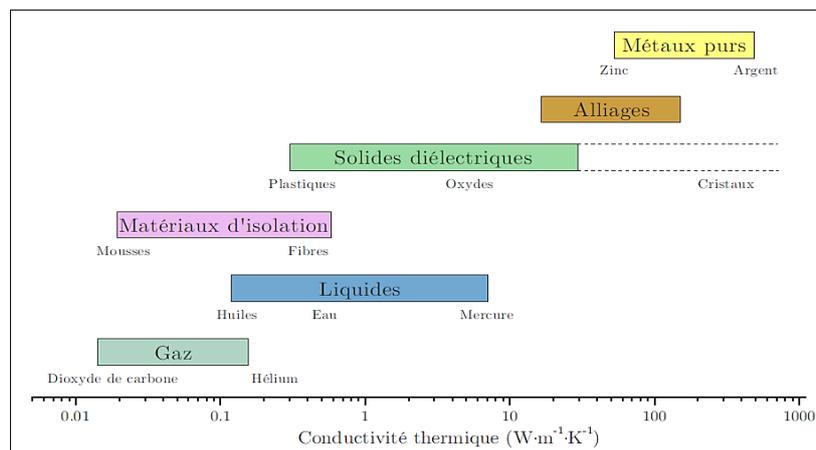


Figure 2-1 : Ordre de grandeur pour la conductivité thermique de la matière sous ses différentes formes [68]

D'après l'état physique de la terre, cette dernière est considérée comme étant un matériau poreux insaturé comportant plusieurs phases : solide, liquide et gazeux, donc, le « transfert de chaleur » est se fait soit par : « conduction, convection, rayonnement ou évaporation/condensation », ce qui rend compliqué la détermination de la « conductivité de la terre ». Par conséquent, la grandeur obtenue par mesure de la « conductivité accessible » est nommée « conductivité thermique apparente ». Cependant, la « conductivité équivalente » est la grandeur de la conductivité d'un « matériau homogène équivalent » au matériau considéré, qui a un « comportement thermique macroscopique » identique.

La terre crue ne peut pas être considérée comme un excellent « isolant » (Figure 2-2), par contre associé à des « fibres végétales » avec de convenables épaisseurs, la terre est éventuellement employée pour « l'isolation » dans le domaine de la construction.

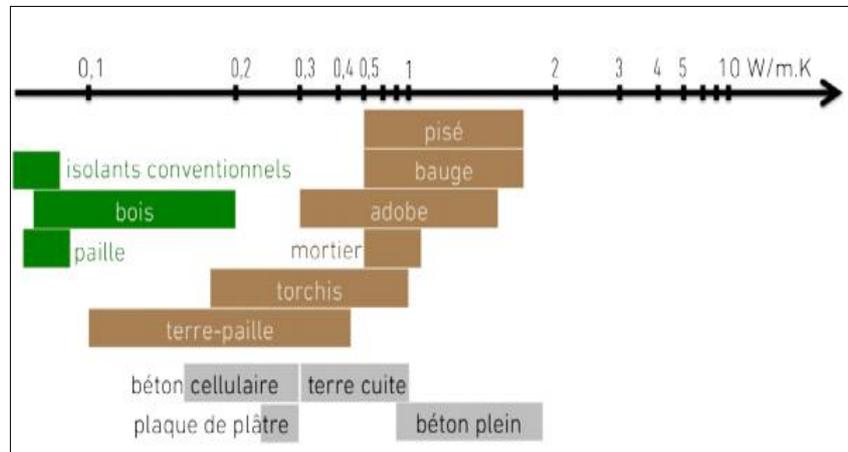


Figure 2-2 : Ordre de grandeur de la conductivité thermique de la terre [69]

Le Tableau 3 énumère toutes les grandeurs de la « conductivité de la terre » repérées dans les études scientifiques moyennant plusieurs façons de mesurage expérimentales.

Référence	Terre	Régime	Technique de mesure	Teneur en eau	T°(C)	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$k$ [W/MK]
[70]	Pisé	Stationnaire	Méthode des boîtes	Sec	19-21	1276-1879	0.3-0.93
[71]	Torchis	Stationnaire	Méthode fluxmétrique	Sec (70°)	23	1217-1724	0.26-0.54
[71]	Pisé	Stationnaire	Méthode fluxmétrique	Sec (70°)	23	1903	0.42
[71]	Enduit	Stationnaire	Méthode fluxmétrique	Sec (70°)	23	1223-1838	0.34-0.51
[71]	Torchis	Stationnaire	Méthode fluxmétrique	0.63-2.57%	23	1217-1724	0.28-0.52
[71]	Pisé	Stationnaire	Méthode fluxmétrique	1.40%	23	1903	0.53
[71]	Enduit	Stationnaire	Méthode fluxmétrique	0.6-1.17%	23	1223-1838	0.35-0.51
[72]	Bauge	Transitoire	Fil chaud	Ambiante	Ambiante	1230-1800	0.37-0.55
[73]	Adobe	Transitoire	Fil chaud	Ambiante	Ambiante	800	0.24
[74]	Pisé	Stationnaire	Plaque chaude	Sec H=90%	?	2210	0.91-1.22
[74]	Torchis	Stationnaire	Plaque chaude	Sec H=90%	?	660	0.14-0.25
[74]	Adobe	Stationnaire	Plaque chaude	Sec H=90%	?	1933	0.66-0.75
[75]	Pisé	Stationnaire	Plaque chaude	Sec H=5%	?	1794	0.5-0.91
[76]	Bauge	Transitoire	Sonde tritige	1.17%	20	1660	0.76
[76]	BTC	Transitoire	Sonde tritige	?	24	1960	1.64
[77]	Pisé	Transitoire	Sonde monotige	Sec	20	1600-2200	0.69-1.41
[77]	Torchis	Transitoire	Sonde monotige	Sec	20	600-1400	0.21-0.55
[78]	Pisé	Stationnaire	Plaque chaude	?	?	1810	1.04
[79]	BTC	Stationnaire	Disque de Lee	?	?	1600-1900	0.5-1.5
[80]	Compacté	Transitoire	Fil chaud	2.15-2.4%	20	1857-2100	1.02-1.36
[80]	Terre-chanvre	Transitoire	Fil chaud	0.00%	20	537-1236	0.11-0.5
[80]	Terre-chanvre	Transitoire	Fil chaud	0.45-2.53%	20	537-1236	0.12-0.54

Tableau 3 : Grandeurs mesurées des conductivités thermiques

Cheikhi et autres [81] ont mesuré au sud du Maroc la « conductivité thermique » d'un mur en terre paille d'épaisseur 0,4 m. la valeur trouver est de « 0,463 [W/m.K] ».

EL Harrouni et autres [82] ont étudié un modèle d'une maison traditionnelle située à la ville de Rabat. La conductivité thermique de la terre crue pisé est de « 0,8 [W/m.K] ».

La « conductivité thermique » de la « terre sèche » émane a priori de « sa masse volumique ainsi que sa porosité ». Celle-ci est aux alentours de « 1,3 [W/m.K] pour des terres hautement denses de 2200 [kg/m<sup>3</sup>] » et a la possibilité de baisser jusqu' à « 0,10 [W/m. K] pour des mixtures terre-chanvre ou terre-paille de 500 [kg/m<sup>3</sup>] ». Le Tableau 4 présente les « conductivités moyennes » ainsi que des différences de mesures pour certaines « masses volumiques ».

La conductivité accroit avec la « teneur en eau ». En effet, il est possible qu'elle arrive à une valeur de « 1,0 [W/m. K] pour un pisé de 1800 [kg/m<sup>3</sup>] » quand la « teneur en eau » arrive à un pourcentage de « 2 % ». Notons que, pour une égale variation de « teneur en eau », l'écart de conductivité est repéré selon « chaque terre ».

$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$k_{moy}$ [W/m.K]	$k$ [W/m.K]
500	0.10	0.10-0.15
800	0.20	0.15-0.25
1000	0.25	0.20-0.30
1400	0.45	0.30-0.50
1600	0.6	0.50-0.70
1800	0.8	0.50-1.00
2000	1.00	0.70-1.40
2200	1.3	0.80-1.70

Tableau 4 : Valeurs moyennes de conductivité thermique pour plusieurs masses volumiques de terres [83]

### 2.3.2 Inertie thermique

L'inertie thermique est la capacité à « stocker de la chaleur » et à la « restituer » lentement. Elle permet de déphaser les variations de températures à l'intérieur de la bâtisse par rapport à son extérieur et d'amortir les variations de température. Ainsi, les murs exposés au soleil emmagasinent de la chaleur pendant la journée et la restituent doucement à l'intérieur de local en fin d'après-midi. En effet, il y a un décalage temporel entre le stockage et la restitution, et un amortissement des amplitudes de variation de températures. Elle résulte de la « capacité thermique massique des matériaux » : plus elle est élevée, plus le matériau apporte de l'inertie au bâtiment. « L'inertie latente » provoquée par l'évaporation et la condensation de l'eau dans le mur peut aussi contribuer à l'inertie thermique d'un mur. Cette propriété spécifique aux matériaux poreux hygroscopiques comme la terre.

### 2.3.2.1 Capacité thermique

La capacité thermique « notée (C) s'exprime en [J/kg. K] ». Elle reflète la capacité d'un matériau à « absorber de la chaleur » et à « s'échauffer » et agit dans les sujets « thermiques instationnaires » (équation (4)).

$$C = \frac{1}{m} \frac{dQ}{dT} \quad (4)$$

Dans la revue de la littérature, deux termes réfèrent à la capacité thermique massique : la « capacité thermique massique » dite à « pression constante ou à volume constant ». Dans notre étude de recherche, nous nous référerons à la « capacité thermique massique à pression constante, notée (Cp) ».

La terre est classée en étant un matériau poreux, est composée de trois phases « solide, eau adsorbée, ponts capillaires et gaz ». La « capacité thermique » de l'air est minime par rapport à celle de « l'eau 1,2 [kJ/m<sup>3</sup>. K] à 20 °C, 1 bar contre 4180 [kJ/m<sup>3</sup>. K] pour l'eau ». La participation de « l'air » peut alors être omise, ce qui permet de montrer que la « capacité thermique massique » est distincte de la « macroporosité de l'échantillon ». Cependant, la « capacité thermique volumique » quant à elle, découle de la « masse volumique totale ». Ainsi, la « capacité thermique » est délicatement échangé, à cause de la « microporosité » qui impact la « teneur en eau du matériau ».

JP Laurent [84] a défini la « capacité thermique massique » de différents terres « pisé, terres africaines latéritiques, torchis... ». Il découvre une grandeur constante de « 830 [J/kg. K] à 20 °C » sur des prototypes de « terre sèche » et présente la formule décrite selon (l'équation (5)) en proportion à la « température exprimée en °C » [84] :

$$C_{Terre} = 771 + 1.305T + 1.023 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \text{ [J/Kg. K]} \quad (5)$$

Il a également défini la « capacité thermique de la paille » à « 1600 [J/kg. K] à 30 °C », équation (6):

$$C_{paille} = 1360 + 7.59 \cdot T + 5.467 \cdot 10^{-1} T^2 \text{ [J/Kg. K]} \quad (6)$$

Pour un matériau composite « terre-paille », on peut définir la « capacité thermique » de la façon ci-dessous (équation (7)) :

$$C = 1 - X \cdot C_{terre} + X C_{paille} \text{ où X est la teneur massique de la paille} \quad (7)$$

$C(\theta)$  est estimé à l'état humide de la façon ci-dessous (équation (8)) :

$$C_{\theta} = C_{sec} + \theta C_{eau} \quad (8)$$

Or, dans la recherche bibliographique, à peine on bénéficie de quelques valeurs mesurées sur la « terre crue non stabilisée » :

Une « capacité thermique de 1740 [kJ/m<sup>3</sup>. K] » a été défini par JP Laurent [76] sur des « murs en bauge de 1660 [kg/m<sup>3</sup>] » avec une « teneur en eau de 1,17 % massique » ce qui équivaut à « la capacité thermique massique sèche de la bauge 999 [J/kg. K] ».

Goodhew [85] a utilisé le procédé du « fil chaud » pour l'étude des « caractéristiques thermiques de la terre ». Goodhew et autres. [72] ont déterminé des « capacités thermiques massiques entre 630 à 950 [J/kg.K] » sur trois murs en « bauge différents » à « température et hygrométrie » non contrôlées. La « teneur en eau » n'est pas communiquée et les composants sont inconnus.

Goodhew et autres mesurent, sur des « briques en adobe », une « capacité thermique de 750 [J/kg. K] » [73].

Pour des « blocs comprimés secs », Hutcheon [75] détermine une grandeur de « 804 [J/kg K] ».

La (Figure 2-3) donne quelques grandeurs de la « capacité thermique de la terre crue » ainsi que celles des différents modes de « construction en terre ».

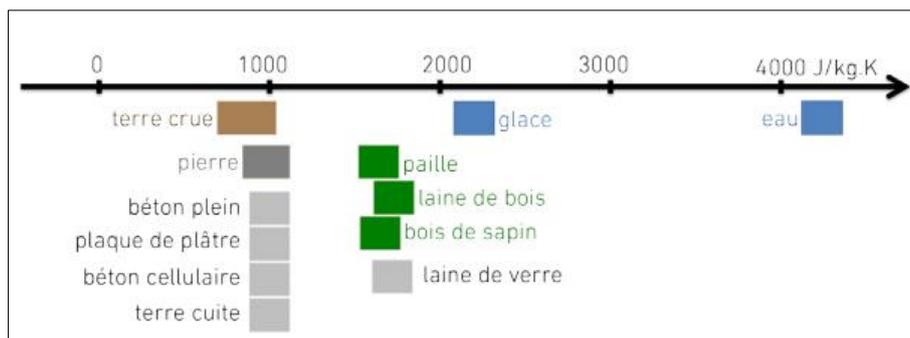


Figure 2-3 : Ordre de grandeur de la capacité thermique de la terre [69]

Concernant la terre crue stabilisée, voici à titre indicatif quelques valeurs de capacité thermique :

Cheikhi [86] a mesuré pour un mur en terre d'épaisseur de 0,4 m stabilisé en paille une capacité thermique de 1128,59 [J/kg. K].

En régime transitoire, Florence [87] a défini une « capacité thermique de 780 [J/kg. K] » pour une « bauge sèche » contenant de la « paille et du ciment » par le moyen d'une mesure de « conductivité au fil chaud » et d'une mesure de « diffusivité par une sonde anneau ».

Une « capacité thermique de 1254 [J/kg K] » a été mesurée par Kafescioglu [88] pour un adobe stabilisé avec 10 % de gypse.

Miriel [89] a déterminé une « capacité thermique de 687 [J/kg. K] » pour de la « bauge stabilisée avec 4 % de chaux et de la paille ».

Les grandeurs généralement acceptées pour la « chaleur spécifique massique de la terre sont de 836 [J/kg K] » d'après Hill [90] et le MOPT Delgado [91], et plus communément « 1000 [J/kg K] » d'après Wessling [92], AFNOR [93].

### **2.3.2.2 Inertie latente**

La structure poreuse et l'affinité physico-chimique de la terre avec l'eau font que cette dernière contient constamment un faible pourcentage massique d'eau sous forme liquide. Ainsi, l'eau est soit elle se trouve sous forme de « ménisques » dans les « porosités les plus fines », soit elle est « adsorbée » sur les « parois des pores ». Finalement, l'eau change d'état au gré des « fluctuations thermiques et hygrométriques » ambiantes : soit elle « s'évapore ou se condense ».

### **2.3.3 Autres paramètres d'intérêt**

Toute une variété de propriétés thermiques permet de mieux s'adapter aux problèmes posés. Ces paramètres résultent souvent de ceux cités précédemment. On citera encore :

- **Effusivité thermique :**

Notée « e », exprimé en  $[J/m^{-2}.s^{-1/2}. K^{-1}]$ . Elle reflète la capacité du corps à « absorber la chaleur » de son entourage. Elle est alors dû à la participation de deux faits à savoir la « conduction thermique ( $k$ ) et le stockage de l'énergie ( $Cp$ ) ». Cependant, une fois la « conductivité thermique » est importante, davantage l'attribution de chaleur du milieu environnant vers le corps sera grand. D'ailleurs, mieux la « capacité thermique à pression constante » est importante, moins la chaleur stockée aidera à « l'augmentation de la température » et donnera l'occasion d'emmagasiner plus. L'effusivité thermique s'exprime selon la formule suivante (équation (9)) :

$$e = \sqrt{k(\rho C_p)} \quad (9)$$

Ce paramètre agit surtout quand il y a contact de deux matériaux à différentes températures. De même, la « température de contact » s'énonce directement en proportion à la « température des deux corps » et à leur « effusivité respective ».

- **Diffusivité thermique :**

La diffusivité thermique est un coefficient de diffusion qui participe de manière directe dans « l'équation de la chaleur ». Notée « (D), exprimée en [m<sup>2</sup>/s] », elle présente la rapidité de la transmission de la chaleur dans le matériau.

Elle s'écrit de la manière suivante (équation (10)) :

$$D = \frac{k}{\rho C_p} \quad (10)$$

Elle donne principalement le temps caractéristique de diffusion en fonction de la longueur caractéristique de diffusion et vice versa (équation (11)).

$$D = \frac{[L_c]^2}{[t_c]} \rightarrow \begin{cases} L_c = \sqrt{D \cdot t_c} \\ t_c = \frac{L_c^2}{D} \end{cases} \quad (11)$$

Par ailleurs, d'autres paramètres thermiques incontournables existent quand on traite des problèmes de convection ou de rayonnement, ce qui ne sera pas le cas dans ce travail de recherche. Nous en citons à titre indicatif les principaux « émissivité thermique, coefficient d'échange convectif ». Pour plus d'informations, nous renvoyons le lecteur vers la référence [94] qui présente dans le détail ces propriétés.

## **2.4 Méthodes de prédiction des propriétés thermiques du matériau composite « terre paille »**

Nombreux sont les travaux de recherches qui se sont intéressés au sujet de l'étude des « conductivités thermiques » des « matériaux composites » [95, 96]. L'étude de la « conductivité thermique (*k*) » pour des matériaux « isotropes et homogènes » est constante en tous sens et en chaque place. En revanche, pour des « matériaux composites », la conductivité change ponctuellement à cause de la présence de « deux phases ». Le matériau composite à la spécificité d'être identifié en une seule partie avec des propriétés fréquemment homogènes.

Par ailleurs, pour les petites particules, il est possible d'évaluer statistiquement la conductivité par le billet d'une moyenne. Par conséquent, la « conductivité thermique » du « matériau composite » est avoisinée par l'intermédiaire d'une « valeur moyenne équivalente ». Ainsi, la notion de la « conductivité thermique effective ( $k_{eff}$ ) » est donc adoptée [95] [97].

Afin de prévoir l'attitude des « propriétés physiques » des matériaux, des formules « théoriques et semi-empiriques » [97, 98] sont employés. Par ailleurs, malgré que le concept mathématique formulé soit le même pour toutes les propriétés, sauf lorsqu'il y a « percolation ». De plus, la « conductivité thermique effective » est une fonction délicate. La conductivité émane de la « géométrie, de la conductivité thermique des différentes phases, de la distribution des inclusions dans le milieu et du contact entre l'inclusion et la matrice ».

En effet, la détermination de la « conductivité thermique effective » des « matériaux hétérogènes » est d'un grand avantage dans de multiples applications de « transfert de chaleur ». Par conséquent, pour définir la « conductivité thermique des composites », plusieurs formules « analytiques et numériques » seront exposés dans les sections suivantes.

Dans ce cas, la caractérisation des « propriétés thermiques équivalentes ( $k$ ,  $\rho$  et  $C$ ) » est essentiel pour les « bilans thermiques ». De ce fait, le « transfert de chaleur » dans le matériau s'opérant par conduction s'exprime sous la forme (équation (12)) :

$$k_{eq} \nabla^2 T + P = \rho_{eq} C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

#### **2.4.1 Homogénéisation des matériaux composites**

L'étude de la réaction d'un « matériau composite » à « l'échelle microscopique » est difficile a déterminé par les « méthodes numériques » contemporaine. Pour contourner cette difficulté, il est essentiel d'échanger le matériau par un « matériau homogène équivalent ». Ainsi, on aura recours à une démarche multiéchelle qui consiste à spécifier le « comportement global » à « l'échelle macroscopique » aux moyens des données obtenues à une « échelle microscopique » [99], [100], [101], [102], [103].

#### **2.4.2 Conductivité thermique effective**

Depuis plus de 100 ans, les prospections théoriques sur la « conductivité thermique effective ( $k_{eff}$ ) » des « matériaux composites » ont été recherchées [104]. Ceci représente une partie de « l'étude bibliographique » suggérée par « Mottram et Taylor » [95]. D'ailleurs, pour calculer

la « conductivité thermique effective » des composites à deux composants, plusieurs « formules théoriques et semi-empiriques » ont été indiqués [105].

En outre, cette propriété résulte de la « conductivité de la matrice, du renfort, ainsi que du pourcentage de remplissage ». En général, toutes les formules sont imaginées en se renvoyant à la « forme, la taille et l'orientation du renfort dans la matrice ».

Notons qu'il existe quatre classes de formules « théoriques » pour la détermination de la « conductivité thermique » : « modèles de premier ordre, de deuxième ordre, de troisième et quatrième ordre ». À cet égard, cette répartition a été améliorée pour des « matériaux composites » désigné au même titre que des « matériaux à deux phases (solide/solide) » contenant des « inclusions (phase 2) » éparpillées dans la « matrice (phase 1) ». Enfin, la « différence de température », de même que le « flux thermique » dans le matériau sont « isotropes ».

En effet, les principales théories emploient un développement mathématique fondé sur différents critères essentiels [106], à savoir :

- Les « phases » des composants sont « macroscopiquement isotropes et homogènes ».
- Les « inclusions » ont toutes un aspect identique.
- Les « deux phases » nécessitent un « contact parfait entre eux ».
- Le composite est composé de « deux phases non poreuses ».
- Les éléments de « transfert par rayonnement et convection » ne sont pas pris en compte.

Pour ce qui est des « modèles de premier ordre ». « O. Wiener [107] » a proposé en (1912) des relations qui assènent une approximation de la « conductivité thermique effective de deux milieux ». Il a considéré un « transfert thermique » dans un « matériau hétérogène », il a proposé d'adapter « l'analogie électrique » dans un « circuit en série ou en parallèle ». Cependant, les « deux phases » sont présumées ordonnées « parallèlement l'une à l'autre ». Ainsi, la « conductivité thermique effective » est donc limitée par les « deux grandeurs ( $k_{inf}$ ) et ( $k_{sup}$ ) ».

Pour le « modèle de second ordre », il tient compte du désordre entre les « phases du composite et la géométrie des inclusions », et intègre dans les formules un coefficient concernant la « géométrie ». Nous mentionnons dans cette classe les modèles de « Bruggemen, Hatta et Taya, Hashin et Shtrikman..., etc ».

Quant aux modèles de « troisièmes et quatrièmes ordres », ils tiennent compte aussi du désordre dans les « phases du composite » et la « géométrie des inclusions ». Ils introduisent alors une expression proportionnelle à une équation « statistique de répartition ».

Enfin, on trouve d'autres modèles de « prédiction de la conductivité effective des composites ». Ce sont les modèles « semi-empiriques ». On mentionne le modèle de « Nielsen et Lewis » qui est défini comme étant l'un des modèles « semi-empiriques » les plus employés. En plus du modèle de « Nielsen et Lewis », plusieurs auteurs ont recouru à « l'homogénéisation auto cohérente » [108]. Le « matériau hétérogène » est rapproché à un « matériau homogène équivalent » afin de définir ses propriétés. Ainsi, ce « matériau homogène » est contraint de posséder un « comportement thermique global » identique, correspondre aux mêmes « conditions aux limites » que le « milieu hétérogène » et considérer les règles de « conservation de l'énergie » entre le « milieu hétérogène et homogénéisé ».

### 2.4.3 Modèles de prédiction de la conductivité thermique effective

Généralement, les modèles faciles résultent des « lois des mélanges », ils placent l'inclusion « perpendiculairement ou parallèlement » en fonction au sens du « flux de chaleur » (Figure 2-4). Ainsi, des « bornes supérieures et inférieures » de la « conductivité thermique effective » sont prodiguées conformément au « modèle en parallèle [109] ».

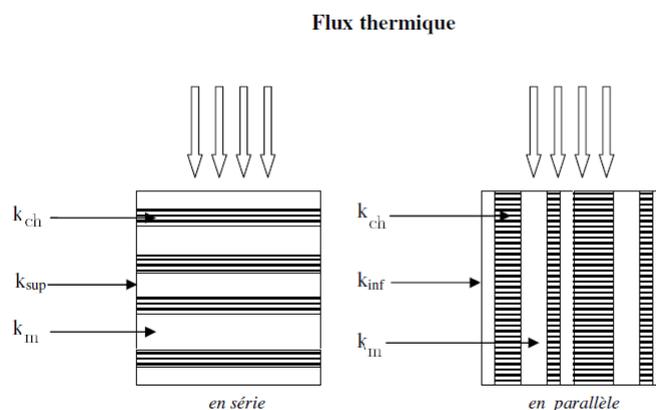


Figure 2-4 : Modèles de conductivité thermique de premier ordre [109]

Dans la mesure où le « matériau composite » est constitué d'une « matrice » et « d'un seul renfort », alors les deux exemples se schématisent tel qu'il est mentionné en dessous.

En ce qui concerne le « modèle en série », l'inclusion est dirigée en direction de « flux » (équation (13)) :

$$\frac{k_{sup}}{k_m} = \varphi_m + \frac{k_{ch}}{k_m} \varphi_{ch} \quad (13)$$

Par ailleurs pour le « modèle en parallèle », l'inclusion est dirigée « perpendiculairement au flux » (équation (14)) :

$$\frac{k_{inf}}{k_m} = \frac{1/k_m}{(\varphi_m/k_m + \varphi_{ch}/k_{ch})} \quad (14)$$

Par conséquent, l'homogénéité n'est en aucun cas perfectionnée au sein d'une « matrice composite », elle est relative à la répartition « granulométrique ». Or, la distribution des composants soumises au hasard est souvent le problème le plus généralisé. D'ailleurs, le « modèle de Maxwell » est le plus rencontré [110] pour des inclusions de « géométrie sphérique », en considérant « l'interférence moyenne » réciproque à travers les « sphères ». Bien que les solutions soient acceptables uniquement pour de minimes taux d'inclusions, le « modèle de Maxwell » a été transformé par « Rayleigh [111] ». Ceci en remplaçant la configuration des inclusions d'une « forme sphérique » à une « forme cubique », en considérant l'effet de quelque « grandeur de propriétés ». En définitive, les mesures sur l'authenticité du « modèle de Rayleigh-Maxwell » pour des rapport d'inclusions plus grands ont été perfectionnés par « Meredith et Tobias [112] ». En effet, le « modèle de Rayleigh-Maxwell » est utilisable pour un éparpillement de « particules sphériques » au sein de la matrice. Par contre, celui de « Meredith-Tobias » ne prend pas en compte la dimension et l'aspect des inclusions éparpillées dans la « matrice ».

Pour des « renforts non sphériques », une formule a été suggéré par « Hashin et Shtrikman [113] », il s'ensuit que leurs études ont été continué par « Reynolds et Hough [114], Polder et van Santen [115] et Hamilton et Crosser [116] ». Par conséquent, d'autres études de recherche se sont également intéressées à la « prédiction de la conductivité à haute température » en renvoyant à des solutions empiriques. Finalement, un modèle « semi-empirique » a été étendu par « Lewis et Nielsen [108] » en changeant celui de « Halpin-Tsai ». Ce dernier modèle est plus approprié pour les « compositions de poudres » et qui considère l'aspect des inclusions et de leurs positions.

Nous exposons des modèles employés tel présenté dans l'énoncé suivant :

- **Modèle de « premier ordre » :**

La théorie de « Maxwell » reliée au tout début au cas de « conduction électrique » dans un « milieu hétérogène » composé de « sphères dispersées dans un milieu continu » a conduit à la détermination de la « conductivité effective du milieu homogène équivalent » (équation (15)) :

$$k_{eff} = k_m \frac{k_{ch} + 2k_m + 2\varphi_{ch}(k_{ch} - k_m)}{k_{ch} + 2k_m - \varphi_{ch}(k_{ch} - k_m)} \quad (15)$$

• **Modèle de « second Ordre » :**

Le modèle de « second ordre » inclut un coefficient proportionnel à la « géométrie » et considère le dérèglement à travers les « phases du composite » et la « géométrie des inclusions ».

« Gurland [117] » décrit la création d'un ensemble de « sphères dispersées » au hasard au-delà de « ( $\varphi_{ch} = 0.35$ ) ».

En reproduisant de la démarche de « Maxwell » et en employant la supposition du dérèglement, « Hashin et Shtrikman » ont prospéré un prototype pour diverses catégories « d'inclusions » [113]. En effet, la répartition au hasard des dimensions n'est pas considérée par le « modèle Hashin et Shtrikman », pourtant elle a des propriétés spécifiques. De plus, la « conductivité thermique » des stimulants est plus élevée à celle de la « matrice ( $k_{ch} > k_m$ ) ». Les stimulants sont des « sphères de rayon ( $r_2$ ) » et de « conductivité ( $k_{ch}$ ) » environnés d'une « coquille de rayon ( $r_1$ ) » et de « conductivité ( $k_m$ ) » (Figure 2-5). La distribution est telle qu'elle remplit tout le volume avec  $\Phi_2 = (r_1/r_2)^3$ . La conductivité thermique effective  $k_{eff}$  s'exprime suivant Hashin et Shtrikman par (équation (15)) :

$$\frac{K_{eff}}{K_m} = \frac{1 + (d-1)\rho_{ch}\beta}{1 - \rho_{ch}\beta} \quad (16)$$

Avec  $\beta = \frac{K_{ch} - K_m}{K_{ch} + (d-1)K_m}$

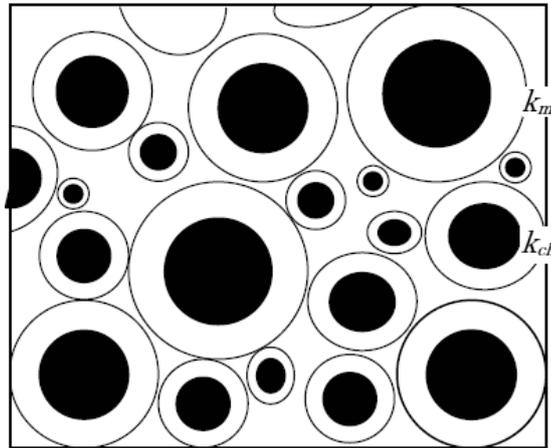


Figure 2-5: Assemblage de sphères ou de cylindres dans un composite selon Hashin pour  $k_{ch} > k_m$ . La matrice est représentée en blanc et la phase dispersée en noir [95] [113] [118].

