



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2018-2019

Voie d'approfondissement :
Génie Civil

Soutenu le 30/08/2019

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Stéphane HANS
- Maître de TFE : Antonin FABBRI
- Expert : Thibault VIALLETON

Par

Maxime LHENRY

**Mesure de la performance mécanique du pisé pour la
construction d'habitation**

ENTPE – LGCB/LTDS

Notice analytique

AUTEUR			
Nom	LHENRY		
Prénom	Maxime		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme	de et	ENTPE	
Localité		3 rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin	
Nom du Tuteur	Antonin FABBRI		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Mesure de la performance mécanique du pisé pour la construction d'habitation		
Titre (anglais)	Measuring the mechanical performance of rammed earth for residential construction		
Résumé (français)	<p>Le pisé est une technique ancienne de construction en terre. Très présent en France, l'utilisation de ce matériau est aujourd'hui restreinte par de nombreux verrous, comme par exemple la difficulté d'en évaluer correctement les performances (mécaniques, hygroscopiques ou hygrothermiques). De plus, il n'existe actuellement pas de protocole de caractérisation faisant consensus afin d'estimer ces performances.</p> <p>La grande majorité des essais de ce TFE visait à déterminer la résistance à la compression simple d'échantillons de pisé, qui ont été complété par des essais de séchage et de rétention d'eau. Les objectifs de ce TFE étaient dans un premier temps de mettre en place une méthodologie de référence pour assurer la meilleure répétabilité des essais. Dans un second temps, ce TFE avait pour objectif d'étudier le lien entre des résultats d'essais de laboratoires obtenus sur des petits échantillons et le comportement réel des structures en pisé.</p>		
Résumé (anglais)	<p>Rammed earth is an ancient technique of earth construction. Very present in France, the use of this material is today restricted by many locks, as for example the difficulty to correctly evaluate its performance (mechanical, hygroscopic or hygrothermal). In addition, there is currently no consensus characterization protocol to estimate these performances.</p> <p>The vast majority of tests of this TFE were designed to determine the simple compressive strength of rammed earth samples, which were supplemented with drying and water retention tests. The objectives of this TFE were initially to set up a reference methodology to ensure the best repeatability of the tests. In a second step, this TFE aimed to study the link between the results of laboratory tests obtained on small samples and the actual behavior of rammed earth structures.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Pisé, résistance à la compression, teneur en eau, succion, séchage		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Rammed earth, compressive strength, water content, suction, drying		
Termes géographique (français)	Vaulx-en-Velin, Lyon, Confluence, France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	74	0	23

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier M. Antonin FABBRI, mon tuteur de stage, ainsi que M. Fionn MCGREGOR pour leur encadrement, leurs nombreux conseils et leurs aides tout au long de mon TFE.

Je tiens à remercier aussi tout particulièrement M. Stéphane COINTET pour son aide, ses conseils, sa disponibilité et son assistance tout au long de mon TFE et particulièrement lors des essais de compression simple sur les échantillons et aussi lors de leurs préparatifs.

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes que j'ai pu croiser au sein du Laboratoire de Génie Civil et de Bâtiment, et qui m'ont apporté leur soutien, leur aide ou qui ont fait que mon TFE a été une période agréable de mes études.

Sommaire

Table des matières

Notice analytique	1
Sommaire	3
Liste des illustrations	5
INTRODUCTION	7
1. Bilan des connaissances existantes	9
1.1 La construction en terre	9
1.1.1 Les différents types de construction en terre crue	9
1.1.2 Les constructions en terre en France et dans le monde	10
1.1.3 Les avantages du pisé	11
1.1.4 Les limites du pisé.....	12
1.2 Les caractéristiques mécaniques du pisé	13
1.2.1 La caractéristique la plus importante : la résistance à la compression	13
1.2.2 Les différents éléments qui influencent la résistance à la compression	13
1.3 L'influence de l'eau sur le pisé	19
1.3.1 L'importance de la teneur en eau sur la résistance à la compression	19
1.3.2 Le pisé : un matériau poreux.....	19
1.3.3 L'étude de la succion.....	21
1.3.4 La notion de rétention d'eau	22
2. Protocole expérimentale.....	23
2.1 Introduction	23
2.2 Détermination des paramètres allant servir pour les échantillons	24
2.2.1 La teneur en eau de fabrication	24
2.2.2 La densité sèche	25
2.2.3 Le tamisage et les corrections nécessaires liées	25
2.2.4 Réalisation de la courbe granulométrique et calcul de la masse volumique des granulats	27
2.3 Réalisation des essais de succion permettant de réaliser les courbes de rétention d'eau	28
2.3.1 Réalisation des échantillons	28
2.3.2 Réalisation des essais	29
2.3.3 Résultats des essais.....	31
2.4 Réalisation des essais de compression simple	32
2.4.1 Les essais de la campagne ayant déjà été réalisés	32
2.4.2 Le choix des paramètres des échantillons fabriqués et testés lors de ce TFE	33
2.4.3 La réalisation des échantillons.....	35
2.4.4 Réalisation des essais	38
2.5 Réalisation des essais de séchage.....	41
3. Analyse des résultats des expériences	42
3.1 Introduction	42
3.2 La création d'une méthodologie de référence.....	43

3.2.1	Introduction.....	43
3.2.2	Choix de la teneur en eau de fabrication	43
3.2.3	Choix de la densité sèche	44
3.2.4	Choix de la géométrie des échantillons	44
3.2.5	Choix du tamisage.....	48
3.2.6	Manipulation des échantillons	50
3.2.7	Surfaçage des échantillons	51
3.2.8	Utilisation des résultats des essais de séchage	54
3.2.9	Modélisation du séchage par le logiciel COMSOL.....	58
3.3	Etude des liens entre les échantillons de laboratoire et le comportement réel des structures en pisé	60
3.3.1	Introduction.....	60
3.3.2	L'ensemble des résultats des expériences réalisées.....	60
3.3.3	Exploitation des résultats obtenus avec la terre n°2	62
3.3.4	Exploitation des résultats obtenus avec la terre utilisée sur chantier	64
3.3.5	Conclusions des résultats obtenus par étude des impacts du tamisage sur la résistance à la compression 69	
3.3.6	Mise en évidence de l'importance de l'utilisation des formules de correction de densité et de teneur en eau 69	
4.	Conclusion générale.....	71
	Bibliographie.....	73

Liste des illustrations

Figure 1 : Photo du chantier du bâtiment de Confluence	8
Figure 2 : Photo d'une arche du chantier	8
Figure 3 : Carte des constructions en terre crue en France d'après [LEYLAVERGNE]	10
Figure 4 : Photo de la cité de Shibam au Yémen (photo Google Image)	11
Figure 5 : Relation entre résistance à la compression et densité sèche [Morel]	13
Figure 6 : Influence de la teneur en eau de fabrication sur la densité sèche [MONTGOMERY]	14
Figure 7 : Influence de l'énergie de compactage sur la teneur en eau de fabrication optimale (Schéma Cours MEC) ..	15
Figure 8 : Matériels de l'essai Proctor normal à gauche et modifié à droite (Image Google).....	15
Figure 9 : Exemple de facteur de correction [MOREL]	16
Figure 10 : Le frettage dans les essais de compression simple [DUFFAUT].....	17
Figure 11 : Les effets de l'ajout de ciment sur la résistance à la compression [MOREL].....	18
Figure 12 : Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression et le module d'Young [CHAMPIRE]....	19
Figure 13 : Représentation 2D d'une matrice solide et de l'espace poreux [DAIAN]	20
Figure 14 : Schéma d'un espace poreux représenté par un réseau de pores cylindriques [DAIAN].....	20
Figure 15 : Représentation des effets de la succion sur les grains [MUKOKO KALENDA]	21
Figure 16 : Illustration de la succion dans un sol en fonction de sa teneur en eau [BROOKS]	21
Figure 17 : Exemple d'une courbe de rétention d'eau [CRONEY]	22
Figure 18 : Courbe granulométrique.....	27
Figure 19 : Courbes de rétention d'eau précédemment réalisée par Antoine Peltier	28
Figure 20 : Photo de 5 de 6 cubes destinés aux essais de rétention d'eau.....	29
Figure 21 : Courbe de rétention d'eau des papiers filtre Whatman 42 [FAWCETT and COLLIS-GEORGE]	30
Figure 22 : Photo des cubes et des papiers filtre emballés hermétiquement pour atteindre l'équilibre	30
Figure 23 : Courbes de rétention d'eau obtenues avec les essais	31
Figure 24 : Photo d'un échantillon prismatique à gauche, et d'un échantillon cylindrique à droite.....	32
Figure 25 : Groupes de classement des cylindres en fonction de leur teneur de eau d'essai	33
Figure 26 : Classement des essais que nous avons réalisés par teneur en eau	34
Figure 27 : Photo des coffrages et dames utilisés pour la fabrication des échantillons	36
Figure 28 : Photo d'échantillons prismatiques qui ont été emballés afin de conserver leur teneur en eau	37
Figure 29 : Photo d'échantillons ayant eu besoin d'un surfaçage supérieur car ils étaient abimés.....	37
Figure 30 : Photo et schéma de la disposition des extensomètres sur les échantillons cylindriques	39
Figure 31 : Photos d'un échantillon avant et après rupture	39
Figure 32 : Exemple des courbes que l'on réalise pour les échantillons	40
Figure 33 : Photos des échantillons cylindriques en train de sécher, à gauche en 3D et à droite en 1D	41
Figure 34 : Photo des éléments nécessaire à la fabrication des échantillons de chaque géométrie	44
Figure 35 : Photo d'un coin de prisme très abimé.....	45
Figure 36 : Photos d'un cube tamisé à 50mm ayant un coin très abimé.....	46
Figure 37 : Photo d'un échantillon prismatique au-dessus de la base du coffrage en bois	46
Figure 38 : Graphique de comparaison des résistances à la compression pour les prismes et les cylindres	47
Figure 39 : Courbe contrainte/déformation pour un prime et pour un cylindre tamisés à 12mm.....	47
Figure 40 : Photo d'un échantillon cylindrique dont la base est abimée par un gros granulat	48
Figure 41 : Courbes de résistances à la compression des essais cylindriques en fonction de la teneur en eau.....	49
Figure 42 : Photo d'un dispositif d'acquisition de la masse (Photo MOLLION)	50
Figure 43 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau pour tous les petits échantillons	52
Figure 44 : Photo et courbe contrainte/déformation de l'échantillon dont le surfaçage était bancal.....	53
Figure 45 : Schéma de principe de réalisation d'un bon surfaçage réalisé par [BUI]	53
Figure 46 : Courbes des séchages en 3D	55
Figure 47 : Résultats des essais de compression réunis par groupe de teneur en eau	56
Figure 48 : Courbes de rétention d'eau pour un cube tamisé à 12mm.....	57
Figure 49 : Courbes séchages avec variations de Dww, mu fixé.....	59
Figure 50 : Courbes de séchage avec variation de mu, Dww fixé.....	59
Figure 51 : Résistance à la compression de l'ensemble des essais en fonction de la teneur en eau.....	61
Figure 52 : Résistance à la compression des essais réalisés avec l'autre terre	62
Figure 53 : Courbes de séchage	65

Figure 54 : Moyenne courbes de rétention d'eau par tamisage	65
Figure 55 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau	66
Figure 56 : Capture d'écran pour les teneurs en eau élevés	67
Figure 57 : Capture d'écran pour teneurs en eau intermédiaires.....	68
Figure 58 : Capture d'écran des résultats des essais à faible teneur en eau	68
Figure 59 : Résistance à la compression avec et sans correction de teneur en eau	70

INTRODUCTION

Dans un contexte actuel de développement durable, les réductions de gaz à effet de serre et de consommation énergétique sont au cœur des débats. De ce fait, il existe donc une volonté politique visant une diminution de l'utilisation des matériaux classiques de constructions industriels comme le béton ou l'acier. Ces matériaux nécessitent en effet beaucoup d'énergie tout au long de leur cycle de vie, pour leur fabrication, transport, mise en œuvre et pour leur recyclage qui est loin d'être optimal. Le retour à des matériaux traditionnels comme le pisé, qui est une technique ancienne de construction en terre compactée, permettrait à la fois de répondre aux enjeux du développement durable mais aussi de préserver, en France, un patrimoine architectural qui représente une part importante du bâti ancien.

Il existe actuellement plusieurs freins au développement des constructions neuves en pisé en France. Il y a notamment le fait que ses performances mécaniques ne sont pas très élevées. En effet, étant uniquement composé de terre et d'eau, le pisé ne résiste pas en traction et surtout, il possède une résistance à la compression faible par rapport au béton (de l'ordre du MPa quand le béton a une résistance d'environ 25 MPa pour un béton ordinaire classique). De plus, au-delà des faibles performances mécaniques du pisé, il est difficile d'en évaluer les performances mécaniques, hygroscopiques ou hygrothermiques. Tous ces éléments rendent l'utilisation du pisé complexe du fait de problèmes au niveau de la création de règlements pour ce type de construction. Cela rend donc plus complexe l'utilisation du pisé pour de nouvelles constructions mais aussi pour la préservation du patrimoine actuel. En effet, l'utilisation d'un matériau alternatif au béton ne doit pas se faire au détriment de la sécurité.

La terre sur laquelle ont été réalisées les différents essais pendant ce TFE provient d'un gisement situé à Saint-Quentin-Fallavier dans l'Est lyonnais et sert actuellement à la construction d'un bâtiment de deux étages de bureaux, L'Orangerie, situé à Confluence. La construction du bâtiment de onze mètres de haut est assurée par Nicolas Meunier, spécialiste de la construction de bâtiment en pisé que j'ai pu rencontrer sur chantier lors de mon TFE.

La réalisation de ce TFE s'intègre dans le cadre de l'action actuellement conduite au niveau international par le comité technique RILEM 274 et dont le but est de mettre en place une procédure répétable afin de quantifier la performance mécanique du pisé pour la construction. La première étape du travail consistera à la création d'une méthodologie de référence pour la fabrication d'échantillons en terre afin de créer une méthode permettant d'obtenir des essais répétables et donc faire un pas de plus vers une réglementation sur les constructions en terre crue. La seconde étape du travail consistera à étudier le lien entre les résultats des essais de laboratoires et le comportement réel des structures en terre. Le comportement réel est obtenu par l'étude d'essais réalisés sur des blocs de grandes dimensions réalisés sur chantier. Les autres résultats proviennent d'une campagne d'essai de blocs de plus petites tailles, cette campagne a déjà été commencée avant le début de mon TFE par Antoine Peltier. Ainsi, lors de l'analyse des essais, j'utiliserai à la fois mes résultats et ceux d'Antoine Peltier. Cette analyse de résultats se fera sur une approche multi-échelle en prenant en compte les hétérogénéités de densité et de teneur en eau liées au fait que les essais ne sont pas tous réalisés avec le même tamisage.

Mon rapport de TFE va se présenter sous trois grandes parties. Dans un premier temps, une partie bibliographique qui va comprendre un point sur les connaissances sur le matériau terre et plus particulièrement sur le pisé en se focalisant sur les connaissances concernant les paramètres qui nous intéresseront pour la suite du TFE, notamment l'influence de la teneur en eau, de l'échelle des échantillons, du ratio plus gros grain sur plus petite dimension, du tamisage, de la densité sèche.

Dans un second temps, une partie sur l'étude expérimentale que nous avons réalisé lors de mon TFE. Cette partie comprendra les détails des expériences ainsi que les résultats obtenus. On comptera principalement des essais de compression permettant les mesures de résistance à la compression, les mesure de séchage et les mesures de succion de l'eau.

Dans un dernier temps, l'analyse des résultats associés à l'ensemble des essais réalisés par Antoine Peltier et moi-même afin de répondre aux différents objectifs de mon TFE.



Figure 1 : Photo du chantier du bâtiment de Confluence



Figure 2 : Photo d'une arche du chantier

1. Bilan des connaissances existantes

1.1 La construction en terre

1.1.1 Les différents types de construction en terre crue

La construction en terre se répartie en deux grandes familles. Ainsi, par opposition à la terre crue à laquelle nous nous sommes intéressés lors de ce Travail de Fin d'Etude, il existe aussi des constructions en terre cuite. La terre cuite est principalement utilisée sous forme de briques industrielles ou de tuiles et est réalisée à partir d'une terre argileuse.

