

Caractérisation expérimentale du matériau

modèle

2.1. Introduction

La terre crue est un matériau hétérogène dont la composition et les propriétés varient grandement en fonction du lieu où elle est prélevée. Pour être capable de modéliser le comportement du matériau, il est nécessaire tout d'abord d'étudier le comportement d'un matériau modèle. Pour que ce matériau soit au plus proche des hypothèses du modèle numérique, il est composé d'une argile pure non gonflante, la kaolinite, d'un sable fin uniforme et d'eau. Les propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques de ce matériau modèle sont déterminées au cours d'une campagne expérimentale. Plusieurs mélanges sont étudiés afin de calibrer, puis de tester le modèle d'homogénéisation. Ce chapitre présente, dans un premier temps, la composition des mélanges et le procédé de fabrication des échantillons. Par la suite, les propriétés physiques des mélanges telles que la masse volumique ou la porosité des éprouvettes sont déterminées. Enfin, les propriétés thermiques, mécaniques et acoustiques de chaque mélange sont étudiées pour deux teneurs en eau différentes.

2.2. Choix des matériaux et procédé de fabrication des échantillons

2.2.1 Composition des mélanges

La terre crue est composée essentiellement de sable, d'argile et d'eau. Les proportions du mélange argile-sable peuvent varier en fonction du type de mise en œuvre utilisé : l'adobe nécessite une granulométrie plutôt fine alors que le pisé peut contenir des granulats dont le diamètre peut atteindre quelques centimètres. Selon Delgado et Guerrero [100], il est nécessaire d'avoir une quantité minimum d'argile de 5% pour assurer la cohésion du matériau. Cependant, la quantité maximale d'argile dépend de la méthode de fabrication utilisée. Dans cette partie, le rôle de chacun des éléments composant la terre crue est identifié et les matériaux choisis pour cette étude sont décrits.

2.2.1.1 L'argile

2.2.1.1.1 Les différents types d'argiles

Les argiles sont des particules très fines, de l'ordre du micromètre, pouvant facilement passer d'un état fluide à un état pâteux ou granulaire en fonction de la quantité d'eau présente dans le matériau [101]. La structure en feuillets des argiles est responsable de leur capacité liante qui permet d'assurer la cohésion entre les grains de sables de la terre crue, mais aussi de la capacité d'un sol à

changer de volume en fonction de sa teneur en eau (retrait ou gonflement). En effet, chaque particule d'argile est composée de plusieurs feuillets qui peuvent être assimilés à des disques agglomérés de façon plus ou moins ordonnée en fonction du type d'argile (Figure 2.1).

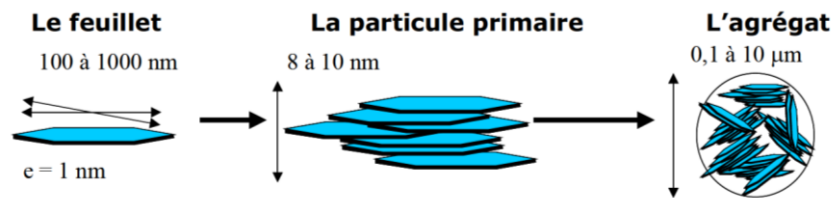


Figure 2.1. Structure multi-échelles de la montmorillonite [102]

Selon Meunier [103], il existe deux types de feuillets :

- Les feuillets 1/1 dans lesquels une couche tétraédrique est liée à une couche octaédrique (Figure 2.2.a) ;
- Les feuillets 2/1 dans lesquels la couche octaédrique est entourée de deux couches tétraédriques (Figure 2.2.b).

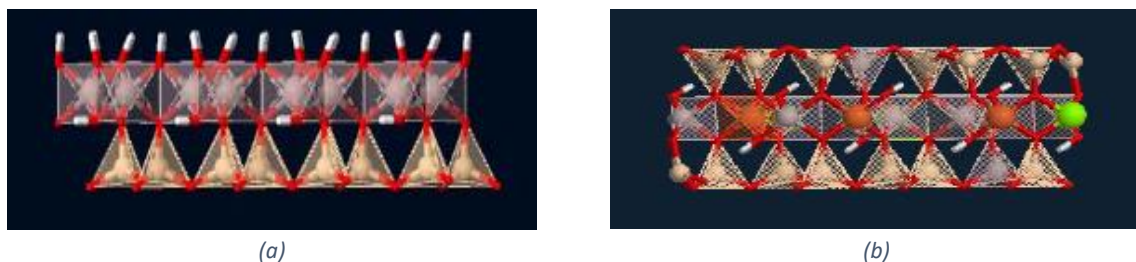


Figure 2.2. a : feuillet de type 1/1 ; b : feuillet de type 2/1 [101]

En fonction du type de feuillet, l'espace interfoliaire est plus ou moins grand, ce qui peut entraîner la présence d'ions dans cet espace. La présence de ces ions ou de défauts dans la structure cristalline charge électriquement les feuillets, ce qui influence la capacité gonflante des argiles et leur capacité à passer d'un état fluide à un état pâteux ou granulaire facilement [101], [103]. D'après Meunier [103], il existe trois structures cristallines principales :

Le Type 1/1 (qui n'a jamais de couche interfoliaire) : kaolinite

Ce feuillet est électriquement neutre car il n'y a pas d'imperfection dans la structure cristalline. Les différentes couches s'empilent régulièrement. Selon Anger [101], les liaisons entre feuillets sont assurées par les liaisons hydrogène et les forces de Van der Waals. L'importance de ces forces diminue l'espace interfoliaire (7,15 Å) et empêche donc la présence d'autres particules telles que l'eau dans l'espace interfoliaire. Le gonflement intercristallin induit par les molécules d'eau ne peut donc pas avoir lieu avec ce type de structure, c'est pourquoi la kaolinite est une argile non gonflante.

Le Type 2/1 sans couche interfoliaire : pyrophyllite, talc

Dans le cas de la pyrophyllite et du talc, la structure cristalline ne présente pas de défauts dans les couches tétraédriques et octaédriques, ce qui implique une neutralité des particules. Les liaisons entre deux feuillets, c'est-à-dire entre deux couches tétraédriques, sont établies de la même façon que dans le cas précédent, à l'aide des forces de Van der Waals et des liaisons hydrogène. Ainsi, l'espace interfoliaire reste également constant en présence d'eau, ce qui induit le non-gonflement de ce type d'argile.

Le Type 2/1 avec couche interfoliaire : illite, smectite

L'illite se caractérise par une substitution d'ions Si^{2+} par des ions Al^{3+} , ce qui entraîne un déficit de charges important. Dans le but de compenser ce déficit, des ions de potassium K^+ se positionnent dans l'espace interfoliaire. Les feuillets sont donc étroitement et très fortement liés par la création de cet assemblage. La présence de potassium induit une déshydratation de l'espace interfoliaire et ne laisse pas la possibilité aux molécules d'eau de s'y insérer. L'espace interfoliaire a une taille de 10 Å et ne gonfle pas en présence d'eau.

La smectite se caractérise également par des substitutions au sein de la structure cristalline dont le déficit est compensé par des cations interfoliaires plus mobiles que le potassium (Ca^+ , Mg^{2+} ou Na^+). Les molécules d'eau peuvent facilement pénétrer dans l'espace interfoliaire et créer des gonflements très importants.

La Figure 2.3 résume les différentes structures cristallines évoquées précédemment.

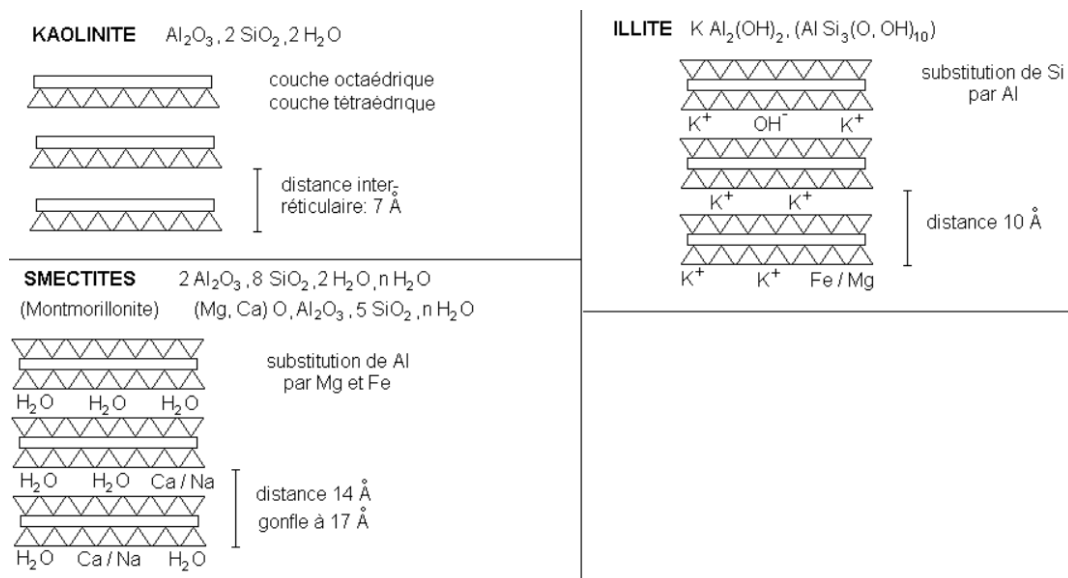


Figure 2.3. Structure cristalline de minéraux argileux [104]

2.2.1.1.2 Caractéristiques de l'argile sélectionnée

Dans cette étude, le matériau utilisé est un matériau modèle dont le comportement de chacune des phases qui le composent doit être connu. Le comportement des argiles en présence d'eau pouvant varier de façon conséquente en fonction de leur structure cristalline, il a été choisi d'utiliser une argile ne contenant qu'un seul type de structure cristalline afin de ne pas avoir d'effets conjugués entre le comportement d'argiles gonflantes et non gonflantes. Pour limiter les effets de retrait lors du séchage des éprouvettes, l'argile utilisée est la kaolinite. D'après le fournisseur, plus de 99% de l'argile sélectionnée est de la kaolinite. La masse volumique réelle du matériau est de $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$ et sa composition chimique, donnée par le fournisseur, est présentée dans le Tableau 2.1. La courbe granulométrique de l'argile, dont la courbe est donnée en Figure 2.4, a été déterminée par sédimentométrie selon la norme NF EN ISO 17892-4 [105].

Tableau 2.1. Composition chimique de la kaolinite

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	CaO
48 - 50	35 - 37	0,6 - 0,8	0,2 - 0,4	1,9 - 2,3	0,1 - 0,2	0,04 - 0,06	0,09 - 0,11

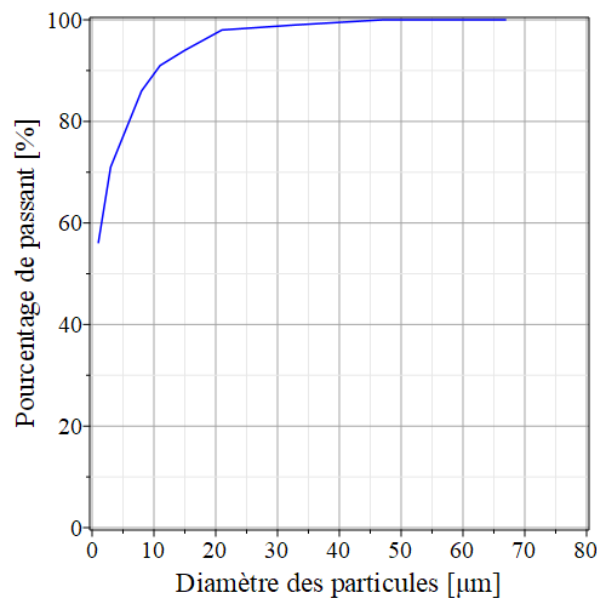


Figure 2.4. Courbe granulométrique de l'argile

2.2.1.2 Les granulats

2.2.1.2.1 Les différents types de granulats

Les granulats utilisés dans la terre crue sont le plus souvent des minéraux silicatés ou calcaires déjà présents dans la terre [106]. Cependant, il est possible d'observer sur certaines constructions des granulats issus de recyclage. En effet, De Chazelles [107] a constaté que les murs en terre crue des constructions romaines contenaient souvent des morceaux de céramiques cassées ou bien du charbon de bois. De plus, dans les constructions plus modernes, il est parfois possible de trouver des granulats issus du recyclage du béton, comme dans l'étude de Eid [108] dont le sol est constitué à 80% de sol naturel et à 20% de granulats de béton recyclé. La diversité des granulats exerce une influence non négligeable sur les performances mécanique, thermique et hydrique du matériau.