$d$  : variable équivalent à la taille de l'élément et détermine l'aspect de l'inclusions (Figure 2-6). Dans des conditions de « dispersion sphérique ( $x = y = z$ ) ( $d = 3$ ) », pour les « cylindres ( $d = 2$ ) » et pour « l'ellipse, ( $d$ ) » est assés par la formule ci-dessous :

$$d = \left( \frac{\left(\frac{1}{x}\right) + \left(\frac{1}{y}\right) + \left(\frac{1}{z}\right)}{\frac{1}{x}} \right)$$

Où « (x, y, z) » désignent les orientations de la « particule ellipsoïdale ».

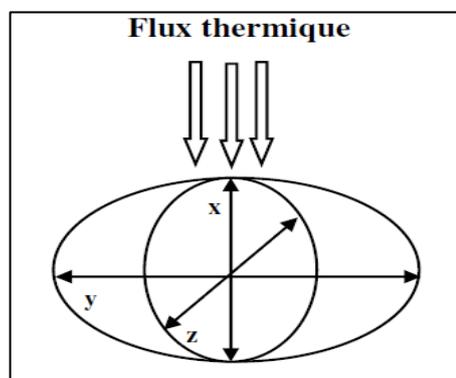


Figure 2-6 : Propagation du flux dans le cas d'une ellipse [95].

- **Modèle de « Hatta et Taya » :**

Les chercheurs « Hatta et Taya [119] » ont amélioré un « modèle de prédiction de la conductivité thermique effective ( $k_{eff}$ ) » pour des « fibres courtes » de différentes axes grâce à l'emploi de la similitude avec les « propriétés mécaniques des matériaux ». Par ailleurs, l'idée de cette démarche est basée sur l'étude d'une grandeur correspondante à la « conductivité thermique » du spécimen en « régime permanent ». Entre autres, cette étude considère l'aspect ainsi que les

interférences entre les inclusions de divers axes (Figure 2-7). En définitive, pour la détermination de la « conductivité thermique » de ce genre de composite, la résolution définitive est donnée d'après « Hatta et Taya » par l'équation (17). Dans l'ensemble « l'inclusion de fibres courtes ayant un aspect d'ellipsoïde ».

$$k_{eff} = k_m \left( 1 - \frac{\varphi_{ch}(k_{ch} - k_m)[k_{ch} - k_m(2S_{33} + S_{11}) + 3k_m]}{3(k_{ch} - k_m)^2} \frac{1 - \varphi_{ch}}{1 - \varphi_{ch} S_{11} S_{33} + k_m} \frac{k_{ch} - k_m}{k_{ch} - k_m} \frac{R + 3k_m}{R + 3k_m} \right) \quad (17)$$

( $S_{ij}$ ) étant un indice propre à la « géométrie des inclusions » et (R) est fourni selon la relation ci-dessous par :

$$R = 3 S_{11} + S_{33} - \varphi_{ch} (2S_{11} + S_{33})$$

Tandis que pour des « inclusions » en aspect de « cylindres ou des fibres », ces facteurs prennent les valeurs suivantes :  $S_{11} = S_{22} = \frac{1}{2}$  ;  $S_{33} = 0$

C'est-à-dire l'équation (17), peut prendre la forme de l'équation (18) :

$$k_{eff} = k_m \left[ 1 + \frac{\varphi_{ch}}{\frac{1 - \varphi_{ch}}{3} + \frac{k_m}{k_{ch} - k_m}} \right] \quad (18)$$

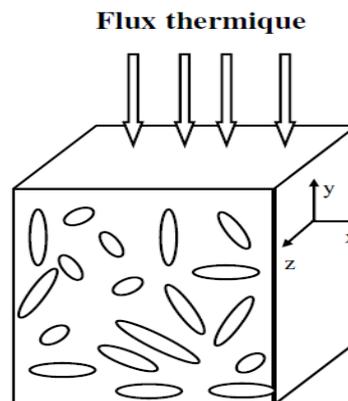


Figure 2-7 : Distribution de fibres courtes orientées dans différentes directions dans la matrice [119]

- **Modèles « semi-empiriques » :**

Un « modèle semi-empirique » formulé par l'équation (19) a été suggéré par « Nielsen et Lewis [99] ». Cette méthode considère « la forme, la distribution et plusieurs genres d'inclusions ». En outre, ils joignent un coefficient de l'influence optimal du « pourcentage volumique ( $\varphi_{ch}$ ) » des stimulants. Ce coefficient est proportionnel à la présence d'une quantité considérable de

« particules de la phase » éparpillée dans la « matrice ». Il est considéré comme étant la limite décisive où les « particules » qui sont en liaison constituent une pâte régulière dans le mélange pour la transmission du « flux thermique ». Le « modèle semi-empirique de Nielsen » se présente comme suite (équation (19)) :

$$\frac{K_{eff}}{K_m} = \frac{1 + AU\varphi_{ch}}{1 - \psi U\varphi_{ch}} \quad (19)$$

Avec,  $U = \left(\frac{K_{ch}}{K_m} - 1\right) / \left(\frac{K_{ch}}{K_m} + A\right)$  et  $\psi = 1 + \left(\frac{1 - \varphi_{max}}{\varphi_{max}^2}\right)$

Le paramètre « (A) » est à proportion de la « géométrie et de l'orientation des particules [120] [121] ». Pour divers genres « d'inclusions », « Nielsen » définit des grandeurs de « (A) ». Le (Tableau 5) expose un aperçu de ces grandeurs. Le « modèle semi-empirique de Nielsen » sera semblable au « modèle théorique de Hashin et Shtrikman » pour des « inclusions sphériques (A = 2,5) ». L'apport essentiel fourni par « Nielsen » touche l'expression qui estime le « pourcentage volumique maximale ( $\varphi_{max}$ ) des charges ».

Types d'inclusions	Direction du flux	A
Cubes	Quelconque	2,0
Fibres aléatoires	Quelconque	1,58
Collectif de sphères	Quelconque	$3.5 / \varphi_{max} - 1$
Fibres	Perpendiculaire	0.5

Tableau 5 : Valeurs de 'A' pour différents types d'inclusions [122].

Enfin, tous les modèles reposent la plupart du temps sur l'expérience. Ainsi, en théorie, toutes les formules améliorées sont des transformations des « modèles de Maxwell et de Meredith ». Il faut mentionner que l'interconnexion « fibre-matrice » est très considérable pour « améliorer les propriétés thermiques ».

- **Homogénéisation « auto cohérente à inclusions simples » :**

En considérant le cas d'un matériau composé « d'inclusions simples », le « modèle géométrique » est formé du « matériau homogène » dominé par un « gradient de température uniforme unitaire (G) à l'infini » et d'une « inclusion sphérique de rayon ( $R_1$ ) » (Figure 2-8).

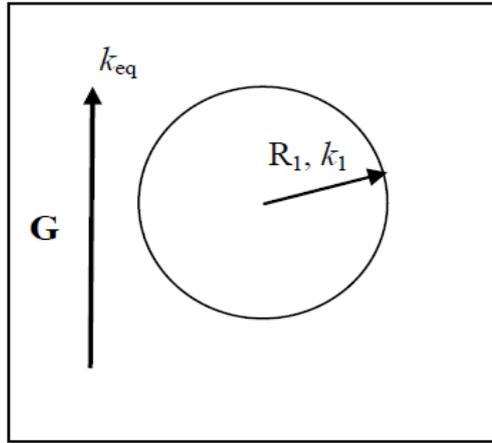


Figure 2-8 : Inclusion sphérique simple dominée par un gradient unitaire (G)

Le « champ de température » obtenu de « l'équation de chaleur en coordonnées sphériques » est représenté selon l'équation (20) :

$$T_i = \left( A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta \quad (i = 1, eq) \quad (20)$$

Ainsi d'après Brini [123] un flux thermique dans chaque phase i est donné selon l'équation (21) :

$$\varnothing_i \ r, \theta = -k_i \left[ \left( A_i - \frac{2B_i}{r^3} \cos \theta \right) - \left( A_i - \frac{B_i}{r^3} \right) \cdot \sin \theta \right] \quad (21)$$

Les « conditions aux limites » exigent que :

Si,  $r=0$   $T_1$  est finie donc  $B_1=0$

Si,  $r=\infty$   $(\overrightarrow{grad})_{eq}$  tends vers G donc  $A_{eq}=1$

Si,  $r=R_1$ ,  $T_1$  est continue donc  $\frac{B_{eq}}{R_1^2} + R_1 = A_1 R_1$

Si,  $r=R_1$ , le flux  $\varnothing_i$  est continu donc  $k_{eq} \left( 1 - \frac{2B_{eq}}{R_1^3} \right) = k_1 R_1$

Un dispositif à deux variables « (A1) et (B1) » est alors donné, dont la résolution est présentée selon (22) :

$$A_i = \frac{3k_{eq}}{k_1 + 2k_{eq}} \quad \text{et} \quad \frac{A_1}{R_1^3} = \frac{k_{eq} - k_1}{k_1 + 2k_{eq}} \quad (22)$$

Dorénavant, on présume que le milieu est composé de deux types « d'inclusions simples (1) et (2) » de « concentrations volumiques ( $\varphi_1$ ) et ( $\varphi_2$ ) », telles que «  $\varphi_1 + \varphi_2 = 1$  ».

La « conservation de flux » dans la totalité du matériau s'exprime (23) :

$$k_{eq}(gradT)_{eq} = \varphi_1 k_1 (gradT)_1 + \varphi_2 k_2 (gradT)_2 \quad (23)$$

En estimant que les « deux inclusions » qui sont gouvernées par un « gradient de température » identique à l'infinie, on peut alors exprimer cette relation selon l'équation (24) :

$$(gradT)_{eq} = \varphi_1 (gradT)_1 + \varphi_2 (gradT)_2 \quad (24)$$

On constate alors la fonction ci-dessous ((25)) :

$$k_{eq}(\varphi_1 (gradT)_1 + \varphi_2 (gradT)_2) = \varphi_1 k_1 (gradT)_1 + \varphi_2 k_2 (gradT)_2 \quad (25)$$

À savoir (26) :

$$k_{eq}(\varphi_1 A_1 + \varphi_2 A_2) = \varphi_1 k_1 A_1 + \varphi_2 k_2 A_2 \quad (26)$$

Donc, on obtient l'équation (27) :

$$\varphi_1 \frac{k_1 - k_{eq}}{k_1 + 2k_{eq}} + (1 - \varphi_1) \frac{k_2 - k_{eq}}{k_2 + 2k_{eq}} = 0 \quad (27)$$

Les variables suivantes sont alors énoncées :  $\alpha = \frac{k_{eq}}{k_2}$  ,  $\beta = \frac{k_1}{k_2}$

Une équation du « second ordre » est alors obtenue, soit l'équation (28) :

$$2\alpha^2 + \alpha(3\varphi_1 - 2 + \beta(1 - 3\varphi_1)) - \beta = 0 \quad (28)$$

La recherche de solution de ce système a permis d'avoir la conductivité thermique équivalente ( $k_{eq}$ ). Pour le cas où ( $k_1$ ) est minime en comparaison à ( $k_2$ ), (28) devient l'équation (29) :

$$2\alpha^2 + \alpha(3\varphi_1 - 2) = 0 \quad (29)$$

On obtient (30) :

$$k_{eq} = \left(1 - \frac{3}{2}\varphi_1\right) k_2 \quad (30)$$

#### 2.4.4 Capacité thermique du composite

La « capacité thermique » s'emploie dans les « régimes transitoires » par contre, la « conductivité thermique » agit en « régime permanent ». En effet, en « régime transitoire », si le « temps (t) » converge à « l'infini », l'élément récupère sa stabilité pour des « conditions initiales » et des « conditions aux limites exigées ». Alors plus d'exactitude dans les solutions

est donnée. Pour donner la « capacité thermique » d'un « matériau composite », la modélisation exige plus de « temps » en vue d'atteindre la stabilité et tolère d'évaluer cette solution. Finalement, les « conditions aux limites » sont la seule modification dans la recherche de solution.

Si l'on veut caractériser la « conductivité thermique » à une « température ( $T_0$ ) », deux « températures ( $T_1$ ) et ( $T_2$ ) », seront exigées aux limites selon l'équation (31) :

$$\begin{cases} T_1 = T_0 - \delta \\ T_2 = T_0 + \delta \end{cases} \rightarrow T_0 = \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (31)$$

L'objectif de ces exigences est de déséquilibrer l'élément avant qu'il ne retourne à son état de stabilité en absorbant une « concentration d'énergie :  $Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}$  ». Ainsi, la « conductivité apparente » sera définie par rapport à cette « énergie » en traitant un seul « volume de contrôle » comme mentionné sur l'équation (32) :

$$\rho_{eq} C_{eq} \frac{\partial T}{\partial t} dx dy = k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) dx \rightarrow \rho_{eq} C_{eq} \frac{\Delta T}{\Delta t} Lx Ly = k_{eff} \left( \frac{\widehat{\Delta T}}{Ly} \right) Lx \quad (32)$$

D'où l'équation (33)

$$k_{eff} = \frac{\rho_{eq} C_{eq} L_y^2 \Delta T}{\Delta t_{RP} \widehat{\Delta t}} \quad (33)$$

Avec :

$$\Delta T = T(x, y, t) - T(x, y, 0)$$

$$\widehat{\Delta T} = T_2 - T_1$$

$$\rho_{eq} = \emptyset C \rho_F + (1 - \emptyset) C \rho_M$$

$$C_{eq} = \emptyset C_F + (1 - \emptyset) C_M$$

$\emptyset$  : Pourcentage volumique d'inclusion dans la « matrice » en (%).

$\Delta t_{RP}$ : Temps (s) qu'il faudra pour arriver à la température  $T_0$  en (K).

Par conséquent, l'élément représentant la « constante de temps ( $\tau$ ) thermique » y participe. L'élément «  $\tau$  » définit la mesure de « temps » et détermine le « temps » de transition de l'état « transitoire » à l'état « permanente ».

Souvent, le « régime permanent » est obtenu pour une mesure « supérieure à  $(3\tau)$  » (Figure 2-9). Selon « Dutreux [124] », différentes approches donnent la possibilité de définir cet élément en effectuant la similitude en compagnie de la solution à un degré de dispositif du « 1<sup>er</sup> ordre ».

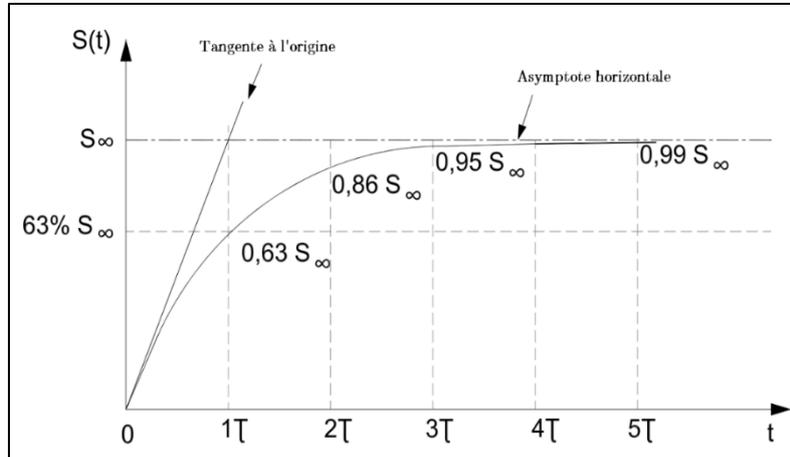


Figure 2-9 : Courbe générale de réponse à un échelon d'un système du 1er ordre [30]

- **Méthode de  $3\tau$**  : l'inclusion aboutit à « (95 %) » de sa grandeur ultime lorsque «  $(t = 3\tau)$  ».
- **Méthode de la tangente au départ** : on marque que la pente est au départ de la courbe. L'inclusion aboutit sa grandeur ultime quand «  $(t = \tau)$  ».
- **Méthode des 63 %** : L'inclusion touche à « (63 %) » de sa grandeur optimale quand «  $t = \tau$  ». Cette méthode est considérée la mieux adéquate, puisqu'on se trouve dans un « milieu non homogène ». Ainsi, la « conductivité thermique ( $k_0$ ) » considérée de repère est déterminée. Pour définir «  $(\tau)$  », on doit chercher la mesure de «  $(t)$  » équivalent à «  $\Delta T_t = 0,63 \delta$  » (équation (33)), que l'on appelle la durée nécessaire pour arriver au « régime stationnaire » (équation (34)) :

$$\Delta T_{RP} = p\tau \quad (34)$$

«  $(p)$  » doit être déterminé pour une matrice sans renfort, grâce à sa « conductivité thermique » maîtrisée. Pour connaître si on est arrivé au « régime permanent », on fixe d'un commun accord l'indice «  $(p)$  ». De cette manière on obtient une grandeur de «  $(k_{eff})$  » selon l'équation (35) :

$$k_{eff} = \frac{\rho C L_y^2 \Delta T}{p\tau \Delta T} \quad (35)$$

Finalement pour une matrice vierge, la « conductivité thermique effective ( $k_{eff}$ ) » obtenue nécessite qu'elle soit équivalente à «  $(k_0)$  ». Alors, avec un dispositif de rapprochement, l'indice

«  $(p)$  » coïncidant avec «  $(k_p)$  » est simple à définir. Ainsi, l'indice «  $(p)$  » sera déterminer une fois pour toutes. Toutefois, il sera employé pour définir toutes les grandeurs de « conductivités thermiques apparentes » des différentes « matrices renforcées », en indiquant que toute « matrice composite » fait usage d'une « constante de temps » spécifique.

## 2.5 Propriétés mécaniques de la terre

La construction en terre rencontre un énorme défi pour l'amélioration de ses performances mécaniques, du fait du considérable nombre d'hétérogénéités qu'elle comporte. Par conséquent, l'analyse d'un tel matériau ne peut passer par une étude directe. Ainsi, selon les formules de prédiction des « propriétés mécaniques » des « matériaux composites », le « matériau réel » est remplacé par un « matériau homogène équivalent », qui a un identique attitude à « l'échelle macroscopique ».

### 2.5.1 Généralités sur le comportement mécanique

Pour bien cerner le « comportement mécanique » d'un « matériau composite », il est indispensable de savoir l'influence de chaque paramètre caractérisant le matériau. Il faut alors proposer une « loi de comportement homogénéisée » constituant la solution d'un « élément de volume » traité au même titre qu'un macro homogène. Cette démarche n'est réalisable que sur des fondements théoriques consistants qui tolère d'annoncer l'impact de chaque paramètre sur les résultats du matériau.

### 2.5.2 Loi de Hooke généralisée

La « loi de Hooke » a été généralisée par « Cauchy (1789-1857) », qui a présenté chaque é du « tenseur des contraintes » comme une fonction « linéaire » des éléments du « tenseur des déformations ». La loi de Hooke est donc aujourd'hui souvent écrite sous la forme équation ((36)) :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{C}} : \underline{\underline{\epsilon}} \quad (36)$$

où  $\underline{\underline{S}}$  est le « tenseur des complaisances » élastiques du matériaux (ses composantes covariantes sont  $S_{ijkl}$ ). Les tenseurs  $\underline{\underline{C}}$  et  $\underline{\underline{S}}$  ont a priori 81 composantes (chaque indice varie de 1 à 3). Cependant, les « tenseurs des contraintes de Cauchy » et ceux des « déformations » sont symétriques. Ainsi, ils ont que six composantes indépendantes, leur liaison linéaire est réalisée seulement en fonction de 36 termes. L'expression (37) est généralement utilisée, dans un repère orthonormé, pour relier les composantes des contraintes et des déformations (équation) :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2223} & C_{2231} & C_{2212} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3323} & C_{3331} & C_{3312} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2323} & C_{2331} & C_{2312} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3123} & C_{3131} & C_{3112} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1223} & C_{1231} & C_{1212} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ 2\epsilon_{23} \\ 2\epsilon_{31} \\ 2\epsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (37)$$

Avec «  $C_{ijkl} = C_{ijlk} = C_{jikl} = C_{jilk}$  ». Noté souvent «  $C_{IJ}$  », avec I et J variant de 1 à 6.

### 2.5.3 Détermination du module de Young

La mesure du module élastique des matériaux exige un appareillage particulier. En effet, d'après la littérature la recherche précise du « module de Young » de la terre est assez compliquée. Elle exige une évaluation sûre de la « contrainte », et spécialement une « mesure locale » exacte de la « déformation de l'éprouvette », car il faut qu'elle soit sollicitée de manière strictement uniaxiale [125]. Par ailleurs, pour déterminer correctement la « loi de comportement et le module de Young de la terre crue », il est conseillé d'évaluer la « déformation dans la partie médiane de l'éprouvette » avec un « élancement de 1,5 à 2 », pour empêcher des conséquences de rives et des déformations parasites existantes en dépit du système anti-fretage [126].

D'après les techniques d'évaluation du « module de Young » sur plusieurs terres différentes, selon Moevus et autres. Il est compris entre « 1 et 6 [GPa] », [83].

Pour une « teneur en eau de 1,8 à 2,8 % » avec un « élancement de 2 ». Des valeurs comprises entre « 1277 et 2081 [MPa] » ont été obtenues grâce à l'étude de Mollion [127] pour des « éprouvettes de terre compactée sèches »

Des valeurs du « module de Young » pour de la « terre compactée sans chanvre » ont été atteintes par Barras [128]. Elles sont comprises entre « 1666 et 3333 [MPa] » ont été obtenues sur des cylindres de hauteur 0,76 avec un système anti-fretage.

Pour des combinaisons de « kaolinite et de sable », Fontaine [129] a trouvé des valeurs comprises entre « 1700 à 2500 [MPa] » avec l'appareil « Grindo-sonic ». Par une technique semblable, des mesures enregistrées entre « 1500 et 5500 [MPa] » ont été obtenues par Pirat [130] pour distinctes « teneurs en eau », sur des « éprouvettes de pisé » « 22 cm de hauteur, 11 cm de diamètre ».

Pour des « terres en adobe » depuis des « vitesses de propagation d’ultra-sons » dans le matériau, Bourges [131] a évalué des « modules élastiques ». Selon les constituants de la terre exploitée, des grandeurs enregistrées entre « 1000 et 5500 [MPa] » ont été obtenues.

## 2.6 Méthodes de prédiction des propriétés mécaniques

L’homogénéisation est un outil de prédiction du comportement d’un élément formé de plusieurs phases en employant des informations associées à sa microstructure. Nous citons le célèbre « Einstein », un des précurseurs de cette technique, qui a modélisé la viscosité d’un fluide comportant des particules sphériques solides.

### 2.6.1 Principe d’homogénéisation

On étudie une matrice composée de « milieu (D) élastique infini et homogène, tenseur d’élasticité ( $C^M$ ) dans le cas isotrope, module de cisaillement ( $\mu^M$ ), module de Young ( $E^M$ ), module de compressibilité ( $K^M$ ) et de coefficient de poisson ( $\nu^M$ ) ». Une multitude « d’inclusions élastiques de formes ellipsoïdale » sont intégrés dans la matrice. On note « ( $C^I$ ) tenseur d’élasticité d’une inclusion (dans le cas isotrope, on intègre les modules de cisaillement ( $\mu^I$ ), module de Young ( $E^I$ ), module de compressibilité  $K^I$  et le coefficient de poisson ( $\nu^I$ ) ».

### 2.6.2 Aperçu sur le micro et macro du composite

Un « matériau composite » à la possibilité d’être traité comme un matériau à « N+1 » composants, l’étape « 0 » représente la « matrice », les « N » étant les composants du « renfort ». À chaque fois l’on essaie de retirer les « propriétés élastiques » d’un « matériau hétérogène », on se sert par convention d’un contenu à caractère « conditions aux limites homogènes au bord ». On exige donc à la « surface extérieure ( $\partial V$ ) » du composite des « déplacements  $\underline{u}(\partial V)$  ou des efforts  $\underline{\sigma}_n(\partial V)$  » selon la configuration de l’équation (38) :

$$\underline{u}(\partial V) = \underline{E} \cdot \underline{x} \quad \text{ou} \quad \underline{\sigma}_n(\partial V) = \underline{\Sigma} \quad (38)$$

Où «  $\underline{E}$  et  $\underline{\Sigma}$  » décrivent à l’égard de chacun les « tenseurs de déformations et de contraintes macroscopiques ».

«  $\underline{E}$  (ou  $\underline{\Sigma}$ ) » sont fixés, la recherche de « solution théorique » du « problème élastique » équivalent, donne la formule des « champs de contrainte et de déformation locaux ». Lors de l’un de ces « chargements », les « champs de déformation et de contrainte microscopiques »

sont affectés par l'existence des « hétérogénéités ». On évaluera, en tout « point  $M(x)$  de  $(D)$  », les « champs de contraintes et de déformations  $\sigma(x)$  et  $\varepsilon(x)$  ». Ces « champs locaux » sont associés aux « champs microscopiques » par des formules de « moyenne » (équation (39)) :

$$\langle \varepsilon \rangle = E \quad \text{et} \quad \langle \sigma \rangle = \Sigma \quad (39)$$

Où  $\langle . \rangle$  indique la formule de « moyenne sur le milieu  $(D)$  de volume  $|D|$  », la formule est déterminée par l'équation (40) :

$$\langle f \rangle = \frac{1}{|D|} \int_D f \, dx \quad (40)$$

Dans le domaine « d'élasticité linéaire » où nous nous situons, les « contraintes et déformations microscopiques » sont associées par «  $\sigma = C : \varepsilon$  ou  $\varepsilon = S : \sigma$  ».

Ces « champs locaux » sont associés aux « champs macroscopiques » par l'équation (41) :

$$\varepsilon = A : E \quad \text{et} \quad \sigma = B : \Sigma \quad (41)$$

Où  $A(x)$  et  $B(x)$  sont des « tenseurs de positionnement du quatrième ordre ». La « loi de comportement macroscopique » aide à avoir le « tenseur d'élasticité  $C^{\text{eff}}$  (ou  $S^{\text{eff}}$ ) » du matériau composite par l'équation (42) et l'équation (43) :

$$\langle \sigma \rangle = C^{\text{eff}} : E \quad \text{« si on exige une déformation } E \text{ »} \quad (42)$$

$$\langle \varepsilon \rangle = S^{\text{eff}} : \Sigma \quad \text{« si on exige une contrainte } \Sigma \text{ »} \quad (43)$$

Où les « tenseurs effectifs » sont fournis par l'équation (44) :

$$C^{\text{eff}} = \langle \underline{C} : \underline{A} \rangle \quad \text{et} \quad S^{\text{eff}} = \langle \underline{S} : \underline{B} \rangle \quad (44)$$

On spécifie «  $(\sigma^K)$  et  $(\varepsilon^K)$  » représentent les « contraintes et déformations moyennes », on les traite de « microscopiques » en les comparant avec aux dimensions « macroscopiques  $(E)$  et  $(\Sigma)$  » sur la « phase  $(K)$  » selon l'équation (45) :

$$\sigma^K = \langle \underline{\sigma} \rangle_K \quad \text{et} \quad \varepsilon^K = \langle \underline{\varepsilon} \rangle_K \quad (45)$$

Où  $\langle . \rangle_K$  indique la démarche de « moyenne » sur la « phase  $(K)$  » traitée. Démarche déterminée par l'équation (46) :

$$\langle f \rangle_K = \frac{1}{|D_K|} \int_{D_K} f \, dx \quad (46)$$

Dans cette dernière formule  $|D_K|$  spécifie le « volume du domaine ( $D_K$ ) » comportant la « phase ( $K$ ) ».

La transition au stade « macroscopique » s'effectue par la suite par la « moyenne sur tout le volume des dimensions  $\sigma(x)$  et  $\varepsilon(x)$  » (équation 40), peut aussi correspondre à « ( $\sigma^K$ ) et ( $\varepsilon^K$ ) » ; selon l'équation (47) :

$$E = \sum_{I=0}^N f_I \varepsilon^I \quad \text{et} \quad \Sigma = \sum_{I=0}^N f_I \sigma^I = \sum_{I=0}^N f_I C^I : \varepsilon^I \quad (47)$$

Où ( $f_I$ ) indique le « pourcentage volumique » de la « phase I ». L'équation (47) est établie en exploitant la « loi de comportement élastique de la phase I :  $\sigma^I = C^I : \varepsilon^I$  ».