La terre crue, qui est un mélange d'argiles, de silts, de sables, de graviers et de cailloux en différentes proportions, permet de réaliser plusieurs types de construction répartie en deux grandes familles. D'un côté, les constructions dont les murs porteurs sont en terre crue monolithique, et de l'autre les bâtiments dont les murs sont composés d'une ossature remplie de terre crue. Dans ces deux familles, la terre crue peut être utilisée selon différents modes de construction :

- L'adobe est un type de construction en brique de terre crue. De la terre argileuse est moulée puis séchée au soleil pour former les briques d'adobes. Ces briques étaient à l'origine formées à la main, elles sont désormais fabriquées à la machine à l'aide de moules. Il s'agit d'une technique dite humide car la teneur en eau de fabrication se situe à l'état plastique entre les limites d'Atterberg.
- Le BTC (ou Bloc de Terre Compressée) est l'évolution de l'adobe en un produit industriel ou semi-industriel apparu au milieu du 20^{ème} siècle. Il s'agit de terre, stabilisée ou non, à teneur en eau optimale (teneur en eau donnée par l'optimum proctor) qui est compressé à l'aide d'une presse puis séché avant sa mise en œuvre.
- La bauge est un type de construction monolithique souvent confondue avec le pisé car souvent recouverte d'un enduit. Il s'agit d'un procédé qui consiste à empiler puis tasser des boules de terre malaxées auxquelles on a ajouté des fibres. Il s'agit, comme l'adobe, d'une technique dite humide.
- Le torchis est un type de construction qui comprend l'utilisation d'un mélange non porteur composé de terre argileuse et de fibre servant de remplissage à une ossature en bois.
- Le pisé, que nous avons étudié lors de ce TFE, est une technique de construction de type monolithique qui consiste à compacter de la terre crue par couche dans un coffrage. La compaction peut se faire de façon manuelle ou avec l'aide d'un vérin pneumatique après avoir amené la terre à une teneur en eau optimale, qui dépend de la nature de la terre et du type de compactage, et déterminé grâce à l'essai de l'optimum proctor [BUI].
Le pisé dans sa forme traditionnelle, dit non-stabilisé, est uniquement composé de terre et d'eau. Afin d'être utilisé pour faire du pisé, une terre doit contenir suffisamment d'argile qui sert de liant entre les différents grains (mélange de limon, sable, gravier et cailloux).

1.1.2 Les constructions en terre en France et dans le monde

En France, d'après la figure ci-dessous, les logements construits en pisé sont principalement répartis dans les régions lyonnaise et toulousaine quand d'autres régions comme la Bretagne ou dans le Nord de la France, présentent principalement des constructions en bauge ou en torchis.

D'après [MICHEL], en France, le bâti ancien réalisé en terre crue représente une part non négligeable du parc national et on en dénombrerait environ 1 million pour environ 500 000 en pisé. L'âge moyen de ces constructions en terre serait d'environ 100 ans.

Dans la région Auvergne-Rhône-Alpes, l'usage du pisé remonte à l'Antiquité et, était très utilisé jusqu'au 20^{ème} siècle et ses deux guerres mondiales. En effet, après la fin de la 2nd Guerre Mondiale, l'urgence de la reconstruction du pays a condamné l'utilisation du pisé qui n'était plus adapté notamment du fait de l'approche locale ou du rythme saisonnier du matériau. Le matériau a aussi souffert de la volonté de la production industrielle de standardiser les constructions. Ces éléments ont, en partie, entraîné l'essor et la diffusion des matériaux préfabriqués et du béton.

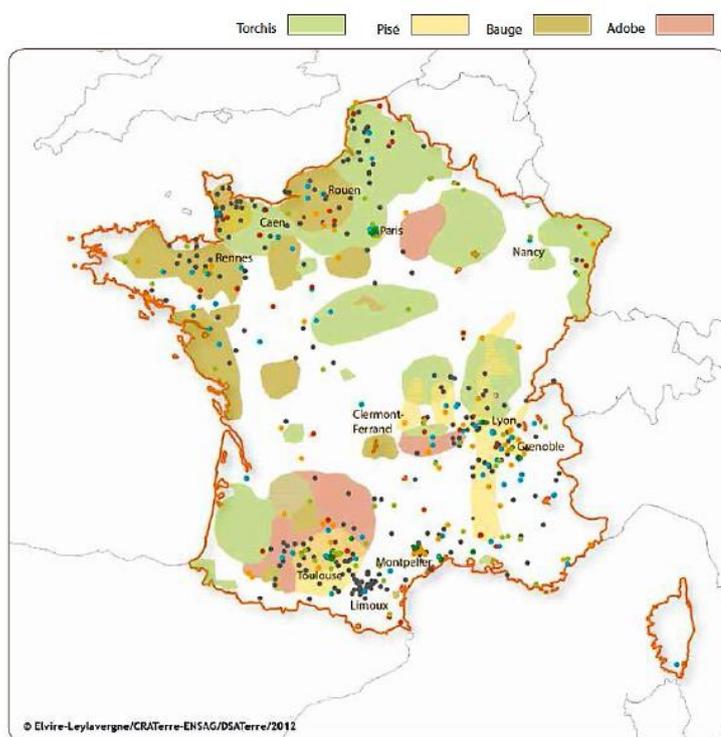


Figure 3 : Carte des constructions en terre crue en France d'après [LEYLAVERGNE]

Dans le monde, d'après [PERELLO], un tiers de la population mondiale vivrait actuellement dans une habitation en terre. Principalement présent dans les pays en voie de développement, le succès de ce matériau de construction vient principalement de sa disponibilité ainsi que de son accessibilité.

Le premier cas de construction en pisé a été recensé en Tunisie en 814 avant J-C, la technique s'étant ensuite répandue en Europe à partir du 8^{ème} siècle.

Les briques de terre compressées (BTC) ont été beaucoup utilisées les 50 dernières années principalement dans les pays en voie de développement comme Mayotte.

Les adobes ont été utilisés pendant plusieurs centaines d'années en tant que structure porteuse en maçonnerie, principalement pour des constructions à 1 ou 2 étages, même si des exemples de constructions avec un grand nombre d'étages existent, comme dans la cité de Shibam au Yémen où plusieurs immeubles de plus de 8 étages et atteignant une hauteur de 30m ont été construit avec des blocs de terre. Le site est classé au patrimoine mondial de l'UNESCO, et est connu comme la plus ancienne cité gratte-ciel du monde.



Figure 4 : Photo de la cité de Shibam au Yémen (photo Google Image)

1.1.3 Les avantages du pisé

Le 1^{er} avantage qui est mis en avant dans les pays industrialisés lorsque l'on parle de matériau comme le pisé, est probablement l'aspect matériau durable lié à son côté peu polluant et à sa faible énergie grise qui est l'énergie nécessaire pour la production, l'extraction, la transformation, la fabrication, le transport, la mise en œuvre, l'entretien et le recyclage. En effet, dans le domaine du bâtiment, le type de matériau utilisé est le facteur prépondérant en termes de développement durable tout au long de son cycle de vie. Le matériau étant disponible sur place et facilement utilisable manuellement, son utilisation permet donc de réduire fortement les coûts énergétiques lié au transport, à la transformation et à la mise en œuvre. Le faible impact du pisé est aussi lié à la capacité de réutilisation du matériau.

Dans les pays pauvres en revanche, c'est principalement le côté économique qui est mis en avant, du fait du faible coût de la main d'œuvre, de l'abondance et du caractère local du matériau.

Le pisé possède également un côté social très fort étant donné qu'il s'agit d'un matériau dont l'utilisation mets en avant le savoir-faire de l'homme et permet ainsi d'éviter son remplacement par des machines.

En termes de performance thermique, le pisé est souvent considéré comme un matériau présentant de bonnes qualités thermiques permettant d'avoir des températures plus fraîches en été et plus chaudes en hiver dans les pays où le climat est doux et tempéré comme en France. Seulement, la faible quantité d'études sur le sujet et l'absence de consensus sur les performances thermiques du pisé ne permettent pas de conclure de façon claire sur ce sujet.

Au niveau des performances hygroscopiques, l'utilisation de matériau en terre crue tel que le pisé semble être une option intéressante. Comme exemple, il existe notamment l'essai de sorption-désorption dynamique permettant de mesurer la valeur de Moisture Buffering Value (MBV) d'un matériau qui représente la capacité d'un matériau à réguler les variations d'humidité intérieure grâce à la sorption et la désorption. Un matériau possédant une MBV élevé peut être utilisé pour contrôler de façon passive l'humidité intérieure et ainsi améliorer le confort d'un bâtiment. Les bâtiments construits avec des matériaux en terre crue tel que le pisé présenterait d'intéressantes qualités notamment grâce à ces valeurs de MBV intéressantes [Rode], [McGregor].

Les matériaux en terre possèderaient également une intéressante capacité à résister au feu, particulièrement intéressant dans les milieux urbains où les incendies se propagent très vite [CRATERre]

1.1.4 Les limites du pisé

La principale faiblesse du pisé est sa sensibilité à l'eau, de ce fait les constructions en terre doivent être particulièrement protégées de l'eau. Pour cela, différentes techniques sont utilisées comme par exemple bien choisir l'orientation du bâtiment afin de protéger l'un des murs de pluie avec par exemple un toit débordant ou un enduit adapté. Un soubassement en pierre ou en béton d'au moins 50cm est quasiment toujours nécessaire afin de protéger les constructions des remontés capillaires.

L'utilisation du pisé est aussi limitée par les performances mécaniques de ce matériau. En effet, du fait de ses faibles performances par rapport au béton, ce dernier rendra plus difficile l'utilisation du pisé pour des constructions comportant un nombre important d'étages.

La vitesse de construction fait aussi partie des inconvénients du pisé, ce fait s'explique notamment par plusieurs raisons : le fait que le matériau est mis en œuvre par couches successives, le fait qu'il soit souvent nécessaire de faire sécher les blocs avant de les positionner pour qu'ils aient le temps d'atteindre une teneur en eau suffisamment basse et le fait qu'il s'agisse d'un matériau non industriel ayant pour chaque terre différente des propriétés propres, dont il est nécessaire d'en évaluer les performances. Ce que peut donc prendre du temps avant de commencer les travaux. On peut aussi souligner que dans certaines régions comme la région Auvergne-Rhône-Alpes, du fait du climat pouvant entraîner du gel en hiver, il n'est possible de construire en pisé que d'avril à octobre.

1.2 Les caractéristiques mécaniques du pisé

1.2.1 La caractéristique la plus importante : la résistance à la compression

Avant le début des constructions modernes, les propriétés mécaniques des matériaux étaient évaluées par empirisme, et la terre crue était largement utilisée car elle permettait de construire de manière durable des murs qui présentaient peu de déformations au cours du temps. Cependant, à partir du 20^{ème} siècle, le béton a rapidement pris la place de matériau le plus utilisé dans la construction du fait de sa résistance à la compression exceptionnelle. Avec l'essor du béton, la notion de résistance à la compression est devenue la caractéristique la plus importante des matériaux de construction et le principal critère de qualité. Ainsi, après l'essor du béton, la résistance à la compression est désormais le principal indicateur pour évaluer la qualité d'une terre de construction.

1.2.2 Les différents éléments qui influencent la résistance à la compression

Le pisé étant un matériau ayant une très faible résistance à la traction, l'approche classique pour évaluer le comportement mécanique des éprouvettes est l'utilisation d'essais de compression simple. Ce test permet de déterminer la résistance à la compression mais aussi la relation contrainte-déformation et donc le module d'Young.

Lorsque l'on utilise un matériau non-industriel comme le pisé, il peut exister un grand nombre de paramètres de fabrication dont les valeurs influencent directement les performances du matériau. Ainsi, le bon respect des paramètres utilisés sur chantier lors de fabrication d'échantillons en laboratoire est important afin d'assurer une bonne représentativité. Dans le cadre de fabrication d'échantillon en pisé, cette représentativité peut notamment poser problème étant donné qu'il existe beaucoup de paramètres sur lesquelles celui qui fabrique les échantillons a une influence (teneur en eau de fabrication, compactage, ...).

Influence de la teneur en eau de fabrication et de l'énergie de compactage

La résistance à la compression est fortement liée à la densité sèche de l'échantillon, en effet, quand cette dernière augmente, la résistance à la compression augmente elle aussi [Morel]. Dans le but d'optimiser la résistance à la compression, il est donc fondamental de rechercher à avoir un pisé avoir la densité sèche la plus élevée possible.

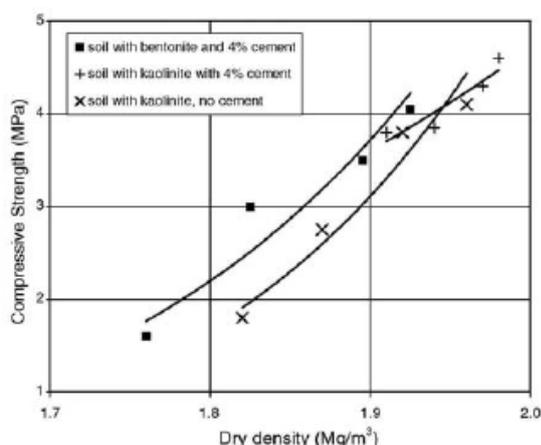


Figure 5 : Relation entre résistance à la compression et densité sèche [Morel]

La densité sèche dépend directement du mode de fabrication de l'échantillon et tout particulièrement de la teneur en eau de fabrication et de l'énergie de compactage. Du point de vue de l'énergie de compactage c'est très simple, plus elle sera importante, plus le pisé sera dense. En revanche, à énergie de compactage équivalente, dans le but d'obtenir l'échantillon le plus dense, il faut que la teneur en eau de fabrication soit le plus proche possible de la teneur en eau optimale. Ce phénomène est illustré par la figure 4. Si la teneur en eau de fabrication est inférieure à la teneur en eau optimale, la terre est trop sèche et il apparaît trop de frottements entre les grains qui ne peuvent ainsi s'arranger de façon optimale. Si l'on ajoute de l'eau jusqu'à la teneur en eau optimale, ce frottement diminue et les grains peuvent s'arranger de façon optimale et donc obtenir la densité sèche la plus importante. Si l'on dépasse cette teneur en eau optimale, il y a de l'eau en trop et comme l'eau est incompressible, la densité sèche diminue.

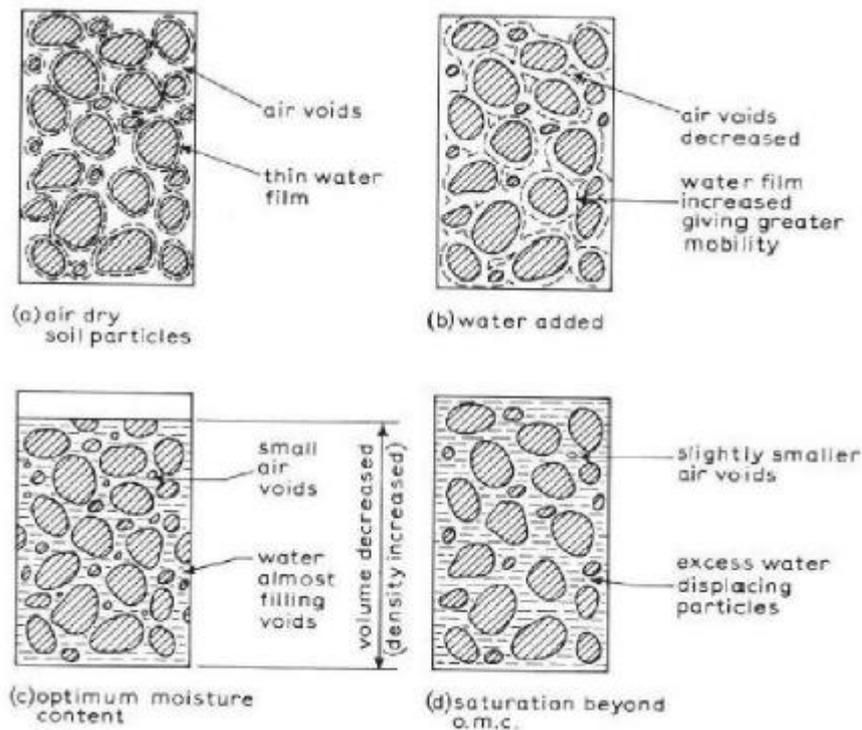


Figure 6 : Influence de la teneur en eau de fabrication sur la densité sèche [MONTGOMERY]

La détermination de la teneur en eau optimale ajoute une complexité supplémentaire car il n'existe pas une seule teneur en eau optimale pour un seul matériau. En effet, cette dernière varie avec l'énergie de compactage comme le montre la figure ci-dessous où les deux courbes ont été obtenues en utilisant des dames manuelles différentes entraînant une énergie de compactage différente (la dame de la courbe rouge fournit une plus grande énergie de compactage). Ainsi, avec la figure ci-dessous, on se rend compte que plus l'énergie de compactage est élevée, plus la teneur en eau optimale diminue et plus la densité sèche atteignable augmente.