De nombreuses propriétés géotechniques et hydrogéologiques sont liées à la répartition granulaire du sol étudié, c'est pourquoi la distribution granulométrique est l'un des paramètres les plus importants pour caractériser un sol. L'étude d'Aubert *et al.* [109] a montré que la distribution granulométrique de la terre crue varie beaucoup en fonction du type de mise en œuvre utilisé. En effet, la Figure 2.5 montre que les briques de terre crue contiennent souvent plus de particules fines que le pisé. Dans le cas des briques de terre crue, la méthode de fabrication des briques (Compressed Earth Block, Extruded Earth Block et Adobe) ne semble pas impacter leur granulométrie. Les compositions des sols étant très diversifiées, il ne semble pas y avoir de granulométrie type en fonction du type de mise en œuvre.

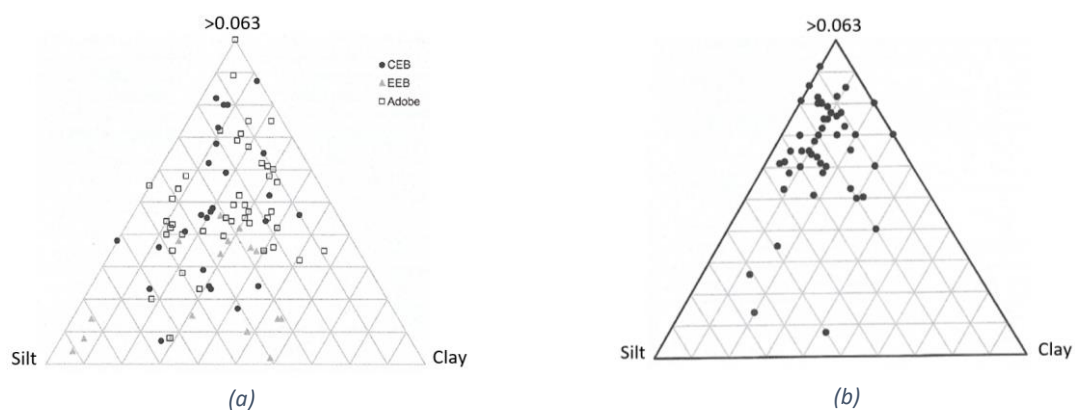


Figure 2.5. Distribution granulométrique de briques en terre crue (a) et de pisé (b) dans un diagramme ternaire [109]

Certaines études ont cependant tenté de définir un fuseau de passage de la courbe granulométrique pour lequel le sol serait adéquat pour la construction. La Figure 2.6 présente les fuseaux de passage recommandés par la norme NF XP P 13-901 [110] et l'étude de Houben et Guillaud [111]. Comme le montre la figure, la plupart des sols étudiés dans la littérature ne respectent pas ce fuseau de passage. De plus, il existe des cas d'études dans lesquels des constructions en adobes

contiennent des galets de plusieurs centimètres qui ne respectent donc pas ces fuseaux granulaires et remettent ainsi en cause la pertinence de cette approche [109].

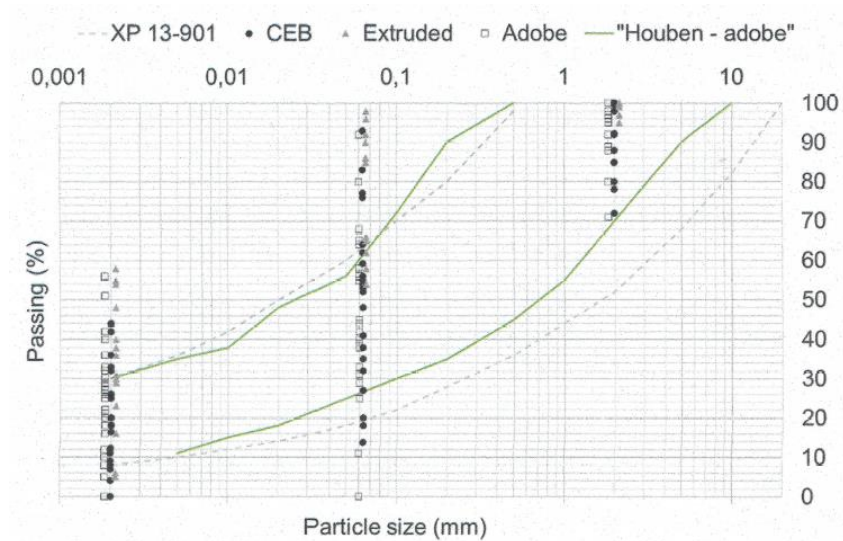


Figure 2.6. Fuseaux de passage recommandés pour les briques de terre crue [109]

2.2.1.2.2 Caractéristiques du sable sélectionné

Dans cette étude, le squelette granulaire est composé d'un sable fin siliceux roulé dont la courbe granulométrique uniforme est donnée en Figure 2.7. Ces grains de sable pourront ainsi être représentés comme des inclusions sphériques de taille uniforme lors de la modélisation. La taille des grains de sable doit être au moins dix fois supérieure à celle de l'argile pour les besoins de la modélisation. Le choix de ce sable peut avoir un impact sur les propriétés mécaniques des sols étudiés et les résultats obtenus peuvent donc être légèrement différents de ceux obtenus pour des terres ayant une granulométrie plus répartie et avec des grains de sable plus gros.

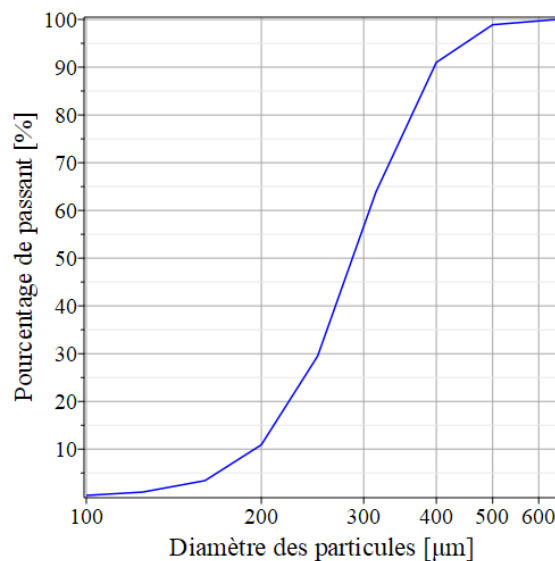


Figure 2.7. Courbe granulométrique du sable

La composition chimique du sable donnée par le fournisseur est indiquée dans le Tableau 2.2. La masse volumique apparente du sable est de $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$ et sa masse volumique réelle est de $2,6 \text{ g.cm}^{-3}$. Le coefficient d'absorption d'eau du sable a été mesuré selon la norme NF EN 1097-6 [112] et il est égal à 2,9 %.

Tableau 2.2. Composition chimique du sable

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	CaO	I ₂ O ₃
> 99	0,02	0,5	0,025	0,01	0,95

2.2.1.3 Composition des mélanges

Trois mélanges de sable et d'argile ont été analysés dans cette campagne expérimentale contenant 0, 30 et 60% massique de sable. Dans la suite de ce document, ils seront notés respectivement 0S, 30S et 60S. Le premier mélange permet d'obtenir les propriétés de la matrice argileuse seule, et les deux autres mélanges permettront de voir l'influence de la quantité de sable sur les propriétés de la terre crue. Le Tableau 2.3 résume les quantités de sable et d'argile de chaque mélange.

Tableau 2.3. Composition des phases solides des trois mélanges étudiés

	0S	30S	60S
Argile (%)	100	70	40
Sable (%)	0	30	60

2.2.2 Caractérisation géotechnique des mélanges

2.2.2.1 Limites d'Atterberg

La consistance d'un sol est liée à sa composition, et en particulier aux quantités d'eau, d'argile et de sable, et au type d'argile présent dans le sol. Les limites d'Atterberg servent à déterminer les teneurs en eau permettant à un sol de passer d'un état liquide à un état plastique (limite de liquidité ω_L) et d'un état plastique à un état solide (limite de plasticité ω_P). Ces limites ont été déterminées pour les trois mélanges 0S, 30S et 60S selon la norme NF EN ISO 17892-12 [113]. Trois essais ont été réalisés pour chaque mélange et chaque limite d'Atterberg, et le Tableau 2.4 présente les valeurs moyennes et les écarts-type des limites de liquidité et de plasticité ainsi obtenues.

Tableau 2.4. Limites d'Atterberg

	0S	30S	60S
ω_L (%)	$64,6 \pm 3,9$	$43,2 \pm 1,5$	$25,7 \pm 1,4$
ω_L/a	0,65	0,62	0,64
ω_P (%)	$35,4 \pm 3,0$	$23,8 \pm 2,1$	$15,6 \pm 1,1$
ω_P/a	0,35	0,34	0,39

Les valeurs obtenues pour le mélange 0S ne contenant que de l'argile sont cohérentes avec les valeurs obtenues par Cornell [114] qui a déterminé les limites de liquidité et de plasticité de la kaolinite en fonction des cations présents dans l'argile. Il est également possible de remarquer que le ratio entre la quantité d'eau correspondant à la limite liquide (ω_L) ou plastique (ω_P) et le pourcentage massique d'argile de la phase solide (a) reste constant en fonction du mélange. Ce phénomène indique que la consistance du mélange est donnée principalement par la matrice argileuse, c'est-à-dire le mélange d'eau et d'argile du sol, et que la présence de sable a peu d'influence sur cette propriété. Liu et Tong [115] ont également analysé des sols contenant des quantités variables de kaolinite mais ils n'ont pas obtenu la même conclusion concernant le rôle de l'argile et du sable sur la consistance des mélanges. Cette différence peut être due à la présence d'une granulométrie mieux répartie dans leurs mélanges et en particulier à la présence de limons qui peuvent également avoir un impact sur la consistance d'un sol.

2.2.2.2 Essai Proctor

Dans le but de déterminer la teneur en eau de fabrication pour chacun des mélanges, des essais Proctor ont été réalisés selon la norme NF P94-093 [116]. La Figure 2.8 représente les trois courbes Proctor et le Tableau 2.5 indique les masses volumiques apparentes sèches maximales ($\rho_{dProctor}$) obtenues lors des essais Proctor, ainsi que la teneur en eau ($\omega_{Proctor}$) correspondant à ces masses volumiques. Il est possible de remarquer que la teneur en eau correspondant à la masse volumique maximale est proche de la limite de plasticité de chaque mélange. Des résultats similaires ont été observés dans plusieurs études où la limite de plasticité a été utilisée comme teneur en eau de fabrication [117]–[119].