La fonction établie par la « phase (0) de la matrice » est spéciale. Ainsi, les deux dernières formules sont notées de la manière suivante (équation (48)) :

$$E = f_0 \varepsilon^0 + \sum_{I=1}^N f_I \varepsilon^I \quad \text{et} \quad \Sigma = f_0 C^0 \varepsilon^0 + \sum_{I=1}^N f_I C^I : \varepsilon^I \quad (48)$$

Ce qui admet d'exclure ( $\varepsilon^0$ ) et d'avoir l'équation (49) :

$$\Sigma = C^0 : E + \sum_{I=1}^N f_I (C^I - C^0) : \varepsilon^I \quad (49)$$

En outre, en énonçant l'équation (47) sous la configuration suivante (équation (50)) :

$$E = f_0 S^0 \sigma^0 + \sum_{I=1}^N f_I S^I \sigma^I \quad \text{et} \quad \Sigma = f_0 \sigma^0 + \sum_{I=1}^N f_I \varepsilon^I \quad (50)$$

Où « ( $S^I$ ) matrice de souplesse de la phase I », opposé de ( $C^I$ ), on obtient l'équation (51) :

$$E = S^0 : \Sigma + \sum_{I=1}^N f_I (S^I - S^0) : \sigma^I \quad (51)$$

Si par n'importe quelle approche, on peut formuler ( $\sigma^I$ ) et ( $\varepsilon^I$ ) sous la configuration suivante (équation(52)) :

$$\varepsilon^I = A^I : E \quad \text{et} \quad \sigma^I = B^I : \Sigma \quad (52)$$

On perçoit « ( $C^{eff}$ ) et ( $S^{eff}$ ) » et on peut exprimer l'équation (53) sous la forme :

$$C^{eff} = C^0 + \sum_{I=1}^N f_I (C^I - C^0) : A^I \quad \text{et} \quad S^{eff} = S^0 + \sum_{I=1}^N f_I (S^I - S^0) : B^I \quad (53)$$

Le « tenseur  $(A^I)$  et  $(B^I)$  » est la « moyenne sur la phase I » du « tenseur de localisation » des « déformations  $A(x)$ , des contraintes  $B(x)$  » déterminé en tout « point  $M(x)$  » de l'équation (41). Ces « tenseurs  $(A^I)$  et  $(B^I)$  » découlent de la « microstructure et de l'hétérogénéité », du « matériau composite ».

### 2.6.3 Évaluation de Voigt et Reuss

Les techniques élémentaires pour la prédiction des « propriétés mécaniques » d'un matériau sont la « méthode de Voigt (1889) », la méthode de Reuss (1929) pour la détermination de « la déformation et sa duale en contrainte » est souvent appliquée. Pour celle de (1889), la supposition réalisée présente une « déformation constante dans tout le composite », à savoir que dans toute « phase I », on a «  $\varepsilon^I = E$  ». Le tenseur  $(A^I)$  est restreint au « tenseur identité », et la prévision équivalente pour le « tenseur de rigidité du composite » est la « moyenne arithmétique des tenseurs de rigidité de chaque phase » équation (54) :

$$C_V^{eff} = C^M + \sum_{I=1}^N f_I (C^I - C^M) \quad (54)$$

Pour la « méthode de Reuss », l'hypothèse fait  $\sigma^I = \Sigma$  est en tous lieux, et on retire l'équation (55) :

$$S_R^{eff} = S^M + \sum_{I=1}^N f_I (S^I - S^M) \quad (55)$$

Ces deux formules simplifiées donnent que le « taux de remplissage des renforts dans la matrice et leur comportement élastique particulier ». En effet, ils donnent des bornes supérieures et inférieures pour les « constantes élastiques effectives ».

### 2.6.4 Méthodes variationnelles

La définition des limites sur les « modules d'élasticité » emploie les « théorèmes variationnels de l'énergie ». En effet, dans une démarche dans le domaine de « déplacements », le principe de « l'énergie potentielle totale » autorise d'atteindre les « bornes supérieures ». Tandis que le principe de « l'énergie complémentaire » tolère dans le contexte d'une démarche avec exigences d'atteindre les « bornes inférieures ».

Hill [125] a prouvé que l'évaluation de « Reuss et celle de Voigt » correspondent à l'égard de chacun aux « bornes inférieures et supérieures ». Ainsi, dans l'éventualité d'une composition « isotope de deux phases isotropes », on réussit à avoir l'équation (56) et l'équation (57) :

$$\frac{K^I K^M}{1 - f K^I + f K^M} \leq K^{eff} \leq 1 - f K^M + f K^I \quad (56)$$

$$\frac{\mu^I \mu^M}{1 - f \mu^I + f \mu^M} \leq \mu^{eff} \leq 1 - f \mu^M + f \mu^I \quad (57)$$

On constate que «  $E^I E^M / 1 - f E^I + f E^M$  » décroît réellement le « module de Young ( $E^{eff}$ ) » du matériau global. Au moyen de la rapport linéaire «  $1/E = (1/3\mu) + (1/9K)$  » qui donne les inégalités proposées par la méthode de Reuss «  $1/K^{eff} \geq (f/K^I) + 1 - f /K^M$  » et «  $1/\mu^{eff} \geq (f/\mu^I) + 1 - f /\mu^M$  ». Cependant, constatons que «  $fE^I + 1 - f E^M$  » n'augmente pas automatiquement ( $E^{eff}$ ). Le « coefficient de Poisson » étant associé à ( $K$ ) et ( $\mu$ ) par la formule suivante :  $2\nu = (3K - 2\mu)/(3K + \mu)$ .

En maîtrisant les pourcentages « volumiques des phases » présumées isotropes, et en connaissant que la totalité des éléments est isotrope « les configurations des phases sont diverses et leurs positions sont au hasard de manière à assurer l'isotropie du composant). Par conséquent, les limites sont plus réduites que celles de « Voigt et Reuss », démontrées initialement par « Hashin et Shtrikman » [132] [133] et étendues par « Walpole [134] [135] [136] [137], Willis et Acton [138], Willis [139], Kröner [140], Laws et Mclaughlin [141] ». Pour l'élément à « deux phases », les formules sont décrites de la manière suivante (58), (59), (60) et (61) :

$$\min K_a, K_b \leq K^{eff} \leq \max K_a, K_b \quad (58)$$

$$\min \mu_a, \mu_b \leq \mu^{eff} \leq \max \mu_a, \mu_b \quad (59)$$

$$K_a = K^M + f \frac{K^I - K^M}{1 + (1 - f) \frac{K^I - K^M}{K^M + \frac{4}{3} \mu^M}} \quad (60)$$

$$K_b = K^M + f \frac{K^I - K^M}{1 + (1 - f) \frac{K^I - K^M}{K^M + \frac{4}{3} \mu^I}} \quad (61)$$

Et si  $\mu^I - \mu^M (K^I - K^M) \geq 0$ , alors selon « Hashin et Shtrikman, [133] », on retire l'équation (62) et l'équation (63):

$$\mu_a = \mu^M + f \frac{\mu^I - \mu^M}{1 + (1-f) \frac{\mu^I - \mu^M}{\mu^M + \frac{1}{\frac{1}{\mu^M} + \frac{10}{9K^M + 8\mu^M}} \frac{3}{2}}} \quad (62)$$

$$\mu_b = \mu^M + f \frac{\mu^I - \mu^M}{1 + (1-f) \frac{\mu^I - \mu^M}{\mu^M + \frac{1}{\frac{1}{\mu^I} + \frac{10}{9K^I + 8\mu^I}} \frac{3}{2}}} \quad (63)$$

Ou si  $\mu^I - \mu^M (K^I - K^M) \leq 0$ , alors selon « Walpole, [134] [135] », on aura l'équation (64) et l'équation (65):

$$\mu_a = \mu^M + f \frac{\mu^I - \mu^M}{1 + (1-f) \frac{\mu^I - \mu^M}{\mu^M + \frac{1}{\frac{1}{\mu^M} + \frac{10}{9K^I + 8\mu^M}} \frac{3}{2}}} \quad (64)$$

$$\mu_b = \mu^M + f \frac{\mu^I - \mu^M}{1 + (1-f) \frac{\mu^I - \mu^M}{\mu^M + \frac{1}{\frac{1}{\mu^I} + \frac{10}{9K^M + 8\mu^I}} \frac{3}{2}}} \quad (65)$$

## 2.6.5 Démarche d'homogénéisation auto cohérente

La modélisation du « comportement mécanique » du composite « terre paille » est limitée à la « zone élastique ». La méthode « d'homogénéisation auto cohérente » prescrit que le « matériau homogénéisé » ainsi que tous ses composants respectent une « loi de comportement » qui est semblable. On choisit alors, une « loi de comportement » et l'on confirme après la conformité de cette décision par rapport aux solutions de simulation. Nous présumons que la « loi de comportement » est « élastique, linéaire, isotrope » de caractère « loi de Hooke ».

La recherche de la solution numérique donne la possibilité d'avoir le « module de compressibilité (K) et module de cisaillement ( $\mu$ ) » par rapport aux caractéristiques des composants ainsi que de leur « densité volumique ». On obtient par la suite « le module d'élasticité (E) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) » du « matériau homogénéisé » conformément aux équations (66)(67) (68) et (69) :

On a

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (66)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (67)$$

Soit

$$K = \frac{3\mu}{1 + \frac{\mu}{3K}} \quad (68)$$

Et

$$\nu = \frac{3K - 2\mu}{6K + 2\mu} \quad (69)$$

### 2.6.6 Méthode de loi des mélanges

Pour un « matériau non homogène », ses propriétés découlent de celles des « fibres et de la matrice » qui les constituent. Toutefois, ce type de matériau ce peut être imaginé au même titre qu'un matériau homogène en estimant ses propriétés moyennes vis-à-vis des charges externes appliquées.

En considérant un matériau composite qui contient une certaine « fraction volumique ( $V_f$ ) » de « fibres continues » alignées et noyées dans une « matrice ductile » selon (70) :

$$V_f = S_f/S_c \quad \text{et} \quad V_m = (1 - V_f) \quad (70)$$

Si une force ( $F_c$ ) appliqué aux fibres selon l'axe parallèle sur une section droite ( $S_c$ ) du composite, cette force peut être décomposée en force ( $F_m$ ) exercée à « l'aire de la matrice » et en une force ( $F_f$ ) exercée sur « l'aire de renfort ». On arrive à l'équation suivante (71) :

$$F_c = F_f + F_m \quad (71)$$

À cause de cette force ( $F_c$ ) les fibres, la matrice et le composite obéissent à une déformation identique, ce qui s'exprime par l'égalité suivante (72) :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_f + \varepsilon_m \quad (72)$$

La contrainte  $\sigma_c$  s'exerçant sur le composite est par définition égale à (73)) :

$$\sigma_c = F_c/S_c = (F_f + F_m)/S_c \quad (73)$$

D'autre part, les contraintes s'appliquant respectivement sur le renfort et sur la matrice sont par définition égales à (équation (74)) :

$$\sigma_f = F_f/S_f \text{ et } \sigma_m = F_m/S_m \quad (74)$$

Des équations (70) et (74), on peut déduire l'équation (75) :

$$\sigma_c = V_f\sigma_f + V_m\sigma_m = V_f\sigma_f + (1 - V_f)\sigma_m \quad (75)$$

Cette fonction élémentaire est en vérité le cohérent principe des mélanges exercés aux contraintes. Elle se démontre souvent pour toute déformation «  $\varepsilon_c = \varepsilon_f + \varepsilon_m$  » imposée au composite, ce qui aide à avoir la « courbe de traction » du composite si l'on bénéficie de la courbe de traction du « renfort et de la matrice ».

Le « module de Young » est alors déterminé grâce à la formule présentée ci-dessous (76) :

$$E_C = V_f E_f + (1 - V_f) E_m \quad (76)$$

## 2.7 Conclusion

Ce chapitre a exposé les différents « modèles théoriques » déployés pour la prédiction des « propriétés thermiques et mécaniques » des matériaux composites. La phase initiale permet « d'homogénéiser le matériau composite » en un matériau « homogène équivalent ».

De plus dans ce chapitre, une prospection bibliographique a dénombré les valeurs expérimentales des « propriétés thermiques et mécaniques » du matériau « terre » crue ou stabilisée. Le chapitre suivant énoncera les étapes de modélisation numérique pour l'évaluation des « propriétés effectives » du composite « terre paille ».

# **CHAPITRE 3      MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT THERMIQUE ET MÉCANIQUE DU COMPOSITE TERRE PAILLE**

## **3.1 Introduction**

La finalité dans ce chapitre est de comprendre le comportement « thermique et mécanique » du matériau composite « terre-paille ». Pour cela, il est éminent de modéliser le comportement du « composite » en considérant le « pourcentage » et la « distribution aléatoire » des fibres paille.

D'abord, nous citons les démarches de modélisation adoptées. Ensuite, nous allons exposer l'approche par élément fini qui permettra la résolution du problème. De même, nous allons présenter les étapes de création de la géométrie et du maillage. Enfin, deux volets seront développés :

- La caractérisation des « propriétés thermiques effectives » du composite « terre paille ». En effet, pour analyser le sujet, nous considérons des conditions « initiales et aux limites » aussi bien en « régime permanent » qu'en « régime transitoire ».
- La détermination des « propriétés mécaniques » du composite « terre paille ». En effet, la détermination du « module de Young » nécessite des hypothèses de calcul ainsi que la prise en considération de conditions « initiales et aux limites ».

## **3.2 Procédure de modélisation suivie**

Les propriétés physiques d'un matériau composite sont directement liées à ses différents constituants. De plus, l'indétermination de l'arrangement et de la position des fibres durant de la fabrication du composite, augmentera les incertitudes dans la prévision de ses « propriétés physiques ».

De même, la nature non linéaire du problème, fait que la résolution ne peut s'effectuer qu'en utilisant des méthodes numériques, qui sont par nature approchées. Pour réaliser cette étude, nous considérons deux notions : « le volume élémentaire représentatif » et « l'échelle macroscopique ».

### 3.2.1 Volume élémentaire représentatif :

La terre renforcée par la fibre en paille est bien entendu un matériau composite hétérogène. Par conséquent, lors de la définition des « propriétés » du composite « terre paille », la considération de la totalité des « hétérogénéités » représente une tâche insurmontable. Leur microstructure présente une distribution « non homogène » de la paille dans la terre et se caractérise par la présence de zones riches en paille et d'autres riches en terre (Figure 3-1).



Figure 3-1 : Brique de terre stabilisée par la fibre paille

Par conséquent, le matériau est représenté en schématisant sa microstructure au moyen d'arrangements périodiques. Les considérations les plus utilisées sont de modèle carré ou hexagonal (Figure 3-2).

En ce qui est trait au cas de « type carré », la « fraction volumique » de renfort s'énonce en relation avec la distance en deux fibres « S » et du diamètre « d » des fibres. C'est pourquoi la « fraction volumique maximale » de fibres possibles est obtenue pour « S=d » (77) :

$$V_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{S}\right)^2 \quad (77)$$

De même pour le type hexagonal, la fraction volumique de renfort est rattachée au diamètre « d » et à la distance « R » entre la fibre centrale ainsi qu'à ses fractions les plus environnantes exprimée par l'équation (78) :

$$V_f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{R}\right)^2 \quad (78)$$

La « fraction volumique » de fibres est maximale quand « R = d ».

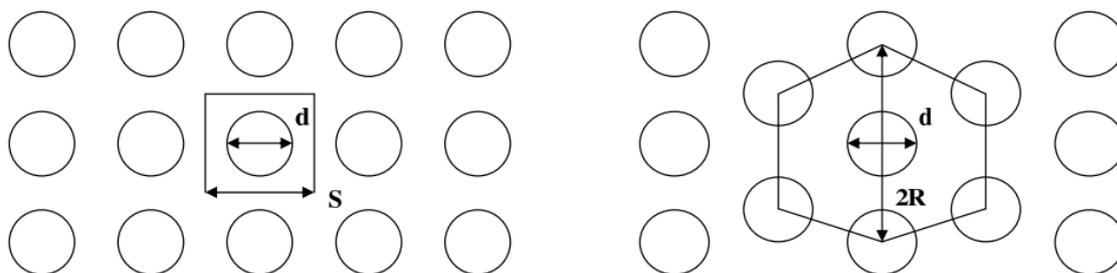


Figure 3-2 : Modélisation de la section d'un composite section- motif carrée- motif hexagonal  
 Finalement, ces motifs sont employés pour définir un « volume élémentaire représentatif (VER) » de la microstructure de sorte que les hypothèses des milieux continus soient satisfaites.

### 3.2.2 Échelle macroscopique :

Lorsque nous abordons la modélisation, il faut évidemment définir l'échelle de travail, microscopique ou bien macroscopique. Nous considérons dans ce travail une « échelle macroscopique ». En effet, l'analyse de l'aspect « thermique et mécanique » d'un composite à « l'échelle macroscopique » ne peut en aucun être réalisée que si « l'équation de la chaleur » et la « loi de comportement » étaient respectivement appliquées en considérant les propriétés de chaque élément comme une donnée propre et pas du tout « effective ou apparente ». Ceci donne à cette simulation son aspect « macroscopique » et non « microscopique ».

### 3.3 Approche en éléments finis

La méthode en « éléments finis » est un moyen « numérique » utilisé pour déterminer la solution approximative du problème. L'approche en « éléments finis » utilise sur la condition de « formulations faibles » une méthode « discrète » servant à atteindre la solution approximative du sujet étudié aux « dérivées partielles » sur un espace avec des « conditions aux limites ». Par conséquent, pour procéder à la résolution des problèmes « d'unicité et d'existence » de la solution, de la « stabilité et la convergence » des « méthodes numériques », ainsi que la « mesure de l'erreur » entre la « solution approximative » et la « solution juste ». La réponse approximative est une relation qui peut être résolue par un ensemble bien défini de variables, tel que le « nombres de nœuds » et les « éléments du maillage ».

- **Avantages :** étude des géométries délicates, détermination plus naturelle des conditions aux limites, possibilité de confirmations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

- **Inconvénients** : Long durée de calcul, besoin de machine performante et contrainte d'application.

L'approche en « éléments finis » sert à « discrétiser » le système traité. La discrétisation opère à plusieurs niveaux :

- **Discrétisation** : Pour travailler sur un domaine «  $\Omega$  », il est requis d'avoir une description du domaine. Ainsi, cette description va se réaliser en l'avoisinant par un maillage composé d'éléments.
- **Interpolation** : Par la suite, il est indispensable d'avoir une approche permettant de symboliser le ou les champs inconnus. Ainsi, la méthode des « éléments finis » a pour but d'avoisiner ces domaines par des relations plus facile « type polynomial de premier ou deuxième degré » déterminées sur chacun des « éléments du maillage ».
- **Approximation** : conformément au cas « d'approximation », on représente « l'espace (V) » de « proportion infinie », par des « approximations de proportion finie « (V<sub>h</sub>) »

D'autre part, un certain nombre de conditions aux limites sur la frontière «  $\Gamma$  » du domaine peuvent être adoptées pour déterminer totalement la solution.

- **Type Dirichlet** : quand la température est définie sur une partie de la frontière.
- **Type Neumann** : pour le problème « flux thermique » fixe ou bien négligeable pour les matériaux isolés.
- **Type Fourier** : pour le problème « échange convectif » avec le milieu extérieur.

### 3.3.1 Présentation de l'approche en éléments finis

La présentation très concise réalisée de la méthode des « éléments finis » a pour raison de fournir les concepts de base dans un cas extrêmement simple.

On introduit tout d'abord un produit scalaire de deux fonctions :

$$v, w = \int_a^b v(x) w(x) dx$$

Et l'espace  $L^2[a; b]$  des « fonctions de carré » similaires sûres  $[a; b]$ , tel que l'intégrale suivante existe :

$$\int_a^b v x^2 dx$$

Soit  $H^1[a; b]$  « l'espace des fonctions  $v$  », de « carré similaire » et dont la dérivée est également de « carré sommable ».

$$v \in L^2[a; b], v' \in L^2[a; b],$$

Et soit  $H_0^1[a; b]$  l'espace des fonctions  $v$  de  $H^1[a; b]$  nulles en  $a$  et  $b$ .

Le problème différentiel est donné selon l'équation (79) :

$$\left\{ \begin{array}{l} -u'' x + f x \\ u a = u b = 0 \end{array} \right\} \quad \forall x \in [a; b] \quad (79)$$

Conduit après multiplication par  $v(x)$  et intégration sur  $[a; b]$  aux équations (80) et (81) :

$$-\int_a^b u''(x)v x dx = \int_a^b f x v x dx \quad (80)$$

$$-\int_a^b u'' x v x dx = \int_a^b u' x v' x dx + u'(a)v a - u' b v(b) \quad (81)$$

D'où une nouvelle formulation variationnelle du problème (1) qui en tenant compte des conditions sur l'espace  $H_0^1[a; b], u a = v b = 0$

S'écrit (82) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Chercher la fonction } u \text{ appartenant à } H_0^1[a; b] \text{ telle que} \\ u', v' = (f, v) = 0 \quad \forall v \in H_0^1[a; b] \end{array} \right\} \quad (82)$$

Cette formulation est équivalente à la minimisation d'une forme quadratique représentant l'énergie du système qui s'écrit (83) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Chercher la fonction } u \text{ appartenant qui réalise le minimum} \\ \text{dans l'espace } H_0^1[a; b] \text{ de la forme } J \text{ définie par} \\ J v = \frac{1}{2} \int_a^b v'^2 dx - \int_a^b f v dx \end{array} \right\} \quad (83)$$

On obtient ainsi trois formes équivalentes du problème

- Une forme différentielle
- Une forme variationnelle
- Une forme d'atténuation de « l'énergie ».

En récapitulant, nous échangeons, dans le contexte de l'approche en « éléments finis », le sujet préalable sous configuration « différentielle » par le « problème variationnel » (84) :

$$\left\{ \begin{array}{l} -u'' = f \\ u(a) = u(b) = 0 \end{array} \right\} \quad a < x < b \quad (84)$$

Par le problème variationnel, (85) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver la fonction } u \text{ appartenant à } H_0^1[a; b] \text{ telle que} \\ u', v' = (f, v) \quad \forall v \in H_0^1[a; b] \end{array} \right\} \quad (85)$$

### 3.3.2 Approximation par éléments finis

L'approximation par éléments finis consiste à remplacer l'espace  $H_0^1[a; b]$  des fonctions tests du problème continu par un sous-espace de dimension finie  $V_{0;h}$  qui caractérise la méthode d'éléments finis adoptée.

Le problème approché s'écrit alors formellement suivant l'équation (86) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Trouver la fonction } u_h \text{ appartenant à } V_{0;h} \text{ telle que} \\ u'_h, v'_h = (f, v_h) \quad \forall v_h \in V_{0;h} \end{array} \right\} \quad (86)$$

### 3.3.3 Détermination d'éléments P1

On approche l'espace  $H_0^1[a; b]$  par l'espace  $V_{0;h} \subset H_0^1[a; b]$  constitué de la sorte.

On choisit une discrétisation de l'intervalle  $[a; b]$  en  $N$  sous intervalles ou éléments

$K_i = [x_{i-1}; x_i]$  comme expliqué sur la Figure 3-3.

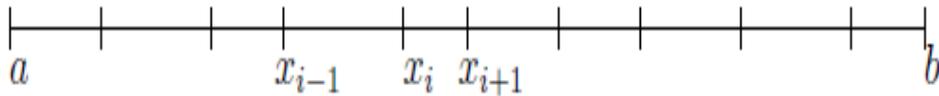


Figure 3-3 : Discretisation

Les éléments  $K_i$  n'ont pas forcément la même longueur. Alors «  $V_{0;h}$  » représente l'espace des fonctions continues affines par morceaux (c'est à dire affine sur les segments  $K_i$  et nul aux extrémités a et b).

L'utilisation des fonctions affines, les fonctions polynomiales de degré un justifie la dénomination d'éléments P1 comme présentés sur la Figure 3-4.

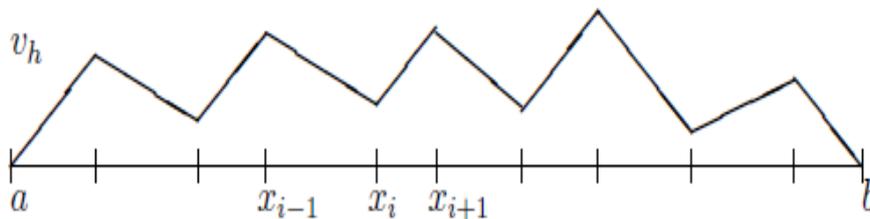


Figure 3-4 : Fonction affinée par morceaux

Chaque fonction  $v_h \in V_{0;h}$  est déterminé de manière unique par la donnée de ses valeurs aux points  $x_i$ , pour  $i = 1; N-1$ . L'espace  $V_{0;h}$  est de dimension  $N-1$ .

### 3.3.4 Base de Lagrange

Considérons les «  $N-1$  » fonctions  $w_i \in V_{0;h}$  définies par les  $N-1$  conditions suivantes selon l'équation (87) :

$$w_i(x_j) = \delta_{ij} \quad \forall i = 1, N-1 \text{ et } \forall j = 1, N-1 \quad (87)$$

Ces «  $N-1$  » fonctions forment une base de  $V_{0;h}$  ; h et une fonction  $v_h$  quelconque s'écrivant dans cette base comme présentée sur la Figure 3-5 :

$$v_h(x) = \sum_{i=1}^{i=N-1} v_i w_i(x)$$

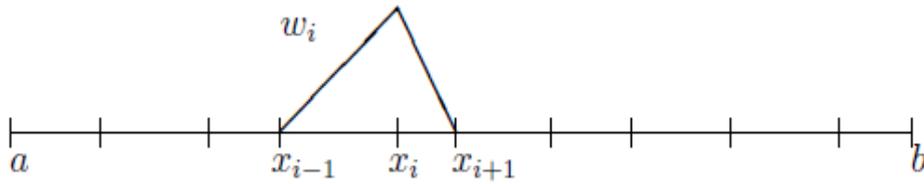


Figure 3-5 : Fonction de base de Lagrange

Avec  $v_i = v_h(x_i)$ . Les coefficients  $v_i$  sont donc les valeurs de  $v_h$  aux points  $(x_i)$

### 3.3.5 Écriture du problème approché

Écrivons le problème approché dans  $V_{0;h}$  selon l'équation (88) :

$$\int_a^b u'_h(x) v'_h(x) dx = \int_a^b f(x) v_h(x) dx \quad \forall v_h \in V_{0;h} \quad (88)$$

Le sujet est de type « linéaire », l'équation est exacte pour tout  $v_h$  si elle est exacte pour un élément de « l'espace vectoriel  $V_{0;h}$  »

$$\forall v_h \in V_{0;h} \leftrightarrow \forall w_i \quad \text{pour } i = 1, N - 1$$

D'autre part, écrivons  $u_h$ , solution du problème approché dans  $V_{0;h}$ , dans la base des  $w_i$  selon l'équation (89) :

$$u_h(x) = \sum_{j=1}^{j=N-1} u_j w_j(x) \quad (89)$$

Avec  $u_j = u_h(x_j)$  valeur approchée de la solution exacte au point  $(x_j)$

Nous obtenons l'écriture suivante du problème approché :

Trouver  $u_1; u_2 ; \dots \dots u_{N-1}$  tels que l'équation (90) :

$$\int_a^b \left( \sum_{j=1}^{j=N-1} u_j w'_j(x) \right) w'_i(x) dx = \int_a^b f(x) w_i(x) dx \quad \forall i = 1, N - 1 \quad (90)$$

Ce que nous pouvons réécrire selon l'équation (91) :

$$\sum_{j=1}^{j=N-1} \left( \int_a^b w_j(x) w'_i(x) dx \right) u_j = \int_a^b f(x) w_i(x) dx \quad \forall i = 1, N - 1 \quad (91)$$

Soit en appliquant les équations (92) (93) et (94) :

$$\int_a^b f(x)w_i(x) dx = F_i \quad (92)$$

Et

$$\int_a^b w'_j(x)w'_i(x) dx = A_{ij} \quad (93)$$

$$\sum_{j=1}^{j=N-1} A_{ij}u_j = F_i \quad \forall i = 1, N - 1 \quad (94)$$

Nous avons ainsi parvenu un « système linéaire » de N-1 équations à N-1 inconnues, qui a la possibilité d'être posé sous l'aspect « matricielle » suivant (équation (95)) :

$$A U = F \quad (95)$$

### 3.4 Conception du modèle composite en terre paille

En raison du but de notre recherche qui est réalisée sur un « matériau composite », ce dernier exige la conception d'un modèle associant « matrice et fibre ». Cependant, la maîtrise du pourcentage, de la longueur ainsi que la disposition des fibres en paille dans le champ de calcul sont des éléments primordiaux.

On définit le modèle « M = u + v » désignant les deux composants du matériau « terre paille », en considérant « u = 0 » et « v = 1 » dans un dispositif booléen. Nous concevons des modèles de « matrice terre » avec des positions arbitraires des fibres en paille que nous pouvant convertir en « vecteur ». Nous avons même la possibilité de modifier la l'emplacement de chaque élément du « vecteur » dans le domaine de calcul à tout moment que nous concevons une nouvelle « matrice ». Une fois, le processus est recommencé, une nouvelle réorganisation des positions des fibres en paille va être renouvelée.

Si nous associons la valeur « 0 » à la matrice « terre » représentée en couleur bleue et la valeur « 1 » à la « fibre paille » représentée en couleur mauve. Nous procédons alors à la conception de la « matrice composite » terre paille comme indiqué sur la Figure 3-6.

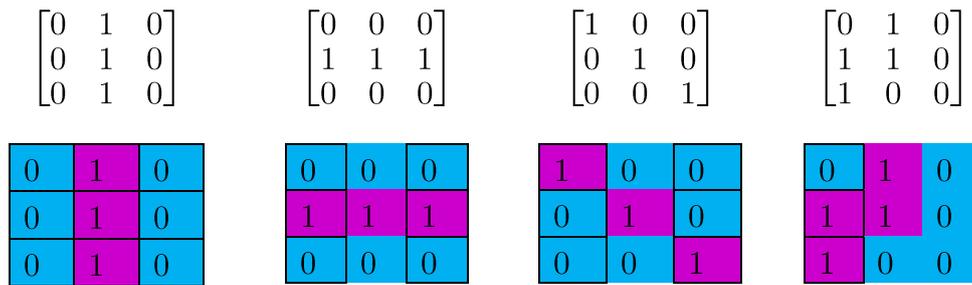


Figure 3-6 : Matrices de taille « (3 x 3) »

En vue d'avoir des « matrices composites » de taille grandes, nous utilisons des matrices de taille « 3 x 3 » comme présentées sur la Figure 3-6 ou bien « (4 x 4) (5 x 5) », etc. Ainsi, nous obtenons un domaine plus large dont le pourcentage de fibres en paille est réciproquement relatif à la grandeur de la « matrice basique ».

Pour cela, nous avons construit une matrice (9 x 9) avec « 5, 10, 15 % » de renfort comme présenté sur la Figure 3-7. La finalité de concevoir ces « matrices » est d'obtenir une attribution des fibres en paille qui est arbitraire.