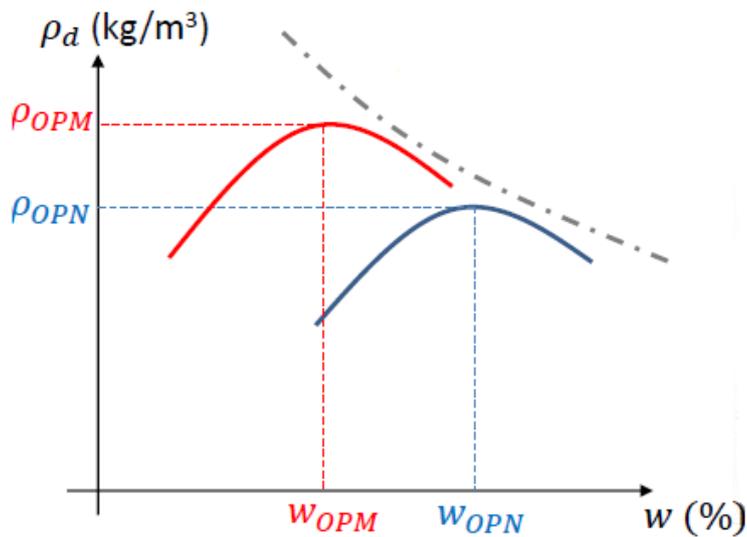


Figure 7 : Influence de l'énergie de compactage sur la teneur en eau de fabrication optimale (Schéma Cours MEC)

L'essai qui est utilisé pour déterminer cette teneur en eau optimale s'appelle l'essai Proctor, et est généralement utilisé en géotechnique routière. Il existe plusieurs versions de l'essai dont les plus connus sont l'essai Proctor normal OPN et l'essai Proctor modifié OPM. La figure ci-dessous montre les deux dames différentes. Les principales différences entre les deux sont la hauteur de chute du poids et la masse du poids, ces différences permettent à la dame de l'essai Proctor modifié d'appliquer une énergie de compactage supérieure sur l'échantillon.

Pour chacun des essais, pour différents teneurs en eau de fabrication, la terre est compactée dans un moule cylindrique en utilisant toujours le même nombre de coup. L'échantillon de terre reçoit donc toujours la même énergie de compactage, et la mesure de la densité sèche de l'échantillon permet de placer un point $\rho(w)$ sur la courbe. Après avoir répété l'opération avec plusieurs teneurs en eau de fabrication différentes, la représentation graphique nous permet de déterminer l'optimum Proctor pour une énergie de compactage donnée.



Figure 8 : Matériels de l'essai Proctor normal à gauche et modifié à droite (Image Google)

Influence de la géométrie de l'échantillon

Plusieurs études réalisées ont montré que l'on obtenait une valeur de résistance à la compression différente en fonction de la géométrie de l'échantillon testé. Par exemple, l'étude réalisée par [PIATTONI], pour laquelle plusieurs géométries de blocs différentes ont été testé en compression simple. Des blocs de géométrie $46*31*13 \text{ cm}^3$ et $23*15*13 \text{ cm}^3$ dont les élancements (hauteur/largeur) sont respectivement de 0.42 et 0.87 ont été testés puis comparés avec des tests sur des murs d'élancement 2.55. Lors de cette étude, il a été observé une augmentation importante de la résistance à la compression quand l'élancement diminuait, en effet, la résistance à la compression allait de 6.56 MPa pour les blocs d'élancement 0.42 à 1 MPa pour les murs.

Pour discuter sur les effets de l'élancement, deux concepts ont été mis au point, le premier UCS « Unconfined Compressive Strength » correspond à la compression maximale que le matériau peut supporter indépendamment de sa géométrie. Le second, ACS « Apparent Compressive Strength » qui correspond à la valeur de la résistance à la compression. De plus, les résultats des études tendent à indiquer que la valeur de ACS rejoint la valeur de UCS pour des élancements allant de 2 à 5. Le lien entre UCS et ACS en fonction de l'élancement a été étudié lors de plusieurs études et des chercheurs ont mis au point différents facteurs de correction comme le montre la figure ci-dessous. L'utilisation de facteurs de correction présente l'avantage de pouvoir utiliser diverses tailles de blocs et de ne plus être limité qu'à des blocs ayant un élancement suffisant, cependant, il faut évidemment que le facteur de correction soit adapté au type de matériau testé [MOREL], [AUBERT].

Aspect ratio correction factors						
Aspect ratio	0	0.4	0.7	1.0	3.0	≥ 5.0
Krefeld's correction factor (use linear interpolation)	0	0.50	0.60	0.70	0.85	1.00
Heathcote and Jankulovski's correction factor (non-linear)	0	0.25	0.40	0.58	0.90	1.00

Figure 9 : Exemple de facteur de correction [MOREL]

D'autres études se sont intéressées quant à elles, à l'influence de la taille de l'échantillon à l'élancement constant, par exemple l'étude par [MANIATIDIS] qui a testé des échantillons de pisé avec différentes géométries. Lors de son étude expérimentale, il a trouvé que la résistance à la compression de petits cylindres était supérieure à celle de plus grands cylindres et a, par la suite, attribué ce résultat à l'hétérogénéité des grands échantillons à la fois au niveau de la présence de gros granulats en plus grande quantité au centre de l'échantillon et aussi à une différence de teneur en eau entre le centre de l'échantillon, plus humide, et les extérieurs.

Un autre élément qui a été étudié par [DUFFAUT] lors d'essais de compression simple qui permet de comprendre les différences entre les résultats des expériences pour différents élancements, il s'agit de la présence d'une zone où il existe un état de contrainte non homogène au niveau des zones en forme de cône situées sur la figure ci-dessous. Le freinage est la résultante du frottement entre la presse et l'éprouvette freinant le déplacement latéral des extrémités de l'échantillon car l'échantillon est plus déformable que la presse. La surface de contact entre l'échantillon et la presse augmente sous la compression, et la résistance ainsi créée augmente artificiellement la résistance à la compression de l'éprouvette. Ainsi, il est nécessaire d'avoir un élancement suffisant de telle sorte que les deux cônes ne se touchent pas. Dans ce cas, la distribution des contraintes au centre de l'échantillon est homogène et permet donc une bonne évaluation de la résistance à la compression.

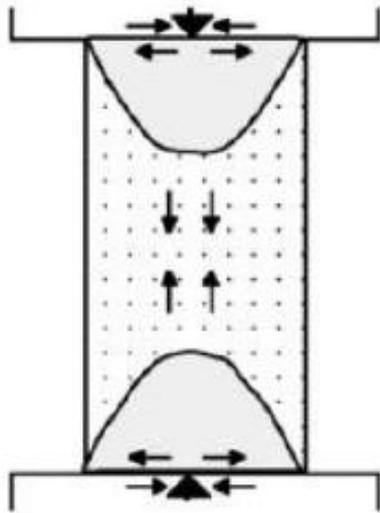


Figure 10 : Le fretage dans les essais de compression simple [DUFFAUT]

La taille de l'échantillon doit aussi prendre en compte la granulométrie de la terre utilisée afin que l'essai puisse être considéré comme homogène. En temps normal, la taille des plus gros grains fixe la taille de la plus petite dimension de l'échantillon. D'après [DUFFAUT], la plus petite dimension de l'échantillon doit au moins être égale à 10 fois la taille du plus gros granulat. De ce fait, si l'on veut pouvoir réaliser de petits échantillons tout en ayant l'assurance qu'il n'y aura pas de problèmes d'hétérogénéités liés à un ratio taille de la plus petite dimension sur taille d plus gros granulat inférieur à 10, il est nécessaire de tamiser la terre avant de faire les échantillons.

Influence des diverses stabilisations du pisé

Traditionnellement, le pisé est un matériau uniquement composé de terre prélevée sur site, éventuellement tamisée, et d'eau, où les argiles font offices de liants naturels. Il s'agit du pisé dit « non stabilisé ». Cependant, les principales limites du pisé ont entraîné l'apparition de nouvelles techniques modernes d'utilisation du pisé et l'apparition de pisé dit « stabilisé ». Les deux premiers intérêts de la stabilisation sont l'augmentation de la résistance à la compression qui est un facteur qui limite l'utilisation à plus grande échelle du pisé et l'augmentation de la résistance à l'eau. Les différentes stabilisations permettant de palier à ces problèmes consistent principalement à l'ajout de chaux ou de ciment. Comme le montre la figure ci-dessous, il y a bien une corrélation entre ajout de ciment et augmentation de la résistance à la compression.

En revanche, la stabilisation du pisé ne possède pas que des avantages. Tout d'abord, la stabilisation augmente de façon importante les coûts de la construction. Ensuite, la terre devient difficile voire impossible à recycler et perd donc l'un de ses principaux avantages qui était la non production de déchets et la possibilité de réutilisation.

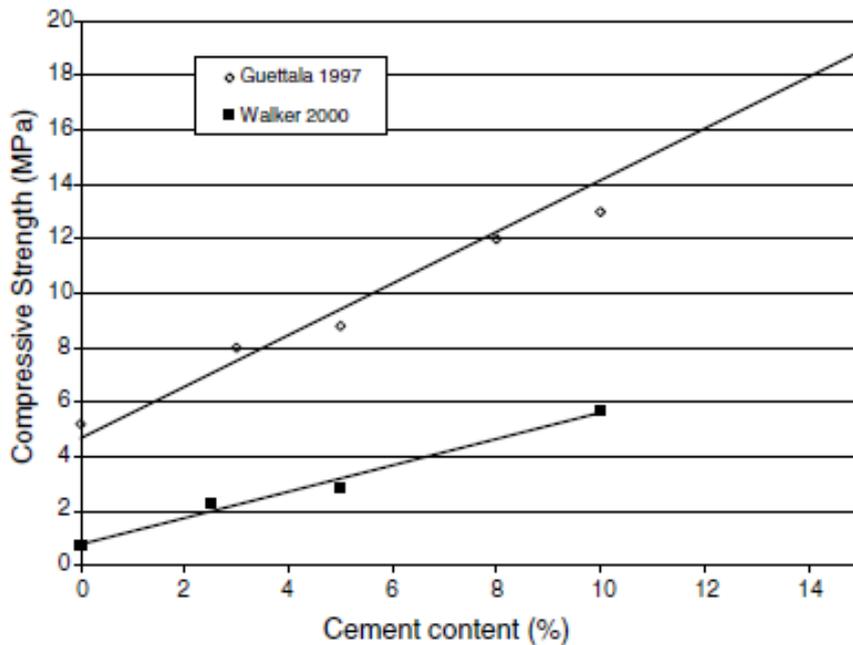


Figure 11 : Les effets de l'ajout de ciment sur la résistance à la compression [MOREL]

Influence du choix de la terre

Le choix de la terre lors de la construction d'un bâtiment est très important car ce choix influe lui aussi sur les propriétés mécaniques du pisé. La terre étant composée d'agrégats (cailloux, sables, ...) lié par une matrice argileuse, les proportions de chaque élément ont une importance sur les performances de la terre, notamment la quantité d'argile qui est responsable de la cohésion du matériau. L'impact de la quantité d'argile sur la résistance mécanique a notamment été étudié par [REDDY] et il a été trouvé que la résistance à la compression augmente avec la quantité d'argile jusqu'à une certaine limite et diminue par la suite. [TAYLOR] a lui aussi reporté les mêmes conclusions lors de ces études. Cependant, il n'y a pas de consensus établi sur ce point car d'un autre côté, [HAMARD] ne reportait pas quant à lui, une augmentation systématique de la résistance à la compression avec l'augmentation de la quantité d'argile.

1.3 L'influence de l'eau sur le pisé

1.3.1 L'importance de la teneur en eau sur la résistance à la compression

La teneur en eau dans un échantillon de pisé est probablement le facteur avec la plus grande influence sur le résultat de l'expérience. En effet, de nombreuses études ont montré que plus la teneur en eau du matériau était faible, plus celui-ci avait une résistance à la compression élevée. Par exemple, l'étude réalisée par [BUI], qui a étudié l'effet de la teneur en eau sur la résistance à la compression sur plusieurs terres différentes. Pour chaque terre, il a été trouvé que la résistance à la compression diminuait quand la teneur en eau augmentait et que ce taux variait d'une terre à l'autre. [CHAMPIRE] a lui aussi trouvé lors de ces expériences que tous les paramètres de résistances du pisé chutent avec l'augmentation de la teneur en eau. Toutes ces études ont donc mené aux mêmes conclusions à propos du comportement du pisé vis-à-vis de la teneur en eau. La teneur en eau dans l'échantillon est aussi liée à l'humidité relative dans l'air environnant.

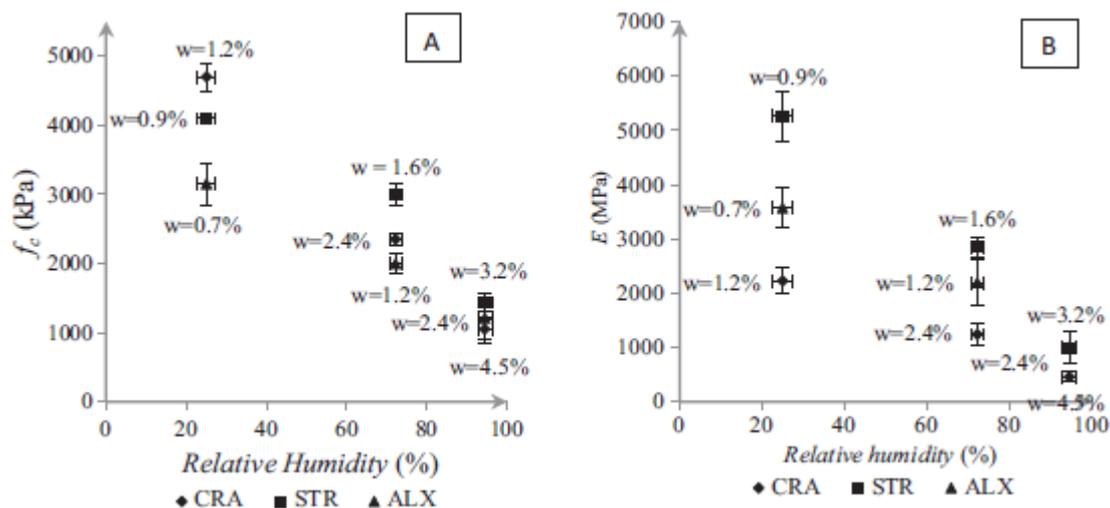


Figure 12 : Influence de la teneur en eau sur la résistance à la compression et le module d'Young [CHAMPIRE]

1.3.2 Le pisé : un matériau poreux

Afin de comprendre comment fonctionne le pisé vis-à-vis de l'eau, il est nécessaire de savoir de quoi se compose le pisé. D'une manière générale, les sols, et donc par extension la terre, sont considérés comme des milieux poreux comprenant plusieurs phases composés d'une phase solide et de son complément géométrique, l'espace poreux. Plusieurs fluides sont généralement présents en même temps dans l'espace poreux. Il peut s'agir de fluides dans une phase liquide (eau) ou dans une phase gazeuse (air, vapeur d'eau). Le comportement hydromécanique de la terre dépend du comportement du squelette solide mais aussi des interactions entre les différentes phases.

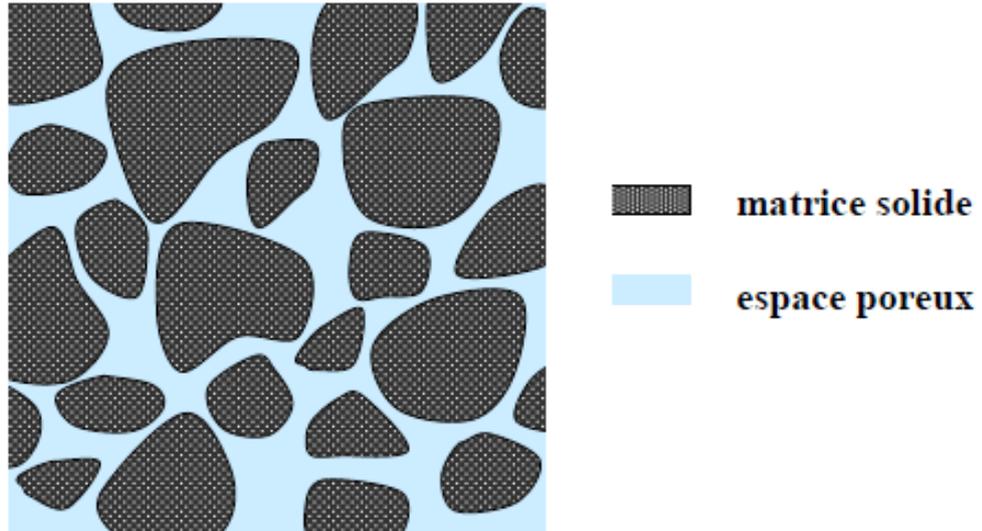


Figure 13 : Représentation 2D d'une matrice solide et de l'espace poreux [DAIAN]

La figure ci-dessus propose une représentation en 2D d'un matériau poreux. Cependant, la figure ne donne qu'une représentation simplifiée par définition car représenter un milieu poreux en 2D donne une représentation biaisée de la réalité. En effet, la surface de schéma doit être séparé en deux phases, solide et fluide, ainsi seul une des deux pourra être connexe. Ici, c'est l'espace poreux qui est connexe mais il s'agit d'un choix arbitraire. Afin d'obtenir une représentation plus fidèle de la réalité, un milieu poreux peut être représenté comme sur la figure ci-dessous où la matrice solide en vert connexe entoure la distribution de pore elle aussi connexe. Le réseau de pore peut être représenté par un enchainement de tube cylindrique de rayon différent.