Tableau 2.5. Masses volumiques apparentes sèches obtenues avec l'essai Proctor

	0S	30S	60S
$\rho_{dProctor} (g.cm^{-3})$	1,48	1,66	1,91
$\omega_{Proctor}$ (%)	25,4	21,0	12,1
ω_{fab} (%)	30	21	12

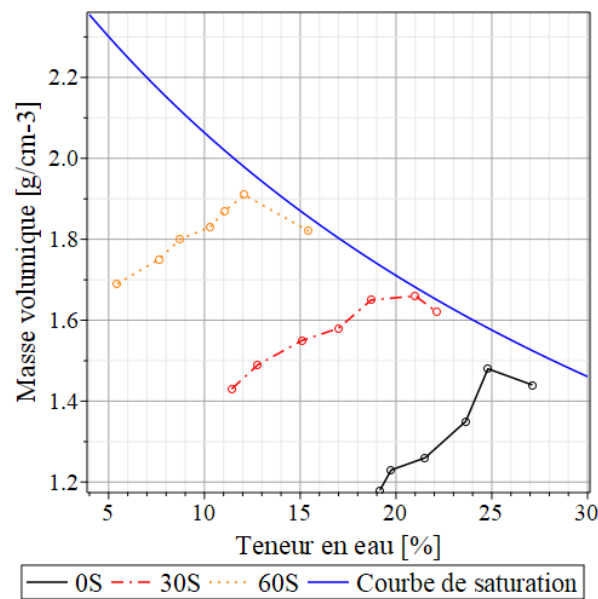


Figure 2.8. Courbe Proctor des trois mélanges

Pour être en mesure de comparer les résultats expérimentaux avec ceux issus de la modélisation, il est nécessaire que la matrice argileuse de chaque mélange soit identique et que seule la quantité de sable varie. Pour cela, le rapport entre la teneur en eau et la teneur en argile de la phase solide doit être constant pour chaque mélange. Ce rapport a été choisi égale à 0,3 pour que la masse volumique apparente sèche de chaque mélange soit au plus près de l'optimum Proctor correspondant. La teneur en eau de fabrication (ω_{fab}) retenue pour chaque mélange est présentée dans le Tableau 2.5.

2.2.3 Procédé de fabrication des échantillons

Dans le cadre des mesures des propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques des différents mélanges, plusieurs types d'échantillon ont été fabriqués (Figure 2.9). Ces échantillons ont été fabriqués en utilisant la même méthode, mais avec des moules différents. Les échantillons sont fabriqués par compression statique dans des moules métalliques avec une force de 20kN.

Les éprouvettes des essais de compression, de module d'Young et de coefficient de Poisson sont des cylindres de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur ; celles des essais de retrait et de conductivité thermique sont des pavés droits de dimensions 15*15*5 cm³. Les éprouvettes des essais de flexion trois points sont des pavés droits de dimensions 15*5*5 cm³ qui ont été découpés dans des pavés droits de dimensions 15*15*5 cm³ à l'aide d'une scie diamantée. Enfin, les essais acoustiques ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de diamètre 8 cm et d'épaisseur 2 cm.

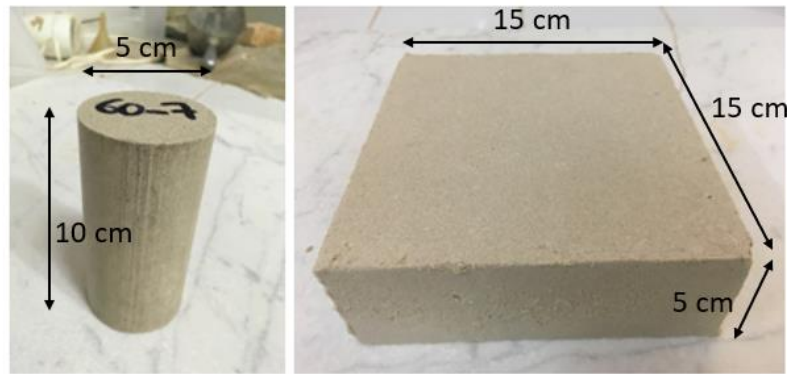


Figure 2.9. Échantillons cylindriques ($\phi 5h10$) et prismatiques ($15*15*5\text{ cm}^3$)

Une fois fabriqués, la moitié des échantillons est testée à la teneur en eau de fabrication, et l'autre moitié des échantillons est séchée dans une chambre climatique avec une température constante de 20°C et une humidité relative de 50%. Les échantillons ainsi séchés ont été pesés quotidiennement et les essais ont été réalisés lorsque la variation de masse entre deux pesées successives était inférieure à 1%.

2.3. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des échantillons telles que la masse volumique apparente, la porosité et les isothermes de sorption sont mesurées sur des échantillons provenant des éprouvettes cylindriques et des éprouvettes prismatiques afin de vérifier que la forme du moule et le procédé de fabrication n'influencent pas les propriétés du matériau.

2.3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente de chaque échantillon est déterminée à partir de la mesure de sa masse et de ses dimensions. Les dimensions sont relevées à l'aide d'un pied à coulisse, et le volume de l'éprouvette est calculé en supposant que les cylindres et les prismes sont parfaits. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne permet pas de prendre en considération les défauts de fabrication des échantillons et, en particulier, ceux des éprouvettes prismatiques pour lesquelles les angles du moule peuvent induire une répartition non homogène de la terre au niveau des arêtes.

Le Tableau 2.6 présente les masses volumiques apparentes des éprouvettes après fabrication (ρ_{fab}) et après séchage dans la chambre climatique ($\rho_{50\%HR}$). Ces résultats représentent la moyenne et l'écart-type calculés à partir de tous les échantillons (cylindriques et prismatiques). On peut observer que l'écart-type est très faible, ce qui signifie qu'il y a peu de différence entre les masses volumiques des échantillons de formes différentes. Cette propriété est donc peu influencée par la méthode de fabrication.

Tableau 2.6 Masses volumiques apparentes des échantillons

	0S	30S	60S
$\rho_{fab} (g.cm^{-3})$	$1,80 \pm 0,01$	$1,96 \pm 0,01$	$2,14 \pm 0,01$
$\rho_{50\%HR} (g.cm^{-3})$	$1,50 \pm 0,02$	$1,72 \pm 0,03$	$1,92 \pm 0,01$

2.3.2 Porosité

La porosité des échantillons a été mesurée par porosimétrie avec intrusion au mercure selon la norme ISO 15901-1:2016 [120]. Cette mesure nécessitant de faire le vide dans la cellule de mesure, les échantillons ont été préalablement séchés dans une étuve à 105°C. Une fois le vide atteint, la pression dans la cellule augmente progressivement jusqu'à 400 MPa, ce qui permet de déterminer la répartition de taille des pores du matériau étudié (Figure 2.10).

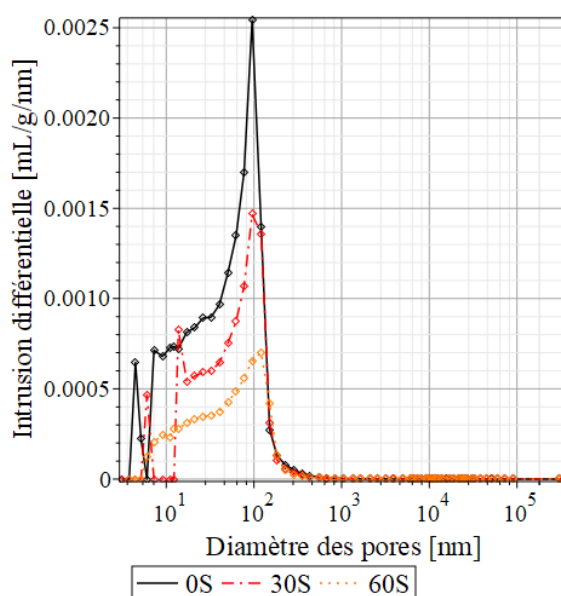


Figure 2.10. Répartition de la taille des pores

Dans le cas des trois mélanges étudiés, la Figure 2.10 montre que les pores ont une taille inférieure à 100 nm, ce qui est plus petit que la taille des particules d'argile. De plus, les valeurs de porosité (n) indiquées dans le Tableau 2.7 montrent que la porosité évolue linéairement lorsque la quantité de sable augmente.

Tableau 2.7 Porosité des trois mélanges

	0S	30S	60S
$n (\%)$	$43,7 \pm 0,7$	$36,6 \pm 0,9$	$30,6 \pm 0,9$

La taille des pores étant de l'ordre de grandeur des particules d'argile et la valeur de la porosité étant proportionnelle à la quantité d'argile dans le mélange, il est possible de supposer qu'il n'y a pas de porosité entre les grains de sable, ce qui signifie que les grains de sable sont noyés dans une matrice argileuse continue, et que la porosité du matériau est principalement localisée dans l'argile. Certains auteurs ont également mesuré la porosité de briques de terre crue en utilisant la porosimétrie par intrusion de mercure [121]–[123] et ils ont obtenu une porosité variant de 21 à 35% et une taille de pores allant de 100 nm à 10 μm . Les ordres de grandeur des résultats que nous obtenons sont donc cohérents avec ceux de la littérature.

2.3.3 Isothermes de sorption

Les isothermes d'adsorption et de désorption permettent de relier la teneur en eau d'un échantillon à l'humidité relative et ainsi de caractériser le comportement hygroscopique du matériau. Dans cette étude, les isothermes de sorption sont mesurées à l'aide d'un appareil DVS (Dynamic Vapor Sorption) sur des petits échantillons cubiques découpés dans des éprouvettes cylindriques et prismatiques. Ces échantillons ont été séchés dans une étuve à 105°C avant la mesure. Cette mesure s'effectue en deux parties : dans un premier temps, l'humidité relative de l'appareil augmente progressivement de 0 à 97% et la masse de l'échantillon est mesurée pour différents paliers d'humidité relative. Cela permet de tracer la courbe d'adsorption. Puis dans un deuxième temps, l'humidité relative diminue jusqu'à atteindre 0% dans le but d'obtenir la courbe de désorption.

La Figure 2.11 représente les isothermes de sorption des trois mélanges.

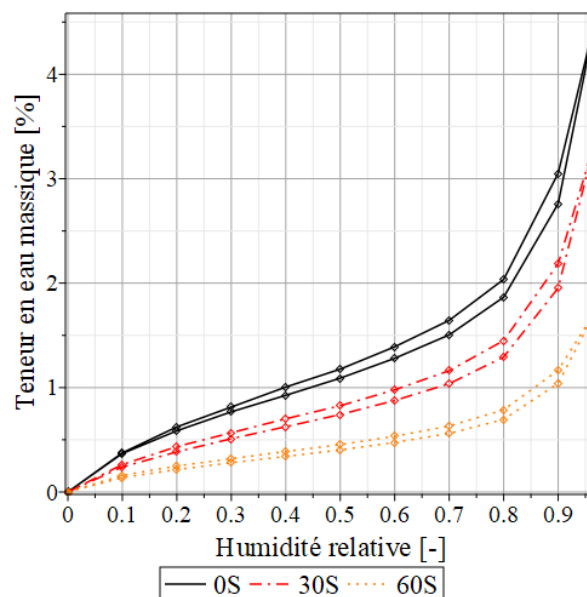


Figure 2.11. Isothermes de sorption des trois mélanges

Entre les courbes d'adsorption et de désorption, il est possible de voir un phénomène d'hystérésis de faible amplitude. Ce phénomène est lié à distribution poreuse du matériau : plus la variation de taille des pores est importante, plus l'amplitude de l'hystérésis est grande. Selon la Figure 2.10, la taille des pores des matériaux étudiés varie peu, ce qui explique la faible amplitude de l'hystérésis. Par ailleurs, la teneur en eau maximale adsorbée varie entre 1,75 % pour le mélange 60S et 4,56 % pour le mélange 0S. L'ordre de grandeur de ces valeurs est cohérent avec la littérature [121], [124]–[127].