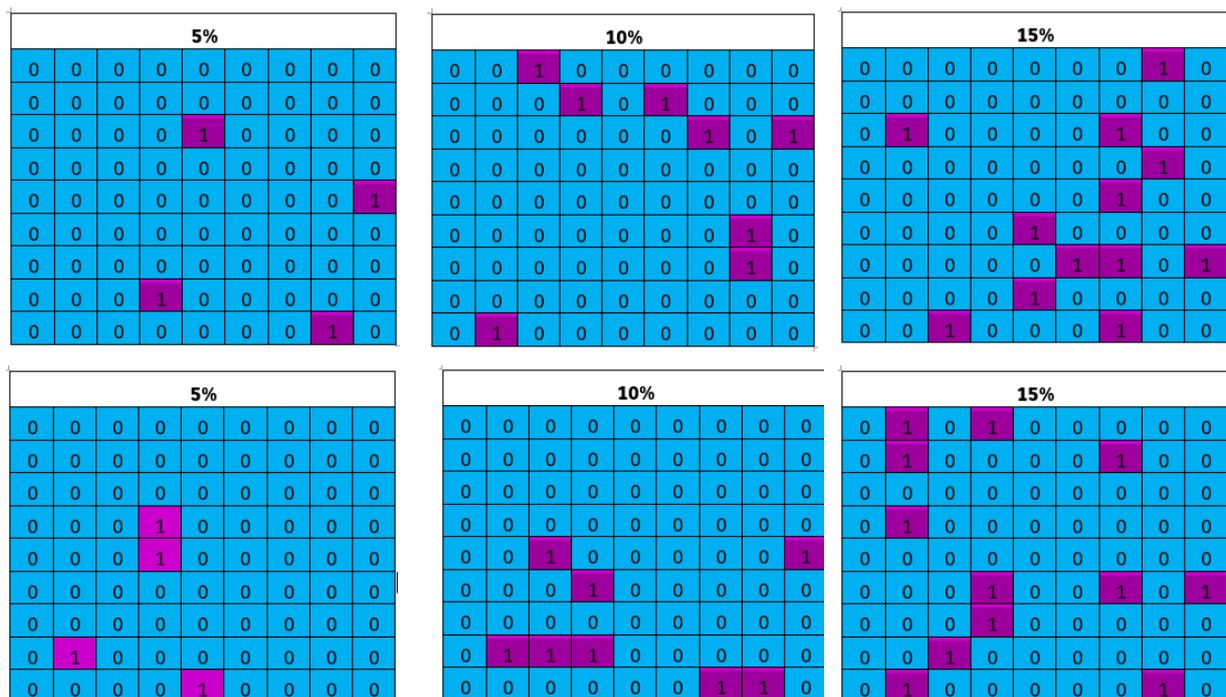
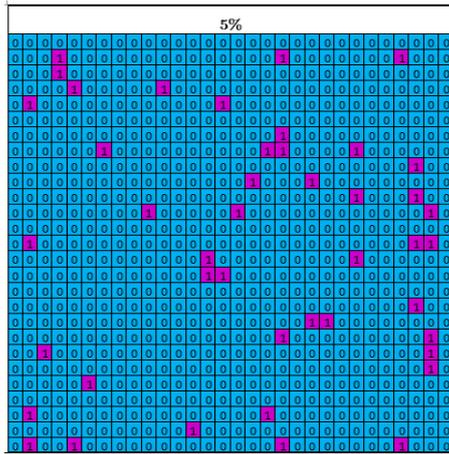
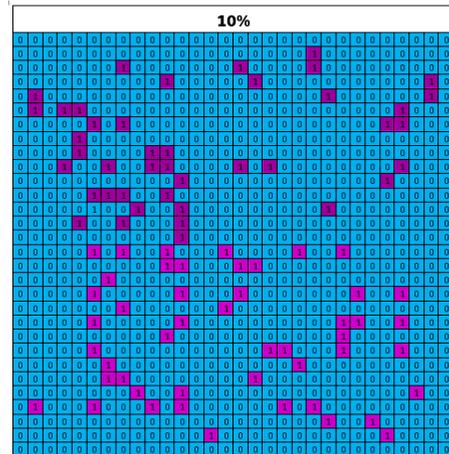


Figure 3-7 : neuf matrices élémentaires « 3 x 3 »

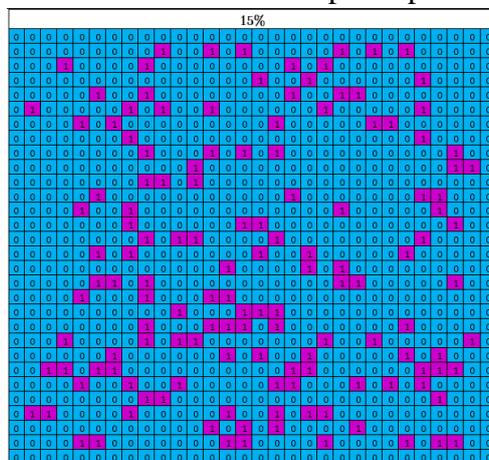
Toutefois, il est possible de concevoir une « matrice » de taille plus grande en contrôlant le nombre des « matrices basiques » qu'elle comporte comme présenté sur la Figure 3-8 et de les orienter suivant des directions aléatoires au sein du domaine.



Attribution arbitraire de 5 % de fibres paille pour une « matrice 30×30 » ;



Attribution arbitraire de 10 % de fibres paille pour une « matrice 30×30 » ;



Attribution arbitraire de 15 % de fibres paille pour une matrice « 30×30 » ;

Figure 3-8 : Différentes distributions de fibre dans une matrice à grandes dimensions « 30×30 »

En raison des « matrices » qui ont été conçues en prenant en compte le pourcentage des fibres, leurs attributions, et finalement leurs positions ; il s’ensuit alors que nous pouvons réaliser une simulation numérique en considérant des données d’entrées.

### 3.5 Géométrie et maillage

La création de la géométrie ainsi que le maillage se font sous le logiciel « Ansys » dans un champ de calcul généré en deux dimensions. Notons que les proportions du champ de calcul ainsi que les dimensions des constituants sont définies pour une « matrice (40x40) » remplie de fibres paille (d=0,0025 m, diamètre utilisé) sont (Figure 3-9) :

$$L_x = L_y = 40 \times D = 0,1 \text{ m.}$$

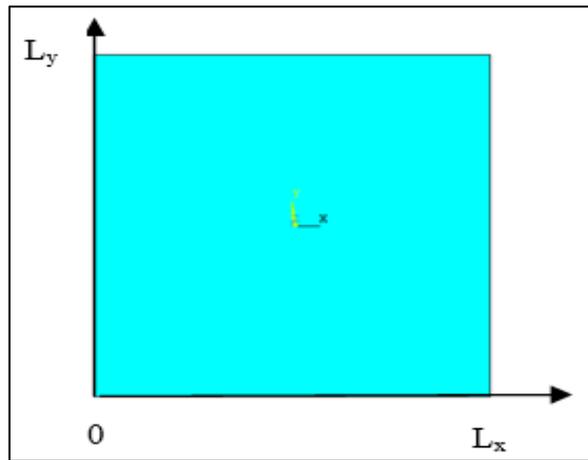


Figure 3-9 : Géométrie 2D  $L_x \times L_y$

Nous avons défini l'élément comme étant un solide type : Quad 4 nœuds 55. Ensuite, les propriétés des deux matériaux ont été définies (Tableau 6) : le matériau (1) étant la matrice terre et le matériau (2) représente la fibre en paille. Finalement, tel qu'il a été cité précédemment, nous avons adopté une grandeur de « discrétisation » équivalente à la proportion la plus éminente en disposition de fibres paille qui est de « 2,5 mm ».

Les caractéristiques « thermophysiques » de la terre et des fibres en paille stabilisantes sont présentées dans le tableau suivant (Tableau 6) :

<b>Matériaux</b>	<b>Conductivité thermique [W/mK]</b>	<b>Diamètre [m]</b>	<b>Chaleur spécifique [J/kgK]</b>	<b>Densité apparente [kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>Fibre Paille [142]</b>	0,07	Entre 0.001- 0.004 Moyenne 0,002 5	1700	200
<b>Terre crue [143]</b>	0,75	-	900	1500

Tableau 6 : Propriétés thermophysiques de la terre et de la paille

Le champ d'analyse représenté sur (Figure 3-10) est généré et maillé en 2D à l'aide du logiciel « Ansys ». Pour ce faire, nous avons divisé le domaine de calcul en maille de géométrie standard du type quadrilatères de 1er degré carré à quatre nœuds. Le nombre total des éléments obtenus pour tout le domaine du calcul est de l'ordre de 1600 éléments et 1681 nœuds. Le maillage a été fait pour plusieurs taux de charge 5 %, 10 % et 15 % distribués aléatoirement pour une matrice « 40×40 » (Figure 3-11).

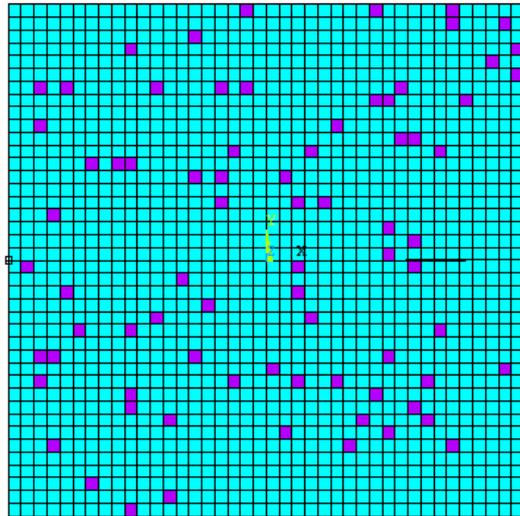


Figure 3-10 : Maillage quadrilatères de 1600 éléments et 1681 nœuds.

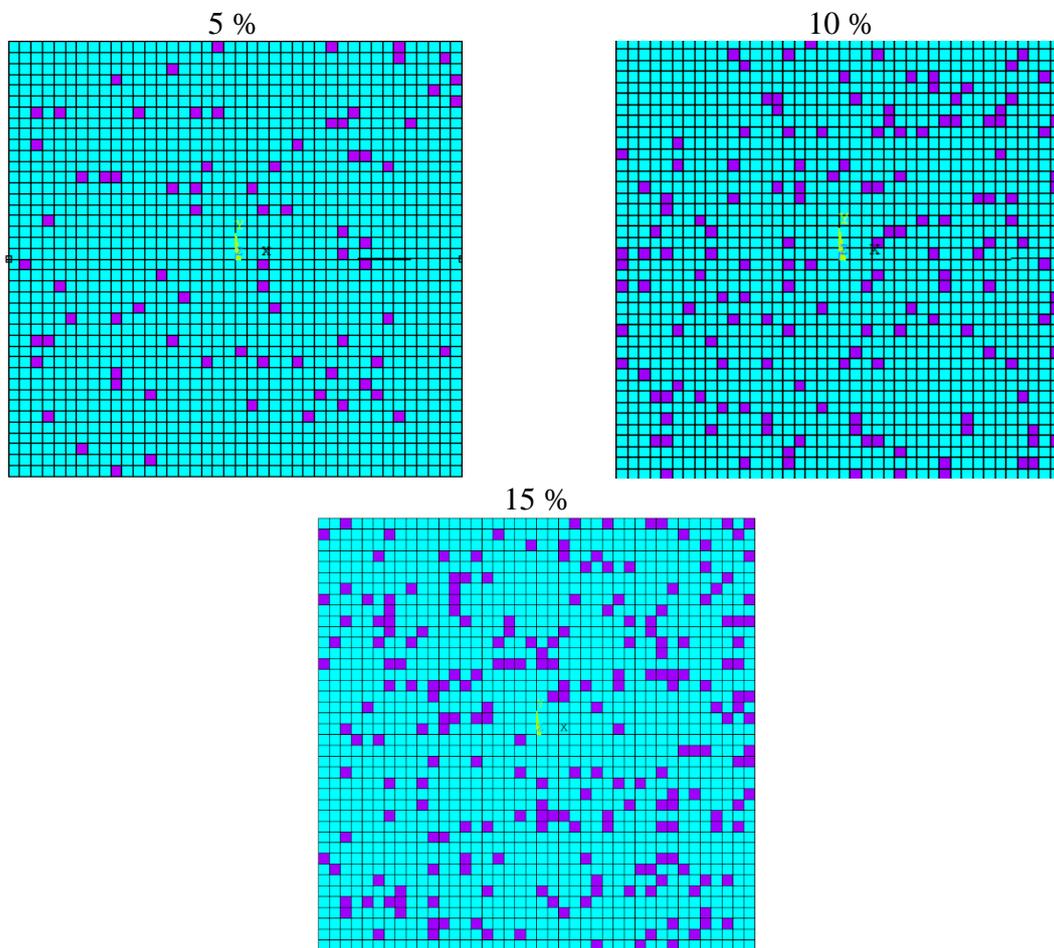


Figure 3-11 : Distribution aléatoire de renfort avec différent taux de remplissage 5 %, 10 % et 15 % pour une matrice « 40×40 »

## 3.6 Détermination des propriétés thermiques effectives du composite en terre paille

La « simulation numérique » est un moyen très utile pour déterminer quelques exigences et pour déterminer le « comportement thermique » du composite « terre paille ». Ainsi, définir un « modèle numérique » approprié nécessite par la considération des différents modes de « transfert de chaleur » utilisé, des « conditions aux limites » requis, des « conditions initiales » et finalement des hypothèses de calcul.

### 3.6.1 Application et mise en équation

Les « conductivités thermiques » de la terre et de la paille sont différentes l'une de l'autre, pour cette raison nous pouvons créer un composite de « conductivité thermique » différente. En effet, « l'équation de la chaleur » sera employée en s'intéressant aux « propriétés » de la terre et de la paille comme des paramètres spécifiques à chacun d'eux non « effective ou apparente », ce qui confère à cette étude de « simulation » son aspect « macroscopique » et non « microscopique ». Ceci offre la possibilité d'analyser l'effet de certains éléments et de les améliorer. Pour cela, des bénéfices pertinents « en temps et en coûts » seront permis par « l'étude numérique ». Par ailleurs, si cette dernière est associée à une « étude expérimentale », alors les résultats seront confirmés et validés.

La « température  $u(x; y; t)$  » d'un élément de « volume ( $\Omega$ ) », de « densité ( $\rho_{eq}$ ) » de « chaleur spécifique ( $C_{eq}$ ) » et de « conductivité thermique ( $k_{eff}$ ) » est géré au fil du « temps » par (96) :

$$\rho_{eq} C_{eq} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(k_{eff} \text{grad } u) + P \quad \forall x \in \Omega \text{ et } \forall t \in [0, T] \quad (96)$$

Où « P » représente la puissance volumique fournie au corps «  $\Omega$  ».

Si la conductivité «  $k$  » est constante et qu'il y absence de puissance fournie, l'équation se ramène à l'équation (97) :

$$C_{eq} \rho_{eq} \frac{\partial u}{\partial t} = k_{eff} \Delta u \quad \forall x \in \Omega \text{ et } \forall t \in [0, T] \quad (97)$$

Lorsque la température ne dépend plus du temps (régime permanent ou stationnaire), on retrouve l'équation déjà étudiée (98) :

$$\left\{ \begin{array}{l} - \operatorname{div}(k_{eff} \operatorname{grad} u) = 0 \quad \forall x \in \Omega \\ + \text{Conditions aux limites sur } \Gamma \end{array} \right\} \quad (98)$$

Des conditions physiques définies aux frontières du domaine « $\Gamma$ » sont nécessaires pour la détermination de cette relation. Mentionnons que ces conditions caractérisent la distribution de la « température » à tout moment et en toute place.

Par rapport à notre travail de recherche, nous avons adopté une approche en éléments finis vu l'hétérogénéité du matériau composite « terre paille ». Ainsi, pour simplifier les calculs, plusieurs hypothèses ont été adoptées.

- Les transferts de types radiatifs sont négligeables ;
- La résistance de contact thermique entre fibre et matrice est négligeable ;
- La production interne de chaleur est négligée.

Pour le « régime permanent », nous avons utilisé l'équation de la chaleur en conduction pure « Loi de Fourier » (équation (99)) :

$$\emptyset = -k \overrightarrow{\operatorname{grad}} T \quad (99)$$

Quant au « régime transitoire », nous avons utilisé l'équation de la chaleur à partir des « lois de conservation » (équation (100)) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C} \nabla^2 T \quad (100)$$

### 3.6.2 Conditions initiales et aux limites en régime permanent

Les conditions « initiales et aux limites » (Figure 3-12) du modèle mathématique construit par les équations et les hypothèses précédentes prennent en considération la « symétrie de l'espace » de calcul. Nous les citons ci-dessous :

- Les deux « faces latérales » sont « isothermes » à des températures respectivement égales à « 0 et 25 °C ».
- Les faces perpendiculaires sont adiabatiques.

- Afin d'imposer la distribution aléatoire des fibres dans la matrice, une fonction est programmée et implémentée dans le modèle numérique.

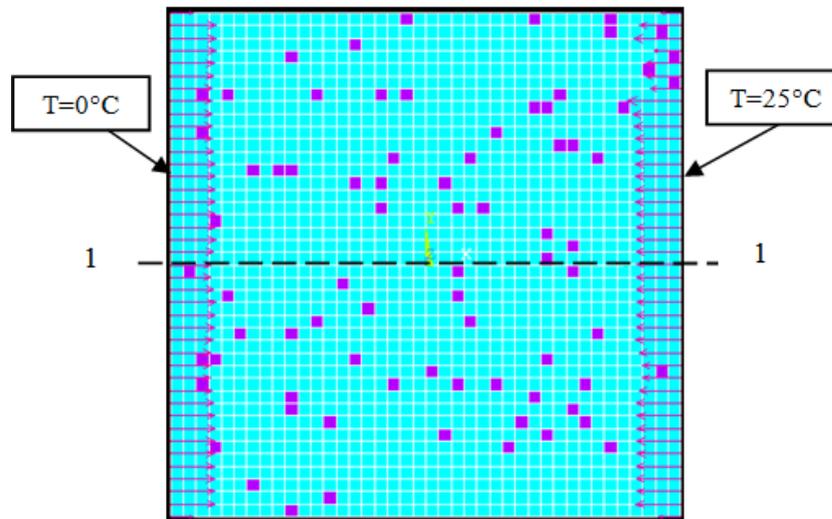


Figure 3-12 : Conditions aux limites en régime permanent

- Simulation en régime permanent équation (101) :

$$K_{eff} = \frac{Q \times e}{\Delta T} \quad (101)$$

La discrétisation de l'équation de la chaleur en régime permanent est appliquée à chaque élément du domaine de la matrice composite dont les dimensions ne seront que celles de la taille élémentaire du renfort.

### 3.6.3 Conditions initiales et aux limites en régime transitoire

Pour déterminer la capacité thermique du composite « terre-paille », notre simulation sera appliquée en régime transitoire. La motivation dans cette partie est la détermination de la variation des « profils des températures » par rapport au « temps », et par conséquent, l'étude de l'impact de quelques éléments tels que « l'influence du pourcentage de fibres » sur les « transferts de chaleur » dans le composite « terre paille ».

Vu les « conditions aux limites » appliquées sur le domaine, nous considérons le « régime transitoire » dans un espace limité.

- Simulation en régime transitoire équation (102)

$$C_{eff} = \frac{k_{eff} p \tau \widehat{\Delta T}}{\rho L_y^2 \Delta T} \quad (102)$$

Les deux faces latérales sont isothermes à des températures respectivement égales à « 0 et 25 °C ». La température ( $T_0$ ) égale à la température au « centre du domaine », elle est égale à « 12,5 °C » (Figure 3-13).

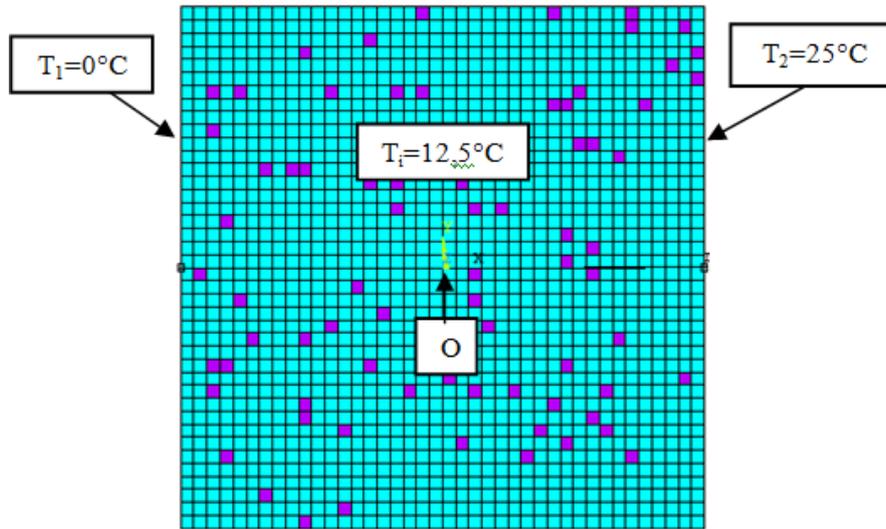


Figure 3-13 : Conditions aux limites en régime transitoire

### 3.7 Détermination des propriétés mécaniques du composite en terre paille

Nous étudions maintenant le problème en soumettant une brique de terre paille à une traction uniforme du type contraintes imposées à « 1, 1,5 et 2 [MPa] » pour différents taux de remplissage en paille 5 %, 10 % et 15 %. Le cas des déformations imposées conduit à des résultats similaires.

Le but ultime de la simulation est d'estimer les valeurs des caractéristiques mécaniques du matériau homogène équivalent notamment son « module de Young ».

#### 3.7.1 Hypothèses du calcul des propriétés mécaniques

Nous exécutons sous le logiciel « ANSYS structural » un calcul en éléments finis d'un essai de traction. Pour le bon déroulement du calcul des propriétés mécaniques du composite « Terre Paille », il suffit d'alimenter le modèle par les données suivantes :

- La quantité des fibres en paille ;

- Les caractéristiques « élastiques » des constituants : le renfort « fibre de paille » et la matrice en « terre ». À savoir le « module de Young (E) » et le « coefficient du Poisson ( $\nu$ ) » ;

Nous estimons que :

- La fibre en « paille » a un comportement isotrope (postulat faux) puisque les « fibres végétales » développent dans l'ensemble une anisotropie remarquable. Aussi bien que pour la « matrice terre » supposée elle aussi isotrope (postulat faux) puisqu'elle dépend de la texture du sol utilisé.
- Les déplacements sont petits
- Le matériau a un comportement élastique

La simulation est appliquée pour une analyse statique. La détermination du module de Young et du coefficient de poisson se fait respectivement selon les équations suivantes (103)(104) :

$$\sigma = E\varepsilon \quad (103)$$

$$\nu = \frac{\Delta Ly}{\Delta Lx} \quad (104)$$

Avec  $\Delta Ly$  : rétrécissement transversal relatif *et*  $\Delta Lx$  : allongement longitudinale relatif

Les caractéristiques « mécaniques » de la matrice et des fibres stabilisatrices sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 7) :

<b>Matériau</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>L(m)</b>
Terre crue [144]	2000	
Paille [145]	4760	0,1

Tableau 7 : Propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre en paille

Les « coefficients de Poisson » de chaque composant présenté dans le tableau ci-dessous (Tableau 8) :

<b>Coefficient de Poisson de la terre</b>	<b>Coefficient de Poisson de la paille</b>
0.38 [127] [146]	0.3 [147]

Tableau 8 : Coefficient de Poisson de la matrice et de la fibre

### 3.7.2 Conditions initiales et aux limites

Pour chaque taux de remplissage, nous avons déterminé trois valeurs de module de Young afin de pouvoir tracer la courbe « contrainte déformation ».

- Une condition de déplacement a été appliquée à la frontière  $\partial\Omega$   $u(x)=u(y)=0$ .
- Des contraintes imposées de « 1, 1,5 et 2 [MPa] » (Figure 3-14).

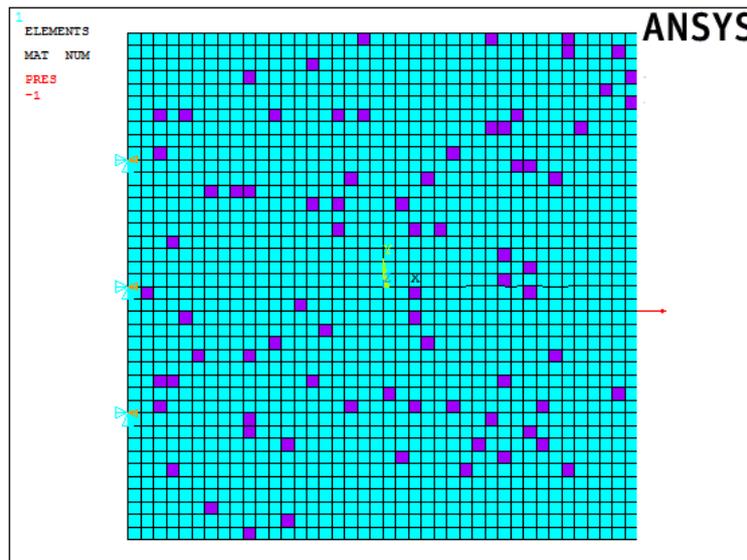


Figure 3-14 : Conditions aux limites de l'essai de traction

### 3.8 Conclusion

La simulation développée ici vise la détermination de différents paramètres du matériau « terre paille » destiné à la construction en traitant simultanément le confort thermique, le confort structurel et l'impact environnemental.

Pour promouvoir la construction de bâtiments en terre, des méthodes de simulation et des méthodes théoriques sont donc nécessaires. Ces méthodes doivent aboutir à des résultats approchés à ceux obtenus par des études expérimentales en minimisant le temps et le coût des essais. En conséquence, la finalité est le développement de systèmes de simulation permettant de faciliter la prise de décision sur l'usage du matériau « terre paille », en amont, par les constructeurs.

## **CHAPITRE 4 CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE**

### **4.1 Introduction**

Ce chapitre décrit l'ensemble des essais nécessaires pour la spécification des « propriétés mécaniques » du matériau « terre paille ». En effet, la nature d'une terre ainsi que la nature des fibres utilisées pour la stabiliser sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement mécanique des briques « terre-paille ». La mise au point des différentes formulations et des conditions de fabrication des échantillons nécessite tout d'abord la réalisation de certains essais préliminaires nommés essais d'identifications. Par ailleurs, les éprouvettes confectionnées seront soumises à un essai de compression afin de déterminer le module de Young du composite « terre paille ».

Les essais d'identifications ont été réalisés au sein du Laboratoire de « Génie civil » au sein de « l'École Mohammadia des Ingénieurs », établissement relevant de « l'Université Mohammed V de Rabat ». Quant à la préparation des éprouvettes ainsi que leur conservation, elles se sont déroulées au sein du « Laboratoire de mécanique » de l'ENSAM (Ex ENSET). Finalement pour les essais de compression mécaniques, ils ont été effectués au sein du « Centre National d'Études et de Recherches Routières (CNER) ».

### **4.2 Essais d'identifications**

Les essais d'identification proposent une classification des sols. Ils permettent d'évaluer des ordres de grandeur au moyen de corrélation des caractéristiques mécaniques des sols.

#### **4.2.1 Masse volumique absolue**

La « masse volumique absolue » d'un matériau est exprimée en «  $T/m^3$ ,  $kg/m^3$  ou  $g/cm^3$  », c'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine après passage à l'étuve à « 105 °C » sans les pores dedans des particules. En fait, au cas où les matériaux sont poreux, ils doivent être concassés et broyer jusqu'à ce que la dimension des grains des matériaux devienne inférieure à 0,2 mm. Ceci en vue d'éliminer les pores et les vides existants dans les matériaux. La Figure 4-1 présente le déploiement de l'essai.

La masse volumique absolue peut se calculer par l'équation (105) :

$$\rho = ms / (N_2 - N_1) \quad (105)$$

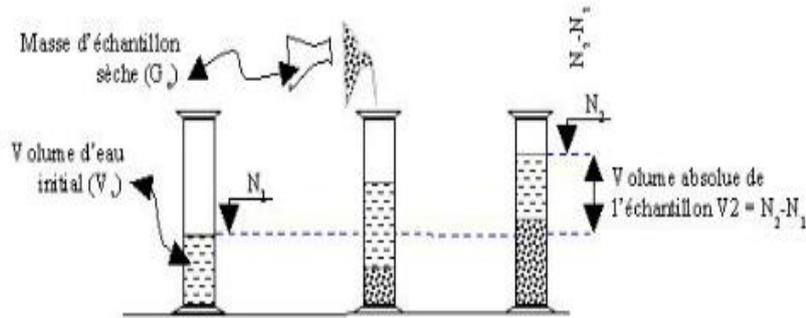


Figure 4-1 : Détermination de la masse volumique absolue d'un matériau  
 La Figure 4-2 illustre l'essai réalisé au laboratoire pour un volume d'eau initial de 250 ml et une masse de 150 g de matériau passé au préalable au tamis de 2 mm de maille.



Figure 4-2 : Essai permettant la détermination de la masse absolue du matériau

### 4.2.2 Limites d'Atterberg

Les « limites d'Atterberg » participent à catégoriser les échantillons et à prévoir leur comportement chaque fois qu'ils sont soumis à des efforts mécaniques. Les « limites d'Atterberg » conviennent à la dose en eau dont le « matériau argileux » a besoin pour passer d'un état « semi-liquide » à un « état plastique ». Ensuite, il passe d'un « comportement plastique » à un « comportement semi-solide » [148].

- **Limite de liquidité  $W_L$  :**

Elle définit la transition à travers un état plastique et liquide. En effet, c'est la « teneur en eau » au-dessus de laquelle la terre s'éboule selon une attitude identique d'un « liquide visqueux » sous l'action de son poids propre.

- **Limite de liquidité  $W_P$  :**

Elle détermine la transition d'une forme de « solide élastique » à une forme « plastique ». Au fait, c'est la « teneur en eau optimale » pour façonner une terre et puis aider le compactage.