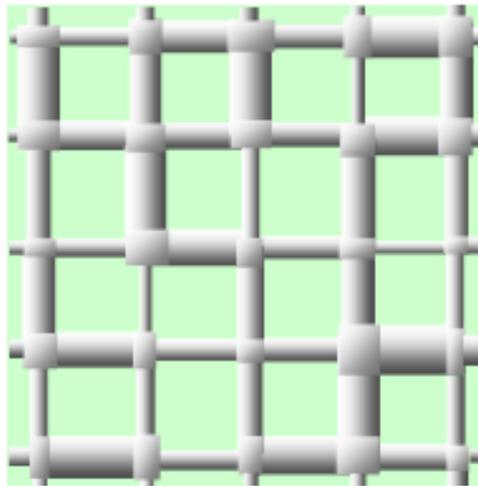


Figure 14 : Schéma d'un espace poreux représenté par un réseau de pores cylindriques [DAIAN]

1.3.3 L'étude de la succion

Afin de comprendre comment l'eau dans le pisé se comporte et interagit avec la matrice solide, il est nécessaire de parler de la notion de succion. La coexistence de l'eau liquide et de l'air gazeux conduit à un phénomène de tension superficielle et à une différence de tension appelé succion. Ce phénomène entraîne une attraction apparente entre les grains comme le montre la figure ci-dessous.

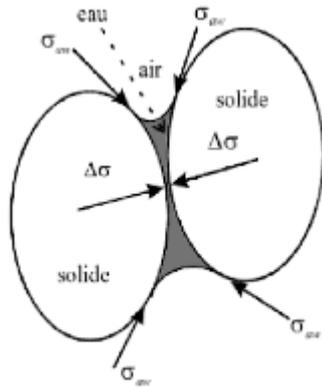


Figure 15 : Représentation des effets de la succion sur les grains [MUKOKO KALENDA]

La succion dans les sols en géotechnique a notamment été défini par [DELAGE] comme étant une énergie potentielle pouvant être assimilée à la charge hydraulique dans les sols saturés : énergie nécessaire à fournir pour résister à l'attraction exercé lorsque l'on souhaite amener à une altitude constante de l'eau libre de l'infini jusqu'au sol non saturé. Il s'agit de la définition analogue à celle du potentiel électrique d'une charge dans un champ électrique. La succion peut aussi être décrite comme une mesure de l'affinité entre le sol et l'eau. La figure ci-dessous illustre la notion de succion, et on remarque que plus le sol est sec, plus la succion est grande et plus il attire l'eau.

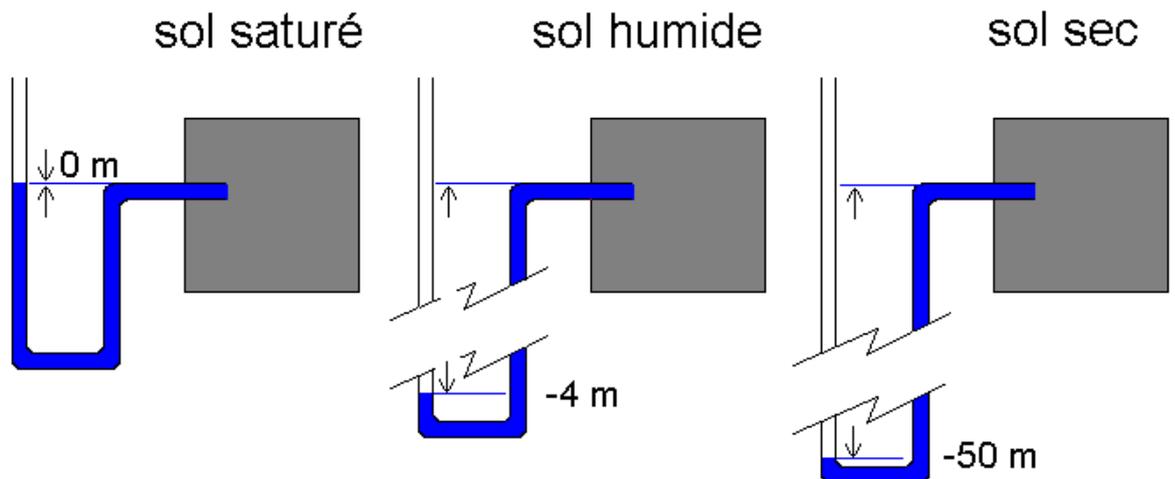


Figure 16 : Illustration de la succion dans un sol en fonction de sa teneur en eau [BROOKS]

1.3.4 La notion de rétention d'eau

La détermination des courbes de rétention d'eau permet la représentation de la capacité des sols non saturés à attirer et à retenir l'eau en fonction de leur saturation ou de leur teneur en eau. Ces courbes, dont un exemple se trouve sur la figure ci-dessous, expriment la succion en fonction de la teneur en eau dans le sol. Une courbe contient deux chemins, un chemin d'humidification (ou mouillage), où on mesure la succion sur un échantillon dont la teneur en eau augmente, et un chemin de dessiccation (ou séchage) où on mesure la succion sur un échantillon dont la teneur en eau diminue.

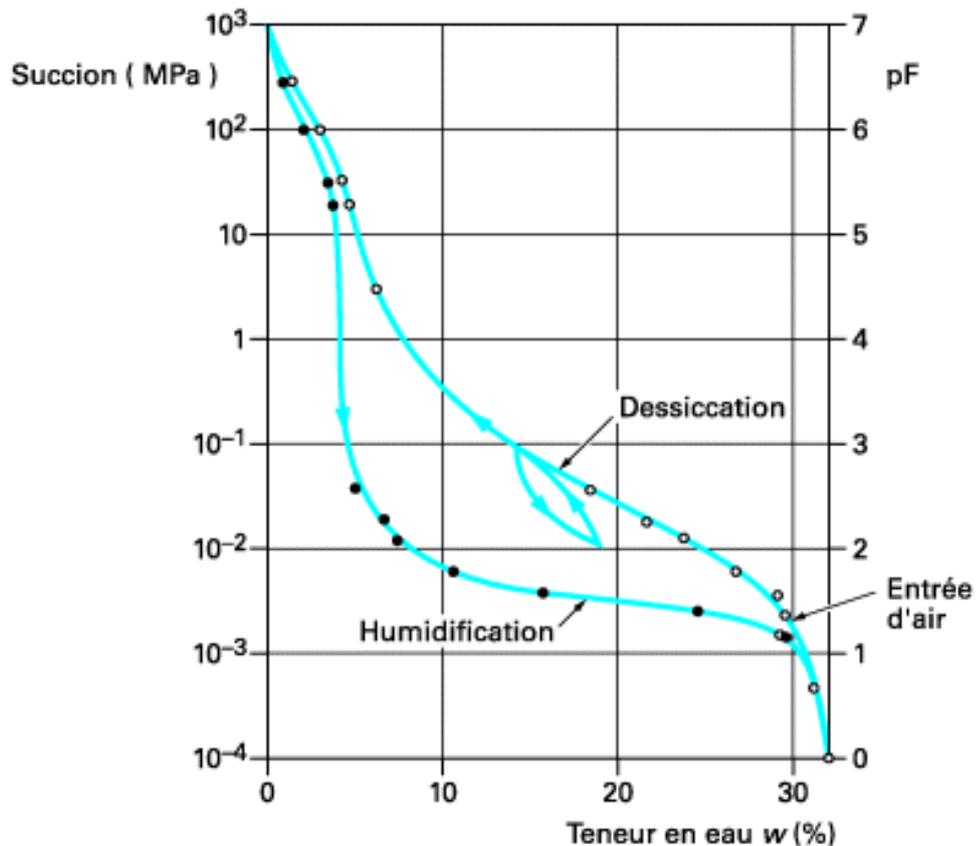


Figure 17 : Exemple d'une courbe de rétention d'eau [CRONEY]

On peut remarquer sur la courbe ci-dessus que les chemins empruntés par les courbes d'humidification et de dessiccation ne sont pas les mêmes, ce dénote l'existence d'un phénomène d'hystérésis. Il n'existe donc de pas relation réversible entre la succion et la teneur en eau, la valeur de la succion dépend donc du chemin parcouru précédemment.

2. Protocole expérimentale

2.1 Introduction

Les essais qui seront présentés dans cette partie sont la suite d'un travail qui avait été commencé par Antoine Peltier quelques mois avant le début de mon stage en avril 2019. La terre qui a été utilisée tout au long de ces essais provient de Saint-Quentin-Fallavier et elle est actuellement utilisée par Nicolas Meunier, un artisan-piseur, et son équipe pour la réalisation de façades porteuses d'un immeuble de bureau à Confluence à Lyon.

L'objectif global de l'ensemble des essais qui ont été réalisés est la caractérisation de l'ensemble des paramètres dont la connaissance est importante pour la réalisation du chantier de Confluence. Il s'agissait de déterminer les paramètres mécaniques de la terre, il a ainsi été réalisé des essais de compression simple afin de déterminer la résistance à la compression. Lorsque ces essais de compression ont été réalisés, des cycles de charges-décharges ont aussi été appliqués afin de déterminer le module d'Young du matériau. Mais aussi de déterminer des paramètres hygrothermiques de la terre, il a ainsi été réalisé des essais de perméabilité à la vapeur, de remontée capillaire, de succion de l'eau, de conductivité thermique, d'effusivité thermique et de séchage. Les données ainsi récupérées serviront à la modélisation théorique du comportement hygrothermique des parois et du bâtiment. Ces données seront aussi recoupées et couplées aux résultats de mesures et suivie sur site du comportement thermique et hygrothermique réel du bâtiment et de ses parois en pisé afin de tirer un retour d'expérience complet.

Etant donnée qu'une bonne partie des essais avait déjà été réalisée par Antoine Peltier, il ne me restait plus qu'à compléter les campagnes d'essais incomplètes et à refaire les essais dont les résultats n'étaient pas exploitables pour différentes raisons.

Lors de mon TFE, j'ai donc réalisé les essais suivants :

- Essais de succion dans le but de réaliser des courbes de rétention d'eau afin de compléter les données car seules une partie des courbes avaient été réalisé précédemment
- Essais de séchage car les données étaient incomplètes et inexploitables car il manquait une grande partie des données à cause des vacances qui avaient empêché les mesures
- Essais de compression simple dans le but de compléter la campagne d'essais qui n'avait été fait qu'à moitié par Antoine Peltier.
- Détermination de la courbe granulométrique de la terre

2.2 Détermination des paramètres allant servir pour les échantillons

Afin de réaliser les essais, il était tout d'abord nécessaire de déterminer les différents paramètres au niveau de la terre pour avoir la meilleure continuité possible par rapport aux essais déjà réalisés précédemment par Antoine Peltier mais aussi par rapport à ce qui se fait sur le chantier pour assurer la meilleure représentativité entre les essais de laboratoires et la réalité du chantier.

2.2.1 La teneur en eau de fabrication

Comme nous l'avons vu précédemment, la teneur en eau de fabrication est un paramètre à ne pas négliger car il permet, couplé avec une énergie de compactage donnée, d'obtenir des échantillons avec la densité sèche la plus élevée possible et donc la résistance à la compression la plus élevée possible aussi.

La teneur en eau w est définie par :

$$\omega = \frac{m_e}{m_s}$$

Où m_e et m_s sont respectivement la masse d'eau et la masse sèche d'une quantité de terre. La masse d'eau peut également s'exprimer par $m_e = m_h - m_s$ où m_h est la masse humide du volume de terre dont on cherche à déterminer la teneur en eau.

Afin d'avoir la meilleure représentativité des essais, il avait été demandé à Nicolas Meunier, l'artisan-piseur qui réalise les blocs pour le chantier, à quelle teneur en eau est la terre lorsqu'il fabrique ses blocs. Etant donné que le chantier doit avancer le plus vite possible et que la terre qui sert à fabriquer les blocs est entreposée à l'air libre sur le chantier, il est difficile pour lui de savoir précisément quelle est la teneur en eau de fabrication pour chaque bloc. De plus, quand bien même la teneur en eau de sa terre ne serait pas exactement celle qu'il souhaite, ce serait une trop grosse perte de temps d'adapter à chaque fois la teneur en eau de la terre avant de fabriquer. C'est pour cela qu'il a donné comme réponse qu'il utilisait une terre avec une teneur en eau situé entre 4% et 12%.

Afin d'assurer la meilleure continuité des essais avec ceux qui avaient été fait précédemment, nous avons regardé quelle était la teneur en eau de fabrication des échantillons ayant servis pour les essais de compression simple fait précédemment. Comme il s'agissait d'échantillons réalisés par Nicolas Meunier et son équipe, la valeur des teneurs en eau de fabrication nous donnera des informations précises sur les conditions réelles de fabrication sur chantier. Sur un panel de 18 échantillons réalisés sur chantier, la moyenne des teneurs en eau de fabrication était de 7.8% avec un écart-type de 3.1%.

En combinant toutes les informations que nous avons donc à notre disposition par rapport à la teneur en eau de fabrication, nous avons choisi de fabriquer nos échantillons à une teneur en eau de 8%, ce qui correspond à la moyenne de ce que nous avait dit Nicolas Meunier sur les conditions de fabrication et environ à la valeur moyenne qu'il avait été trouvé sur les échantillons fabriqués sur chantier.

Dans le laboratoire de l'ENTPE, comme nous travaillons sur une quantité de terre réduite par rapport au chantier et comme nous pouvons conserver la terre dans des sacs fermés de façon hermétique, nous sommes sûr d'avoir une teneur en eau de fabrication de 8% lorsque nous faisons nos échantillons. De plus, après fabrication des échantillons, nous vérifions avec la terre restant au fond du sac que sa teneur en eau et bien celle que nous souhaitions.

2.2.2 La densité sèche

Comme nous l'avons vu précédemment, la densité sèche d'un échantillon est un facteur important si l'on souhaite avoir les meilleures caractéristiques mécaniques possibles. Il existe différentes manières de procéder pour la fabrication des échantillons, et le choix au niveau de la procédure influe directement sur la densité sèche des échantillons.

Le premier procédé nécessite en premier lieu de réaliser un essai Proctor en choisissant un nombre de coup et une masse suffisante pour avoir un échantillon d'une taille le plus proche possible de la taille souhaitée. Par la suite, la réalisation de l'essai Proctor donne la teneur en eau optimale à laquelle on fabrique donc les échantillons.

Le second procédé consiste à déterminer une teneur en eau de fabrication, la densité sèche souhaitée, et la taille de l'échantillon voulu. Avec tous ces paramètres, on peut déterminer la quantité de terre nécessaire, terre dont on connaît la masse sèche car on en connaît la teneur en eau. Ensuite, on applique avec une dame, non pas un nombre de coups définit à l'avance, mais le nombre de coups nécessaire pour avoir exactement la taille de l'échantillon souhaité.

Chaque procédé présente ses avantages, le second par exemple permet de choisir la densité sèche et la taille de l'échantillon de façon précise, choses que le premier ne peut pas assurer car le nombre de coup de dame est limité, et on ne peut donc pas en rajouter pour modifier une densité qui ne serait finalement pas assez élevée.

Etant donné que nous cherchons à avoir une continuité dans les essais par rapport à ceux qui ont déjà été fait précédemment par Antoine Peltier, nous avons choisi le second procédé.

Lors des essais réalisés par Antoine Peltier, la densité sèche moyenne des échantillons testés était de 1.9 et nous avons donc choisi de continuer les essais avec la même densité sèche. Lorsque nous l'avons rencontré sur son chantier, Nicolas Meunier nous a confié qu'il réalisait ses blocs avec une densité sèche légèrement supérieure à 2 sans être toutefois plus précis. Avec cette information, on peut vraisemblablement penser que, à échantillons et blocs fait sur chantier de taille similaire, les blocs faits sur chantier présenteraient une résistance à la compression supérieure. Dans le cas où les résultats de laboratoire fourni par l'ENTPE serviraient de norme pour ce chantier, cela ne permet pas d'optimiser le dimensionnement de la construction mais cela va dans le sens de la sécurité.

2.2.3 Le tamisage et les corrections nécessaires liées

On a vu lors de la partie bibliographique grâce à [DELAGE], qu'il était nécessaire, afin de pouvoir considérer un échantillon comme homogène, d'avoir un rapport taille de la plus petite dimension de l'échantillon sur taille du plus gros granulats supérieur ou égal à 10. Sur chantier, Nicolas Meunier tamise la terre à 50mm avant de s'en servir, nous avons donc fait de même, ainsi, la terre pour nos échantillons a donc comme plus gros granulats des granulats de 50mm maximum.

Lors de cette étude, nous avons fabriqué deux géométries d'échantillons pour les tests de compression simple : des échantillons prismatiques de dimension 16x16x32 cm³ et des échantillons cylindriques de diamètre 16cm et de hauteur 32cm. Ainsi, sur les deux géométries, la plus petite dimension est de 16cm, ce qui ne permet pas de considérer les échantillons comme homogène. Pour cela, il faudrait soit fabriquer des échantillons dont la plus petite dimension est au moins 50cm, soit tamiser la terre.