La Figure 2.11 permet également de mettre en évidence l'impact de la quantité d'argile dans le sol sur les isothermes de sorption. En effet, l'argile ayant une capacité d'échange hygroscopique plus importante que le sable, plus la quantité d'argile est grande, plus les échanges hydriques seront importants. Les études de McGregor *et al.* [124] et Aubert [128] ont également mis en évidence l'impact du type d'argile sur les isothermes de sorption. Les argiles dites gonflantes telles que la montmorillonite ont des capacités d'adsorption de vapeur d'eau plus élevées que les argiles non gonflantes telles que la kaolinite. Cependant, la quantité et le type d'argile d'un sol ne sont pas les seuls paramètres influant sur les courbes de sorption. Selon l'étude de Fredlund *et al.* [20], l'allure générale de la courbe est principalement contrôlée par la granulométrie du sol. Cette hypothèse a également été mise en évidence par Vanapalli *et al.* [21] qui a étudié des terres avec des squelettes granulaires différents et dont les travaux sont résumés dans la Figure 1.4.

2.4. Caractéristiques thermiques

Dans le but de limiter la consommation d'énergie, les réglementations thermiques sont de plus en plus exigeantes vis-à-vis des performances thermiques des bâtiments. Plusieurs études ont montré que la terre crue n'est pas un bon isolant, mais qu'elle a une très bonne inertie thermique, ce qui permet d'obtenir un confort intérieur d'été sans avoir nécessairement besoin de climatisation [129], [130]. La réglementation thermique ne prend cependant pas en compte les bénéfices liés à l'inertie thermique du bâtiment. C'est pourquoi dans le dimensionnement de bâtiment en terre crue, les performances attendues sont moins élevées que les performances thermiques observées. C'est le cas du bâtiment réalisé en Grande Bretagne par Morton *et al.* [129], pour lequel les performances thermiques sont bien plus élevées que ce que la norme avait initialement prédit.

2.4.1 Conductivité thermique

Il existe deux méthodes pour mesurer la conductivité thermique qui peuvent donner des résultats différents : la méthode de la plaque chaude gardée et la méthode du fil chaud [131]. Dans cette étude, la conductivité thermique est mesurée à l'aide de la méthode de la plaque chaude gardée selon la norme NF EN 12667 [132]. Cette méthode consiste à positionner l'éprouvette entre deux plaques à

des températures différentes, et à mesurer le flux passant entre les deux plaques. Dans cette campagne expérimentale, la température de la plaque chaude est de 25°C et celle de la plaque froide de 15°C. Chaque configuration expérimentale (variation des teneurs en eau et en sable) a été testée trois fois. Dans le but de limiter les pertes d'eau des éprouvettes ayant une teneur en eau élevée au cours des essais, les éprouvettes ont été enveloppées dans un film plastique. Des essais réalisés sur les éprouvettes sèches ont montré que ce film plastique n'a pas d'impact sur la mesure de la conductivité thermique du matériau.

Le Tableau 2.8 et la Figure 2.12 présentent les conductivités thermiques obtenues pour les trois mélanges après séchage dans la chambre climatique ($\lambda_{50\%HR}$) et après fabrication (λ_{fab}). La dispersion des mesures pour chaque configuration expérimentale est faible.

Tableau 2.8. Conductivités thermiques

		0S	30S	60S
λ_{fab}	W/(m.K)	$1,15 \pm 0,08$	$1,34 \pm 0,06$	$1,00 \pm 0,09$
$\lambda_{50\%HR}$	W/(m.K)	$0,40 \pm 0,01$	$0,54 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,08$

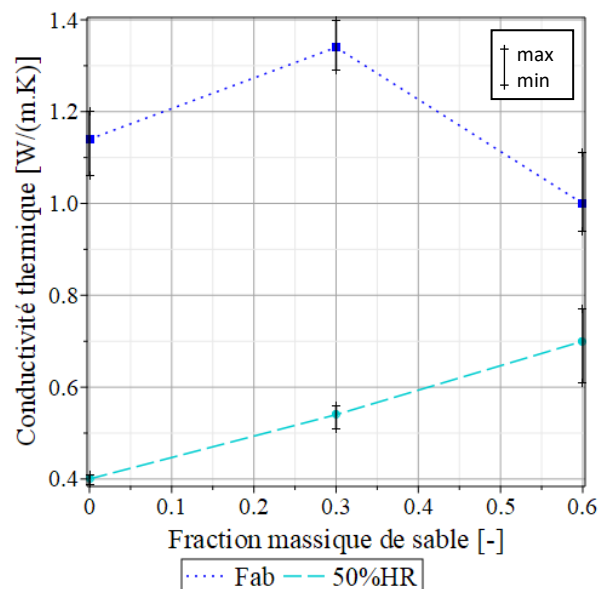


Figure 2.12. Mesures de conductivité thermique en fonction de la quantité de sable

Sur la Figure 2.12, il est observé que la teneur en eau du matériau a un impact conséquent sur sa conductivité thermique. Cependant, l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau ne semble pas être la même pour tous les mélanges. Hall et Allinson [133] ont montré que la conductivité thermique augmente linéairement en fonction du degré de saturation de la terre considérée, mais que la pente de cette évolution linéaire dépend de la masse volumique apparente de la terre. La linéarité de l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la teneur en eau n'a pas

pu être confirmée dans cette étude car seules deux teneurs en eau ont été étudiées. Cependant, la différence de comportement en fonction de la masse volumique a bien été constatée. Le fait que la conductivité thermique de certains sables est plus faible que celle de l'eau [134] peut expliquer que l'impact de l'eau soit moindre sur des mélanges contenant beaucoup de sable.

Dans le cas des éprouvettes sèches, la conductivité thermique semble augmenter lorsque la teneur en sable augmente, c'est-à-dire lorsque la porosité du matériau diminue. En effet, Laurent [135] a montré que la conductivité thermique de la terre crue est grandement influencée par sa porosité et sa masse volumique : plus le matériau est poreux, plus la conductivité thermique est basse. La Figure 2.13 illustre l'évolution de la conductivité thermique de plusieurs terres crues en fonction de leur masse volumique apparente [125], [133], [136]–[138]. Les mesures de toutes ces études ont été faites avec la méthode de la plaque chaude gardée. Ainsi, il est possible de voir que les résultats expérimentaux de cette étude sont du même ordre de grandeur que ceux de la littérature.

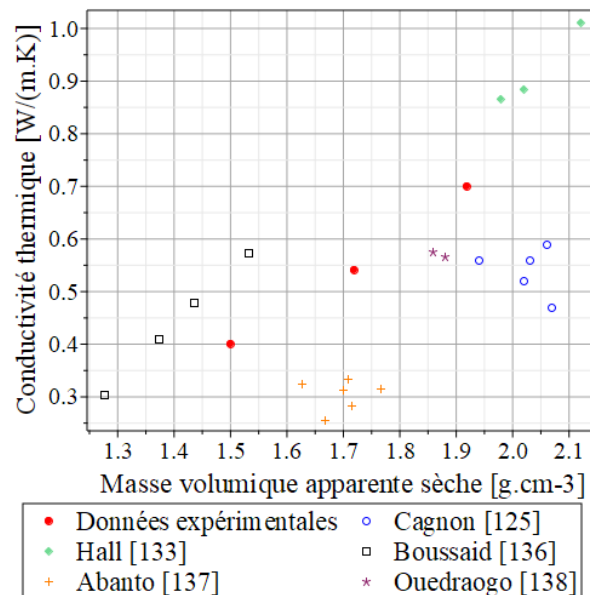


Figure 2.13. Comparaison de la conductivité thermique de différentes terres mesurée avec la méthode de la plaque chaude gardée

2.4.2 Capacité thermique massique

La capacité thermique massique, notée c et exprimée en J/(g.K), peut se mesurer par calorimétrie en imposant une variation d'énergie à un échantillon tout en mesurant sa température. Selon Laurent [139], la capacité thermique massique des argiles se situe entre 0,8 et 0,95 J/(g.K). Dans cette étude, la capacité thermique est mesurée sur des échantillons sous forme de poudre à l'aide de la DSC (Differential Scanning Calorimetry) et selon la norme NF EN ISO 11357 [140]. La poudre est broyée avec un mortier d'agate jusqu'à ce que la taille des particules soit inférieure à 40 μm , puis séchée dans une étuve à 40°C jusqu'à ce que la masse reste constante entre deux pesées. La capacité thermique

massique des mélanges humides ($c(\omega)$) peut être déterminée à partir de celle du mélange sec (c_{sec}) et de la capacité thermique de l'eau (c_{eau}) selon la relation suivante [131] :

$$c(\omega) = c_{sec} + \omega c_{eau} \quad (\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})) \quad (2.1)$$

Avec ω la teneur en eau du mélange.

Les valeurs de capacité thermique massique de la terre crue trouvées dans la littérature varient entre 0,8 et 1,2 J/(g.K) [125], [135], [141]–[145]. Les valeurs expérimentales présentées dans le Tableau 2.9 sont donc du même ordre de grandeur que ces valeurs.

Tableau 2.9. Capacités thermiques massiques

		0S	30S	60S
c_{fab}	J/(g.K)	$2,04 \pm 0,10$	$1,84 \pm 0,19$	$1,29 \pm 0,01$
$c_{50\%HR}$	J/(g.K)	$1,01 \pm 0,14$	$1,14 \pm 0,25$	$0,88 \pm 0,01$

2.5. Caractéristiques mécaniques

2.5.1 Résistance à la compression

La terre crue étant principalement utilisée en compression, sa résistance à la compression est l'une des propriétés mécaniques les plus mesurées. La méthode de fabrication d'une construction en terre étant très variable, les échantillons utilisés peuvent avoir des formes variées [146]–[149]. Dans cette campagne expérimentale, les éprouvettes sont des cylindres $\phi 5 \text{h} 10$ qui ont été fabriqués par compaction en adaptant la norme NF EN 13286-53 [150] qui porte sur la fabrication d'éprouvettes cylindriques pour des essais sur les matériaux utilisés en chaussée. Selon Pkla [151], l'élancement des éprouvettes est suffisamment grand pour considérer que le freinage n'impacte pas les résultats. Actuellement, il n'existe pas de norme pour évaluer la résistance à la compression de ce type de matériau, c'est pourquoi la norme NF XP P 13-901 [110] concernant les essais de compression sur des blocs de terre comprimés a été adaptée à ces éprouvettes. Ainsi, la résistance à la compression est mesurée à l'aide d'une presse hydraulique contrôlée en force avec une vitesse constante de chargement de 0,02 kN/s.

Le Tableau 2.10 résume les résistances à la compression des trois mélanges de terre pour les deux teneurs en eau étudiées. Comme illustré sur la Figure 2.14.a où les barres d'erreur représentent les valeurs minimales et maximales obtenues, les résultats sont peu dispersés, ce qui signifie que les défauts de fabrication des éprouvettes ont un impact limité sur la résistance à la compression.