Ainsi, pour le calcul de la « limite de liquidité », nous considérons un échantillon dont la quantité correspond à « 200 gr », de dimension de grains moindre à « 425  $\mu\text{m}$  » à laquelle nous ajouterons de « l'eau distillée » pour former une pâte argileuse. Tout d'abord, la pâte est étalée dans une coupelle, nous traçons une lèvres calibrée, ensuite, l'échantillon est secoué sur « l'appareil de Casagrande ». Enfin, nous notons la fréquence de choc équivalant à la fermeture de la « lèvres de 10 mm ». Nous réalisons ainsi au moins quatre mesures. Les mesures sont inscrites sur une courbe affichant « teneur en eau-nombre de coups ». La « limite de liquidité » équivaut à la « teneur en eau » chaque fois que la fréquence de choc est égale à « 25 » [149].

De plus, pour le calcul de la « limite de plasticité », nous nous servons de la « pâte argileuse » en vue de constituer un boudin de faible épaisseur de « 3 ou 4 cm de long ». Ensuite, nous l'enroulons sur une surface plane jusqu'à ce qu'il arrive à une longueur d'environ « 10 cm de long et 3 mm de diamètre » à sa rupture. Enfin, la « teneur en eau » du boudin lors de sa brise représente la « limite de plasticité ». Nous répétons la manipulation à trois reprises et la « limite de plasticité » correspond à la « valeur moyenne » de ces trois proportions [149].

Les « limites d'Atterberg » servent à donner l'expression de « l'indice de plasticité », selon l'équation (106) :

$$I_P = (W_L - W_P) \quad (106)$$

Elle définit l'intervalle où le matériau argileux reste plastique ou façonnable.

Les Figure 4-3 ;Figure 4-4) illustrent les « essais d'identifications » des « limites d'Atterberg ».



Figure 4-3 : Limite de liquidité à la coupelle



Figure 4-4 : Limite de plasticité au rouleau

### 4.2.3 Essai au bleu de méthylène

L'essai au « bleu de méthylène » (Annexe 1) est adopté en science des sols en vue de définir la « propreté du sol ». L'essai au « bleu de méthylène » est déterminé pour les éléments des terres compris entre « 0 et 400  $\mu\text{m}$  » (Annexe 1). En effet, les « argiles » ainsi que les « matières organiques » absorbent le « bleu de méthylène ». Cependant, mesurer la « valeur au bleu » de la portion fine des sols sert à évaluer leur pouvoir à retenir les « molécules du bleu de méthylène » et par élargissement les « molécules d'eau ». Par ailleurs, il présente alors l'action des « argiles » dans l'échantillon. D'ailleurs, il permet l'identification et la typologie des sols.

Or, pour réaliser l'essai, la terre a été intégrée dans un bocal, mis en suspension dans de « l'eau distillée » et dispersé en continu en utilisant un élément perturbateur à palettes à un rythme, équivalent à « 400 tr/min  $\pm$  100 tr/min » (Figure 4-5). De même, l'expérience consiste à ajouter

progressivement un soluté de « bleu de méthylène » à la prise d'essai d'un spécimen à même que la portion « argileuse » en soit saturée. En définitive, des gouttes sont prélevées chaque minute et sont mises sur le « papier filtre », constituant ainsi un sédiment principal orné d'un « bleu sombre » cerné d'une aire « humide incolore ». Dès l'apparition et la persistance d'une auréole périphérique bleu clair, nous pouvons dire que la saturation est atteinte. L'essai est refait pour cinq tâches consécutives. En somme, l'essai de la tâche sur papier filtre permet de contrôler la saturation des particules de sol.



Figure 4-5 : Appareillage permettant la réalisation de l'essai au « bleu de méthylène »  
Le calcul de la « valeur au bleu du sol (VBS) » se fait en appliquant l'expression ci-après (107) :

$$VBS = \frac{B}{m_s} \times 100 \quad (107)$$

B : masse du bleu de méthylène introduit dans le récipient en « gr » ;

Ms : masse sèche du prélèvement d'essai en « gr » ;

Le Tableau 9 présente la classification des sols selon le guide de terrassement routier :

<b>0,1</b>	Seuil d'insensibilité à l'eau.
<b>0,2</b>	Limite au-dessus de laquelle apparaît à coup sûr la sensibilité à l'eau.
<b>1,5</b>	Limite entre les sols sableux limoneux et sableux-argileux.
<b>2,5</b>	Limite entre les sols limoneux peu plastiques et les sols de plasticité moyenne.
<b>6,0</b>	Limite entre les sols limoneux et les sols argileux.
<b>8,0</b>	Limite entre les sols argileux et les sols très argileux.

Tableau 9 : Classification des sols selon leurs sensibilités au bleu de méthylène.

#### 4.2.4 Teneur en eau optimale de la terre compactée

La dose en eau employée lors de la fabrication des briques est conformée de façon à parvenir à la « densité optimale » pour une « énergie de compactage » donnée. Pour cela, nous utilisons un essai dit de « Proctor standard ou modifié » [13]. Notre échantillon en « terre » est compacté à l'aide d'une dame au sein d'un « moule cylindrique » de proportions notoires, au moyen de la tombée réitérée d'une masse calibrée ou par l'application d'une pression par un « piston » [150], comme présenter sur la Figure 4-6. La « masse volumique » est évaluée après avoir damer des échantillons à distinctes « teneurs en eau ». Enfin, la « teneur en eau » est optimale pour une « masse volumique maximale ».



Figure 4-6 : Dispositif de l'essai de Proctor

#### 4.2.5 Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique offre la possibilité de répertorier les grains d'un échantillon selon leurs tailles et fournit une répartition de la proportion de chaque classe relativement au poids total de l'échantillon. En effet, nous avons réalisé la mesure de la distribution granulométrique des échantillons conformément à la méthode par tamisage.

Nous avons passé l'échantillon à classer dans une succession de tamis emboîtés possédant des diamètres d'ouverture progressifs depuis la base vers le sommet. Nous avons placé l'échantillon sur le « tamis supérieur » et nous avons effectué le classement par « vibration manuelle », comme présenter sur la Figure 4-7. Ainsi, nous récupérons de chaque tamis le refus que nous pesons afin de déterminer le pourcentage. Chaque échantillon est analysé trois fois et la moyenne est calculée.



Figure 4-7 : Série de tamis pour l'analyse granulométrique

### 4.3 Préparation des éprouvettes

Un essai mécanique correct débute toujours par la réalisation d'une bonne éprouvette. En effet, les paramètres de confection d'une éprouvette en « terre paille », tels que le dosage en paille et les effets de bords influencent significativement les propriétés mécaniques du matériau.

#### 4.3.1 Confection des blocs du composite

Pour la réalisation des essais mécaniques, la fabrication des éprouvettes en « terre paille » requiert un coffrage suffisamment solide pour résister aux poussées exercées par le matériau sur le moule quand il est pressé à l'intérieur. Par ailleurs, le moule doit permettre l'égouttage de « l'eau » lors de l'application de la pression.

En s'appuyant sur la configuration de Guettala et autres. [151], nous avons conçu pour la confection des éprouvettes un moule en aluminium. Il est composé de trois éléments une base, un moule et un piston, comme présenter sur la Figure 4-8 formant ainsi un assemblage dont le volume est «  $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}^3$  » [151]. Le moule est équipé d'un « piston » pour garantir la diffusion de la « force de compactage de la presse » à la mixture. De même, le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égal à 2,4 kg.

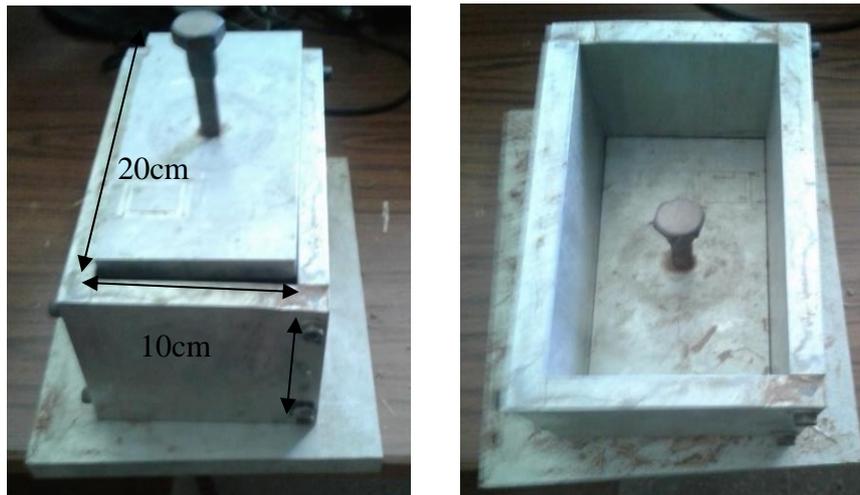


Figure 4-8 : Moule utilisé pour la fabrication des briques terre paille

### 4.3.2 Préparation des mélanges

La réalisation des éprouvettes nécessite tout d'abord une homogénéisation à sec des mélanges pendant deux minutes. D'autre part, nous avons effectué le malaxage avec de l'eau pendant deux minutes. Or, « l'eau de gâchage » est contrainte d'être claire et propre. Dans l'ensemble l'eau potable s'adapte très bien à la fabrication des mélanges. De même, nous avons procédé à l'ajout des fibres en adoptant un malaxage manuel pendant « 5 à 10 minutes ». Par ailleurs, nous avons pris en compte un dosage en fibres de type massique, c'est ainsi qu'une quantité de fibre paille est ajoutée au matériau « terre » selon le pourcentage choisi « 5 %, 10 % et 15 % ». L'homogénéité du mélange est déterminante pour la qualité du matériau composite « terre paille ». Finalement, le mélange est disposé dans l'éprouvette afin d'être compacté.

### 4.3.3 Compactage des briques

Nous avons utilisé une presse hydraulique en mode statique pour le compactage des briques présenté sur Figure 4-9. En effet, le plateau inférieur de la presse reste fixe. En revanche, le plateau supérieur se déplace jusqu'à l'affichage sur l'appareil de la pression souhaitée.



Figure 4-9 : Compactage des briques dans une presse hydraulique

#### 4.3.4 Conservation des briques

Pour éviter les problèmes de dessèchement trop rapide des briques en terre paille, la conservation des briques s'avère une étape très importante. Tout au long de cette phase, nous avons gardé les briques dans une atmosphère humide, à l'abri du soleil, et du vent. À cet égard, après le démoulage, les briques sont prises avec précaution à cause de leurs fragilités. Ensuite, elles sont soumises à une période de cure au Laboratoire.

#### 4.4 Essais mécaniques

Notre étude expérimentale a pour objectif la détermination des propriétés mécaniques du composite « terre paille ». À cet égard, « l'essai de compression » a été employé pour déterminer la propriété visée de ce travail de recherche qui n'est que le « module de Young ».

Les essais sont réalisés après « 28 jours de cure », puisque à cette échéance, les propriétés ultimes des spécimens ont abouti « 95 % » de leurs performances. Pour chaque essai, « trois blocs » ont été expérimentés. En outre, nombreuses sont les procédures employées pour déterminer la « résistance à la compression ». La mesure de la « résistance à la compression » peut être réalisée soit sur une unité de maçonnerie composée de « blocs et de joints », soit sur un « demi-bloc » ou sur un « bloc complet » [152]. Ainsi, en ce qui a trait à notre étude, la mesure de la « résistance à la compression » est effectuée sur un bloc complet conformément à la technique déployée par Walker [153]. Par ailleurs, nous chargeons à vitesse constante « 0,03 mm/s » jusqu'au moment où l'on peut parvenir à la « rupture du bloc ». La résistance à la compression convient à la charge maximale générée à la surface de l'échantillon. Cependant,

la mise à zéro de l'appareil de mesure des déplacements est effectuée une fois la brique maintenue bien centrée entre les deux plateaux de presse présentée sur la Figure 4-10. En outre, pour la réalisation de l'essai, l'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture. Les déplacements verticaux sont mesurés avec l'application d'une charge de compression progressive suivant un pas de « 6 KN ». Finalement, les résultats nous permettent de dresser la courbe « contrainte – déformation » et de déterminer ultérieurement le « module de Young ».

La « résistance à la compression » est estimée conformément à l'équation (108) :

$$R_c = \frac{F_{c,max}}{S} \quad (108)$$

$R_c$  : la résistance en compression (MPa)

$F_{c,max}$  : la charge maximale en compression entraînant la rupture (N) ;

$S$  : la surface transversale de l'éprouvette d'essai (mm<sup>2</sup>).



Figure 4-10 : Essai de compression simple à la machine CBR

## 4.5 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis l'élaboration d'un programme expérimental des essais nécessaires pour la définition des « propriétés mécaniques » du composite « terre paille ». En effet, la connaissance des caractéristiques de la matière première permet une meilleure compréhension de son comportement lors du façonnage et du séchage des briques. Par ailleurs, la connaissance des matériaux ainsi que les processus de confection des composites de terre stabilisée en fibres paille, va nous permettre de mieux analyser les résultats théoriques et numériques obtenus. En outre, l'identification nous donne la possibilité d'avoir une excellente

connaissance des répercussions des différents paramètres étudiés sur le « comportement mécanique » du composite « terre paille ». C'est pourquoi cette étape est essentielle pour le retentissement et la régénération des prouesses de ce matériau, conformément aux exigences du développement durable.

## CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### 5.1 Introduction

En se référant aux hypothèses de calcul ainsi que les conditions « initiales et aux limites » déjà précitées au Chapitre 3. Le sixième chapitre a pour but d'exposer et d'interpréter les résultats obtenus tout au long de ces travaux de recherche. En premier lieu, les résultats des « propriétés thermiques » du matériau composite « terre paille » par simulation numérique aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire seront présentés. Ensuite, une comparaison entre l'approche théorique et la simulation sera présentée pour une validation des résultats. En dernier lieu, les résultats de simulation du comportement mécanique du composite seront comparés à ceux obtenus par approches théoriques et expérimentales.

### 5.2 Résultats des propriétés thermiques du composite en terre paille

L'objectif de la « modélisation » est de comprendre le « comportement thermique » d'un matériau composite en terre stabilisée par différents pourcentages de fibres en paille « 5 %, 10 % et 15 % » réparties de façon aléatoire à l'intérieur d'une « matrice (40 x 40) ». L'analyse des « profils de température » dans le domaine permet d'avoir avec les conditions « initiales et aux limites » énoncées précédemment tous les paramètres « thermique » du composite « terre paille ». En effet, cette caractérisation est établie en se basant sur les propriétés thermophysiques aussi bien de la « matrice en terre » que de la « fibre en paille ». (Voir Chapitre 3 « Paragraphe 3.5 Géométrie et maillage » [Tableau 6]).

#### 5.2.1 Détermination de la conductivité thermique effective du composite

- **Cartographie des températures**

La Figure 5-1 montre la cartographie des températures obtenues pour les taux considérés en fibres. Ils reflètent le comportement quasi homogène du matériau « terre paille ». Les résultats retirés sont cohérents : l'introduction de « fibres en paille » à l'intérieur de la « matrice » modifie entièrement le changement des « températures ». Comme prévu, le transfert est plus lent dans les environnements où la fibre de paille est moins conductrice que la matrice terre. Ce premier résultat permet d'envisager la possibilité d'obtenir les propriétés thermiques effectives à partir de la simulation.

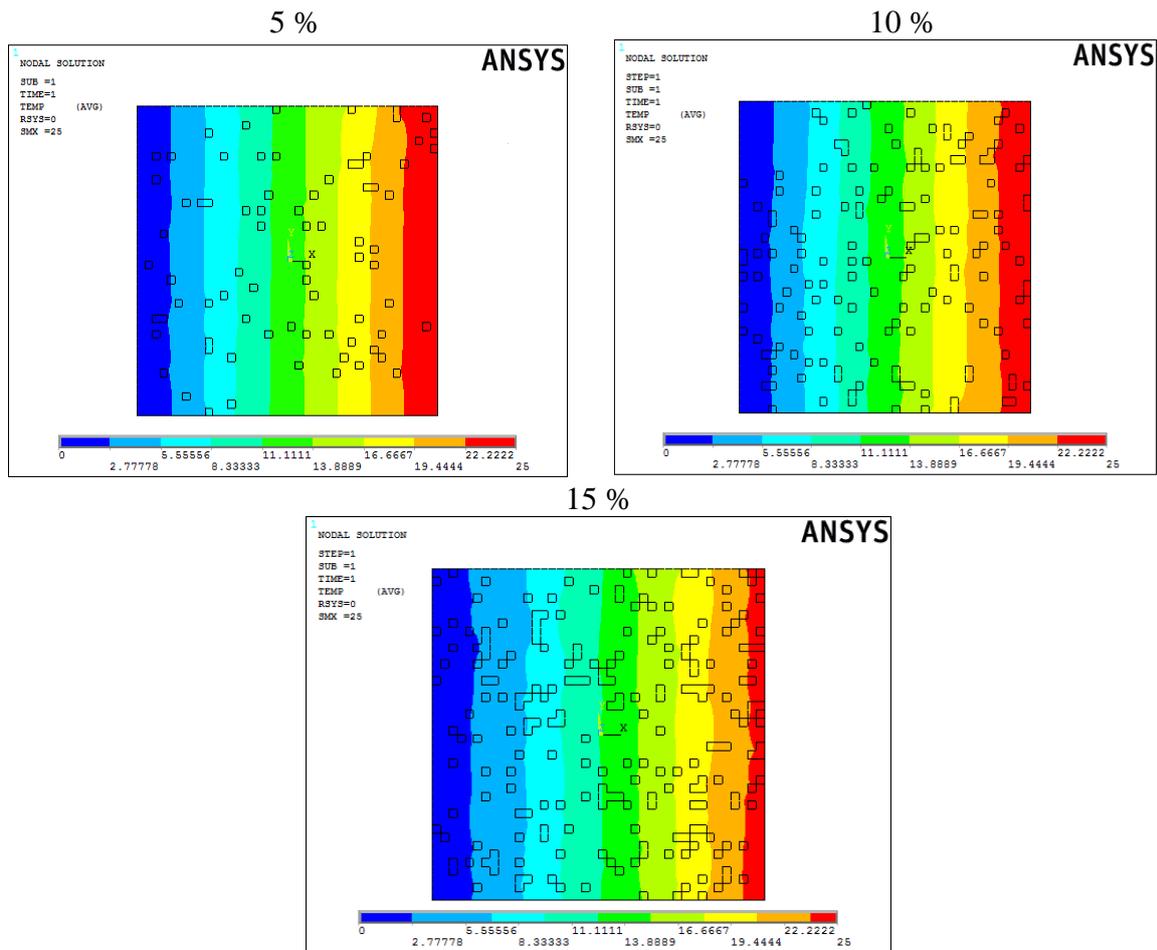


Figure 5-1 : Cartographie des températures

- **Cartographie de densité de flux**

La Figure 5-2 montre que la distribution du flux est uniforme. Ces résultats renforcent ceux obtenus pour la cartographie des températures et montrent à nouveau un comportement quasi homogène du matériau composite. Du fait de la position hasardeuse des fibres dans la « matrice » à chaque redémarrage du processus de calcul, le résultat de chaque « simulation » est différent. Les propriétés homogénéisées des matériaux composites dépendent fortement de la répartition des charges [154].

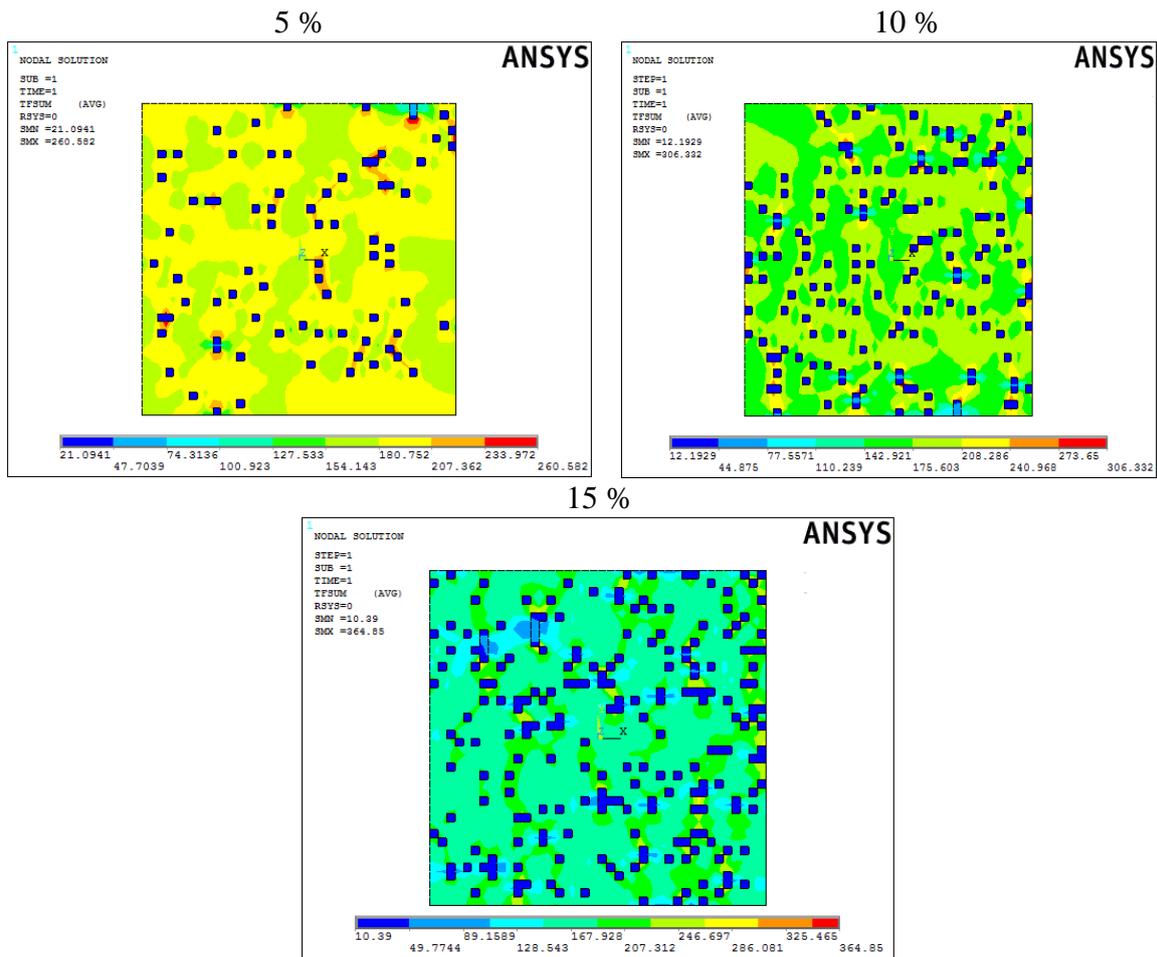


Figure 5-2 : Cartographie de densité de flux

- **Distribution de la température**

Le profil de température obtenu le long de la ligne [1 – 1] (Figure 3-12) en « régime stationnaire » est linéaire comme le montre la Figure 5-3.

Le calcul de la pente de cette distribution offre la possibilité d'identifier la « conductivité thermique » du composite « terre paille ». Les résultats obtenus pour les différents pourcentages de « fibres en paille » paraissent acceptables en les comparant à un certain nombre d'études traitant ainsi la « conductivité thermique » de la brique de terre qui est d'environ « 0,60 [W/m. K.] » [143] [155] [156] [157].

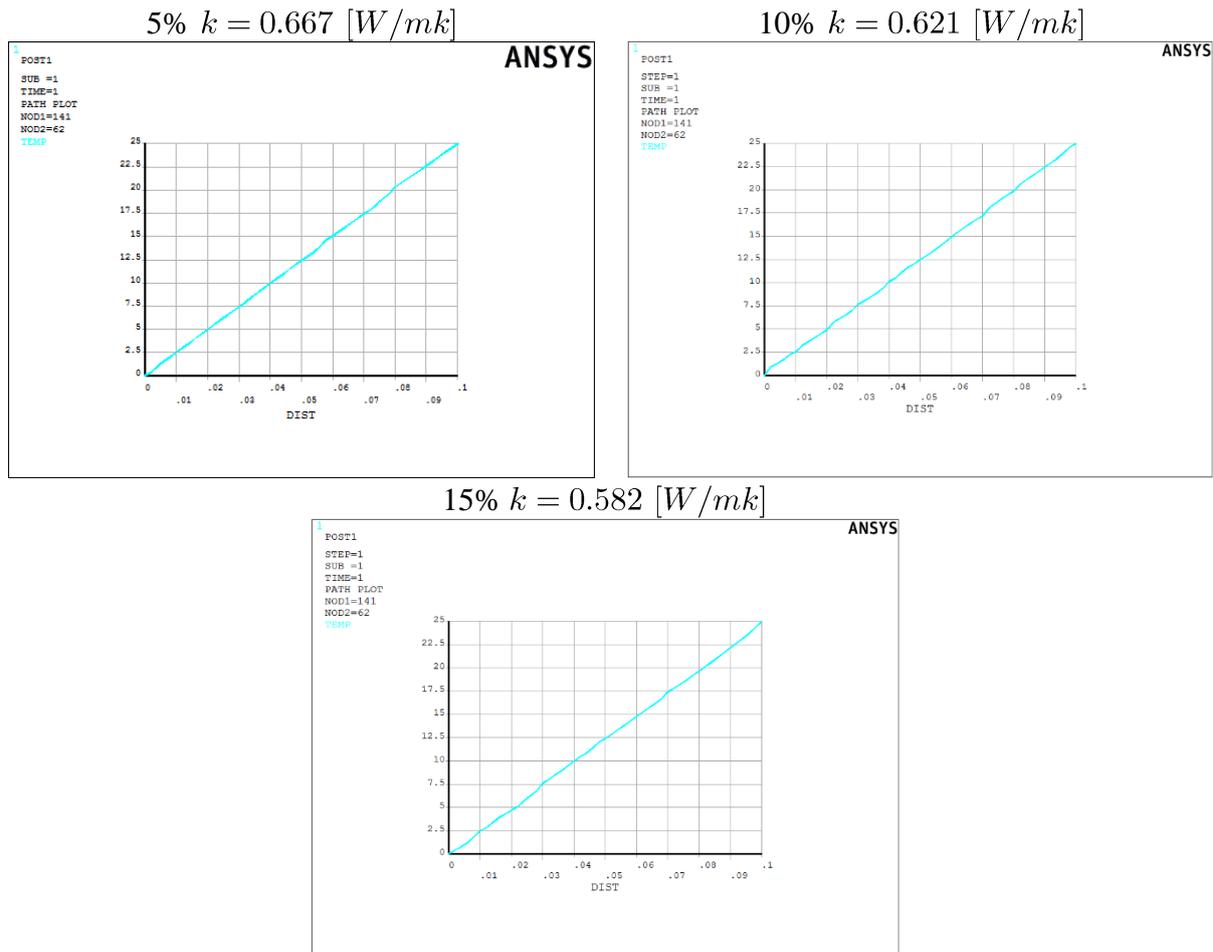


Figure 5-3 : Profil de température pour différents taux de remplissage de fibres en paille « 5 %, 10 % et 15 % »

- **Conductivité thermique effective du composite « terre paille » en régime permanent**

La Figure 5-4 représente les éléments de base de « l'approche numérique » pour la détermination des « conductivités thermiques » réalisées sur le composite « terre-paille » avec des concentrations en paille comprises entre « 5 % et 15 % ». Une baisse de la « conductivité thermique » avec un accroissement de la concentration de fibres en paille est aisément observée pour chaque quantité considérée.

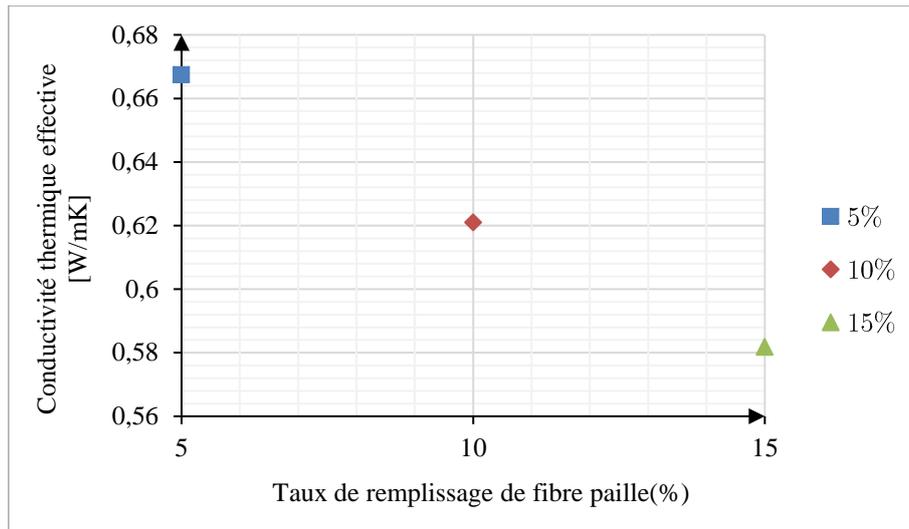


Figure 5-4 : Conductivité thermique effective du composite « terre paille » en régime permanent

### 5.2.2 Validation des résultats numériques

Une comparaison a été effectuée entre les résultats obtenus par « simulation numérique » et les résultats des « modèles théoriques » (Figure 5-5). Nous constatons que les résultats numériques du composite «terre paille» sont avoisinants de ceux repérés dans la littérature [155]. D'ailleurs, nous observons que les « profils de températures » ont la même allure. Par ailleurs, nous remarquons que par rapport aux résultats théoriques obtenus, les modèles de « Nielson », « Hatta et Taya » ont surévalué les valeurs de « conductivité thermique effective » du composite « terre paille ». Nous estimons que l'approche de « Hashin et Shtikman » est la moins éloignée des simulations numériques.