L'un des objectifs de ce TFE est de faire une analyse multi-échelle entre des gros prismes (30x30x60 cm³) représentant les blocs de chantier et des plus petits échantillons faciles à étudier et à fabriquer en laboratoire. Nous souhaitons pouvoir étudier le comportement réel des gros blocs à partir de l'étude de petits échantillons. Il nous fallait donc en étudier les liens. Nous avons donc pris le parti d'essayer de voir si la réduction à la fois de la taille des échantillons mais aussi de la taille des granulats pouvait aboutir à des résultats intéressants en termes de similitudes pour les différentes échelles. Nous avons donc décidé de fabriquer des échantillons avec différents tamisages : 12mm, 30mm et 50mm, pour en étudier l'impact. L'ensemble des échantillons tamisés à 50mm et la moitié des échantillons tamisés à 30mm avaient déjà été fait par Antoine Peltier, il ne me restait donc plus qu'à faire le reste des échantillons tamisés à 30mm et tous les échantillons tamisés à 12mm.

Lorsque l'on tamise de la terre, on enlève uniquement des gros granulats, ainsi la proportion de fines augmente dans la composition de la terre tamisée. Cela a un impact sur la teneur en eau et sur la densité sèche de la terre. En effet, la rétention d'eau n'a lieu qu'au niveau des particules fines de la terre car les granulats ne contiennent pas d'eau. Ainsi, à quantité d'eau en proportion équivalente, une quantité de terre tamisée aura ses fines moins humides que dans une terre non tamisée. Pour prendre en compte ce phénomène nous appliquerons une correction de teneur en eau sur les échantillons tamisés à 12mm et à 30mm. De même pour la densité sèche, les granulats ayant une densité supérieure aux fines compactées, pour avoir des fines compactées de manière équivalente quel que soit le tamisage, il faut avoir une densité sèche d'un échantillon tamisé inférieure à la densité sèche d'un échantillon non tamisé et donc mettre moins de masse de terre plus le tamisage est important. Pour prendre en compte ce phénomène, nous appliquerons donc une correction de densité sur les échantillons tamisés à 12mm et 30mm.

Relations de correction de la teneur en eau et de la densité

Soit w la teneur en eau, w^* la teneur en à appliquer sur l'échantillon tamisé pour prendre en compte la correction liée au tamisage, m_s la masse totale, m_e la masse d'eau, m_G la masse des granulats retirés par le tamisage, m^* la masse des fines et granulats restant tel que $m_s = m_G + m^*$ et $Ptam$ est le passant de terre tamisée tel que $Ptam = m^*/m_s$.

$$w = \frac{m_e}{m_s} = \frac{\frac{m_e}{m^*}}{\frac{m_s}{m^*}} = \frac{w^*}{\frac{1}{Ptam}} = Ptam \cdot w^*$$

$$\text{Donc } w^* = \frac{w}{Ptam}$$

Soit V le volume total, V_G le volume des granulats retirés par le tamisage, V^* le volume des fines et granulats restant tel que $V = V_G + V^*$, ρ_d la masse volumique de la terre, ρ_d^* la densité à appliquer sur l'échantillon tamisé pour prendre en compte la correction liée au tamisage et ρ_G la masse volumique des granulats.

$$\begin{aligned} \rho_d &= \frac{m_s}{V} = \frac{m_s}{V_G + V^*} = \frac{\frac{m_s}{m^*}}{\frac{V_G}{m^*} + \frac{V^*}{m^*}} = \frac{\frac{1}{Ptam}}{\frac{V_G}{m^*} + \frac{1}{\rho_d^*}} = \frac{\frac{1}{Ptam}}{\frac{V_G \cdot m^*}{m_G \cdot m^*} + \frac{1}{\rho_d^*}} = \frac{\frac{1}{Ptam}}{\frac{m_G}{\rho_G \cdot m^*} + \frac{1}{\rho_d^*}} \\ &= \frac{\frac{1}{Ptam}}{\frac{m_s - m^*}{\rho_G \cdot m^*} + \frac{1}{\rho_d^*}} = \frac{\frac{1}{Ptam}}{\frac{Ptam}{\rho_G} \cdot (m^* - 1) + \frac{1}{\rho_d^*}} = \frac{\frac{1}{Ptam}}{\frac{Ptam}{\rho_G} \cdot (Ptam - 1) + \frac{1}{\rho_d^*}} \\ &= \frac{1}{\frac{1 - Ptam}{\rho_G} + \frac{Ptam}{\rho_d^*}} \end{aligned}$$

$$\text{Donc } \frac{1}{\rho_d} = \frac{1-P_{tam}}{\rho_G} + \frac{P_{tam}}{\rho_{d^*}}$$

Ces deux formules seront donc appliquées pour tous les échantillons ayant un tamisage de 12mm ou de 30mm. Pour les échantillons tamisés à 50mm, w et w^* sont égaux car $P_{tam}=100\%$, il n'y aura donc pas de correction à appliquer. Afin d'avoir la meilleure facilité de lecture et de compréhension, toutes les valeurs de teneurs en eau et de densités des échantillons tamisés à 12mm et 30mm indiquées dans ce rapport seront les valeurs équivalentes ramenées au tamisage à 50mm. Par exemple, pour de la terre tamisée à 12mm, la valeur de la teneur en eau de fabrication que nous appliquerons est de 10.8% (obtenu grâce à la formule de correction). Son équivalent en tamisage à 50mm est de 8%. Ainsi donc, dans ce rapport, pour ces échantillons, seule la valeur de 8% sera utilisée. Une analyse de l'impact et de l'utilité de l'utilisation de ces formules sera faite dans la partie analyse de ce rapport (3^{ème} partie).

2.2.4 Réalisation de la courbe granulométrique et calcul de la masse volumique des granulats

Les formules de correction de la densité et de la teneur en eau nécessitent de connaître à la fois la valeur de ρ_G qui correspond à la masse volumique des granulats et de connaître la courbe granulométrique de la terre afin d'avoir P_{tam} .

Pour connaître ρ_G , nous l'avons calculé sur des granulats de différentes tailles et nous avons fait la moyenne des résultats obtenus. La masse de chaque granulat était obtenu grâce à une balance, leur volume avec une jauge graduée rempli d'eau. En moyenne, nous avons finalement trouvé $\rho_G = 2300 \text{ kg/m}^3$

La courbe granulométrique a été réalisé à la main en utilisant différents tamis en enlevant à chaque fois au maximum les fines qui étaient collées aux grains. Etant donné l'importance des valeurs de P_{tam} dans la détermination des paramètres de nos échantillons nous voulions être sûr de bien faire la courbe granulométrique sur une quantité de terre suffisante pour être bien représentative. Nous donc avons réalisé la courbe granulométrique sur environ 60kg de terre prélevée sur chantier. Les résultats et le graphique associé sont représentés ci-dessous. Nous avons fait une vérification de la courbe granulométrique obtenu sur un autre sac de terre de 25kg prélevé un autre jour et nous avons trouvé sensiblement les mêmes résultats.

Passant mm	Pourcentage	Poids (kg)
50	100	56,96
30	94,0	53,56
25	90,4	51,52
16	80,8	46,02
14	77,8	44,34
12	74,0	42,15
10	69,6	39,66
5	55,5	31,6
4	51,8	29,48

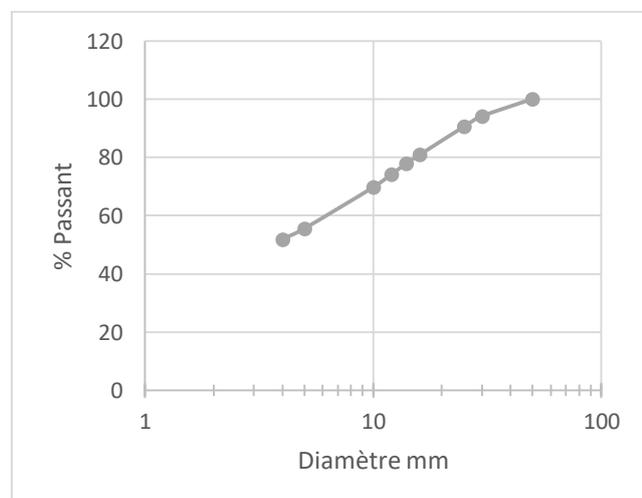


Figure 18 : Courbe granulométrique

2.3 Réalisation des essais de succion permettant de réaliser les courbes de rétention d'eau

2.3.1 Réalisation des échantillons

Les essais suivants ont été réalisés dans le but de compléter les données que nous avons grâce au travail réalisé précédemment par Antoine Peltier. Les courbes que nous avons déjà en notre possession sont les courbes de rétention pour des échantillons ayant une teneur en eau allant de 0% à 1.2% présentées ci-dessous, il nous fallait donc faire la partie des courbes pour des teneurs en eau allant jusqu'à 8% soit la teneur en eau de fabrication.

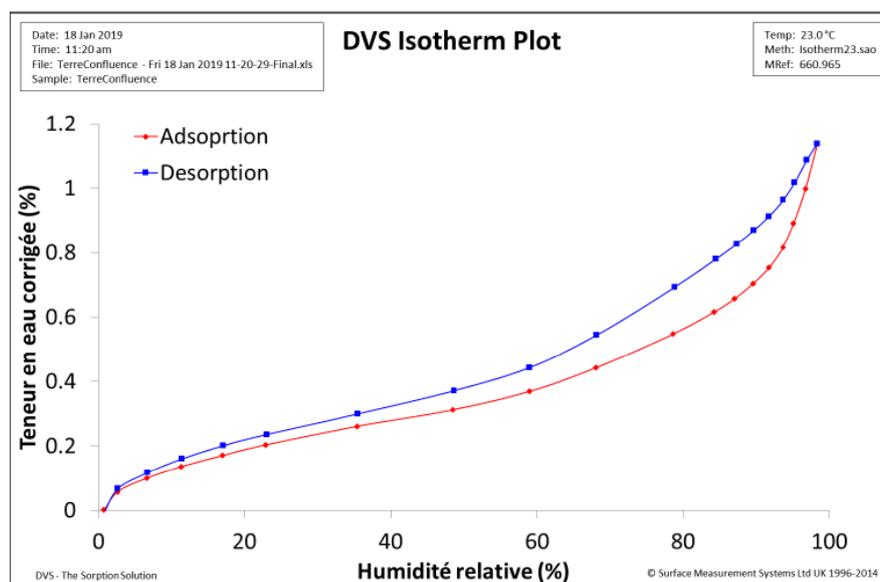


Figure 19 : Courbes de rétention d'eau précédemment réalisée par Antoine Peltier

On utilise le mot courbe au pluriel pour désigner les courbes de rétention car il y a d'un côté la courbe d'adsorption (ou humidification) et d'un autre la courbe de désorption (ou séchage). Etant donné que dans notre cas la réalisation de ces courbes a pour but d'étudier uniquement le séchage du pisé, nous ne compléterons pour ce TFE que la courbe de séchage que nous nommerons désormais abusivement « courbe de rétention d'eau » pour la suite de ce TFE.

Nous avons choisi de fabriquer des échantillons de géométrie $16 \times 16 \times 16 \text{ cm}^3$ pour réaliser ces essais. Ce choix de géométrie découle de notre volonté d'utiliser le moins de terre possible car notre stock était limité, tout en gardant des échantillons représentatifs. Nous avons fabriqué des cubes avec trois tamisages différents, 12mm, 30mm et 50mm, afin de voir les effets du tamisage et donc de la non-homogénéité des cubes tamisés à 30mm et 50mm sur les essais de rétention d'eau. Cette non-homogénéité est liée au rapport taille de la plus petite dimension sur taille du plus gros granulat qui est inférieur à 10. Nous avons également choisi de faire deux cubes par tamisage. Les échantillons sont représentés sur la figure ci-dessous.



Figure 20 : Photo de 5 de 6 cubes destinés aux essais de rétention d'eau

Les échantillons ont été fabriqué dans un coffrage prismatique avec une dame manuelle par couche de 8cm, les teneurs en eau de fabrication et les densités sèches ont été déterminé grâce aux relations précédentes pour les échantillons de tamisage 12mm et 30mm. On peut voir sur la photo que certains angles des cubes sont abimés, mais cela n'a pas de conséquences dans le cadre de cet essai étant donné que nous avons uniquement besoin d'une face dans un bon état.

2.3.2 Réalisation des essais

Lors des essais réalisés précédemment par Antoine Peltier, ces derniers avaient été mené en utilisant la norme NF EN ISO 12572 (2000) qui est la méthode de sorption gravimétrique dynamique aussi appelé méthode de sorption dynamique de vapeur (DVS). Cette méthode consiste à mesurer l'absorption et la perte d'humidité en faisant circuler de l'air à une humidité relative spécifiée au travers d'un petit échantillon de terre tamisée à 1mm suspendu au mécanisme de pesée d'une microbalance.

Lors des essais que nous avons réalisés lors de ce TFE, nous avons utilisé une autre méthode, exposée dans la norme ASTM D 5298 – 94 (1995). Cette méthode nécessite uniquement l'utilisation d'une balance précise 1/10 000^e de gramme ainsi que du papier filtre. Cette méthode nécessite aussi la connaissance de la courbe de rétention d'eau du papier filtre, c'est pourquoi nous utiliserons le papier filtre Whatman n°42 car sa courbe de rétention d'eau est connue et est représentée sur la figure suivante.

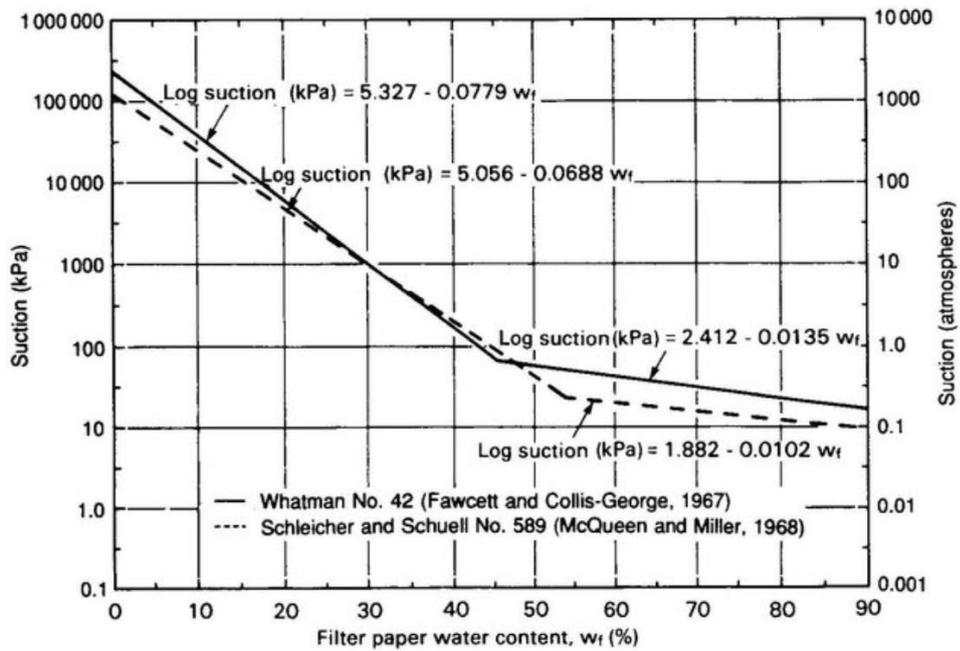


Figure 21 : Courbe de rétention d'eau des papiers filtre Whatman 42 [FAWCETT and COLLIS-GEORGE]

L'essai ainsi réalisé est issu d'une expérience proposée par [DELAGE]. Il est question de placer une triple épaisseur de papier filtre, dont on a préalablement pesé celle du milieu, sur l'échantillon dont veut déterminer la succion et dont on connaît la teneur en eau. On enveloppe ensuite l'échantillon dans du film plastique fermé hermétiquement pour éviter toute évaporation. Ainsi, l'équilibre des succions a lieu entre les papiers filtre et l'échantillon en laissant en contact au moins 24h. Après quoi on extrait les papiers filtre et on détermine par peser la teneur en eau de la feuille centrale car non polluée. La connaissance de la teneur en eau du papier filtre et de sa courbe de rétention d'eau permet d'obtenir la succion du papier filtre et donc de l'échantillon étudié. On répète l'opération plusieurs fois pour couvrir la plage de teneur en eau en laissant sécher les échantillons entre chaque essai.



Figure 22 : Photo des cubes et des papiers filtre emballés hermétiquement pour atteindre l'équilibre

2.3.3 Résultats des essais

Pour les six cubes, nous avons réalisé neuf mesures de succion différentes et dont les résultats se trouvent sur le graphique ci-dessous. Pour l'exploitation des essais, les teneurs en eau des cubes tamisés à 12mm et à 30mm ont été ramenées à leur équivalent pour un tamisage à 50mm.