Tableau 2.10. Résistances à la compression

		0S	30S	60S
$R_{c,fab}$	MPa	$0,11 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,02$
$R_{c,50\%HR}$	MPa	$0,99 \pm 0,18$	$1,16 \pm 0,13$	$1,28 \pm 0,10$

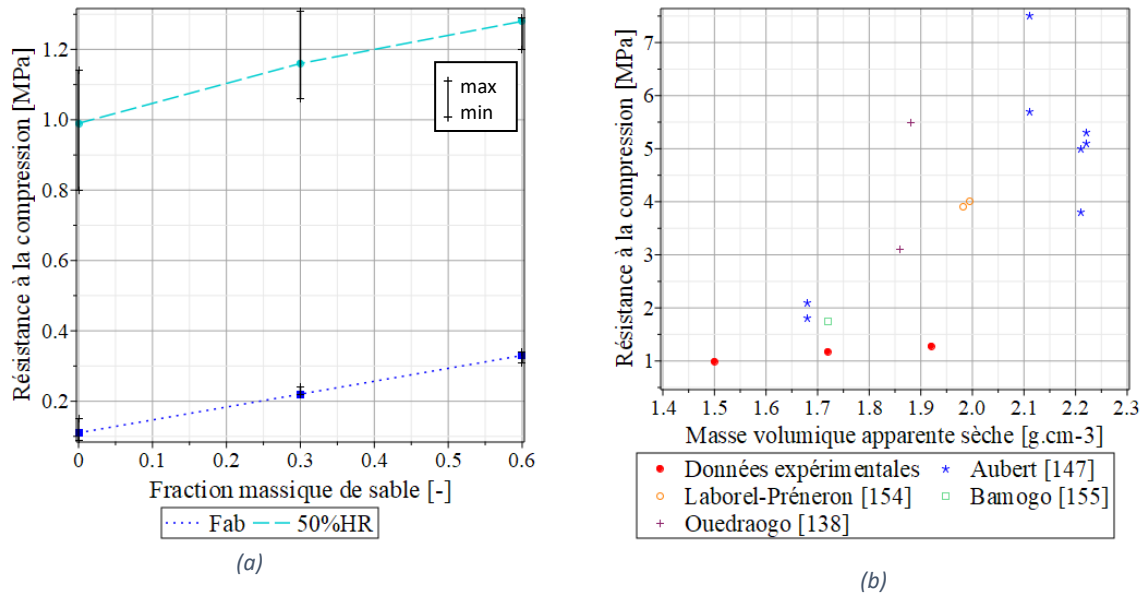


Figure 2.14. Résistance à la compression en fonction de la quantité de sable (a) et comparaison avec la littérature (b)

Sur la Figure 2.14.a, la résistance à la compression des éprouvettes sèches et humides semble augmenter linéairement en fonction de la teneur en sable du mélange et donc de sa masse volumique sèche. Les nombreuses études réalisées sur la terre crue ont montré que la masse volumique de la terre influence effectivement la résistance du matériau, mais que ce n'est pas le seul paramètre à prendre en compte. En effet, les études [117], [118], [152], [153] ont montré que pour des sols dont les éléments constitutifs sont identiques mais en quantités variables comme c'est le cas dans cette campagne expérimentale, la résistance à la compression augmente lorsque la masse volumique sèche augmente. Cependant, la Figure 2.14.b illustrant la résistance de la terre crue en fonction de la masse volumique sèche pour des éprouvettes comparables à celles de cette étude [138], [147], [154], [155] montre que ce paramètre seul ne permet pas de prédire la résistance du matériau. Par ailleurs, certaines études ont également mis en évidence l'influence de la quantité et du type d'argile sur la résistance de la terre crue ([153], [156], [157]). Les terres contenant des argiles gonflantes sont plus résistantes que celles contenant des argiles non gonflantes.

Selon la Figure 2.14.a, la teneur en eau a également un impact non négligeable sur la résistance à la compression du matériau. Plus la teneur en eau est grande, plus la résistance est petite. Cet effet, qui a aussi été observé dans de nombreuses études ([121], [158]–[161]), peut s'expliquer par la

présence de pressions capillaires dans les pores de la terre crue qui augmentent lors du séchage et améliorent la cohésion du matériau. Ainsi, la résistance à la compression serait liée à la masse volumique sèche du matériau, à la quantité d'argile et au type d'argile présent dans la terre et la teneur en eau.

2.5.2 Résistance à la traction

Très peu d'essais ont été réalisés pour déterminer la résistance à la traction de la terre crue. Elle peut cependant être déterminée, comme pour le béton, par des méthodes indirectes comme l'essai en flexion trois points ou l'essai de fendage [131].

Dans cette campagne expérimentale, la résistance à la traction est mesurée grâce à un essai de flexion trois points sur une presse hydraulique contrôlée en force avec une vitesse de chargement constante de 0,02 kN/s. La Figure 2.15 illustre les conditions aux limites de l'essai. Le contact entre l'éprouvette et le bas de la presse est fait par l'intermédiaire de rouleaux dont les lignes de contact sont à 1 cm des bords de l'éprouvette. La force est appliquée sur l'éprouvette via un rouleau centré sur la longueur de l'éprouvette.

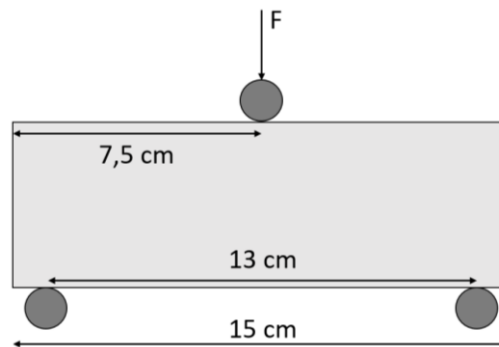


Figure 2.15. Conditions aux limites du test de flexion trois-points

Les résultats présentés dans le Tableau 2.11 et la Figure 2.16 montrent que la résistance à la traction du matériau est faible. La dispersion importante des résultats peut s'expliquer par les faibles valeurs de résistance du matériau et la précision insuffisante du capteur de force.

Tableau 2.11. Résistances à la traction

		0S	30S	60S
$R_{t, fab}$	MPa	$0,052 \pm 0,003$	$0,060 \pm 0,003$	$0,121 \pm 0,022$
$R_{t, 50\%HR}$	MPa	$0,40 \pm 0,06$	$0,37 \pm 0,08$	$0,23 \pm 0,02$

Certains auteurs ont déterminé la résistance à la traction avec un essai de fendage Brésilien [162]–[167] et ils ont obtenu des valeurs inférieures à 0,52 MPa [164]. Dans cette campagne expérimentale,

l'ordre de grandeur de la résistance à la traction est donc similaire à ceux de la littérature. Dans le cas des éprouvettes sèches, la résistance diminue lorsque la quantité de sable augmente, ce qui peut s'expliquer par l'apparition de microfissures autour des grains de sable pendant le séchage. La teneur en eau des échantillons influence considérablement la résistance à la traction de la terre crue. Plus la teneur en eau est faible, plus la résistance est grande. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation des pressions capillaires lors du séchage du matériau qui entraîne ainsi une augmentation de la cohésion.

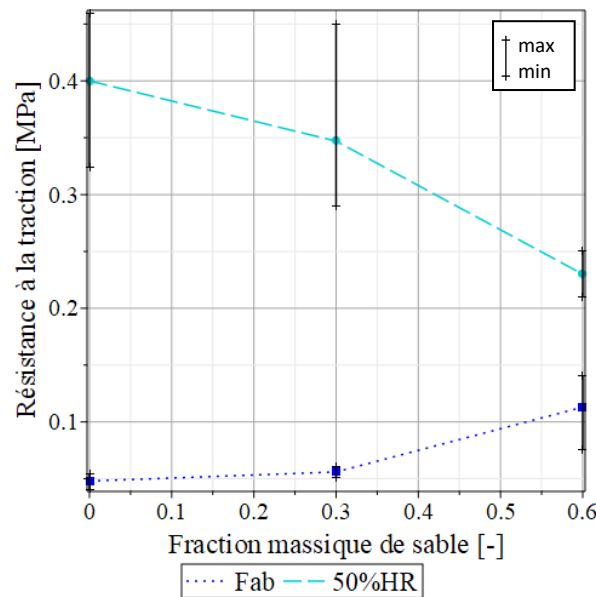


Figure 2.16. Résistance à la traction en fonction de la quantité de sable

2.5.3 Module d'Young et coefficient de Poisson

Le module d'Young peut être mesuré selon de nombreuses méthodes [157], mais, dans la plupart des cas, il est mesuré lors d'un essai de compression. Les résultats issus de la littérature présentent une grande variabilité principalement liée à la mesure de la déformation. Certains auteurs déterminent la déformation du matériau à partir du déplacement de la presse [118], [121], [162], [168], alors que d'autres la mesurent directement sur l'éprouvette à l'aide de jauges de déformation [158], [161]. Dans cette étude, la déformation des éprouvettes sera mesurée à l'aide de la vidéo corrélation sur des éprouvettes cylindriques. Une approche similaire a déjà été utilisée sur de la terre crue par Champiré *et al.* [169].

2.5.3.1 Mise en place de l'essai

La vidéo corrélation est une méthode de mesure consistant à utiliser des images prises au cours d'un essai afin d'en déduire les déformations de l'éprouvette. Dans cette campagne expérimentale, la vidéo corrélation a été utilisée sur un essai de compression cyclique afin d'en déduire le module d'Young et le coefficient de Poisson de chaque mélange. Après avoir réalisé trois cycles de charge/décharge entre 33% et 10% de la capacité maximale de l'éprouvette (NF EN 12390-13 [170]), celle-ci est amenée à la rupture en contrôlant la presse en déplacement avec une vitesse constante de 0,5 mm/min afin d'obtenir le comportement post-pic du matériau. Les cycles de chargement des éprouvettes sèches sont faits avec une vitesse de chargement constante de 0,02kN/s. Ce type de chargement ne peut pas être appliqué aux éprouvettes humides car la précision du capteur d'effort n'est pas suffisante pour assurer une mise en contact avec l'échantillon sans l'endommager. Pour cette raison, les éprouvettes humides sont testées avec une vitesse de déplacement constante de 0,5 mm/min. Par ailleurs, pour limiter les effets de succion et les frottements entre les éprouvettes humides et la presse, des plaques de polytétrafluoroéthylène ont été ajoutées aux extrémités des éprouvettes.

Dans le but de suivre l'évolution de la déformation de l'éprouvette entre deux images successives de la vidéo corrélation, la surface de chaque éprouvette doit être recouverte d'un mouchetis. La qualité de ce mouchetis est liée à plusieurs paramètres tels que le contraste entre les zones sombres et claires ou l'aspect aléatoire du motif. Le logiciel VIC-3D [171] utilisé pour le post-traitement recommande une taille de mouchetis de l'ordre de 100 μm . Selon Dong et Pan [172], de nombreuses méthodes peuvent être utilisées pour créer le mouchetis comme un stylo, une bombe de peinture ou un aérographe. Dans cette étude, le meilleur mouchetis a été obtenu avec une bombe de peinture et la taille des tâches était de l'ordre de 300 μm . Le contraste entre la couleur naturellement blanche de la kaolinite et la peinture noire était suffisant pour assurer une bonne corrélation.

Les images sont prises à l'aide d'une paire de caméras avec une fréquence d'une image par seconde. Les caméras sont positionnées verticalement (l'une au-dessus de l'autre) avec un angle de 30° entre elles afin de maximiser la zone commune des champs de vision des deux caméras (Figure 2.17). Le modèle de caméras utilisé est Grasshoper USB3, leur résolution est de 5 Mpixels et la taille d'un pixel est de 3,45 μm . La distance entre les caméras et l'éprouvette est de 65 cm. Elle a été choisie en fonction des objectifs des caméras et de la zone d'étude considérée afin d'obtenir le meilleur focus.