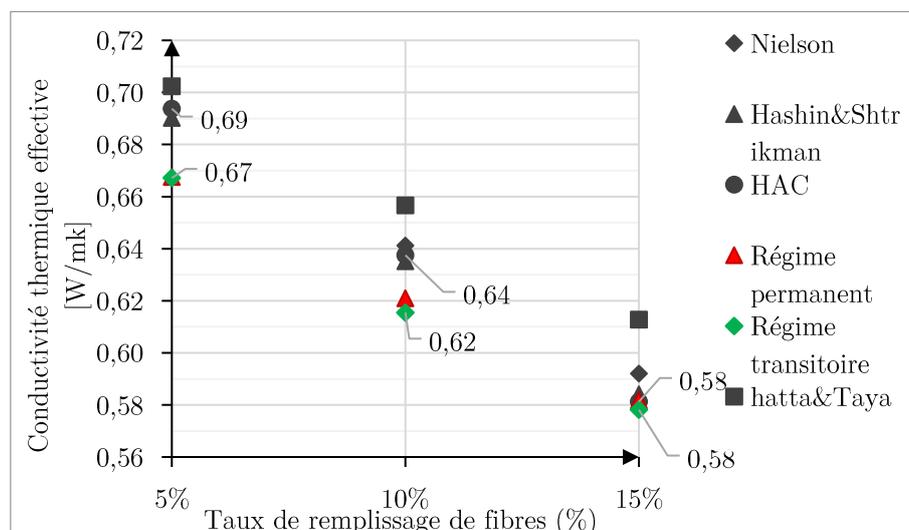


Figure 5-5 : Comparaison des modèles théoriques avec les résultats de simulation

### 5.2.3 Détermination de la capacité thermique effective du composite

Dans le cas d'une « matrice vierge », la valeur de la « conductivité thermique effective » «  $k_{eff}$  » obtenue doit être identique à sa valeur obtenue en régime permanent «  $k_0$  ». Ensuite, la valeur de l'élément «  $p$  » déjà prédéfinie au (Chapitre 2 ; paragraphe 2.4.4) peut être calculé facilement. Quant aux valeurs de la « constante de temps  $\tau$  », elles sont obtenues par la « méthode des 63 % », ce qui permet la détermination du temps nécessaire pour atteindre l'état stationnaire. Les valeurs de «  $\tau$  » sont présentées sur le (Tableau 10).

	5 %	10 %	15 %
$\tau(s)$	1900	2000	2500

Tableau 10 : Valeur de la constante de temps pour différentes concentrations

La Figure 5-6 représente la « conductivité thermique effective » en état « transitoire ». Nous remarquons qu'en rajoutant le pourcentage de la fibre en paille la conductivité thermique décroît. Cela peut être expliqué comme suit : le « transfert de chaleur par conduction » est moindre au sein d'un environnement dans lequel la « conductivité thermique » est faible.

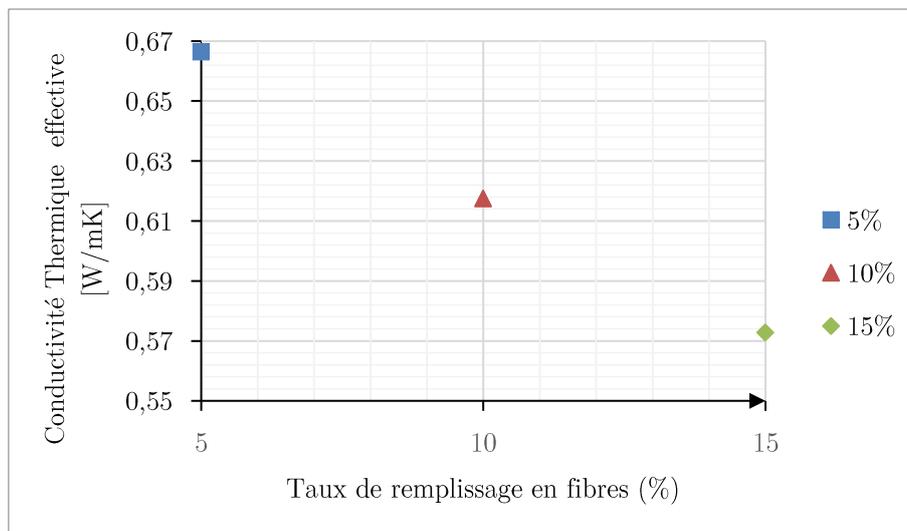


Figure 5-6 : Conductivité thermique en fonction des fibres

La Figure 5-7 montre l'évolution de la « température » au centre de la « matrice » au fil du temps, la « température » se stabilise à une valeur spécifique pour chaque pourcentage de fibres en « paille ». Ainsi, dans l'éventualité où ce milieu est perturbé, cela veut dire que le temps de mise en équilibre est plus long. D'ailleurs d'après cette figure nous remarquons que dans la mesure où le temps nécessaire pour atteindre l'état stationnaire augmente, les conductivités thermiques réelles diminuent, mais par contre les capacités thermiques augmentent.

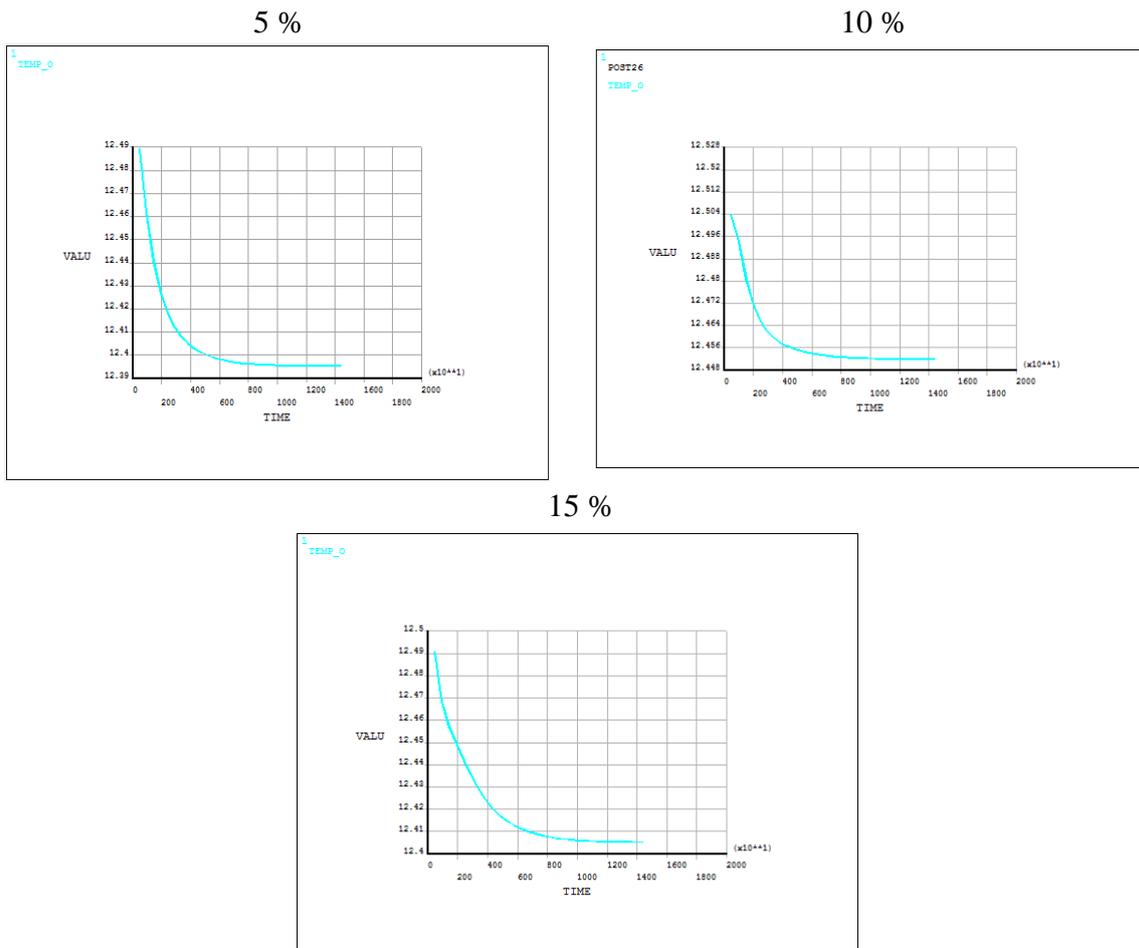


Figure 5-7 : Cartographie de densité de flux au temps t=14400s

### 5.2.4 Validation des résultats numériques

Dans le cas d'un « matériau composite », la « conductivité thermique » du renfort est minime en comparaison à celle de la « matrice d'origine ». Par conséquent, nous remarquons d'après la Figure 5-8 que l'élévation du taux de fibres réduit inévitablement le « transfert de chaleur » dans la matrice, d'où l'accroissement de la « capacité thermique ».

Les résultats obtenus s'avèrent acceptables par rapport à un ensemble d'études traitant la « capacité calorifique spécifique » de la brique de « terre » qui est approximativement à « 996[J/kg. K] » [158].

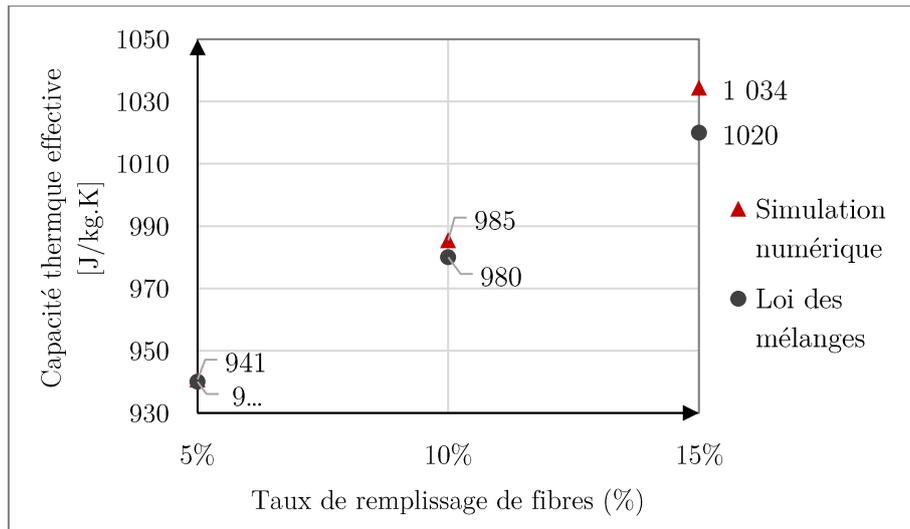


Figure 5-8 : Capacité thermique en fonction des fibres 5 %, 10 % et 15 %

### 5.3 Résultats des propriétés mécaniques du composite en terre paille

Estimer les valeurs des propriétés mécaniques du composite constitué de fibres en paille distribuées aléatoirement dans la « matrice en terre » à différents pourcentages représente l'un des enjeux essentiels de notre travail de recherche. En effet, les résultats des déplacements pour les trois contraintes imposées « 1, 1.5 et 2 [MPa] » permettent de définir les « propriétés effectives intrinsèques » du matériau composite. Ces propriétés vont être comparées aux propriétés effectives obtenues par approche théorique pour une validation appropriée des résultats de simulation numérique.

#### 5.3.1 Résultat de simulation des propriétés mécaniques du composite « terre paille »

Les Figure 5-9 ; Figure 5-10 ; Figure 5-11) représentent les résultats de déplacements pour les trois contraintes imposées pour différents pourcentages de fibres en paille « 5 %, 10 % et 15 % ». Cette analyse prouve que le comportement est toujours dans le domaine élastique. En effet, les résultats de calcul montrent un comportement légèrement différent concernant l'homogénéité. En fait, il est à relever que la distribution des déplacements représente de petites distorsions.

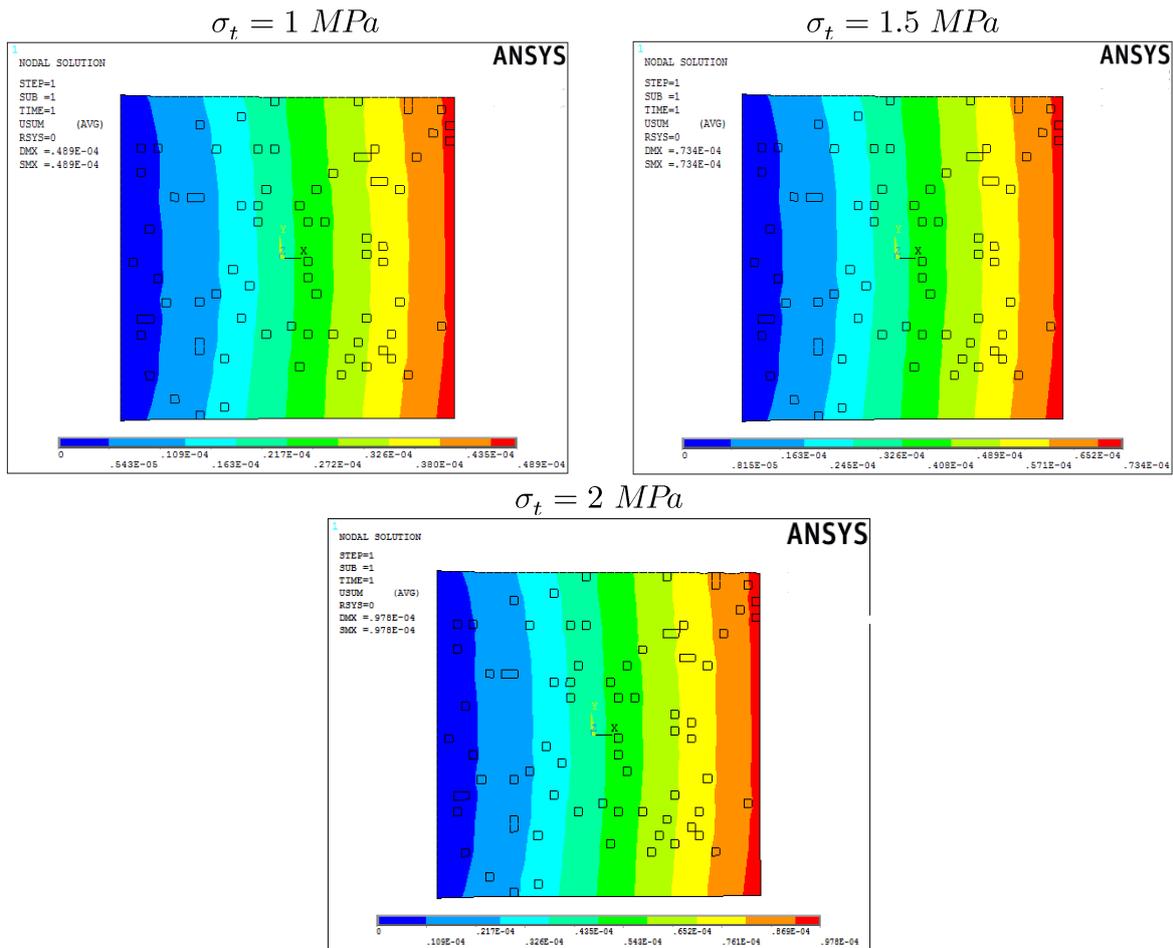
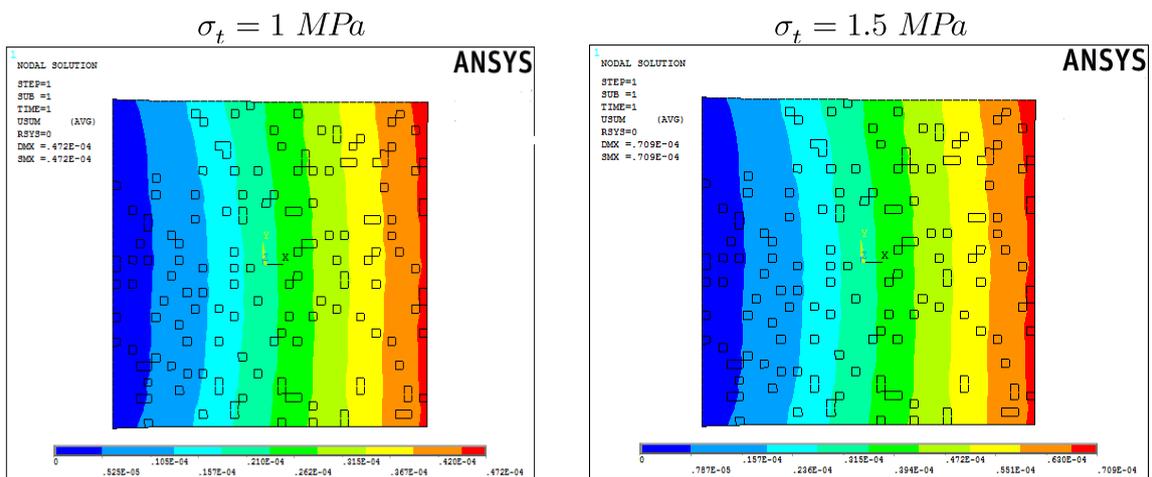


Figure 5-9 : Résultat cartographique des déplacements 5 %



$$\sigma_t = 2 \text{ MPa}$$

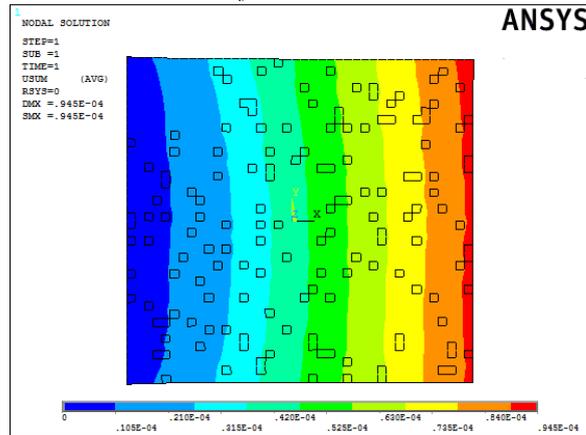
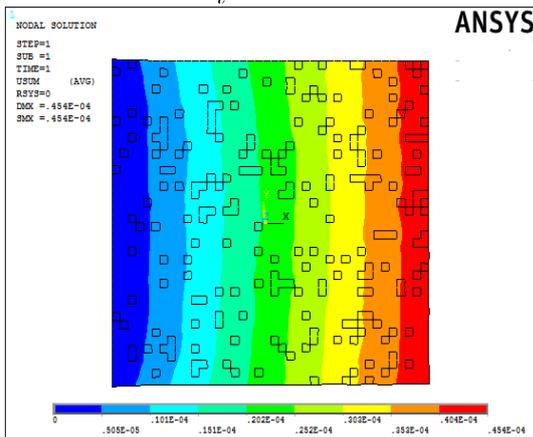
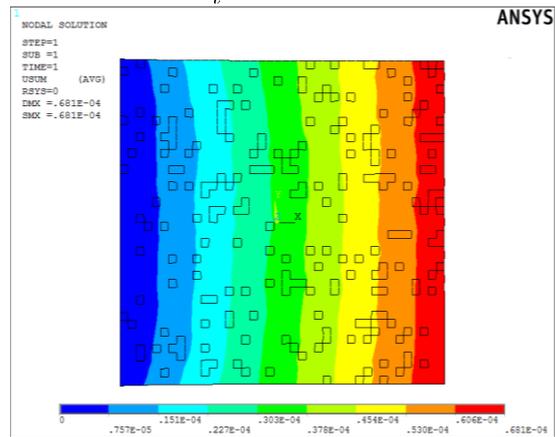


Figure 5-10 : Résultat cartographie des déplacements 10 %

$$\sigma_t = 1 \text{ MPa}$$



$$\sigma_t = 1.5 \text{ MPa}$$



$$\sigma_t = 2 \text{ MPa}$$

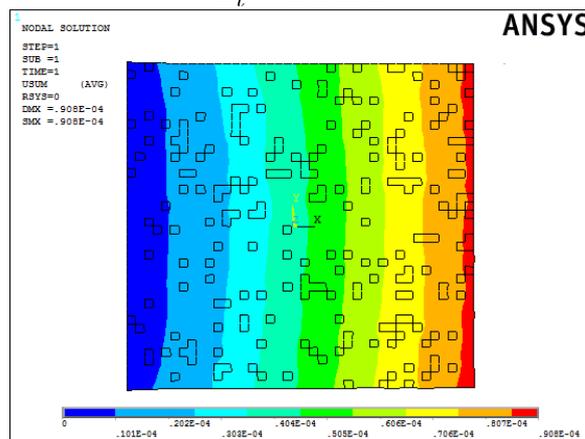


Figure 5-11 : Résultat cartographie des déplacements 15 %

Sur la Figure 5-12, nous remarquons que le matériau composite « terre paille » est déformé de la même manière que certains « matériaux traditionnels ». Par conséquent, la détermination de la pente pour chaque pourcentage de fibres en paille permet d'estimer le « module de Young » du composite pour différents pourcentages. Ainsi, l'ajout de fibres en paille permet de conférer au matériau composite une certaine résistance à la traction, mais reste encore négligeable.

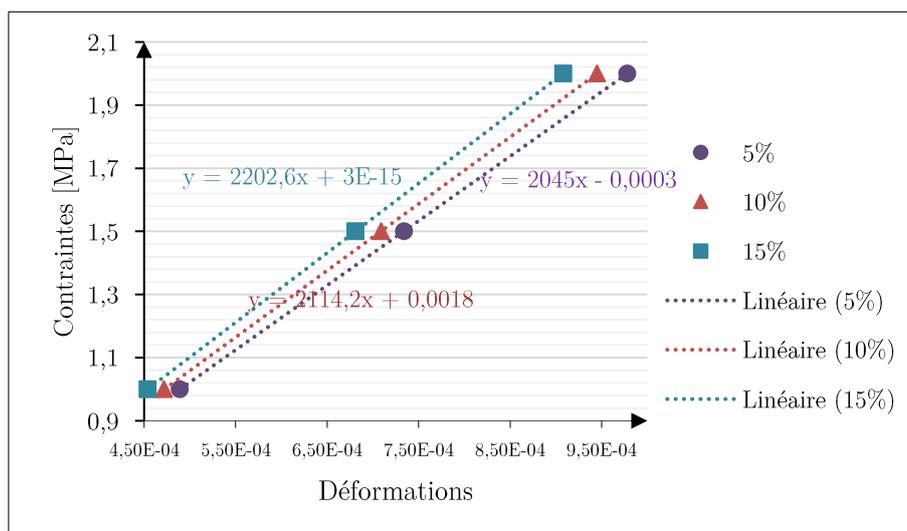


Figure 5-12 : Courbe « contrainte déformation »

La Figure 5-13 montre que le « module de Young » du matériau composite « terre paille » a été amélioré par l'élévation du pourcentage de remplissage en fibres paille de « 5 à 15 % ». Les résultats retirés pour les différents « modules de Young » semblent en bon accord avec les travaux précités au (Chapitre 2 ; section 2.5.3) qui situe le « module de Young » entre « 1 et 6 GPa » [83].

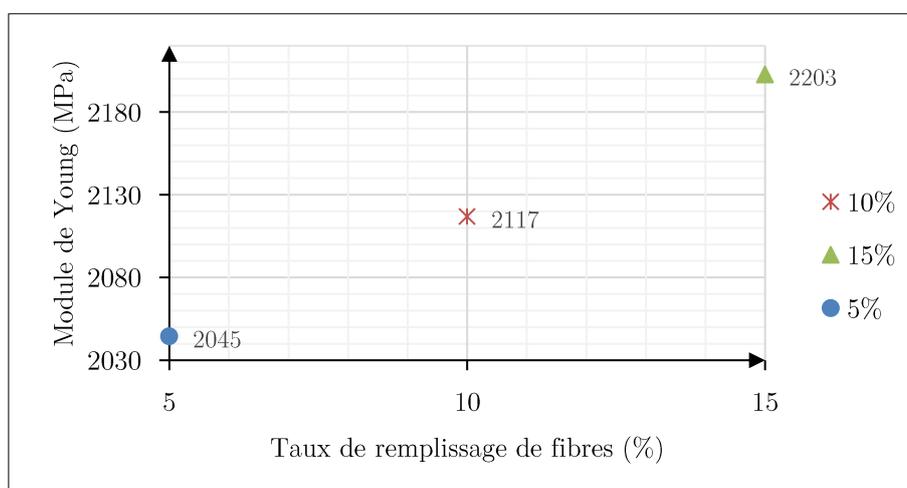


Figure 5-13 : Module de Young selon différents taux de remplissage de fibres en paille.

### 5.3.2 Validation des résultats numériques

D'après la Figure 5-14, nous remarquons que les résultats obtenus par la « loi des mélanges » surestiment les valeurs du « module de Young ». En effet, ces résultats sont tout à fait justifiables, car la relation qui permet le calcul du « module de Young » du composite par la « loi des mélanges » ne donne pas une attention particulière à la distribution aléatoire des fibres en paille. En revanche, cet élément important a été adopté lors de la simulation numérique sur le logiciel « Ansys ».

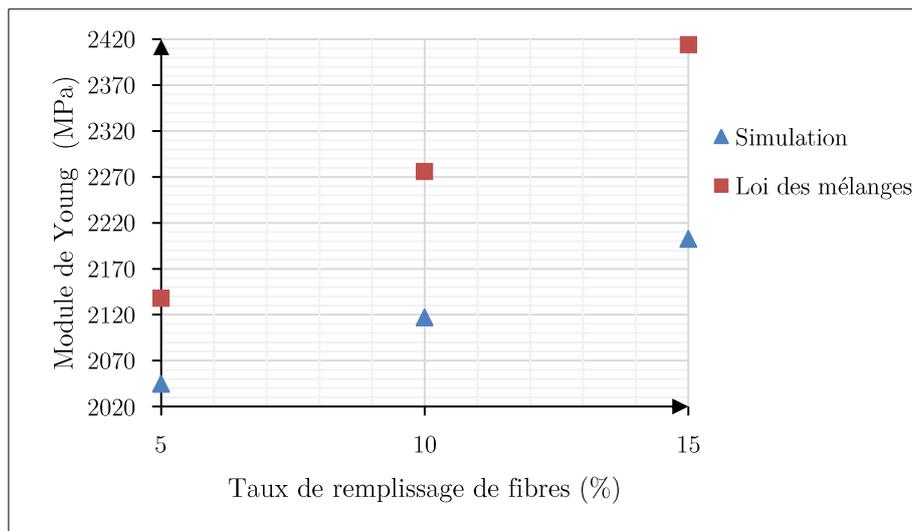


Figure 5-14 : Comparaison entre les résultats de simulation et les résultats de loi des mélanges

D'après la Figure 5-15, nous observons que les bornes de « Voigt et Reuss » ont permis de définir les « propriétés effectives » du composite « terre paille », hormis que, nous ne pouvons pas considérer que ses « bornes » sont optimales. Cependant, cette approximation ne traite pas le problème de l'anisotropie globale due à l'arrangement des fibres, cas abordé lors de notre « simulation » qui repose sur une distribution aléatoire des fibres.

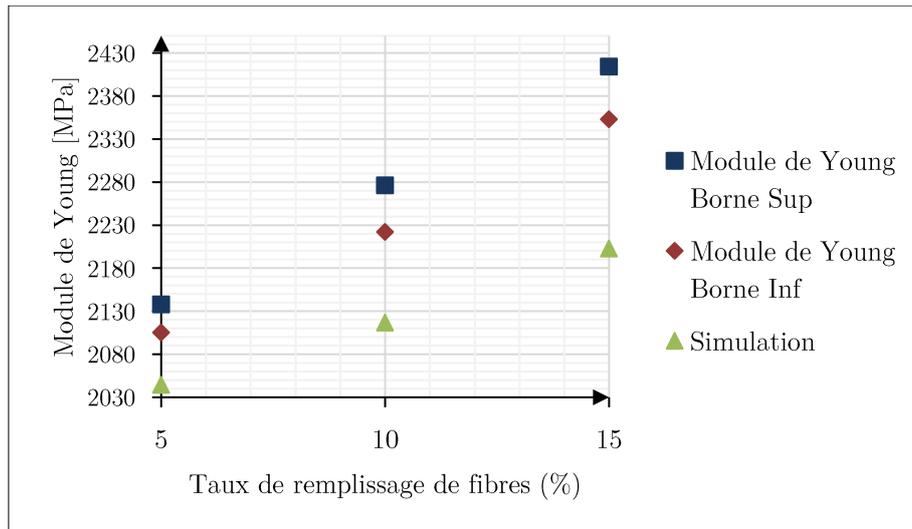


Figure 5-15 : Module de Young effective selon les Bornes de Voigt et Reuss

D'après la Figure 5-16 nous estimons que ses bornes sont optimales, car il existe des matériaux biphasés isotropes qui admettent ses bornes comme propriétés effectives.

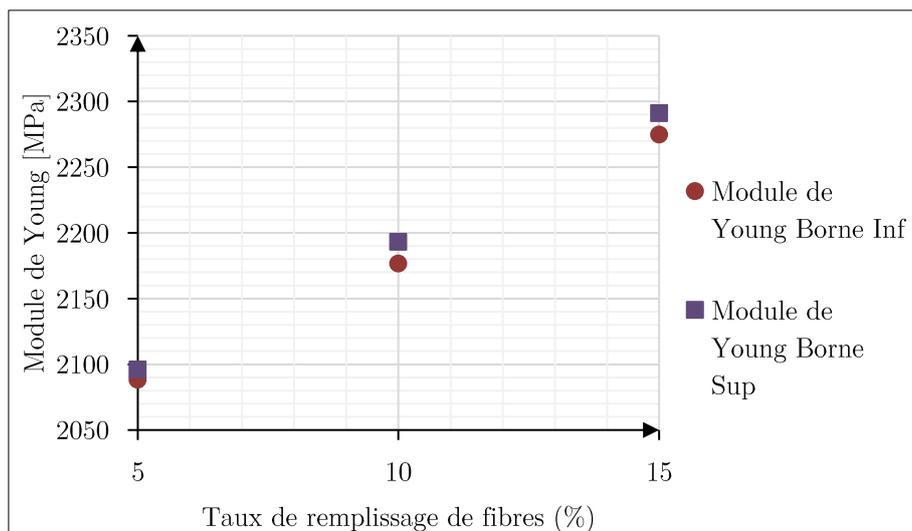


Figure 5-16 : Module de Young effective selon les Bornes de Hashin et Strikman

Les résultats obtenus par les « modèles analytiques » sont comparés à des calculs numériques par « éléments finis » Figure 5-13. Nous considérons que le « modèle de Hashin et Strikman » est le modèle le plus proche des résultats obtenus (voire la Figure 5-17). En effet, les bornes de « Hashim et Strikman » sont éventuellement les plus serrées. Elles font ressortir en plus des données relatives aux concentrations, des données sur l'isotropie locale et globale du matériau. Par conséquent, elles sont plus limitatives que les bornes de « Voigt et Reuss ».