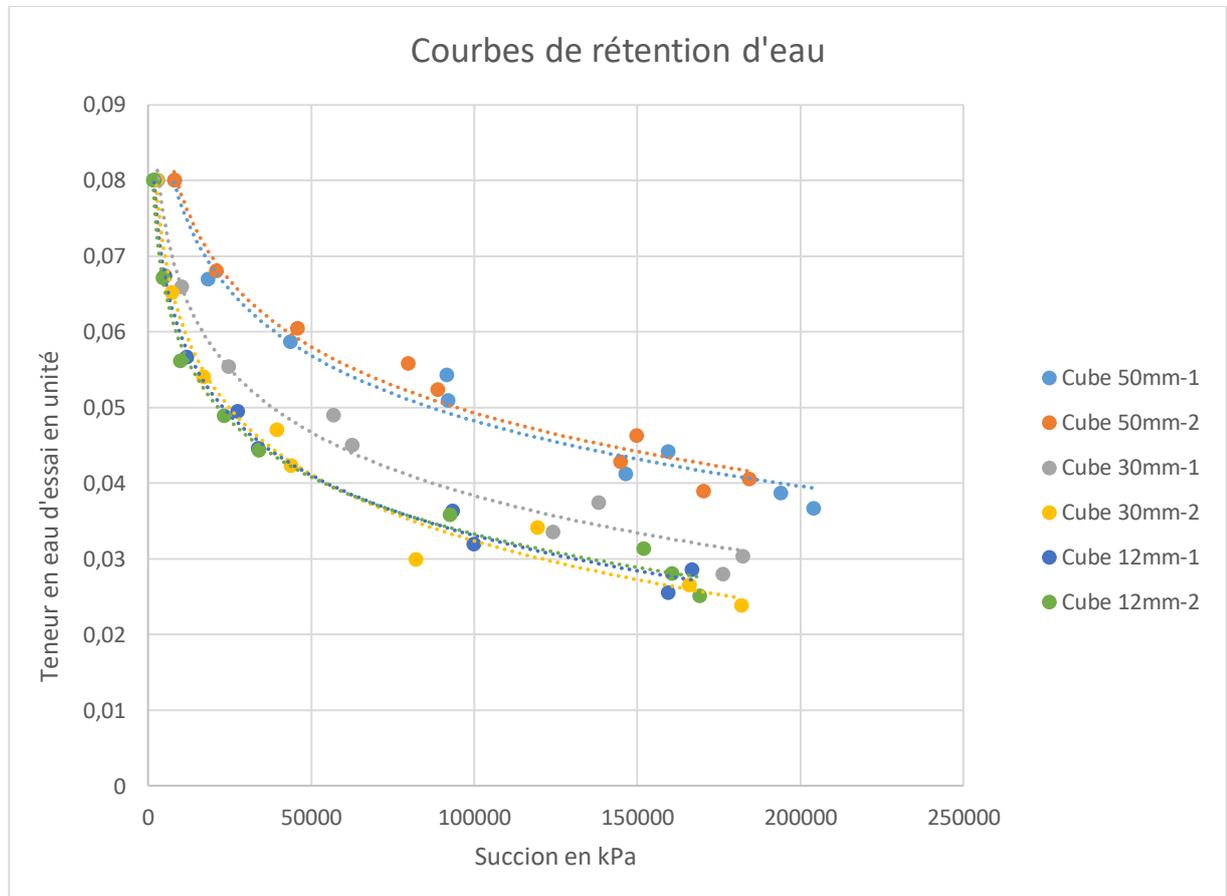


Figure 23 : Courbes de rétention d'eau obtenues avec les essais

Pour exploiter les résultats de ces essais, ce n'est pas la succion en fonction de la teneur en eau qui nous intéresse mais l'humidité relative en fonction de la teneur en eau. Pour cela, nous allons exploiter la relation qu'il existe entre humidité relative et succion. Il s'agit de la loi de Kelvin présentée ci-dessous.

Soit s la succion en kPa, HR l'humidité relative, P_L la pression de l'eau, P_G la pression de l'air, R la constante molaire des gaz égale à 8.314 J/mol/K, T la température en Kelvin, M la masse molaire de l'eau égale à 18.016 g/mol, ρ_L la masse volumique de l'eau. On a la relation suivante :

$$-s = P_L - P_G = \frac{\rho_L \cdot R \cdot T}{M} \ln(HR)$$

L'analyse de ces courbes et leur utilisation dans le cadre de la modélisation du séchage des échantillons par logiciel viendra dans la 3^{ème} grande partie de ce rapport qui concernera les analyses des résultats des expériences (parties 3.2.8, 3.2.9 et 3.3.4).

2.4 Réalisation des essais de compression simple

2.4.1 Les essais de la campagne ayant déjà été réalisés

Comme cela avait été mentionné précédemment, les essais de compression simple qui ont été réalisés lors de ce TFE sont la continuité de la campagne d'essais qui avait été commencé par Antoine Peltier. Le but de la campagne d'essai est double, d'un côté, l'un des objectifs est de caractériser mécaniquement la terre qui est actuellement utilisée sur le chantier à Confluence. Les résultats ainsi trouvés devront assurer que la capacité portante de terre permet bel et bien la durabilité de la construction, ou dans le cas contraire, permettre de savoir ce qu'il est nécessaire de rajouter. D'un autre côté, l'autre objectif de cette campagne d'essai et de mon TFE plus particulièrement, est l'étude des liens qu'il existe entre les résultats de la campagne et le comportement de gros blocs fabriqués sur chantier qui représentent le comportement réel de la structure. Lors de cette campagne d'essai, nous avons fait varier plusieurs paramètres afin d'en étudier les effets. Nous avons principalement étudié la teneur en eau d'essai, le tamisage, la géométrie et la taille des échantillons.

Avant le début de mon TFE, Antoine Peltier avait déjà réalisé les essais suivants : 13 échantillons prismatiques de dimension $30 \times 30 \times 60 \text{ cm}^3$ tamisés à 50mm, 18 échantillons cylindrique de dimension $\text{Ø}15 \times 30 \text{ cm}$ tamisés à 50mm et 3 échantillons cylindrique de dimension $\text{Ø}15 \times 30 \text{ cm}$ mais cette fois tamisés à 30mm. Une photo de chaque géométrie est représentée sur la figure suivante.



Figure 24 : Photo d'un échantillon prismatique à gauche, et d'un échantillon cylindrique à droite

2.4.2 Le choix des paramètres des échantillons fabriqués et testés lors de ce TFE

Afin d'étudier au mieux les effets des différents paramètres sur le comportement mécanique, il était nécessaire de définir un plan d'essai, de choisir le meilleur compromis entre faire plein d'essais différents pour étudier toutes les combinaisons de paramètres, ou répéter certains essais pour vérifier la répétabilité et assurer les résultats obtenus. Pour ce faire, il nous fallait prendre en compte les essais déjà réalisés lors de cette campagne.

Pour les essais sur les prismes 30x30x60cm³, tous tamisés à 50mm, ces considérations ne se sont pas présentées car ils ont tous été fabriqués sur chantier par Nicolas Meunier. En tout, 17 prismes avaient été fabriqués, 13 avaient déjà été testés avant le début de mon TFE, nous avons ensuite testé les 4 derniers après avoir attendu le temps nécessaire pour qu'il soit le plus sec possible, et que la teneur en eau soit bien homogène partout. En effet, d'après Stéphane COINTET, en charge de la casse de tous les blocs de la campagne d'essai, les premiers prismes présentaient une réelle différence de teneur en eau entre le centre et la périphérie visible à l'œil nu après leur casse, cette différence n'était en revanche plus présente lors des essais que nous avons réalisés pendant mon TFE. Pour ces essais, le seul paramètre qui a donc réellement varié, c'est la teneur en eau d'essai, les échantillons ont été testés aux teneurs en eau suivantes : 1.2%, 2.1%, 2.65%, 2.77%, 2.8%, 2.8%, 3.12%, 3.22%, 3.39%, 3.47%, 7.1%, 7.4%, 7.4%. Les 4 prismes restant que j'ai testés lors de mon TFE avaient tous quant à eux une teneur en eau d'essai proche de 1%.

Pour le choix du tamisage des cylindres, 18 ayant été déjà fait à 50mm et 3 à 30mm, nous avons considéré qu'il n'était pas nécessaire de refaire de cylindres tamisés à 50mm, que nous devons compléter les essais fait sur des cylindres tamisés à 30mm et faire entièrement la campagne sur les cylindres tamisés à 12mm. Nous avons initialement visé à faire 4 cylindres tamisés à 30mm et 6 tamisés à 12mm. Comme nous avons finalement pris plus de terre que prévu, nous sommes passé à 8 cylindres tamisés à 12mm. Pour des raisons de disponibilité des coffrages, les cylindres que nous allons fabriquer seront de dimension Ø16x32cm et non de dimension Ø15x30cm comme ceux déjà réalisés.

Pour le choix des teneurs en eau d'essai, nous avons regardé les teneurs en eau des essais ayant déjà été réalisées pour les cylindres tamisés à 50mm et à 30mm. Pour se simplifier l'analyse, nous avons regroupé les teneurs en eau d'essai par groupe de sec à humide. Pour simplifier l'analyse, les teneurs en eau des cylindres tamisés à 30mm ont été ramené à leur équivalent pour le tamisage à 50mm. La figure ci-dessous présente les différents groupes sur lesquels sont représentés les cylindres déjà réalisés par Antoine Peltier.

<u>Très sec :</u>	<u>Sec :</u>	<u>Légèrement humide:</u>	<u>Humide:</u>
Tamisage 50mm :	Tamisage 50mm :	Tamisage 50mm :	Tamisage 50mm :
1,1%, 1,2%, 1,3%, 1,4%	-	4,6%, 4,7%	5,5%, 6%, 6,6%, 6,6%, 6,7%, 7,2%, 7,3%, 7,4%, 7,6%, 8,5%
Tamisage 30mm :	Tamisage 30mm :	Tamisage 30mm :	Tamisage 30mm :
-	2,5%	-	5,9%, 6%

Figure 25 : Groupes de classement des cylindres en fonction de leur teneur de eau d'essai

On remarque en premier lieu qu'il y a une forte concentration des essais déjà réalisés en très sec et en humide pour les cylindres tamisés à 50mm. Nous nous sommes donc servis de ce classement pour déterminer les teneurs en eau d'essai des cylindres que nous allons fabriquer. Pour les 4 cylindres tamisés à 30mm que nous allons tester, nous avons choisi d'en amener 2 à une teneur en eau très sèche, 1 à une teneur en eau sèche et 1 à une teneur en eau légèrement humide. Pour les 8 cylindres tamisés à 12mm nous avons choisi d'en amener 3 à une teneur en eau très sèche, 1 à une teneur en eau sèche, 1 à une teneur en eau légèrement humide et 3 à une teneur en eau humide.

Nous souhaitons également nous servir de cette campagne d'essai pour évaluer l'impact de la géométrie des échantillons sur les propriétés mécaniques et donc voir laquelle est la plus représentative du comportement réel des blocs de chantier. Nous souhaitons aussi voir quel est la géométrie la plus simple à mettre en œuvre dans le but de mettre en place une procédure simple et répétable afin de quantifier la performance mécanique du pisé pour la construction. C'est pour cela que nous avons étudié une nouvelle géométrie pour les échantillons de laboratoire, les échantillons prismatiques de géométrie 16x16x32cm³. Il s'agit d'une géométrie « proche » des cylindres de dimension Ø16x32cm que nous avons fabriqués. Nous avons choisi de les réaliser tamisés à 12mm pour deux raisons, tout d'abord car plus le tamisage est fin, moins l'échantillon et surtout ses angles ont de chances de s'abîmer. Et aussi car nous allons comparer les résultats des prismes aux résultats des cylindres que nous avons réalisé en plus grande quantité, soit les cylindres tamisés à 12mm. En effet, il fallait que le plus de paramètres possibles soient les mêmes entre les prismes et les cylindres.

Pour les teneurs en eau d'essai des prismes, nous en avons amené 2 à teneur en eau très sèche, 1 à une teneur en eau sèche, 1 à une teneur en eau légèrement humide et 2 à une teneur en eau humide. Les valeurs de teneur en eau des essais que nous avons réalisés sont indiqués sur la figure ci-dessous. On peut remarquer que certains échantillons que nous souhaitons tester comme étant légèrement humide était au final plutôt dans la catégorie sèche. Probablement à cause d'un mauvais emballage, ou du fait de la mise en œuvre du surfaçage que nous verrons plus loin dans ce rapport et qui avait nécessité de débarrasser les échantillons.

<u>Très sec :</u>	<u>Sec :</u>	<u>Légèrement humide:</u>	<u>Humide:</u>
Cylindres 12mm : 1,2%, 1,2%, 1,4%	Cylindres 12mm : 2,3%	Cylindres 12mm : 3,6%	Cylindres 12mm : 6,4%, 6,7%, 7,2%
Cylindres 30mm : 1,2%, 1,4%	Cylindres 30mm : 2,1%, 2,8%	Cylindres 30mm : -	Cylindres 30mm : -
Prismes 12mm : 1,2%, 1,2%	Prismes 12mm : 2,3%, 3,1%	Prismes 12mm : -	Prismes 12mm : 5,4%, 6%

Figure 26 : Classement des essais que nous avons réalisés par teneur en eau

2.4.3 La réalisation des échantillons

Pour fabriquer les échantillons, il nous fallait en premier lieu aller chercher la matière première, à savoir la terre, sur chantier. Nous avons au préalable évalué la quantité de terre nécessaire afin de ne pas avoir à faire plusieurs voyages. La terre a été récupérée dans le tas sur chantier qui servait à la fabrication des blocs, il s'agit donc exactement de la même terre. Nous avons dans un second temps réalisé la courbe granulométrique de la terre exposée plus haut dans ce rapport afin de connaître les valeurs de P_{tam} nécessaire à l'application des formules de correction de densité et de teneur en eau.

Nous avons ensuite tamisé la terre en quantité nécessaire par tamisage, la terre a ensuite été mise dans des sacs plastiques fermés hermétiquement que nous avons laissé reposer plusieurs jours afin d'être sûr que la teneur en eau soit homogène dans chaque sac. Une fois la teneur en eau bien homogène, nous avons prélevé une petite quantité de terre (environ 1kg) de chaque sac, que nous avons pesé puis placé à l'étuve afin de déterminer la teneur en eau de la terre dans le sac.

Après avoir déterminé la teneur en eau de chaque sac, il nous fallait amener chaque sac à la teneur en eau de fabrication déterminée en faisant attention à bien utiliser la relation de correction pour les sacs de terre tamisés. Si la teneur en eau de la terre dans un sac était inférieure à celle voulu, nous ajoutions la quantité d'eau nécessaire de façon précise puis nous mélangions pour assurer la meilleure répartition possible de la teneur en eau, nous refermions ensuite le sac pour laisser homogénéiser pendant quelques jours. Si la teneur en eau de la terre dans un sac était supérieure à celle voulu, nous laissions sécher la terre plusieurs à l'air libre afin que sa teneur en eau diminue, nous la remontions ensuite de la manière évoquée précédemment si nécessaire.

Nous avons ensuite fabriqué les différents types d'échantillons dans les coffrages présents sur la photo de la figure ci-dessous. A gauche le coffrage ayant servi pour la fabrication des échantillons cylindriques de dimension $\varnothing 16 \times 32 \text{cm}$ et à droite le coffrage utilisé pour les échantillons prismatiques de dimension $16 \times 16 \times 32 \text{cm}^3$ et pour les échantillons cubiques de dimension $16 \times 16 \times 16 \text{cm}^3$. Les échantillons ont donc été compactés à la main grâce aux dames situés de part et d'autre des coffrages, la dame circulaire servant évidemment pour les échantillons cylindriques et la dame cubique pour les échantillons prismatiques et cubiques.

Le pisé est un matériau qui est composé de couches successives de terre compactée, nous avons décidé de réaliser par échantillons, 2 ou 4 couches de hauteur 8cm en fonction de la géométrie recherchée. La quantité de terre humide par couche avait été déterminée préalablement au gramme près en fonction du tamisage et à la densité souhaitée en utilisant les formules de correction présentées précédemment. La hauteur de chaque couche était mesurée de façon précise, nous savions donc exactement quelle était la densité, la masse sèche, la teneur en eau et la hauteur de chaque échantillon.



Figure 27 : Photo des coffrages et dames utilisés pour la fabrication des échantillons

Après avoir fabriqué les échantillons, nous devons les faire sécher afin de les amener à la teneur en eau d'essai que nous avons déterminée au préalable. Nous avons donc laissé sécher les échantillons en contrôlant fréquemment leur teneur en eau simplement en les pesant car nous connaissions leur masse sèche. Il nous fallait cependant faire très attention aux manipulations étant donné la fragilité et le poids des échantillons. Il fallait notamment veiller à bien porter les échantillons par leur base car les porter par le milieu ou par le haut entraînerai de la traction dans l'échantillon soumis à son propre poids et pourrai entraîner sa ruine étant donné que le pisé est un matériau qui ne résiste à quasiment rien en traction. Nous avons notamment cassé deux échantillons lors de ces manipulations, échantillons qui ont évidemment été refait par la suite mais cette mauvaise opération nous a bien rajouté 2 jours de travail supplémentaire car, pour refaire un échantillon à partir d'un autre échantillon cassé, il faut concasser les échantillons cassés, déterminer la teneur en eau de la terre récupérée, l'amener à nouveau à la teneur en eau de fabrication, refaire les échantillons puis relancer leur séchage.