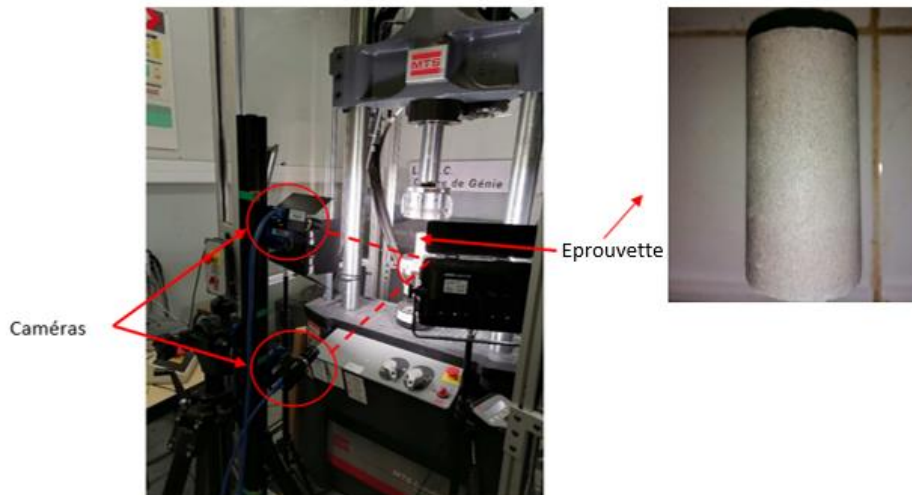


Figure 2.17. Positionnement géométrique du matériel de vidéo corrélation

2.5.3.2 Résultats des essais de vidéo corrélation

La Figure 2.18 illustre l'évolution de la contrainte normale axiale en fonction des déformations axiale et radiale pour un échantillon humide contenant 60% de sable (60S). Les photos illustrant l'évolution du champ de déformation au cours du chargement permettent de mettre en évidence le fait que la vidéo corrélation donne les propriétés locales du matériau. En effet, la déformation n'étant pas uniforme sur toute l'éprouvette, la mesure du module d'Young et du coefficient de Poisson dépend de l'endroit considéré. Afin de ne pas prendre en compte les effets du fretage et les défauts de fabrication, le module d'Young de chaque éprouvette est déterminé à partir de la moyenne de plusieurs mesures faites au centre de l'éprouvette. Par ailleurs, ces photos illustrent également une différence de comportement entre le haut et le bas de l'éprouvette due aux conditions aux limites de chargement.

La Figure 2.19 montre la loi de comportement des échantillons avant et après séchage. Lorsque la teneur en eau est grande, les échantillons se déforment plus au cours de l'essai que pour une teneur en eau faible et la résistance du matériau est plus faible. Dans le cas des échantillons secs, le comportement post-pic de la terre est difficile à interpréter. En effet, une fois la rupture atteinte, les éprouvettes se sont fissurées et certaines parties du mouchetis se sont détachées, ce qui a entraîné des erreurs dans la détermination de la déformation.

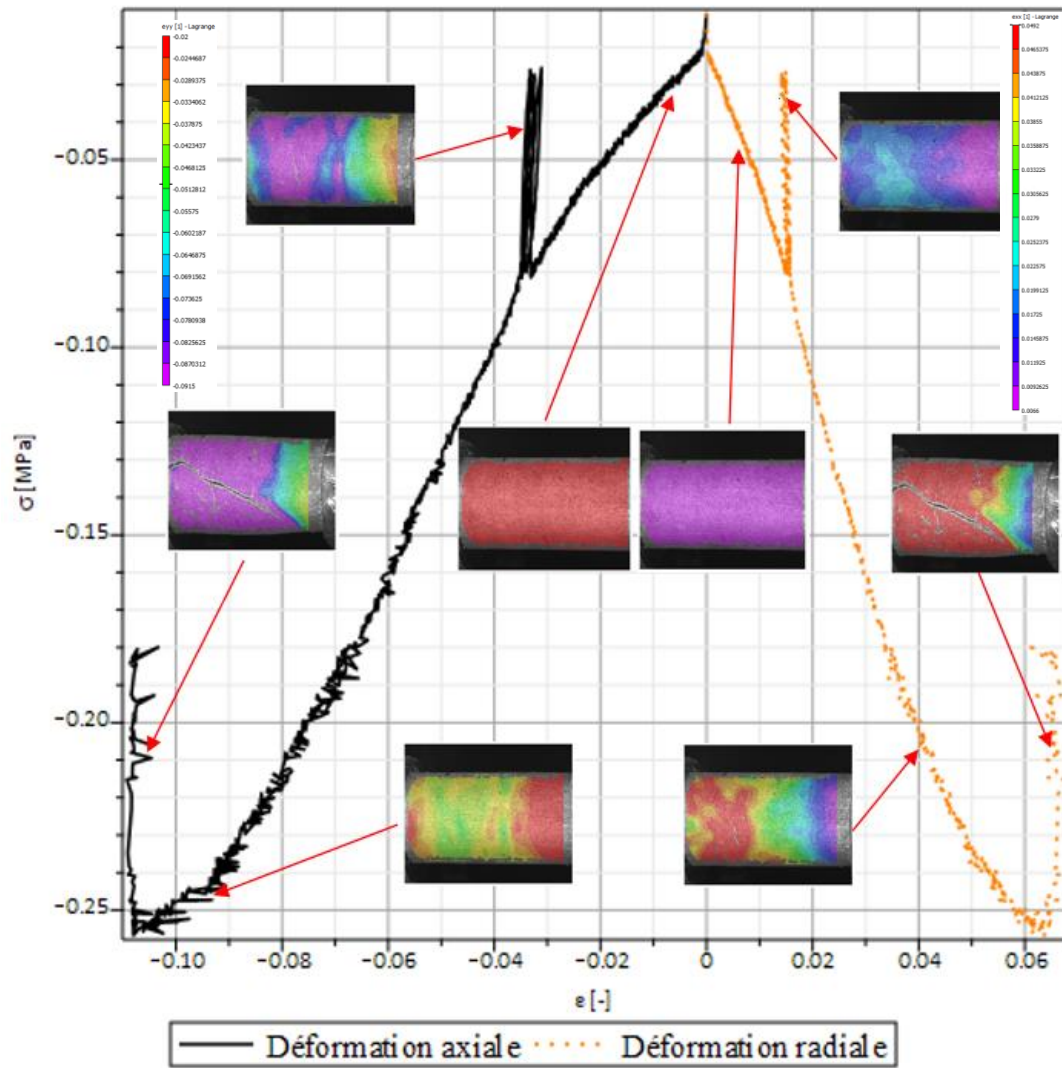


Figure 2.18. Déformations axiale et radiale d'un échantillon humide (60S) lors d'un essai de compression cyclique

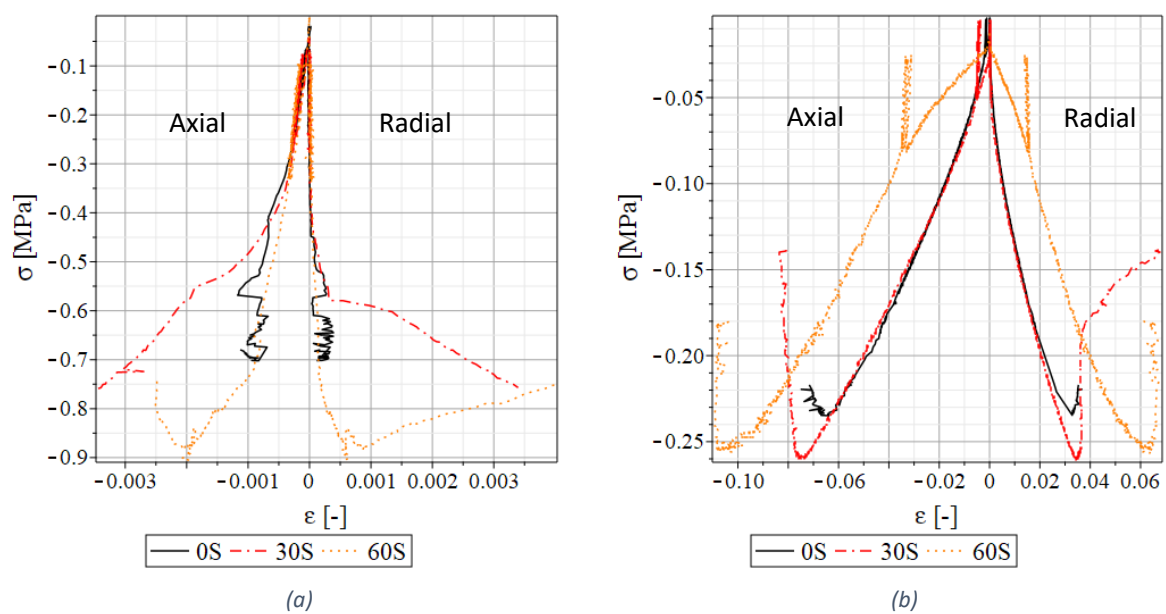


Figure 2.19. Lois de comportement des échantillons secs (a) et humides (b)

Le Tableau 2.12 indique les modules d'Young et les coefficients de Poisson obtenus pour chaque mélange pour la teneur en eau de fabrication et celle après séchage. Ces valeurs ont été mesurées pendant les cycles de charge/décharge.

Tableau 2.12. Module d'Young et coefficient de Poisson

		0S	30S	60S
E_{fab}	MPa	35 ± 18	20 ± 8	18 ± 3
ν_{fab}	-	$0,24 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,12$	$0,46 \pm 0,01$
$E_{50\%HR}$	MPa	262 ± 32	832 ± 100	1191 ± 69
$\nu_{50\%HR}$	-	$0,30 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,04$	$0,40 \pm 0,02$

Dans le cas des échantillons secs, l'ordre de grandeur des résultats obtenus est bien plus faible que les valeurs obtenues dans la littérature qui varient entre 1 et 5 GPa ([115], [119], [162], [168], [169]). Cette différence peut s'expliquer par deux phénomènes. Dans un premier temps, le type d'argile présent dans la terre influence les propriétés mécaniques du matériau. En effet, plusieurs études ont montré que des argiles expansives comme la montmorillonite ont un module d'Young plus élevé que des argiles non expansives comme la kaolinite [160], [161]. Dans un deuxième temps, le squelette granulaire de la terre peut influencer son comportement. Comme le montre la Figure 2.20.a, lorsque la quantité de sable présente dans la terre augmente, le module d'Young est plus grand. Or, les mélanges étudiés dans cette campagne expérimentale contiennent moins de sable que les terres habituellement utilisées dans la construction, ce qui peut expliquer la différence entre les résultats sur le matériau modèle et la littérature. De plus, la distribution granulométrique des mélanges étudiés n'est pas représentative des terres usuelles car la taille des grains du sable choisi est uniforme. Cette distribution granulométrique particulière peut également être la cause des modules d'Young faibles obtenus pour ces mélanges.

La Figure 2.20.a illustre l'évolution du module d'Young en fonction de la teneur en eau de la terre crue. Pour une teneur en eau élevée, la valeur du module d'Young étant très faible, il est difficile d'interpréter les différences entre les trois mélanges. Il est cependant possible de constater que les modules d'Young des éprouvettes sèches sont bien plus grands que ceux des éprouvettes humides. Plusieurs auteurs ont également étudié l'influence de la teneur en eau sur le module d'Young et il ont obtenu des conclusions similaires ([121], [158], [160], [161]).