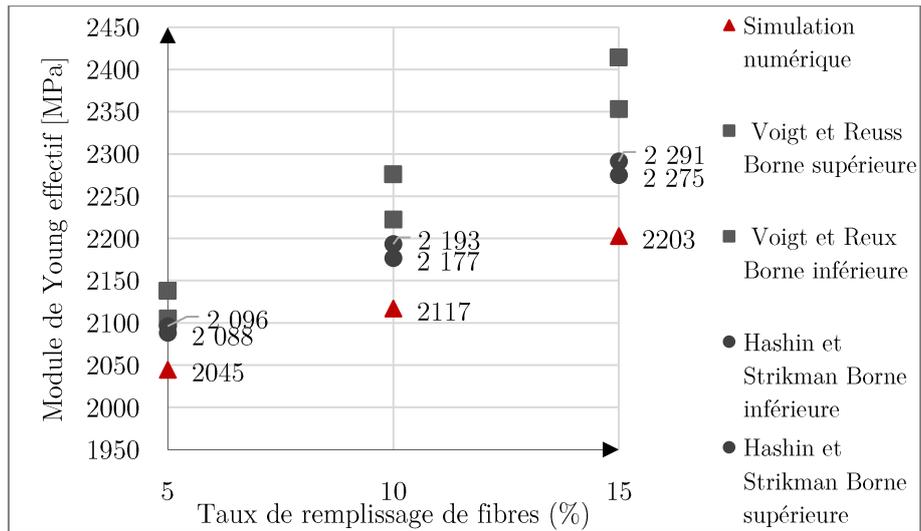


Figure 5-17 : Comparaison entre modèles théoriques et résultats de simulation

La Figure 5-18 présente les résultats du « coefficient de Poisson », élément intrinsèque du matériau. En se référant à l'expression fournie au (Chapitre 2 ; paragraphe 2.6.4), les ordres de grandeurs du « coefficient de Poisson » passent de « 0,38 à 0,37 » pour la « borne supérieure » et de « 0,37 à 0,35 » pour la « borne inférieure ». Contrairement à ce que nous avons constaté pour le module de Young, le coefficient de Poisson de notre matériau composite décroît en augmentant la teneur en fibres paille. Les calculs par modèles théoriques tel que celui de Voigt et Reuss ainsi que les résultats de simulation numérique confirme ce constat.

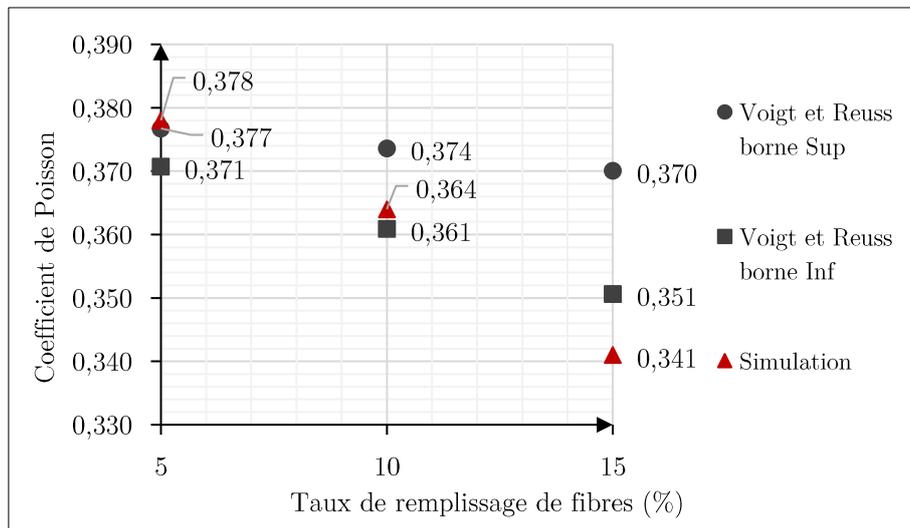


Figure 5-18 : Coefficient de Poisson

## 5.4 Résultats de l'approche expérimentale pour la détermination des propriétés mécaniques

La simulation numérique a fait ressortir le besoin des « essais expérimentaux » pour étudier à l'échelle du laboratoire l'effet de l'ajout des fibres en paille sur les « propriétés mécaniques » du composite « terre paille ». À cet égard, cette partie est consacrée au dépouillement et à l'interprétation des résultats du programme expérimental.

### 5.4.1 Résultats des essais d'identifications

Les études d'identification permettent d'avoir les paramètres de base pour la classification de tous types de terre. Les résultats des essais d'identification permettent aussi d'estimer au moyen de corrélations des ordres de grandeur des propriétés mécaniques du composite « terre paille ».

#### 5.4.1.1 Masse volumique absolue

La masse volumique est une notion de classe élémentaire qui peut influencer sur la caractérisation « mécanique » du composite « terre paille ». En revanche, la masse volumique n'est pas un paramètre déterminant, le facteur qui influence directement la résistance du composite semble être le niveau de porosité et de compactage. La valeur obtenue de la masse absolue de la terre étudiée est de 2143(kg/m<sup>3</sup>).

#### 5.4.1.2 Les limites d'Atterberg

Les « limites d'Atterberg » ont été déterminées à l'aide de la « coupole de Casagrande » selon la norme « NF P 94-051 ». Les résultats des essais sont présentés sur le Tableau 11.

<b>Limites d'Atterberg</b>		
<b>Limite de liquidité W<sub>L</sub> (%)</b>	<b>Limite de plasticité W<sub>p</sub> (%)</b>	<b>L'indice de plasticité IP (%)</b>
34,35	16,66	17,66

Tableau 11 : Limites d'Atterberg de la terre étudiée

À l'issue des résultats obtenus, nous remarquons que les « limites de plasticité » sont dans les seuils les plus appropriés pour la construction en « terre » (Figure 5-19). La norme (XP P13-901) préconise que la terre utilisée pour la construction doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau. D'ailleurs, nous analysons les résultats de la « limite de liquidité » en fonction de « l'indice de plasticité » du matériau étudié. Nous relevons les résultats sur le diagramme de plasticité (Figure 5-19), ce qui a permis de constater

que notre matériau peut être classifié dans la gamme des argiles inorganiques de « plasticité moyenne » conformément au « système de classification unifiée des sols de l'USCS » (Unified Soil Classification System). En somme, ce matériau se situe bien dans une région admissible pour des constructions en terre. Cependant, d'après Moevus [83] les artisans veulent une terre avec un grand « indice de plasticité » pour garantir une maniabilité satisfaisante.

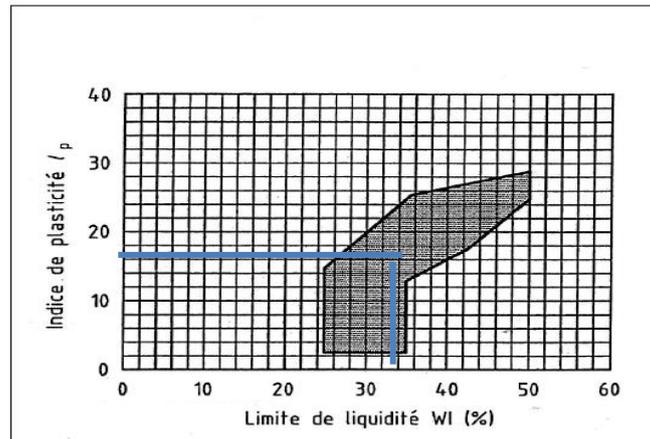


Figure 5-19 : Fuseau du diagramme de plasticité des terres [159].

#### 5.4.1.3 Essai au bleu de méthylène

L'essai « à la tâche » réalisé au laboratoire sur la terre étudiée est représenté sur la Figure 5-20. La valeur de bleu notée « VB » est formulée en « grammes de bleu » pour un échantillon de « 100 g » de sol., elle est de l'ordre de 2,5.



Figure 5-20 : vue du papier filtre et des tâches auréolées

Selon la valeur obtenue du « VB », nous constatons que la terre étudiée est classée entre les sols limoneux peu plastiques et ceux à plasticité moyenne.

#### 5.4.1.4 Teneur en eau optimale de la terre compactée

La « densité sèche » de la terre étudiée en fonction de la « teneur en eau » des différents échantillons pour une « énergie de compactage » de 25 coups par couche est représentée sur la Figure 5-21. Nous constatons que lorsque la « teneur en eau optimale » augmente, la « densité sèche à l'optimum » diminue. Cette augmentation de la « teneur en eau optimale » peut être liée à l'eau adsorbée à la surface des « feuillets d'argile ».

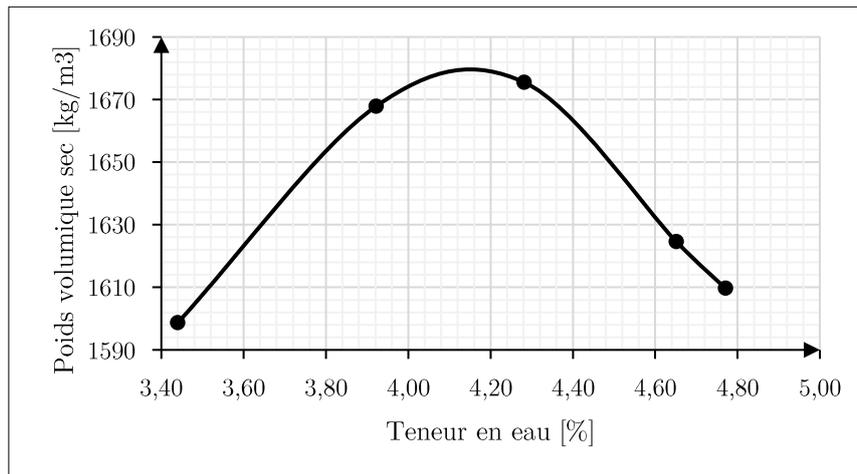


Figure 5-21 : Poids volumique sec en fonction de la teneur en eau

#### 5.4.1.5 Analyse granulométrique par tamisage

Les résultats de « l'analyse granulométrique par tamisage » sont présentés sur la

Figure 5-22, nous remarquons d'après la courbe que le pourcentage de particules, dont le diamètre équivalent est inférieur à 0,001 mm, est d'environ 85 %. D'ailleurs, les valeurs de « l'analyse granulométrique » semblent être en bon accord avec les résultats des « limites d'Atterberg » et ceux de l'essai du « bleu de méthylène ».

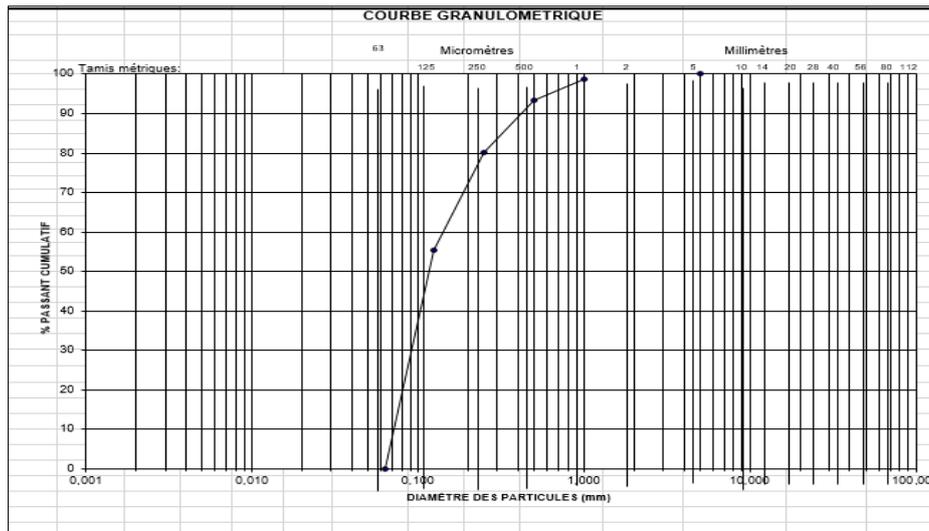


Figure 5-22 : Analyse granulométrique de la terre étudiée

### 5.4.2 Résultats des essais de compression simple

Pour la valorisation du composite « terre paille » dans l'édification, l'un de ses plus grands objectifs est la détermination de ses « propriétés mécaniques ». Ainsi, dans les conditions ambiantes du laboratoire, des « essais de compression » ont été réalisés sur des composants de « terre paille ». En effet, les constats présentés sur la figure 6-23 des « essais de compression », révèlent des « performances mécaniques » intéressantes, quelle que soit le type de formulation retenue « 5 %, 10 % et 15 % ».

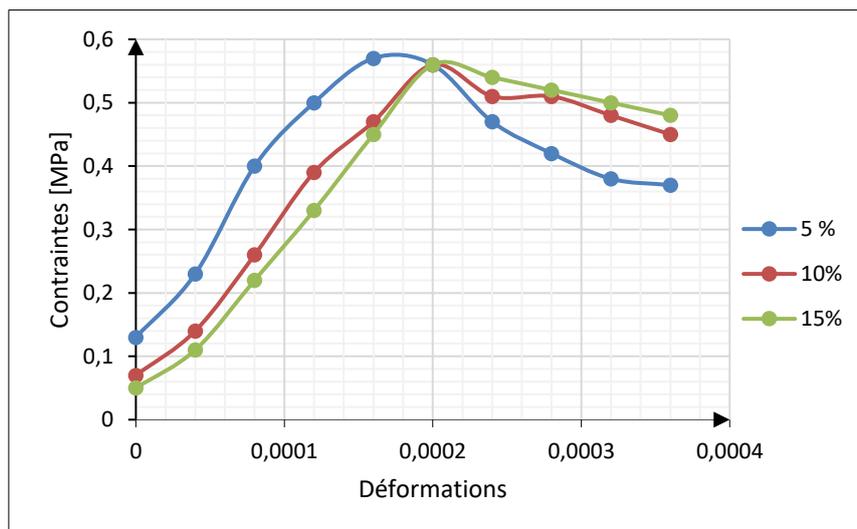


Figure 5-23 : Courbe « Contraintes-Déformation » des différentes formulations 5 %, 10 % et 15 %

Le module de Young du composite « terre paille » pour les différents pourcentages de fibres en paille est présenté sur la Figure 5-24. Or, vu l'hétérogénéité du composite, nous constatons d'après la courbe contrainte-déformation que pour chaque pourcentage, il existe plusieurs modules de Young. Finalement, pour chaque pourcentage de fibres en paille le module de Young présenté n'est que la somme des modules de Young par rapport aux nombres de pentes.

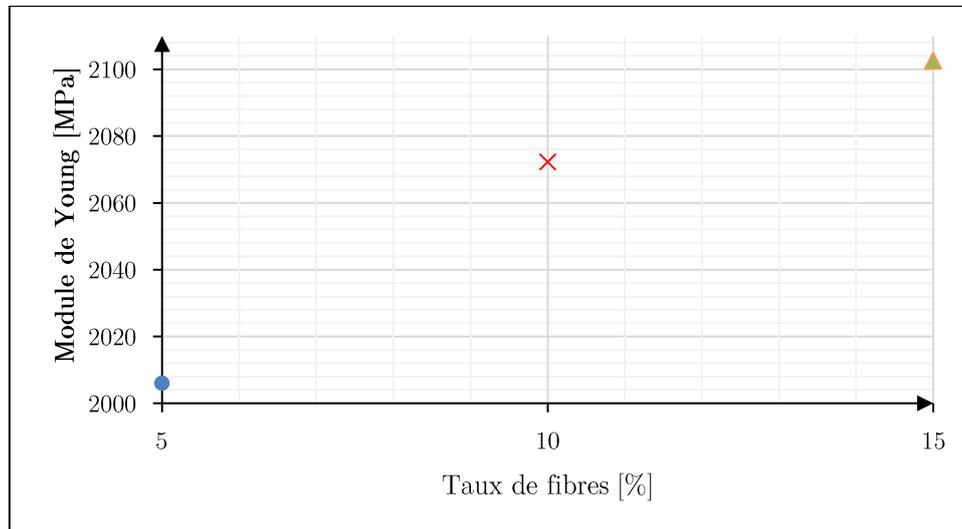


Figure 5-24 : Module de Young selon l'essai de compression.

### 5.4.3 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Nous constatons d'après la Figure 5-25 que les résultats obtenus par approche expérimentale sont en très bon accord avec les constats de la « simulation numérique ». En effet, les modules de Young obtenus expérimentalement se situent bien entre « 1 et 6 GPa » [83]. En effet, les résultats « numériques » présentent des valeurs un peu plus élevées que les résultats « expérimentaux », ceci peut facilement être expliqué par le fait que les « modèles numériques » ne présentent pas des effets de surfaces et des distorsions parasites.

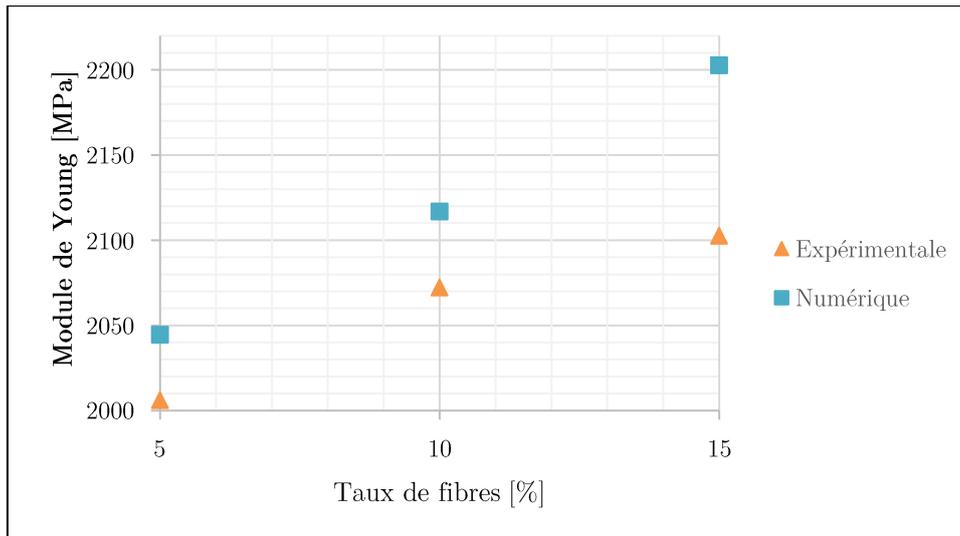


Figure 5-25 : Comparaison des résultats

## 5.5 Conclusion

En conclusion, la diversité des paramètres obtenus soit par analyse numérique, analyse théorique ou expérimentation est très importante. Certains paramètres peuvent avoir des résultats avoisinants les résultats obtenus par les essais expérimentaux. La simulation numérique ainsi que les modèles théoriques ont permis l'obtention de solutions approchées parmi lesquelles le constructeur est amené à effectuer un choix et décider si cette terre sera retenue ou rejetée pour la construction. Cette approche aide également à établir une analyse sur l'effet de la stabilisation des fibres en paille sur la « résistance mécanique et thermique » du matériau composite « terre paille ». Une telle analyse n'aurait pas pu être effectuée sans avoir eu recours aux essais expérimentaux. Finalement, pour conclure ce chapitre, nous remarquons que l'étape de la recherche d'un seul paramètre expérimentalement nécessite tout un protocole d'essai isolé sur chaque propriété.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Cette thèse présente une approche théorique et numérique pour la caractérisation des propriétés « thermiques et mécaniques » du matériau composite « terre paille ».

De nos jours, la terre est peu utilisée dans le bâtiment. Elle est une importante ressource en matière d'économie d'énergie et est généralement, disponible localement. Pourtant, son exploitation demeure marginale par rapport à celle des bâtiments traditionnels. Par ailleurs, ils n'existent pas d'obstacles rédhibitoires à son développement. En effet, parmi les éléments qui freinent l'usage et la compétitivité de la « terre » dans la construction à grandes échelles, nous citons l'insuffisance des spécialistes entraînés aux modes de construction en « terre », la rareté des normes, le défaut de partage pour le public ainsi que la faiblesse d'études multiphysiques. Ainsi, pour promouvoir l'usage du matériau « terre », nous avons réalisé un modèle numérique à « distribution aléatoire » de fibres en paille. L'approche a consisté à homogénéiser le matériau composite à un matériau de propriétés connues en vue d'arriver à un matériau environnemental alliant efficacité énergétique et résistance.

Dans un premier temps, nous avons débuté par présenter le contexte de la construction en « terre » au passé et particulièrement son histoire au Maroc. Ensuite, un état de l'art a fait ressortir les spécificités de l'état physique du matériau « terre » utilisé dans la construction. En effet, en fort développement la recherche scientifique se donne tous les outils en vue d'atteindre une progression remarquable des constructions en « terre ». Toutefois, le problème de construction en terre dans le bâtiment est un problème complexe dont la résolution consiste à rechercher, à adopter et à choisir l'un des meilleurs compromis entre stabilité mécanique et confort thermique. Pour cela, le recours à l'étape de stabilisation s'avère très important. D'ailleurs, l'orientation vers l'étude de fibres naturelles a guidé le choix de renfort, notamment les fibres en paille, afin d'obtenir un matériau composite dont le renfort n'est que les fibres en paille immergées dans une matrice en terre. La revue de la littérature a fait sortir l'utilité de l'ajout de fibres en « paille » pour les constructions en terre en vue de développer ses prouesses « mécaniques et thermiques ».

En second lieu, pour procéder à ce travail de recherche, nous avons aussi dressé un état de l'art sur les propriétés « thermiques et mécaniques » des matériaux « composites ». En effet, les valeurs recensées dans la littérature par des mesures expérimentales ont permis de guider notre étude. Par ailleurs, pour prédire ces propriétés, nous avons procédé à la substitution du matériau

réel à un matériau homogène équivalent possédant le même comportement global. Néanmoins, la complexité de la géométrie des matériaux composites, le nombre de constituants ainsi que la répartition des inclusions dans le milieu, nous en amené à présenter et à détailler plusieurs modèles théoriques pour la prédiction des propriétés physiques des matériaux.

Par ailleurs, nous avons pris en compte la notion du volume élémentaire représentatif ainsi que la définition de l'échelle de travail, pour contourner la non-linéarité du problème et faciliter ainsi sa résolution. En outre, pour la caractérisation des propriétés du matériau composite « terre paille », il est impératif de passer par une résolution en éléments finis du problème. De ce fait, nous avons conçu une application offrant la possibilité de générer des combinaisons géométriques aléatoires. De plus, cette application a permis la prise en compte de la « distribution aléatoire » des fibres en paille au sein de la matrice en terre ainsi que la maîtrise du taux de remplissage « 5 %, 10 % et 15 % ». Par ailleurs, nous avons implémenté notre application dans le logiciel « Ansys Mechanical APDL »<sup>3</sup> pour une simulation numérique avec des « hypothèses de calcul, des conditions initiales et aux limite » distinctes.

Enfin, l'analyse des « profils de températures » ainsi que les « densités de flux » du composite ont permis l'identification des « propriétés thermiques effectives ». De même, les résultats des déplacements pour les trois contraintes imposées « 1, 1,5 et 2 [MPa] » ont permis de prédire le « module de Young » et le « coefficient de poisson » du composite « terre paille ». Par conséquent, nous avons confirmé les résultats retirés de la simulation numérique avec ceux de l'analyse théorique et nous les avons aussi comparés aux résultats expérimentaux.

De multiples perspectives à ces travaux peuvent être énumérées pour les contributions futures.

- Modélisation du modèle en « trois dimensions » avec la prise en compte de la configuration des fibres selon les trois plans de la base « X, Y et Z ».
- Modélisation du composite « terre paille » en tenant en compte du contact entre fibres.
- Réalisation d'une campagne d'essais expérimentaux pour valider notre modèle thermique d'une façon plus précise. Pour cette approbation, un intérêt spécifique devra

---

<sup>3</sup> APDL : Ansys Parametric Design Language

être donné à la détermination de la « conductivité thermique effective » du matériau, donnée déterminante pour la confirmation dudit modèle.

- Développement d'une application permettant de trouver un pourcentage optimal permettant d'augmenter la « conductivité thermique » sans pour autant baisser la « résistance mécanique ».
- Le modèle conçu peut être exploité pour une revalorisation du matériau « terre » ; en choisissant un autre type de renfort autre que la fibre en « paille ».

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] AMEE et ADEME, «Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments au Maroc,» Un projet soutenu par le Fonds Français pour l'Environnement Mondial, 2010-2017.
- [2] G. Minke, *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, 1ed. Basel: Birkhäuser..
- [3] Houben, H. Hugo, Guillaud, M. Dayre et I, «Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Grenoble : Villefontaine).,» chez *Traité de construction en terre*., Marseille: Éd. Parenthèses, 2006.
- [4] B. Berge, *The Ecology of Building Materials*, 2nd ed. Oxford: Architectural Press., 2009.
- [5] Binici, O. Aksogan, M. Nuri Bodur, E. Akca et S. Kapur, «Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials,» *Constr Build Mater*, vol. 21, pp. 901-906, 2007.
- [6] B. Little et T. Morton, *Building with earth in Scotland: innovative design and sustainability*, Scottish Executive Central Research Unit, 2001.
- [7] P. Papika, *Compression behaviour of earth construction techniques: the case of cob*, (Thèse de doctorat). Heriot-Watt University., 2010.
- [8] CNOAM, «Architecture et changements climatiques : climat du futur, acte 2,» Comité de Pilotage COP22 - Pôle Side Events, Marrakech, 2016.
- [9] Anger, *Approche granulaire et colloïde du matériau terre pour la construction*, Lyon: Thèse de doctorat Institut National des Sciences Appliquées, 2011.
- [10] R. Anger et L. Fontaine, *Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture*., Paris Berlin: Cité des sciences de l'industrie, 2009.

- [11] Fantaine et Anger, Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture, CRATerre Edition, 2005.
- [12] CRATerre et GATE, Bloc de terre comprimée. Eléments de base., Eschborn, Allemagne, 1991.
- [13] H. Houben et H. Guillaud, «Traité de construction en terre.,» Marseille: Parenthèses. (2ème éd. 1995 ; 3ème éd. 2006)., 1989.
- [14] P. Pesson, La vie dans les sols, Paris: Gauthier-Villars, 1971.
- [15] D. Soltner, Les bases de la production végétale. Tome 1 : le sol., Sainte Gemmes sur Loire: Collection Sciences et Techniques Agricoles., 1992.
- [16] Doat, Construire en terre, Paris: Edition Parenthèses, 1979.
- [17] M. Tucker et R. Hardy, «X-ray powder diffraction of sediments.,» chez *In M. Tucker (ed.), Techniques in sedimentology*, Oxford: Blackwell Scientific Publications., 1998 , pp. 191-228.
- [18] F. Delecour , «Initiation à la pédologie.,» Gembloux: Service de la Science du Sol., 1981.
- [19] L. Guerin, Construction à faible cout dans les programmes speciaux de travaux publics: Principes directeurs pour l'emploi de la terre crue., Genève: Bureau international du travail..
- [20] V. Rigassi et E. CRATerre, Blocs de terre comprimée, Eschborn, GTZ., 1995.
- [21] A. Agarwal, «Bâtir en terre : Le potentiel des matériaux à base de terre pour l'habitat du Tiers-Monde,» London: Institut international de l'environnement et du développement., 1981.
- [22] L. Mango-Itulama, Valorisation des géoressources argileuses de la région de Kinshasa pour améliorer la qualité et la durabilité des matériaux de construction utilisés dans l'habitat périurbain, Mémoire de fin d'étude. Université de Liège, Liège., 2015.

- [23] B. Pignal, *Terre crue : Technique de construction et de restauration*, Paris: Eyrolles, 2005.
- [24] United Nations , *Earth Construction Technology*, Nairobi, Kenya,: United Nations Centre For Human Settlements, 1992.
- [25] H. Winterkorn , «Soil stabilization,» chez *Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, 1975, p. 750.
- [26] H. Guillaud et H. Houben, *Traité de construction en terre (2ème édition)*, Marseille: Editions Parenthèses., 1995.
- [27] C. Galán-Marín, J. Petric et C. Rivera-Gómez, «Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre".,» *Construction and Building Materials*,, vol. 24, pp. 1462-1468, 2010.
- [28] Royaume du Maroc, «Règlement Parasismique des Constructions en Terre (RPCT2011),» Bulletin Officiel N°6206, 21 Novembre 2013.
- [29] I. Kourdou et T. Cherradi, «Restoration of built heritage Case study of earth constructions - Tiznit,» *International Journal of Engineering Research in Africa*, vol. 25, pp. 133-141, 2016.
- [30] P. Walker et T. Stace , «Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 17, n° 14, pp. 301-310, 1995.
- [31] A. X. P13-901, *Compressed earth blocks for walls and partitions: definitions – Specifications Test methods*, Saint-Denis La Plaine Cedex, 2001.
- [32] CRATerre-EAG, *Compressed earth blocks*, Brussels, 1998.
- [33] MOPT, «Bases Para el Dise˜no y Construccio´n con Tapial.,» *Centro de Publicaciones, Secretari´a General Te´cnica, Ministerio Spain*, 1992.

- [34] H. Houben et H. Guillaud , «Earth construction: a comprehensive,» *London: Intermediate Technology Publications Guide*, 1994.
- [35] AFNOR, «NF P18-560 Analyse granulométrique par tamisage,» AFNOR, 1978.
- [36] . V. Burrough, «Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction,» PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, 2001.
- [37] F. Bultel , Prise en compte du gonflement des terrains pour le dimensionnement des revêtements des tunnels., Thèse de Doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées (France)., 2001.
- [38] USACE, «Soil engineering and stabilization,» US Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, 2000.
- [39] A. D. Tranle, Etude des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment, Thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, , 2010.
- [40] J. Todd , «History of composites-The evolution of lightweight composite materials.,» 2014.
- [41] A. Boudenne, «Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques de matériaux composites à matrice polymère,» Université Paris XII Val de Marne, 2003.
- [42] S. Benferdi, «Caractérisation du comportement micromécanique d'un matériau composite par différentes approches mathématiques,» Université Mentouri Constantine, 2010.
- [43] D. Gay, Matériaux Composites, Paris: Edition Hermès, 1987.
- [44] . J. M. Berthelot, Matériaux compoites : comportement mécanique et analyse des structures, Paris: 3ème Ed. Éditions Tec & Doc., 1999.