Une fois que les échantillons sont arrivés à leur teneur en eau d'essai, il faut les emballer de façon bien hermétique avec du film plastique. Cette opération permet à la fois de conserver les échantillons à la teneur en eau voulu, mais aussi de les laisser s'homogénéiser afin qu'il y ait le moins possible de différences de teneur en eau entre le centre et la périphérie de l'échantillon. La figure ci-dessous montre des échantillons qui ont été emballés pour conserver leur teneur en eau. Les échantillons emballés étaient pesés régulièrement tous les 2,3 jours afin de vérifier qu'ils ne perdent pas en masse et donc que l'emballage était toujours efficace.



Figure 28 : Photo d'échantillons prismatiques qui ont été emballés afin de conserver leur teneur en eau

Une fois que les échantillons sont arrivés à leur teneur en eau d'essai, il reste une dernière manipulation à réaliser afin que les échantillons soient prêts à être testés. Il s'agit de surfaçer les échantillons qui en ont besoin. La figure ci-dessous montre des photos d'exemples d'échantillons qui nécessitaient un surfaçage de la partie supérieure. Le surfaçage permet à la fois d'appliquer la force sur toute la surface de l'échantillon et non que sur les parties non abimées mais aussi d'être sûr que l'échantillon soit bien vertical. Le surfaçage était nécessaire pour la grande majorité de nos échantillons. Il existe pleins de raisons de faire un surfaçage, un angle ou une arrête abimés pour les prismes, le contour circulaire des cylindres abimé, un échantillon pas droit, ou ayant un compactage légèrement inégal en surface. Le surfaçage peut se faire sur la surface du haut et/ou du bas de l'échantillon. Seuls quelques échantillons n'ont pas nécessité de faire les deux surfaçages, et il s'agissait le plus souvent des derniers échantillons que nous avons réalisés, preuves au passage qu'avec l'expérience, la réalisation et la manipulation des échantillons sont mieux maîtrisées.



Figure 29 : Photo d'échantillons ayant eu besoin d'un surfaçage supérieur car ils étaient abimés

Le surfaçage était réalisé avec du plâtre à séchage lent afin de nous laisser le temps de le mettre en place. Pour le mettre en œuvre, nous avons réalisé un petit coffrage ou collier pour la partie supérieure de l'échantillon que nous laissons dépasser de quelques millimètres de l'échantillon. La mise en œuvre du surfaçage entraînait à chaque fois l'humidification de la terre de la partie de l'échantillon juste en dessous du surfaçage, c'est pourquoi nous avons dû laisser plusieurs jours les échantillons séchés au niveau des extrémités avant de pouvoir réaliser les essais de compression simple car la partie humide ainsi créée aurait pu faussée les résultats si elle avait lâché avant le reste de l'échantillon lui à la bonne teneur en eau.

2.4.4 Réalisation des essais

Les essais de compression simple ont été réalisés au LTDS/ENTPE avec deux presses différentes, la première pour les petits échantillons (prismes et cylindres) est une presse hydraulique de marque LOS SYSTEM d'une capacité de 100kN pouvant être pilotée en déplacement ou en force et équipée d'un capteur de force de 100kN. La seconde presse pour les gros prismes est une presse INSTRON d'une capacité de 2500kN pouvant être pilotée en force ou en déplacement équipée d'un capteur de force de 250kN. Dans les deux cas, la presse était pilotée en déplacement à une vitesse de 0.02mm/s jusqu'à atteindre la résistance maximale de l'échantillon. Au-dessus de l'échantillon a été positionné un plateau et une bille en acier servant de dispositif de rotule de façon à assurer une transmission de contrainte uniforme.

Malgré un élanement minimum de 2 pour chacun des petits échantillons que nous avons testés, nous avons placé un dispositif anti-fretage placé à la fois au-dessus et en dessous de l'échantillon. Il s'agit du disque en caoutchouc que l'on peut voir sur l'une des photos de la figure ci-dessus.

Dans le cadre de ses essais, nous ne nous sommes pas seulement intéressés à la résistance à la compression, mais nous avons aussi cherché à déterminer le module d'Young de chaque échantillon. Le module d'Young E est le coefficient de proportionnalité qui existe entre la contrainte axiale et la déformation axiale dans le cas où le comportement du matériau est élastique linéaire. Dans le but de vérifier la linéarité et la réversibilité du comportement, nous réalisons des cycles de charges/décharges. Nous avons réalisé deux types de cycles. Le premier entre 20% R_c et 10% R_c et le second entre 60% R_c et 20% R_c où R_c est la résistance à la compression maximale des échantillons. Ainsi, il était donc nécessaire de prévoir à l'avance quelle serait la probable résistance à la compression maximale afin de se trouver dans la bonne plage de R_c pour les cycles. Pour estimer la R_c probable nous avons analysé les résultats obtenus lors des premiers essais de la campagne en faisant surtout attention à la teneur en eau d'essai.

La déformation globale est mesurée par la presse mais elle prend en compte aussi les déformations de la presse et les déformations des extrémités de l'échantillon qui réagisse différemment du fait du contact proche avec la presse. Ainsi, pour s'affranchir des déformations parasites dues aux interfaces et à la presse, nous avons aussi réalisé une mesure locale de la déformation des échantillons cylindriques uniquement dans le 1/3 central. Cette mesure a été réalisée avec 3 extensomètres INSTRON type 2797 placés à 120° chacun comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, sur cette figure, on peut aussi voir les extensomètres placés sur un échantillon cylindrique. La valeur de la déformation locale était ensuite obtenue en faisant la moyenne des déformations des trois extensomètres.



Figure 30 : Photo et schéma de la disposition des extensomètres sur les échantillons cylindriques

La rupture de l'éprouvette après avoir passé le pic de résistance à la compression se caractérise souvent par l'apparition de fissures sur les échantillons comme on peut le voir sur la photo ci-dessous.



Avant essai



Après essai

Figure 31 : Photos d'un échantillon avant et après rupture

Pour des raisons de simplicité, nous avons seulement mis les extensomètres sur les échantillons cylindriques. On peut voir sur la figure ci-dessous, une partie des courbes réalisées pour les échantillons cylindriques afin de réaliser les analyses qui suivront. Seules manquent les courbes de R20% et R60% issue des mesures de la presse. Le graphe en haut à gauche montre les courbes contrainte/déformation brutes issue de la presse et des extensomètres. En dessous ce trouve la courbe issue de la presse que l'on a lissée (fait une moyenne toute les 10 valeurs) et à laquelle on a enlevé les cycles de charges/décharges que l'on a isolés afin d'avoir une meilleure lisibilité quand on voudra comparer les courbes des différents échantillons. Le lissage était nécessaire à cause des bruits du vérin qui n'ont pas permis d'avoir des courbes propres. Les cycles de charges/décharges ont été isolés individuellement afin de pouvoir faire ressortir facilement la pente moyenne des cycles. Pour les petits prismes, par rapport aux petits cylindres, nous n'avons pas mis les extensomètres il y a donc des courbes en moins. Pour les gros prismes, il n'y avait pas non plus d'extensomètres, nous n'avons pas appliqué de cycles de charges/décharges, et, les courbes fournies par la presse étant relativement propres, nous n'avons pas eu à les lisser.

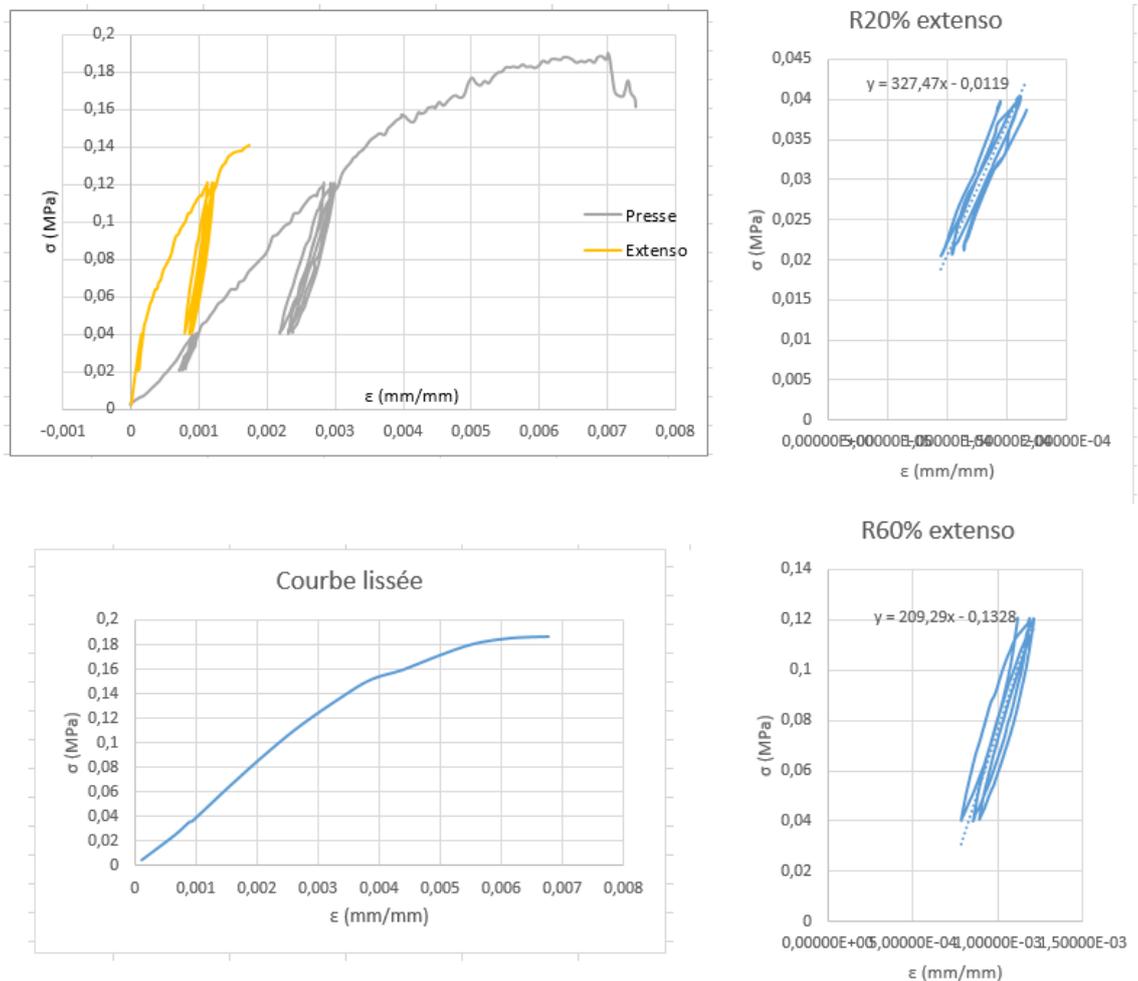


Figure 32 : Exemple des courbes que l'on réalise pour les échantillons

2.5 Réalisation des essais de séchage

Les échantillons qui ont été utilisés pour les essais de séchage sont des échantillons qui ont été réalisés en premier dans le but de les tester en compression simple, ainsi, sur certains échantillons choisis, nous avons décidé de suivre leur cinétique de séchage jusqu'à la valeur de teneur en eau à laquelle on avait décidé de les tester en compression simple. Nous avons étudié le séchage sur chaque type différent d'échantillons que nous avons, à savoir prisme $16 \times 16 \times 32 \text{ cm}^3$ et cylindres de dimensions $\text{Ø}16 \times 32 \text{ cm}$ tamisés à 12mm et à 30mm. Parmi tous ces échantillons, nous avons seulement testé en double les prismes tamisés à 12mm.

Pour les échantillons cylindriques, nous avons décidé d'étudier à la fois le séchage en trois dimensions, mais aussi le séchage en une dimension. Pour les échantillons prismatiques nous n'avons étudié que le séchage en trois dimensions. Pour le séchage en une dimension, nous avons étanchéifié les échantillons sur la face circulaire du cylindre et nous les avons laissés sécher sur la tranche. Pour le séchage en trois dimensions, nous les avons laissés à l'air libre sauf pour la face sur laquelle ils étaient en contact avec le support. Les photos ci-dessous montrent les différents échantillons en train de sécher.



Figure 33 : Photos des échantillons cylindriques en train de sécher, à gauche en 3D et à droite en 1D

L'objectif de ces essais est multiple, étudier les différences de séchage entre deux géométries différentes (prisme et cylindre), les différences entre des modes de séchage différents (1D et 3D) et les différences liées aux tamisages (12mm et 30mm). Les résultats seront aussi comparés à une simulation numérique qui sera réalisée sur le logiciel COMSOL et qui permettra de déterminer certains paramètres de la terre liés au séchage.

Les essais se sont déroulés de façon très simple, à une fréquence donnée, les échantillons étaient pesés et les résultats notés. La fréquence de mesure a varié au cours de l'essai en fonction de la vitesse de séchage, au début, quatre mesures étaient réalisées par jour, puis deux au bout de quelques jours et enfin chaque jour. Le plus délicat dans ces essais, était de manipuler les échantillons avec la plus grande attention pour ne pas les abimer car ils étaient destinés par la suite, à être testés en compression simple. Cette étape était notamment délicate au début du séchage, là où les échantillons sont les plus fragiles, mais aussi les plus lourds. Les prismes étaient encore plus délicats à manipuler car ils étaient non seulement les plus lourds (environ 16kg humide) mais aussi les plus fragiles notamment au niveau des angles et des arrêtes.

3. Analyse des résultats des expériences

3.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons désormais nous intéresser aux réponses que l'on peut apporter afin de répondre au mieux aux différents objectifs que nous nous sommes fixés en début de TFE.

La réalisation de ce TFE s'intègre dans le cadre de l'action actuellement conduite au niveau international par le comité technique RILEM 274 et dont le but est de mettre en place une procédure répétable afin de quantifier la performance mécanique du pisé pour la construction. La première étape du travail consistera à la création d'une méthodologie de référence pour la fabrication d'échantillon en terre afin de créer une méthode permettant la répétabilité des résultats des essais et donc faire un pas de plus vers une réglementation sur les constructions en terre crue.

Pour ce premier travail, nous utiliserons exclusivement les résultats des essais que nous avons réalisés lors de ce TFE, en effet, pour définir une méthodologie ayant la meilleure répétabilité possible, il est nécessaire de se baser sur les expériences que l'on a réalisées nous-même. Lors de ce TFE, nous avons réalisé toutes les étapes nous-même au niveau des expériences, nous sommes partis de la terre sèche directement récupérée sur chantier jusqu'à la casse des échantillons.

La seconde étape du travail consistera à étudier les liens entre les résultats des essais de laboratoires et le comportement réel des structures en terre. Le comportement réel est obtenu par l'étude des essais réalisés sur des blocs de grandes dimensions réalisés sur chantier. Les autres résultats proviennent d'une campagne d'essai de blocs de plus petites tailles, cette campagne avait déjà été commencée avant le début de mon TFE par Antoine Peltier. Ainsi, lors de l'analyse des essais, j'utiliserais à la fois mes résultats et ceux d'Antoine Peltier. Cette analyse de résultats se fera sur une approche multi-échelle en prenant en compte les hétérogénéités de densité et de teneur en eau lié au fait que les essais ne sont pas tous réalisés avec le même tamisage.

Pour cette seconde étape, nous avons récupéré d'autres données sur autre campagne d'essai que nous allons aussi pouvoir utiliser. Les essais ont été réalisés à l'ENTPE par Stéphane COINTET. La terre utilisée pour ces essais provient elle aussi de Saint-Quentin-Fallavier, et il s'agit de la terre qui devait être initialement utilisée pour le chantier de Confluence avant que Nicolas Meunier ne se rendent compte qu'il n'y a pas assez de cette terre pour faire le chantier en entier. Cependant, entre temps, l'ENTPE avait déjà réalisé des essais afin de caractériser cette première terre, essais dont nous pouvons nous servir lors de ce TFE. Nous l'appellerons terre n°2 dans ce rapport.

Lors de mon TFE, nous avons testés deux blocs fait avec la terre n°2, ces blocs n'avaient pas été testés plus tôt car ils étaient en train de sécher sur une étagère. Au niveau visuel, les deux terres sont très ressemblantes. La principale différence entre ces deux terres est la résistance à la compression. En effet, la terre n°2 a une résistance à la compression bien supérieure à celle que nous avons nous-même utilisée. Pour cette terre, nous avons les résultats de la casse de 18 petits cylindres de dimension $\varnothing 15 \times 30 \text{cm}$ et 2 gros prismes de dimension $30 \times 30 \times 60 \text{cm}^3$. Nous pourrons donc étudier les liens entre les petits échantillons de laboratoire et les gros blocs représentatifs des blocs de chantier.