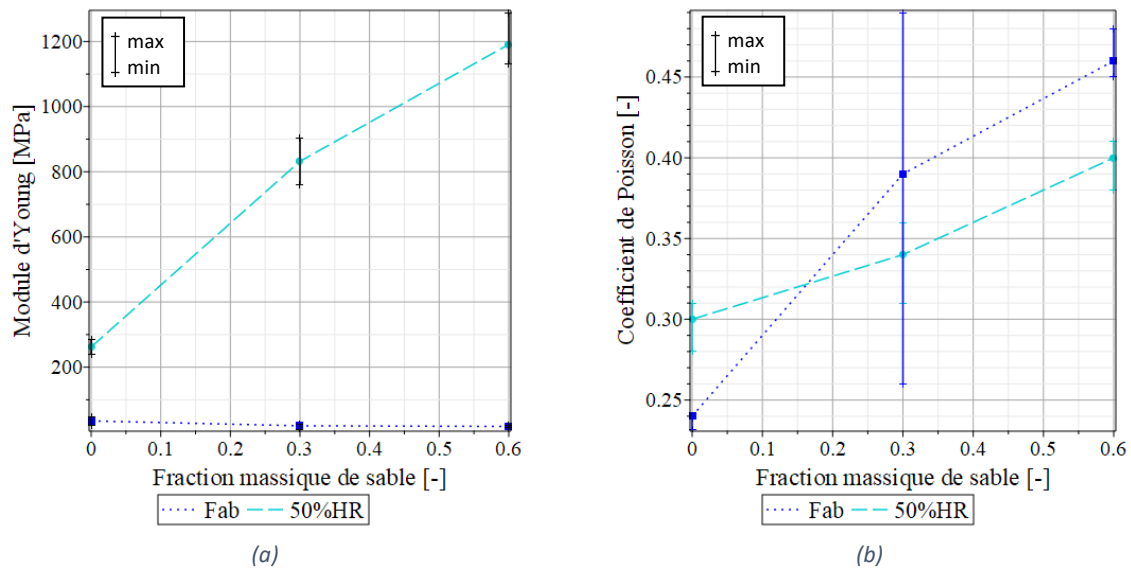


Figure 2.20. Evolutions du module d'Young (a) et du coefficient de Poisson (b) en fonction de la quantité de sable

Les coefficients de Poisson obtenus à l'aide de la vidéo corrélation sont du même ordre de grandeur que les résultats présentés dans la littérature ([160], [163], [164], [173]). Le module d'Young et le coefficient de Poisson ont des évolutions en fonction de la teneur en eau contraires. Bui *et al.* [160] ont observé la même tendance dans leur étude.

2.5.4 Retrait

Le retrait est un phénomène très important lors du séchage de la terre crue. En fonction de la quantité d'eau nécessaire à la mise en œuvre, le retrait peut être plus ou moins grand. La norme NF P 94-060 [174] permettant de mesurer le retrait de la terre utilise un matériau à l'état liquide, c'est-à-dire avec une teneur en eau proche de la limite de liquidité (voir section 2.2.2.1). Dans cette étude, l'objectif est de mesurer les propriétés de trois sols reconstitués avec une teneur en eau de fabrication contrôlée et identique pour chaque test réalisé et d'avoir dans chaque cas une matrice argileuse identique. Cette stratégie permettra dans la suite de l'étude de modéliser la matrice argileuse de la même façon pour chaque mélange et chaque essai. Dans ce cadre, il n'est donc pas pertinent d'utiliser la norme pour mesurer le retrait. Un nouveau système de mesure a été mis en place pour cette campagne expérimentale.

L'appareil de mesure (Figure 2.21) est composé de trois bords fixes et d'un bord amovible. Tous les bords, incluant la surface sur laquelle repose l'éprouvette, ont été couverts de polytétrafluoroéthylène pour limiter la friction entre l'éprouvette et l'appareil de mesure. L'échantillon est placé au fond de l'appareil de mesure, en butée contre le bord opposé à la partie amovible. Une fois l'éprouvette centrée, le bord amovible est mis en contact avec l'éprouvette à l'aide de deux capteurs de déplacement mécaniques. Le système de ressort intégré dans la tige de mesure permet d'assurer le

contact entre la plaque amovible et l'échantillon au cours du séchage. Ces capteurs, dont la précision est de 0,005 mm, mesurent ainsi le retrait dans l'une des directions de l'éprouvette. L'ensemble de l'appareil est positionné sur une balance, ce qui permet de mesurer simultanément le retrait et la perte de masse de chaque échantillon.

Cette mesure de retrait se fait dans une chambre climatique dans laquelle la température et l'humidité relative sont constantes (20°C et 50% HR). La mesure est arrêtée une fois que les variations de masse et de déplacement sont inférieures à 2% pendant deux jours consécutifs.



Figure 2.21. Appareil de mesure du retrait

La Figure 2.22 et le Tableau 2.13 illustrent les résultats obtenus avec ce nouveau système de mesure. Les résultats montrent que plus la quantité de sable est grande dans le mélange, plus le retrait est petit. En effet, la présence de grains de sable empêche le déplacement libre de la matrice argileuse, ce qui réduit le phénomène de retrait. Il est difficile de comparer la valeur finale de retrait avec d'autres études car le type d'argile et la teneur en eau de fabrication impactent grandement le résultat. Cependant, l'ordre de grandeur obtenu semble cohérent avec ceux obtenus avec de la kaolinite [175]. La Figure 2.22 montre également que le retrait de la terre s'arrête avant que la perte de masse ne soit stabilisée, ce qui signifie que les éprouvettes continuent de perdre de l'eau sans qu'il n'y ait d'impact sur la variation de longueur dans la direction de mesure.

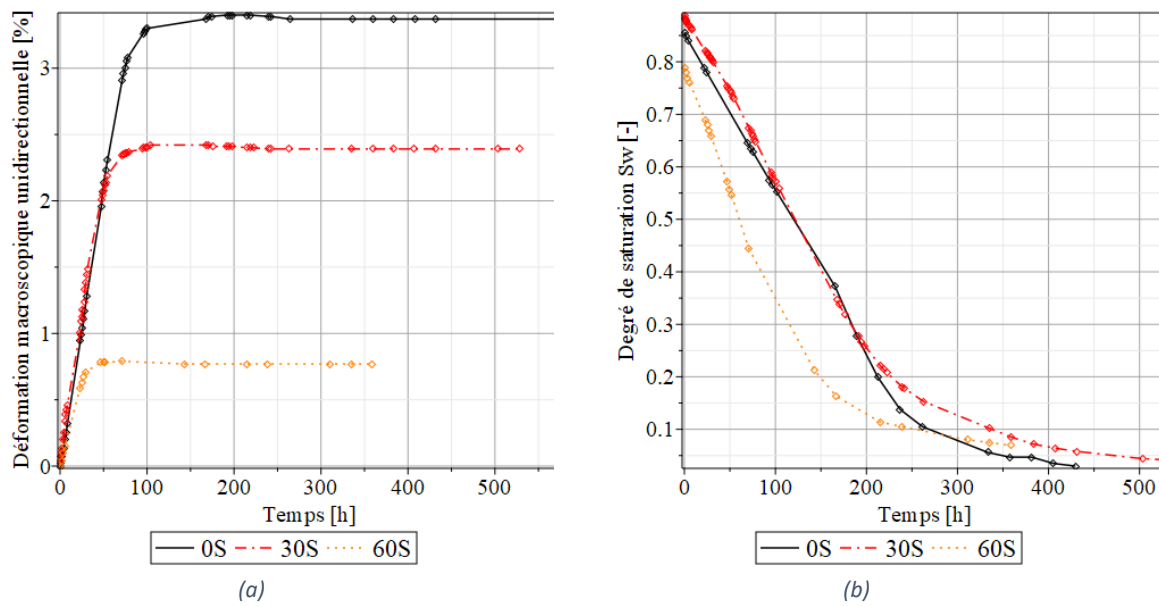


Figure 2.22. Evolutions de la déformation macroscopique (a) et du degré de saturation (b) en fonction du temps

Tableau 2.13. Essai de retrait

		0S	30S	60S
ε_r	%	$3,66 \pm 0,21$	$2,68 \pm 0,23$	$0,76 \pm 0,11$
Δm	%	$24,19 \pm 0,41$	$18,26 \pm 0,22$	$11,1 \pm 0,24$

Par ailleurs, l'évolution du degré de saturation des éprouvettes en fonction du temps illustrée sur la Figure 2.22.b semble être similaire pour les trois mélanges. La porosité du matériau étant principalement localisée dans la matrice et la vitesse et le temps de séchage des différents mélanges étant très proches, on peut supposer que les paramètres de séchage de la terre sont principalement conditionnés par la matrice argileuse.

La Figure 2.23 représente la courbe de retrait intrinsèque des trois mélanges étudiés. Cette courbe permet de relier directement la perte de volume à la diminution de la teneur en eau. Dans ce cas, pour pouvoir comparer les trois mélanges, la courbe représente l'évolution de la longueur relative de l'échantillon dans la direction de mesure en fonction de la teneur en eau relative, c'est-à-dire le ratio entre la teneur en eau à l'instant de la mesure et celle de fabrication. On peut voir sur ce graphique que l'allure des courbes est similaire à celle du retrait d'une argile décrite par Chertkov [176] et aux résultats de Bahar *et al.* [117]. Au début de la mesure, l'échantillon est saturé en eau. Le retrait est dans un premier temps linéaire, ce qui correspond à la perte d'eau sans entrée d'air. Dans un second temps, un palier apparaît indiquant ainsi que la perte d'eau se fera sans modification du volume.

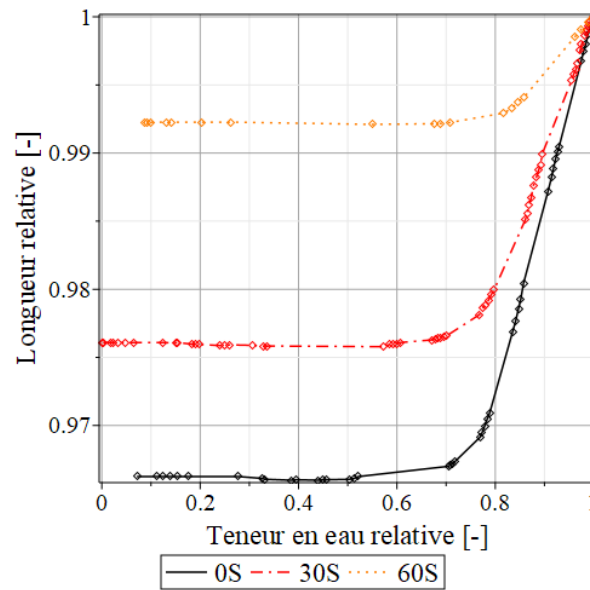


Figure 2.23. Courbe de retrait intrinsèque

2.6. Caractéristiques acoustiques

La terre crue étant un matériau utilisé dans la plupart des cas pour des parois épaisses, ce matériau permet d'assurer naturellement une certaine isolation acoustique grâce à l'application de la loi de masse. L'indice d'affaiblissement acoustique R_d des trois mélanges de cette étude a été mesuré sur des échantillons cylindriques d'épaisseur de 2 cm pour plusieurs fréquences du domaine de l'audible comprises entre 20 Hz et 12000 Hz. La mesure, illustrée sur la Figure 2.24, consiste à envoyer une onde sonore à travers un tube et à relever l'intensité sonore avant et après le matériau afin d'en déduire l'indice d'affaiblissement. La géométrie de l'appareil ne permet pas de tester les hautes fréquences du domaine audible.



Figure 2.24. Appareil de mesure acoustique

La Figure 2.25 illustre l'indice d'affaiblissement acoustique R_d obtenu pour les trois mélanges à la teneur en eau de fabrication et après séchage. Le comportement de chaque mélange semble être similaire. La fréquence critique est légèrement plus grande dans le cas des matériaux secs mais elle ne dépend pas de la quantité de sable dans le mélange. Dans le cas des mélanges avec une forte teneur en eau, il est possible de voir que l'affaiblissement acoustique est plus important pour le mélange contenant le plus de sable. Ainsi, plus le matériau a une masse volumique grande, plus il sera un bon isolant acoustique, ce qui est en accord avec la loi de masse.