- [45] G. Ehrenstein et F. Montagne, *Matériaux Polyères: structure, propriétés et applications*, Paris: Edition Hermès Science publication,, 2000.
- [46] N. Anil, «Composite get greener,» *Material today*, vol. 45, p. 12, 2001.
- [47] C. Baley , *Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites*, Les techniques de l'ingénieur, AM 5 130., 2004.
- [48] F. Michaud, «Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique Aptitude post formage,» thèse Phd, univ Laval, LAVAL, 2003.
- [49] A. Y. Nenonene, «Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage,» DOCTORAT DE L UNIVERSITE DE TOULOUSE, 2009.
- [50] k. Charle, C. morvan, J. Bréard, J.-P. Jernot et M. Gomina, «Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin,» *Revue des composites et des matériaux avancées*, vol. 16, pp. 11-24, 2006.
- [51] C. Ververis, K. Georghiou, N. Christodoulakis, P. Santas et R. Santas, «Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production,» *Industrial Crops and Products*, vol. 19, pp. 245-254, 2004.
- [52] F. Gouanvé, S. Marais et M. Métayer, «composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin,» *composites et matériaux avancées*, vol. 16, pp. 117-128, 2006.
- [53] A. Bledzki, B. K et J. Gassan, «Composites reinforced with cellulose based fibres,» *Prog.Polym. Sci.*, pp. 221-274, 1999.
- [54] C. Baley, «Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase,» *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 33, p. 939-948, 2002.

- [55] K. Ghavami, F. R. Toledo et N. Barbosa , «Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres,» *Cem Concr Compos*, vol. 21, pp. 39-48, 1999.
- [56] S. Yetgin, O. Cavdar et A. Cavdar , «The effects of the fibre contents on the mechanic properties of the adobes. Construc Build Mater ;,» 222-227, vol. 22, n° %13, 2008.
- [57] H. Ramaswamy , B. Ahuja et S. Krishnamoorthy , «Behavior of concrete reinforced with jute, coir, and bamboo fibres.,» *Int J Cem Compos Lightweight Concr*, vol. 5, n° %11, pp. 3-13, 1983.
- [58] S. Ziegler , D. Leshchinsky , . H. Ling et E. Perry , «Effect of short polymeric fibres on crack development in clays,» *Soils Found*, vol. 38, n° %11, p. 247–253, 1998.
- [59] R. Filho , K. Scrivener , G. England et K. Ghavami , «urability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites,» *Cem Concr Compos*, vol. 22, n° %12, pp. 127-143, 2000.
- [60] R. Stulz et K. Mukerji , *Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions*, Switzerland: Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, 1988.
- [61] I. Salehan et Z. Yaacob, «Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers,» *Pertanika J Sci Technol*, vol. 19, n° %11, pp. 33-43, 2011.
- [62] G. Minke , *Earth Construction Handbook*, Boston: WIT Press, 2000.
- [63] M. Villamizar , V. Araque , C. Reyes et . R. Silva, «Effect of the addition of coalash and cassava peels on the engineering properties of compressed earth blocks,» *Constr Build Mater*, vol. 36, n° %111, pp. 276-286, 2012.
- [64] M. Bouhicha , F. Aouissi et S. Kenai , «Performance of composite soil reinforced with barley straw,» *Cem Concr Compos*, vol. 27, n° %15, pp. 617-621, 2005.
- [65] Frgos et Trouillez, *Le guide de l'isolation,, Paris,, 2012.*

- [66] I. l. p. l. t. e. e. l. c. verte, Les matériaux biosourcés dans le bâtiment., 19 décembre 2012.: Article 14 .
- [67] J. Fourier, Théorie analytique de la chaleur., Firmin Didot père et ls, 1822.
- [68] F. Incropera, D. DeWitt, T. Bergman et A. Lavine, Fundamentals of heat and mass transfer, John Wiley and Sons, 2006.
- [69] S. Bossini, Béton d'Argile environnemental, 2013: Des chercheurs de 3 laboratoires (CRAterreENSAG, MATEIS-INSA de Lyon, DGCB-ENTPE).
- [70] S. Boussaid, A. El Bakkouri , H. Ezbakhe et T. Ajzoul , «Comportement thermique de la terre stabilisée au ciment,» *Revue française de génie civil*, vol. 5, n° %14, pp. 505-515, 2001.
- [71] CSTB, «Analyse des Caractéristiques des Systèmes Constructifs Non Industrialisés.,» Rapport intermédiaire CSTB, 2007.
- [72] S. Goodhew, R. Griffiths, L. Watson et D. Short, «Some preliminary studies of the thermal properties of Devon cob walls.,» chez *Terra 2000. Proceedings of the 8th International Conference on the study and conservation of earthen architecture*, Torquay, Devon, UK, 2000.
- [73] S. Goodhew et R. Griffiths , «Sustainable earth walls to meet the building regulations,» *Energy and Buildings*, vol. 37, pp. 451-459, 2005.
- [74] T. Kleespies et A. Huber, «Wärmeschutz und Feuchteverhalten von Lehmbaustoffen, Solararchitektur,» Forschungsgruppe Lehmbau., 1994.
- [75] N. Hutcheon et W. Ball, «Thermal conductivity of rammed earth,» Housing Research Committee of the College of Engineering, University of Saskatchewan, 1949.
- [76] J. Laurent, D. Quenard et H. Sallée, «Caractérisation thermique du matériau terre,» chez *Modernité de la construction en terre*, 1984.
- [77] J.-P. Laurent , Propriétés thermiques du matériau terre, Cahiers du CSTB, 1987.

- [78] V. Maniatidis, P. Walker, A. Heath et Hayward, «Mechanical and thermal characteristics of rammed earth,» chez *International Symposium on Earthen Structures*, Bangalore, India., 2007.
- [79] . S. Ola, «Thermal conductivity of compressed lateritic soil blocks,» chez *9th regional conference for Africa on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Lagos, 1987.
- [80] F. Wibart, «Etude de faisabilité, Caractérisation du Mélange,» ENTPE, 2010.
- [81] W. Cheikhi, K. BABA, S. M. LAMRANI, A. NOUNAH, M. KHALFAOUI et L. BAHI, «Study of indoor performances of a building using Rammed earth,» chez *MATEC Web of Conferences*, 2018.
- [82] K. EL HARROUNI, M. BEN AICHA et R. EL HARROUNI, «Parametric Modelling and Traditional Architecture: Improving the thermal comfort of the traditional courtyard house in Morocco,» chez *MATEC Web of Conferences 149*, 2018.
- [83] M. Moevus, L. Fontaine et R. Anger, «Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du matériau terre crue : bilan de la littérature. In CRATerre-EAG (Ed.),» Projet : Béton d'Argile Environnemental (B.A.E). Grenoble: Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement., 2012.
- [84] J.-P. Laurent, Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaires : optimisation d'outils de mesure « in-situ » des paramètres thermiques, application à l'étude des propriétés thermiques du matériau terre., Grenoble: Thèse INPG, 1986.
- [85] S. Goodhew et R. Griffiths, «Analysis of thermal-probe measurements using an iterative method Analysis of thermal-probe measurements using an iterative method,» *Applied Energy*, vol. 77, n° %12, pp. 205-223, 2004.
- [86] W. Cheikhi, C. Cheradi, K. Baba et A. Nounah, «Building's energy performances and climate: Case of the Rammed earth Buildings in Morocco,» *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, vol. 9, n° %113, 2018.

- [87] F. Collet., *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux.*, RENES: INSA, 2004.
- [88] R. Kafesçioğlu, *Thermal properties of mud bricks : the example of gypsum-stabilized adobe*, Istanbul: Istanbul Technical University, 1987.
- [89] J. Miriel, L. Marmoret, R. t'Kint et M. Quéneudec, «Comportement thermique de parois en bauge mécanisée. Etude en situation réelle dans le cas d'une architecture climatique.,» *Energie Solaire et Environnement*, pp. 128-132, 1996.
- [90] J. Hill, «Heat flow through adobe walls,» chez *EBANZ Newsletter, part 1.* , 1993.
- [91] M. Delgado, . J. Carmen, Guerrero et C. Ignacio , «Earth building in Spain,» *Construction and Building Materials*, vol. 20, n° %19, pp. 679-690, 2006.
- [92] F. Wessling, «Thermal energy storage in adobe and in stone structures.,» ASME Publications, 1974.
- [93] AFNOR, «Maçonnerie et éléments de maçonnerie-Détermination des valeurs thermiques de calcul.». 2002.
- [94] e. a. F. Incropera, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley and Sons, 2006.
- [95] J. T. Mottram et . R. Taylor, «Thermal Transport Properties,» *International Encyclopaedia of Composite VCH, New York*, vol. 5, 1991.
- [96] Y. K. Godovsky et . V. P. Privalko, «Thermal and electrical conductivity of polymer,» *springer-verlag : Berlin*, 1995.
- [97] S. Torquato, *J. Mec. Phys. Solids*, vol. 45, p. 1421, 1997.
- [98] R. Cullough et I. Mc, *Transport properties*, L. A. Carlsson and J. W. Gillespie eds Lancaster: Dlaware composite design encyclopedia, 1990.
- [99] E. Matagne, «Macroscopic electrical characterization of bundles of,» *IEEE Trans. on Magn*, vol. 31, n° %13, pp. 1464-1467, May 1995.

- [100] E. Matagne et J. P. Conard, «Modélisation macroscopique des milieux stratifiés conducteurs»,» *Journal de physique III*, vol. 7, n° %111, pp. 2251-2263, Novembre 1997.
- [101] D. Trichet, J. Fouladgar et G. Develey, «An Estimator for Equivalent Properties of a Bundle of Conductors Using the Inverse Problem Method,» *IEEE Trans On Magn*, vol. 35, n° %155, pp. 2889-2892, Sep. 1998.
- [102] D. Trichet, «Contribution à la modélisation, à la conception et au développement du chauffage par induction des matériaux composites’,» Thèse de doctorat, école doctorale sciences pour l’ingénieur de Nantes, Nantes, Jan 2000.
- [103] D. Trichet, E. Chauveau et J. Fouladgar, «Asymptotic calculation of equivalent electromagnetic and thermal properties for composite materials,» *IEEE Trans On Magn*, vol. 36, n° %14, pp. 1193-1196,, July 2000. .
- [104] Heerwagen et Judith, «Green buildings, organizational success and occupant productivity,» *Building Research & Information*, pp. 353-367, 2010.
- [105] G. T.-N. Tsao, «Thermal Conductivity of Two-Phase Materials,» *Engineering Approaches*, vol. 53, n° %15, pp. 395-397, 1691.
- [106] J. T. Mottram, «Materials and Design,» vol. 13, n° %14, 1992.
- [107] O. Wiener, A. Dstch, . A. Wiss et . B. Kl, *Math. Phys. & Tech*, vol. 32, p. 509, 1912.
- [108] T. Lewis et L. Nielsen , «Dynamic mechanical properties of particulate-filled polymers,» *Appl. Polym. Sci*, vol. 14, pp. 1449-1471, 1970.
- [109] M. Idicula, A. Boudenne, L. Umadevi, L. Ibos et Candau, «Thermophysical properties of natural fiber reinforced polyster compsites,» *Comp. Sci. Tech*, vol. 66, n° %115, pp. 2719-2725, 2006.
- [110] J. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, New York: Dover, 3rd Ed, 1954.

- [111] Rayleigh et Lord, «On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of medium,» *Phil Mag*, vol. 34, pp. 481-502, 1892.
- [112] R. Meredith et C. Tobias , «Resistance of potential flow through a cubical array of spheres,» *Appl. Phys.*, vol. Tobias C.W, n° %131, pp. 1270-1273, 1960.
- [113] S. Hashin et Z. Shtrikman, «A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials,» *Appl. Phys*, vol. 33, pp. 3125-3131, 1962.
- [114] J. Reynolds et J. Hough , «Formulae for dielectric constants of mixtures,» *Proc. Phys.Soc.*, vol. B70, pp. 769-775, 1957..
- [115] D. Polder et . J. Van Santen, «The effective permeability of mixtures of solids.,» *J. Physic*, vol. 12, n° %15, pp. 257-271, 1946.
- [116] R. Hamilton et O. Crosser , «Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems,» *Ind. Eng. Fund*, vol. 1, n° %13, pp. 187-191, 1962..
- [117] J. Gurland, «Transaction of the Metallurgical Society of Aime,» vol. 236, p. 642.
- [118] Z. Hashin, F. W. Wendt, . H. Liebowitz et . N. Perro, «Proceedings of the fifth symposium on naval structural mechanics,» chez *pergamon press, Oxford*, 1970.
- [119] H. Hatta et M. Taya, *J., Appl., Phys.*, vol. 58, p. 2478, 1985.
- [120] J. T. Mottram et R. Taylor, « Thermal Transport,» *International Encyclopaedia of Composite*, Vol. %1 de %2 5, VCH, New York, 1991.
- [121] Y. Godovsky et . V. P. Privalko, «Thermal and electrical conductivity of polymer materials,» *Springer-verlag : Berlin*, 1995.
- [122] J. Gurland, «Transaction of the Metallurgical Society of Aime,» vol. 236, p. 642, 1966.
- [123] A. Brini, Modélisation multi-échelles du comportement et du vieillissement des mousses syntactiques immergées, Thèse de Doctorat, Université de Pierre et Marie Curie, 2004.

- [124] J. Dutretre, *Automatique linéaire 1*, [www.emse.fr/dutertre/enseignement.html](http://www.emse.fr/dutertre/enseignement.html)-2015, 2016.
- [125] L. Laou, *Evaluation du comportement mécanique sous sollicitations thermo-hydriques d'un mur multimatériaux (bois, terre crue, liants minéraux) lors de sa construction et de son utilisation.*, Thèse de Doctorat Université de Limoges, 2017.
- [126] A. Pkila, A. Mesbah, V. Rigassi et J. Morel, « Comparaison de méthodes d'essais de mesures des caractéristiques mécaniques des mortiers de terre,» *Materials and Structures*, vol. 36, n° 12, pp. 108-117, 2003.
- [127] V. Mollion, «Etude du comportement mécanique du pisé,» ENTPE, 2009.
- [128] C. Barras, «Contribution à l'élaboration d'un mélange terre-chanvre,» TFE ENTPE, 2010.
- [129] L. Fontaine, «Cohésion et comportement mécanique de la terre comme matériau de construction.,» ENSAG, Grenoble, 2004.
- [130] P.-E. Pirat et R. Filloux, «Etude de l'effet d'échelle sur le matériau terre,» INSA, Lyon, 2012.
- [131] A. Bourgès, «Study on the physical-mechanical properties on artificial adobe and determination of the water influence.,» Rapport Projet Terra, 2003.
- [132] Z. Hashin et S. Shtrikman, «On some variational principles in anisotropic and nonhomogeneous elasticity,» *Mech Phys*, pp. 335-342, 1962.
- [133] Z. Hashin et S. Shtilrnan, «A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials,» *Mech Phys*, pp. 127-140, 1963.
- [134] L.-I. Walpole, «On bounds for the overall elastic moduli of inhomogeneous systems-I,» *Mech. Phys. Solids*, vol. 14, pp. 151-162, 1966a.
- [135] L.-I. Walpole, «On bounds for the overall elastic moduli of inhomogeneous systems-II,» *Mech Phys Solids*, pp. 289-301, 1966b.

- [136] L.-I. Walpole, «On the overall elastic moduli of composite material,» *Mech Phys. Solids*, pp. 235-251, 1969.
- [137] L.-I. Walpole, «Strengthening effects in elastic solids,» *Mech. Phys.Solids*, pp. 343-358, 1970.
- [138] J. Willis et J. R. Acton, «The overall elastic moduli of a dilute suspension of sphere,» *Mech Appl Math*, pp. 163-177, 1976.
- [139] J. R. Willis, «Bounds and self-consistent estimates for the overall properties of anisotropic composites,» *Mech Phys Solids*, pp. 185-202, 1977.
- [140] E. Kröner, «On bounds for effective elastic moduli of disordered materials,» *Mech. Phys. Solids*, pp. 137-155, 1977.
- [141] N. Laws et R. Mclaughlin, «The effect of fiber length on the overall moduli of composite materials,» *Mech Phys Solids*, vol. 27, pp. 1-13, 1979.
- [142] «Eco Matériaux : La Paille,» 2010, 2010.
- [143] «La Terre Crue,» *Eco Matériaux*, Juillet 2010 b.
- [144] L. Miccoli , U. Müller et P. Fontana, «Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob,» *Construction and Building Materials*, vol. 61, pp. 327-339, 2014.
- [145] M.-J. O'Dogherty, J.-A. Huber, J. Dyson et . C.-J. Marshall, «A study of physical and mechanical properties of wheat straw,» *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 62, pp. 133-142, 1995.
- [146] F. Champire, Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction, THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON , 2017.
- [147] . F. Gilles, H. Cédric et O. Myriam, «La botte de paille,matériau porteur,» *Ecobats Sciences&Techniques*, 2012.

- [148] Peltier et Rumpler, Manuel du laboratoire routier, Dunod, 1959.
- [149] X. P.-O. AFNOR, «Sols : Reconnaissance et Essais – Description – Identification – Dénomination des sols – Terminologie – Éléments de classification.,» AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 1999.
- [150] B. Venkatarama Reddy et K. Jagadish, The static compaction of soils, Géotechnique, 1993.
- [151] A. Guettala, A. Abibsi et H. Houari, «Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure,» *Construction and Building Materials*, vol. 20, n° %13, pp. 119-127, 2006.
- [152] . J.-C. Morel, A. Pkila et P. Walker, «Compressive strength testing of compressed earth blocks,» *Construction and Building Materials*, vol. 1, n° %12, pp. 303-309., 2007.
- [153] . P. J. Walker, «Strength and Durability Testing of Earth Blocks,» chez *In 6th International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries pp. 110-118*, Bangalore, 2000 .
- [154] E. W. Tiedje, «Modelling the influence of particulate geometry on the thermal conductivity of composites,» *Journal of Materials Science* , vol. 49, p. 5586–5597, 2014.
- [155] S. Ngaram, B. Gabriel, H. Wante et H. Kh, «Using Adobe (Clay Soil) Mixed with Quartz (Sharp sand) to determine the Thermal Comfort of Residential Building in Mubi , Adamawa State, Nigeria,» *International digital organization for scientific research issn: 2550-794x idosr journal of scientific research*, vol. 1, n° %11, pp. 28-42, 2016.
- [156] Singh et. al., «Determination of thermal conductivity for adobe (clay soil) mixed with different proportions of quartz (sharp sand),» vol. 7, n° %13, March 2019.
- [157] K. A. Jérémy Ouedraogo, Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux, Doctorat de l'Univeristé de Toutouse , 2019.

- [158] M. Aimilios , «The role of adobes in the thermal performance of vernacular dwellings,» *CRAterre.*, 2016.
- [159] AFNOR et AFNOR XP P13-901 , «Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions – Spécifications – Méthodes d’essais – Conditions de réception. .,» Éditions AFNOR, La Plaine Saint-Denis, 2001.
- [160] Gornet, «Généralités sur les matériaux composites,» 2008. [En ligne]. Available: <http://hal.archives-ouvertes.fr>.
- [161] J. T. Mottram et R. Taylor, *Thermal Transport Properties*, VCH, New York: International Encyclopaedia of Composite,, 1991.
- [162] V. Mollion, «Etude de l’influence de l’eau sur les propriétés mécaniques du pisé,» 2009.
- [163] ". p. c. 2. D. c. d. e.-c. (. A. C. a. J. W. G. e. R. I. Mc Cullough, «Micromechanical Modelling,» *2 Technomic, Lancaster*, vol. 2, p. 205, 1990.
- [164] *Théorie analytique de la chaleur.*, 1822: Firmin Didot père et.
- [165] L. E. N. A. B.-L. LEE, «Dynamic Mechanical Properties of Some Polystyrene Composites,» pp. 136-146, 1971.
- [166] H. B. & Paoli, «Cours UE823 "Construire en terre",» Ecole Nationale Supérieure d'Architecture, Nantes, 2014.
- [167] J. Dutretre, *Automatique linéaire 1*, [www.emse.fr/dutertre/enseignement.html](http://www.emse.fr/dutertre/enseignement.html)-2015, 2016.
- [168] J. Berthelot, *Comportement mécanique et analyse des structures.*, Paris: 5e éd Lavoisier,, 2012.
- [169] R. Hill, «The elastic behavior of crystalline aggregate,» *Proc. Phys.Soc*, pp. 349-354, 1952.
- [170] Ceratec, «Blocs en terre stabilisée,» Technologie de production, 1987.

- [171] F. Guerraoui,, M. Zamama et M. Ibnoussina, «Caractérisation minéralogique et géotechnique des argiles utilisées dans la céramique de Safi (Maroc).,» *African Journal of Science and Technology, Science and Engineering*,, vol. 9, n° %11, pp. 1-11, 2008.
- [172] P. Daot, A. Hays, H. Houben, S. Matur et F. Vitoux, *Construction en terre par le CRAterre*, Edition Parenthèses, 1991.
- [173] A. Mesbah , J. Morel , P. Walker et K. Ghavami , «Development of a direct tensile test for compacted soil blocks reinforced with natural fibers.,» *J Mater Civil Eng* , vol. 16, n° %11, pp. 95-98, 2004.
- [174] P. Doat , . A. Hays, H. Houben , . S. Matuk et F. Vitoux , *Construire en terre.*, Paris, France: Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, 1979.
- [175] H. Houben et H. Guillaud , chez *Traité de construction en terre*, Marseille, France,, CRAterre Edition Parenthèse, 2006, p. 355.
- [176] . E. Akpokodje, «The stabilization of some arid zone soils with cement and lime,» *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, vol. 18, pp. 173-180, 1985.
- [177] J. Gurland, «Transaction of the Metallurgical Society of Aime,» vol. 236, p. 642, 1965.
- [178] M. Bourgeois, «Fibres agrosourcées.,» chez *Techniques de l'ingénieur*, 2011.
- [179] MOPT, «Bases Para el Dise˜no y Construccio'n con Tapial.,» *Centro de Publicaciones, Secretari'a General Te'cnica, Ministerio de Obras Pu' blicas y Transportes Spain*, 1992.
- [180] A. Boudenne, «Étude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques de matériaux composites à matrice polymère,» Université Paris XII Val de Marne, 2003.

# ANNEXE 1 : ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE NF-P18-592

ISSN 0335-3931

---

normalisation  
française

---

**P 18-592**  
Décembre 1990

Granulats

**Essai au bleu de méthylène**

Méthode à la tache

E : Aggregates — Methylene blue test — Spot test  
D : Granulate — Methylenblau verfahren — Fleck-Methode

---

## 1 OBJET

La présente norme a pour objet de décrire la méthode permettant de déterminer la « valeur de bleu » des fines contenues dans un sable ou une grave. Elle décrit également une méthode rapide de contrôle de conformité des fines par rapport à une « valeur de bleu » spécifiée.

## 2 DOMAINE D'APPLICATION

La présente norme s'applique aux sables et aux graves d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans les domaines du bâtiment et du génie civil.

## 4 GÉNÉRALITÉS

### 4.1 But de l'essai

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle «valeur de bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines.

### 4.2 Principe de l'essai

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre (test de la tache, voir paragraphe 7.2.1).

Pour un simple contrôle de conformité, la quantité de bleu spécifiée est injectée en une seule fois.

## 5 APPAREILLAGE

### 5.1 Appareillage d'usage courant

**Balance** dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.

**Chronomètre** au 1/10 s.

Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau (voir la norme expérimentale P 18-553).

**Tamis** de 0,08 mm et 0,5 mm ayant un diamètre de 150 mm.

**Pissette** de 500 ml.

**Bécher** plastique de 3 l ayant un diamètre intérieur de 155 mm.

**Spatule.**

### 5.2 Appareillage spécifique

Une burette de capacité 100 ml ou 50 ml et de graduation 1/10 ml ou 1/5 ml ou une micropipette de 5 ml et une de 2 ml.

Papier filtre : quantitatif et sans cendre (< 0,010) ; grammage : 95 g/m<sup>2</sup> ; épaisseur : 0,20 mm ; vitesse de filtration 75 ; rétention : 8 micromètres.

Une baguette de verre : longueur 300 mm ; diamètre 8 mm.

Un agitateur à ailettes, tournant entre 400 et 700 tr/min. Le diamètre des ailettes est compris entre 70 mm et 80 mm.

Un bac carré en matière plastique de 150 mm de côté et 60 mm de hauteur.

### 5.3 Produits utilisés

Solution de bleu de méthylène de qualité médicinale à 10 g/l  $\pm$  0,1 g/l (voir la norme expérimentale P 18-595, paragraphe 5.3).

La durée maximale d'utilisation de la solution est de un mois. Elle doit être conservée à l'abri de la lumière.

Eau déminéralisée ou distillée.

Kaolinite séchée à 105°C.

## 6 PRÉPARATION DE L'ÉCHANTILLON POUR ESSAI

Connaissant les teneurs en eau  $w$  et en fines  $f$  (voir la norme expérimentale P 18-597), la masse de sable 0-2 mm, à sa teneur en eau en l'état, qu'il faut laver pour en extraire les fines est donnée par la formule :

$$M_h = f' \frac{w + 100}{f}$$

ajustée au gramme près ;  $f'$  représentant la quantité de fines, en grammes, qu'il est souhaitable d'avoir dans la prise d'essai (environ 30 g).

La masse de sable  $M_h$  ne doit pas dépasser 300 g.

## 7 EXÉCUTION DE L'ESSAI

### 7.1 Mise en place de la prise d'essai

Mettre 500 ml d'eau distillée ou déminéralisée dans la pissette.

Placer le sable dans le bac plastique, ajouter à l'aide de la pissette environ 100 ml d'eau déminéralisée ou distillée pour recouvrir le matériau. Bien agiter l'ensemble avec la spatule.

Verser en plusieurs fois le contenu du bac sur le tamis de 0,08 mm surmonté du tamis de décharge de 0,5 mm, l'ensemble étant placé au-dessus du bécher de 3 l. Rincer, pour faire passer la totalité du matériau restant dans le bac avec l'eau qui reste dans la pissette.

Sécher et peser les refus des deux tamis, soit  $M$  cette masse.

La masse réelle  $q$  de fines soumises à l'essai est donnée par la formule :

$$q = \frac{100 M_h}{100 + w} - M$$

Après avoir isolé les fines ajouter dans le bécher 30 g de kaolinite de valeur de bleu connue  $V_{\text{BlaK}}$ .

Le volume  $v'$ , exprimé en ml, de solution de bleu adsorbée par cette kaolinite est donné par la formule :

$$v' = 30 V_{\text{BlaK}}$$

L'ensemble eau + fines + kaolinite, est soumis à une agitation de cinq minutes à 600 tr/min, puis permanente à 400 tr/min, pendant toute la durée de l'essai à l'aide de l'agitateur, les ailettes étant situées à 1 cm au-dessus du fond du récipient.

### 7.2 Détermination par dosage de la quantité de bleu adsorbée

#### 7.2.1 Définition du test à la tache

Après chaque injection de bleu (voir paragraphe 7.2.2), ce test consiste à prélever, à l'aide de la baguette de verre, une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide incolore.

La goutte prélevée doit être telle que le diamètre du dépôt soit compris entre 8 et 12 mm.

Le test est dit positif si, dans la zone humide, apparaît autour du dépôt central une auréole bleu clair persistante. Il est dit négatif si l'auréole est incolore.

### 7.2.2 Dosage

À l'aide de la burette, injecter  $v'$  millilitres de solution de bleu dans le récipient. Après 2 min, ajouter une dose de 5 ml de solution de bleu, cette addition étant suivie du test de la tache sur le papier filtre.

On procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, sans rien ajouter, on laisse s'opérer l'adsorption du bleu, qui n'est pas instantanée, tout en effectuant des tests de minute en minute.

Si l'auréole bleu clair disparaît à la cinquième tache on procède à de nouvelles additions élémentaires de bleu de 2 ml.

Chaque addition est suivie de tests effectués toujours de minute en minute.

Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives : le dosage est alors considéré comme terminé.

On procède au nettoyage de l'appareillage dès que l'on a terminé les essais, les dépôts de bleu se détachant facilement quand ils sont récents.

Le matériel se nettoie très bien à l'eau. Si l'on a utilisé des produits détergents, on doit terminer par un rinçage abondant à l'eau.

## 8 EXPRESSION DES RÉSULTATS

### 8.1 Valeur de bleu

La valeur de bleu des fines  $V_{Bta}$  exprimée en grammes de bleu pour 100 g de fines est donnée par la formule :

$$V_{Bta} = \frac{V_1 - v'}{q}$$

$V_1$  étant le volume final de solution injectée, en ml,

$v'$  volume de solution de bleu kaolinite,

$q$  masse réelle de fines soumises à l'essai.

### 8.2 Contrôle de conformité par rapport à une spécification donnée

La spécification est exprimée en valeur de bleu pour 100 g de fines, soit  $s$  cette valeur.

Le volume de la solution de bleu à injecter en une seule fois est alors :

$$V_2 = q.s + v'$$

Le test de la tache est effectué après huit minutes d'agitation. S'il est positif, le sable est conforme à la spécification ; s'il est négatif, on ajoute un volume de solution de bleu égal à :

$$\frac{qs}{10}$$

Si le test est toujours négatif, après cinq minutes, on effectue le dosage conformément à l'article 7.2. Si le test est positif, on considère que le sable est conforme à la spécification.

## 9 PRÉCISION

La répétabilité  $r$  a été mesurée sur des niveaux de valeur 0,3 à 1,5. Elle est de 0,28.