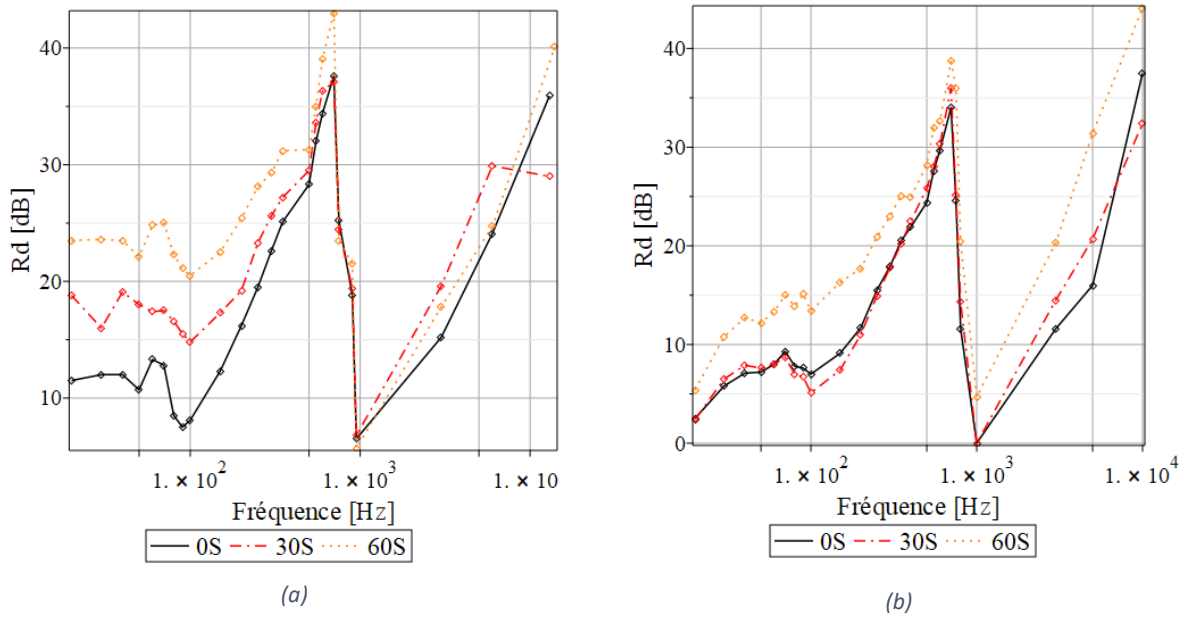


Figure 2.25. Comparaison de l'indice d'affaiblissement acoustique pour la teneur en eau de fabrication (a) et la teneur en eau après séchage (b)

Il est possible de déterminer analytiquement l'indice d'affaiblissement d'un matériau en fonction de ses propriétés mécaniques. En effet, l'indice d'affaiblissement R_d est défini comme le rapport entre la puissance de l'onde acoustique transmise par la paroi et la puissance de l'onde incidente. Dans le cas où l'onde acoustique est perpendiculaire à la paroi, l'indice d'affaiblissement R_0 est approché par la loi de masse :

$$R_0 \approx 20 \log \left[\frac{\omega M_s}{2\rho_0 c_0} \right] \quad (2.2)$$

Avec M_s la masse surfacique de la paroi, ω la pulsation de l'onde acoustique, ρ_0 la masse volumique de l'air et c_0 la vitesse du son dans l'air.

Dans le cas où l'onde acoustique n'arrive pas perpendiculairement à la paroi, il existe une fréquence pour laquelle la paroi entre en vibration et l'indice d'affaiblissement est plus faible. La relation (2.3) permet de prendre en compte tous les angles d'incidence possibles de l'onde acoustique dans le calcul de l'indice d'affaiblissement.

$$\begin{aligned}
 R_d &= R_0 + 10 \log \left[0,316 \left(1 - \frac{f^2}{f_c^2} \right)^2 + \frac{2\eta}{\pi} \right], & \text{pour } f \leq f_c \\
 R_d &= R_0 + 10 \log \left[\frac{2\eta}{\pi} \frac{f}{f_c} \right], & \text{pour } f \geq f_c
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Avec η le facteur de perte acoustique du matériau et f_c la fréquence critique de la paroi. La fréquence critique est déterminée à partir des caractéristiques mécaniques du matériau :

$$f_c = \frac{c_0^2}{2\pi h} \sqrt{\frac{12\rho_m(1-\nu^2)}{E_m}}
 \tag{2.4}$$

Avec ρ_m la masse volumique du matériau, E_m le module d'Young, ν le coefficient de Poisson et h l'épaisseur de la paroi.

Dans un premier temps, la fréquence critique théorique du matériau est calculée selon la relation (2.4). Le résultat théorique ainsi obtenu est trois fois plus grand que la fréquence critique observée sur la Figure 2.25. Cette différence peut être due à plusieurs facteurs tels que des imperfections dans l'échantillon, une porosité élevée ou une différence entre les hypothèses de la théorie et les conditions expérimentales. En effet, le modèle théorique considère que la paroi est un milieu infini, ce qui n'est pas le cas lors de l'essai expérimental. Cependant, la fréquence critique de l'ensemble composé du matériau et de l'appareil de mesure a été déterminée à l'aide d'une modélisation numérique du système sur le logiciel COMSOL. Cette fréquence, dont la valeur est 789 Hz, est très proche de celle obtenue expérimentalement. Elle sera donc utilisée dans la suite pour comparer le modèle théorique aux résultats expérimentaux. La Figure 2.26 présente la comparaison entre le modèle théorique pour différentes valeurs du facteur de perte et les résultats expérimentaux du mélange 60S contenant 60% de sable après séchage. Cette figure permet de d'estimer l'ordre de grandeur du facteur de perte de ce mélange qui est de 0,01%.

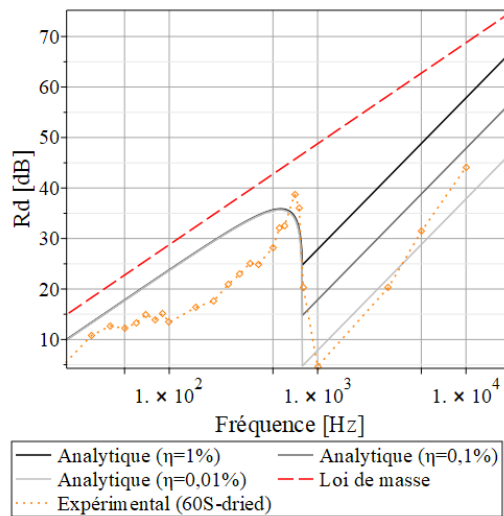


Figure 2.26. Comparaison de l'indice d'affaiblissement expérimental avec les expressions analytiques pour différentes valeurs du facteur de perte

Par ailleurs, il est possible de comparer la loi de masse R_0 pour une fréquence donnée de 500 Hz obtenue pour une paroi en béton de 2 cm d'épaisseur à la loi de masse du mélange contenant 60 % de sable (60S). L'indice d'affaiblissement de la loi de masse d'une paroi en béton est de 44,3 dB, alors que celui de la terre crue est de 42,7 dB. Le comportement acoustique de la terre crue est donc proche de celui du béton.

2.7. Conclusion

Cette campagne expérimentale porte sur la caractérisation de trois sols reconstitués composés de kaolinite et de sable. Le comportement thermique, mécanique et acoustique des trois sols a été déterminé pour deux teneurs en eau différentes (la teneur en eau de fabrication des éprouvettes et la teneur en eau après séchage dans une chambre climatique à 20°C et 50% d'humidité relative) afin d'identifier les effets de la teneur en eau sur les propriétés de la terre crue. Le Tableau 2.14 résume l'ensemble des propriétés thermiques et mécaniques obtenues pour chacun des mélanges.

Tableau 2.14 Propriétés thermiques et mécaniques des trois mélanges étudiés

			0S	30S	60S
ω_{fab}	λ	W/(m.K)	$1,15 \pm 0,08$	$1,34 \pm 0,06$	$1,00 \pm 0,09$
	c	J/(g.K)	$2,04 \pm 0,10$	$1,84 \pm 0,19$	$1,29 \pm 0,01$
	R_c	MPa	$0,11 \pm 0,02$	$0,22 \pm 0,01$	$0,33 \pm 0,02$
	R_t	MPa	$0,052 \pm 0,003$	$0,060 \pm 0,003$	$0,121 \pm 0,022$
	E	MPa	35 ± 18	20 ± 8	18 ± 3
	E_t	MPa	$19,4 \pm 8$	$3,5 \pm 1,8$	$1,6 \pm 0,2$
	ν	-	$0,24 \pm 0,01$	$0,39 \pm 0,12$	$0,46 \pm 0,01$
$\omega_{50\%HR}$	λ	W/(m.K)	$0,40 \pm 0,01$	$0,54 \pm 0,02$	$0,70 \pm 0,08$
	c	J/(g.K)	$1,01 \pm 0,14$	$1,14 \pm 0,25$	$0,88 \pm 0,01$
	R_c	MPa	$0,99 \pm 0,18$	$1,16 \pm 0,13$	$1,28 \pm 0,10$
	R_t	MPa	$0,40 \pm 0,06$	$0,37 \pm 0,08$	$0,23 \pm 0,02$
	E	MPa	262 ± 32	832 ± 100	1191 ± 69
	E_t	MPa	108 ± 42	784 ± 331	938 ± 299
	ν	-	$0,30 \pm 0,02$	$0,34 \pm 0,04$	$0,40 \pm 0,02$
	ε_r	%	$3,66 \pm 0,21$	$2,68 \pm 0,23$	$0,76 \pm 0,11$
	Δm	%	$24,19 \pm 0,41$	$18,26 \pm 0,22$	$11,1 \pm 0,24$

Concernant les propriétés thermiques du matériau sec, les mesures de sa conductivité thermique et de sa capacité thermique confirment les données obtenues dans la littérature. En se basant uniquement sur sa conductivité thermique qui varie entre 0,4 et 0,7 W/(m.K) en fonction de la quantité de sable, la terre crue ne peut pas être considérée comme un bon isolant. Cependant, la capacité de

la terre crue à procurer un confort thermique naturel est liée à son inertie thermique, qui est impactée par la densité et la capacité thermique du matériau. Cette étude a également montré l'effet du sable sur la conductivité thermique. Les résultats issus de cette campagne expérimentale seront utilisés dans le Chapitre 3 afin de calibrer et de tester les différents modèles d'homogénéisation linéaire.

L'analyse de l'indice d'affaiblissement acoustique des murs en terre crue a montré que plus le matériau a une masse volumique importante, plus il sera un bon isolant acoustique. De plus, les propriétés acoustiques de la terre étant similaires à celles du béton, un mur en terre avec une épaisseur suffisamment grande se comportera comme un bon isolant acoustique.

La caractérisation mécanique des trois sols reconstitués a mis en évidence le lien entre la composition de la terre crue et ses propriétés. Dans un premier temps, l'augmentation de la quantité de sable dans le mélange fait augmenter la résistance à la compression et le module d'Young et fait diminuer le retrait. Cependant, la présence de sable dans le sol fait également diminuer la résistance à la traction. Cette baisse de résistance est liée à la concentration de contrainte qui apparaît autour des grains de sable lors du séchage du matériau. Dans un deuxième temps, la teneur en eau des mélanges impacte de façon considérable les propriétés mécaniques de la terre crue. Les résistances à la compression et à la traction du matériau, ainsi que le module d'Young diminuent grandement lorsque la teneur en eau augmente. Ce phénomène peut s'expliquer par l'augmentation des pressions capillaires au cours du séchage qui est responsable d'une partie de la résistance du matériau. Le séchage de la terre crue est donc à la fois bénéfique car il entraîne une augmentation de la résistance grâce aux pressions capillaires, mais il entraîne également une concentration de contrainte autour des grains de sable qui peut amener une perte de résistance. La compétition entre ces deux phénomènes sera étudiée dans la suite de cette étude.