3.2 La création d'une méthodologie de référence

3.2.1 Introduction

En France, l'utilisation du pisé comme matériau de construction est limitée par plusieurs éléments. Tout d'abord le fait que la terre n'est pas un matériau industriel, donc chaque terre est différente et se comporte donc différemment. Au niveau des performances mécaniques, la connaissance de la résistance à la compression de la terre est obligatoire pour pouvoir construire avec, il est donc nécessaire de faire des essais au préalable pour pouvoir la déterminer. L'autre élément important à prendre en compte, est le fait que le pisé est un matériau de construction dont la détermination des paramètres important comme la résistance à la compression est loin d'être évidente, il y a beaucoup de paramètres d'essai ou de fabrication comme notamment la teneur en eau d'essai qui ont une grande importance dans la valeur et l'interprétation des résultats. Deux essais censés être identique au niveau des paramètres peuvent donner des résultats différents du fait d'évènement indépendant de la volonté humaine comme par exemple une mauvaise organisation des granulats et des fines dans une couche qui peut entraîner une rupture prématurée de la couche.

Nous allons donc voir dans cette partie l'ensemble des éléments pouvant affecter les résultats et comment faire en sorte de limiter l'impact de ces éléments. Certains éléments de méthodologie qui seront présentés dans cette partie pourront par la suite réellement faire partie d'un protocole de caractérisation de la performance mécanique du pisé. Certains éléments se relèveront comme étant plus du bon sens que réellement un protocole mais leur rappel ne peut être que bénéfique.

3.2.2 Choix de la teneur en eau de fabrication

Nous avons vu dans la partie précédente, que la teneur en eau de fabrication est un paramètre à ne pas négliger car il permet, couplé avec une énergie de compactage donnée, d'obtenir des échantillons avec la densité sèche la plus élevée possible et donc la résistance à la compression la plus élevée possible.

La caractérisation des performances mécaniques d'une terre se fait très souvent en lien avec une construction sur chantier, il est donc préférable d'utiliser la teneur en eau de fabrication utilisée pour la fabrication sur chantier comme teneur en eau de fabrication des échantillons de laboratoire.

Si cette information n'est pas disponible ou s'il n'y a pas de chantier en cours associé à la terre, la réalisation d'un essai Proctor peut permettre de trouver rapidement et sans trop de difficulté la teneur en eau optimale. Teneur en eau associée à une énergie de compactage.

Le point le plus important cependant reste la connaissance de cette teneur en eau de fabrication, car cela permet ensuite très facilement de savoir la teneur en eau d'un échantillon qui n'a pas encore été cassé simplement en le pesant et en connaissant son poids juste après sa fabrication. On peut aussi ajouter qu'il est également important de conserver toujours la même teneur en eau de fabrication, sauf si c'est le paramètre que l'on souhaite étudier, afin d'assurer la meilleure répétabilité sans avoir à se soucier de l'impact de variation de la teneur en eau de fabrication.

Si l'on utilise la teneur en eau de fabrication qui est utilisé sur chantier, et si l'on réalise des échantillons avec de la terre plus tamisée que celle sur chantier, il ne faut pas oublier d'utiliser la formule de correction de teneur en eau que l'on a vu précédemment. Afin que les fines soient toujours aussi humides. Si l'on utilise l'essai Proctor, on peut réaliser directement l'essai sur de la terre au tamisage souhaité, et dans ce cas, il n'y aura pas de correction de teneur en eau à appliquer.

3.2.3 Choix de la densité sèche

Comme nous l'avons vu précédemment, l'augmentation de la densité sèche d'un matériau se traduit par une augmentation de la résistance à la compression. Comme pour la teneur en eau de fabrication, nous recommandons d'utiliser la densité sèche de fabrication des blocs sur chantier pour réaliser les essais en laboratoire.

Si cette information n'est pas disponible ou s'il n'y a pas de chantier en cours associé à la terre, l'essai Proctor pourra être utilisé, le choix du mode de compactage impliquera l'énergie de compactage de fabrication, et la teneur en eau de fabrication optimale et sa densité sèche associée seront donc connues.

L'important au niveau de la densité sèche est de la garder constante pour tous les échantillons, à moins que ce soit le paramètre que l'on souhaite étudier, afin de pouvoir étudier la répétabilité des essais ou l'impact d'autres paramètres sans avoir à se demander si les variations que l'on observe sont le fait des variations du paramètre étudié ou de la densité sèche.

Comme pour la teneur en eau de fabrication, si l'on utilise la densité sèche qui est utilisée sur chantier, et si l'on réalise des échantillons avec de la terre plus tamisée que celle sur chantier, il ne faut pas oublier d'utiliser la formule de correction de densité sèche que l'on a vu précédemment. Dans le cas où on utilise l'essai Proctor, on ne choisit pas la densité sèche, on prend celle qui est maximale, on n'a donc pas besoin d'utiliser la formule de correction.

3.2.4 Choix de la géométrie des échantillons

Le choix de la géométrie des échantillons est un élément très important à prendre en compte afin de s'assurer de la bonne fabrication des échantillons et de la bonne réalisation des essais. Lors de ce TFE, nous avons réalisé comme petits échantillons, des prismes de dimension $16 \times 16 \times 32 \text{ cm}^3$, et des cylindres de dimension $\text{Ø}16 \times 32 \text{ cm}$. Ce sont donc ces deux géométries que nous allons comparer afin de voir laquelle est la plus simple, la plus répétable, la plus représentative...

Tout d'abord, au niveau de la fabrication, chacune des deux géométries nécessite de posséder les éléments nécessaires à la fabrication des échantillons que l'on peut voir sur la photo ci-dessous. Ainsi, pour avoir le choix au niveau de la géométrie, il faut que le laboratoire soit en possession des éléments nécessaires.



Figure 34 : Photo des éléments nécessaires à la fabrication des échantillons de chaque géométrie

La fabrication des deux types d'échantillons est similaire, il n'y a donc pas vraiment de différences à ce niveau-là, en revanche, le décoffrage des échantillons peut poser pas mal de problèmes surtout pour les prismes. En effet les coins des prismes s'abiment très facilement, surtout juste après la fabrication, au moment où l'échantillon est le plus humide. On peut par exemple voir sur la photo ci-dessous un exemple d'un coin de prisme fortement abimé et qui a dû être arrangé grâce au surfacage. Dans notre cas, les prismes étaient plus lourd que les cylindres (16kg contre 13kg), cela rendait donc leur manipulation encore plus délicate et donc les garder en bon état encore plus difficile notamment lors de l'étape de l'emballage des prismes dans du film plastique pour maintenir leur teneur en eau.



Figure 35 : Photo d'un coin de prisme très abimé

Le tamisage de la terre est également très important du point de vue du choix de la géométrie à adopter. En effet, même si nous avons uniquement réalisé des prismes tamisés à 12mm, nous avons aussi fabriquer des cubes tamisés à 12mm, 30mm et 50mm pour faire les courbes de rétention. Nous avons donc fabriqué des éléments prismatiques et cylindriques avec de la terre tamisée à plusieurs tamisages différents (12, 30 et 50mm pour les prismes/cubes, 12 et 30mm pour les cylindres). Pour les cylindres, nous n'avons pas eu particulièrement de problèmes de fabrication qui seraient dû à des gros granulats mal disposés. En revanche, pour les éléments prismatiques, comme on peut le voir sur la photo ci-dessous, une mauvaise disposition des gros granulats peut être la cause d'angles cassés. Plus les granulats sont gros et en plus grand nombre, plus un échantillon de type prismatique a de chance de voir ses angles abimés. Comme il s'agissait de cube servant à des essais de rétention d'eau, nous n'avons pas eu à refaire ces cubes, en revanche, si ces cubes étaient destinés à des essais de compression, nous aurions dû les refaire car ils ne seraient pas exploitables. Ainsi, en termes de faisabilité, si les échantillons doivent être fait avec une terre faiblement tamisée, nous recommandons plutôt d'utiliser des échantillons cylindriques.



Figure 36 : Photos d'un cube tamisé à 50mm ayant un coin très abimé

Même en limitant au maximum les manipulations et en choisissant un tamisage élevé, il est important de noter que les échantillons prismatiques nécessiteront quasiment toujours un surfaçage au niveau de la base de l'échantillon à cause de la façon dont l'échantillon est décoffré. En effet, lorsque l'on décoffre un prisme, il reste posé sur la base en bois du coffrage, comme on peut le voir sur la photo ci-dessous, et enlever le prisme de cette base est généralement fatal pour un ou plusieurs des coins de la base du prisme.



Figure 37 : Photo d'un échantillon prismatique au-dessus de la base du coffrage en bois

Maintenant, nous allons parler de la répétabilité des essais, pour cela, nous allons nous servir de la figure ci-dessous où sont représentées les résistances à la compression des prismes et cylindres tamisés à 12mm en fonction de leur teneur en eau. Sur la courbe, nous avons tracés les courbes de tendance de chaque géométrie, on peut voir qu'elles se superposent quasiment, ce qui indique que l'on obtient sensiblement les mêmes résultats entre les deux géométries. On remarque aussi que tous les points sont proches de leur courbe de tendance, cela traduit une bonne répétabilité des essais.

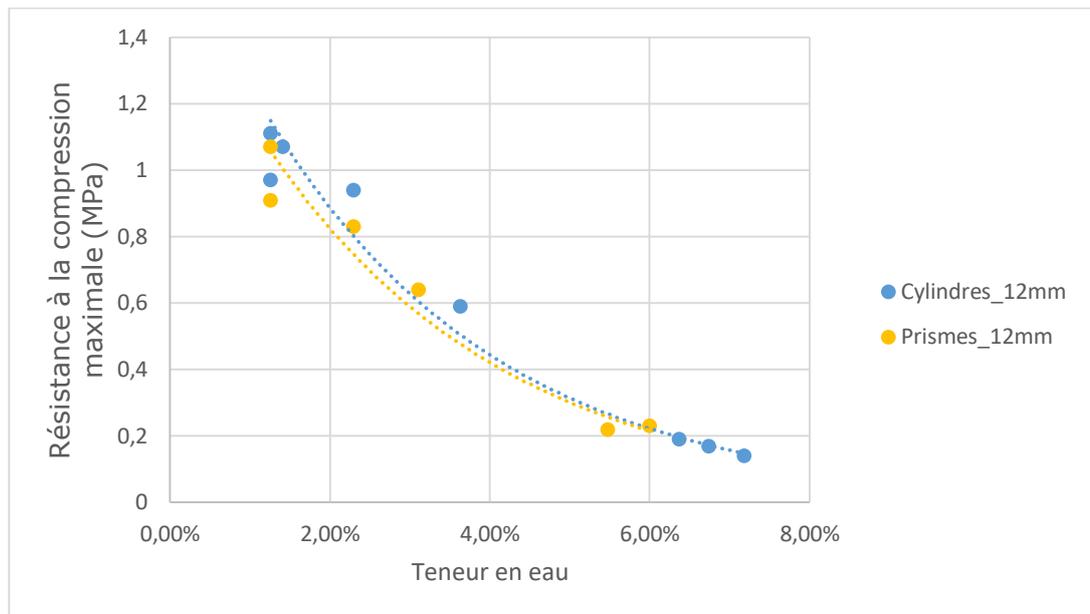


Figure 38 : Graphique de comparaison des résistances à la compression pour les prismes et les cylindres

Nous venons donc de voir que le comportement des prismes et des cylindres à tamisage égal était fortement similaire, cette constatation est fortement accentuée par ce que nous pouvons observer sur la figure ci-dessous. Nous y avons représenté la courbe contrainte/déformation d'un cylindre et d'un prisme à paramètres de fabrication égal et à teneur en eau d'essai très proche. On peut remarquer sur cette figure, que les courbes se superposent quasiment totalement tout le long de l'essai. Ce cas où des courbes se superposent aussi bien n'est arrivé que pour ces deux essais. Il s'agissait de deux essais où les échantillons ne présentaient aucun problème apparent, ce qui était loin d'être le cas pour les autres échantillons qui présentaient parfois des problèmes comme des défauts de surfacage par exemple.

L'absence de cas similaire comme celui des courbes ci-dessous ne nous permet donc pas de conclure sur une équivalence totale en terme de résultats entre les deux géométries. En revanche, le fait que ce cas soit apparu plus le fait que les résultats soient très proches et très répétables comme le montre la figure ci-dessus, nous permet de penser que le choix de la géométrie n'a qu'un faible impact sur la valeur de la résistance à la compression pour des tamisages importants. Ainsi, le choix de la géométrie pour des essais ne doit pas porter là-dessus, mais plutôt sur des considérations de tamisages suffisant pour ne pas que les échantillons ne s'abiment pas.

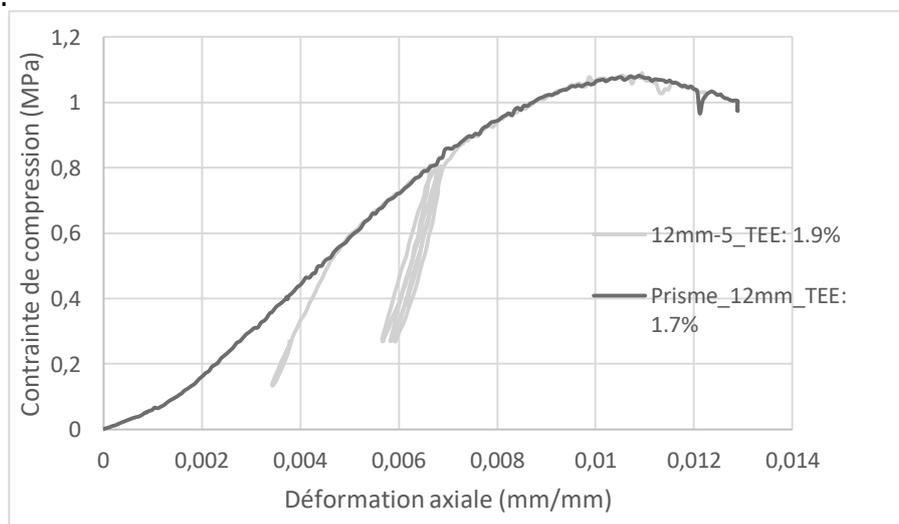


Figure 39 : Courbe contrainte/déformation pour un prisme et pour un cylindre tamisés à 12mm

3.2.5 Choix du tamisage

Comme nous venons de le voir, le choix du tamisage est un point très important notamment en ce qui concerne le choix de la géométrie des échantillons. Nous avons aussi vu dans la partie bibliographique que la granulométrie doit être adaptée à la taille de l'échantillon, et que la plus petite dimension de l'échantillon doit au moins être égale à 10 fois la taille du plus gros granulat [DUFFAUT]. Lors de la campagne d'essai réalisée par Antoine Peltier et moi-même, nous avons pu tester des échantillons cylindriques de dimensions $\varnothing 16 \times 32 \text{ cm}$ avec de la terre tamisée à 12mm, 30mm et 50mm. Nous allons donc pouvoir comparer la faisabilité et la répétabilité des essais pour les différents tamisages. Tous les échantillons cylindriques faits avec de la terre tamisée à 50mm ont été réalisés par Nicolas Meunier, nous ne pourrions donc étudier leur faisabilité qu'avec les photos des échantillons contrairement aux échantillons faits avec de la terre tamisée à 12mm et 30mm.

La faisabilité s'évalue par la simplicité de la procédure à réaliser. Il s'agit donc pour des échantillons cylindriques, d'avoir des échantillons simples à réaliser et ne nécessitant le moins de retouches nécessaires (surfaçage), ni d'être obligé de refaire un échantillon car celui-ci est mal réalisé. Nous avons pu constater lors de nos fabrications que plus la terre est tamisée, plus le damage de l'échantillon est facile notamment car la terre se met naturellement bien sans que des gros granulats ne gênent. Ce point peut être particulièrement important si la densité sèche souhaitée est très élevée, car elle sera beaucoup plus facile à atteindre avec de la terre tamisée. Au niveau des retouches à faire, nous avons constaté que plus l'échantillon est tamisé, plus il est propre et bien réalisé. Par exemple, certains échantillons cylindriques tamisés à 12mm n'ont pas eu besoin de surfaçage, ce qui n'est jamais arrivé pour les tamisages à 30mm et à 50mm. On peut par exemple voir sur la photo ci-dessous, un échantillon cylindrique fait avec de la terre tamisée à 50mm dont la base est abîmée par la mauvaise disposition d'un gros granulat.



Figure 40 : Photo d'un échantillon cylindrique dont la base est abîmée par un gros granulat

La répétabilité des essais est une donnée très importante, en effet, si l'on veut pouvoir tirer des conclusions claires d'une campagne d'essais, une bonne répétabilité est nécessaire. Sans cela, il est beaucoup plus difficile de conclure car on ne peut pas affirmer que les différences de résultats sont dues aux variations du paramètre que l'on étudie, ou juste à une mauvaise répétabilité. Il y a plusieurs éléments qui influencent la répétabilité des essais, il y a notamment la bonne réalisation des échantillons. En effet, un échantillon où un côté est abîmé aura moins tendance à être résistant et donc à avoir une bonne répétabilité. Ainsi, pour avoir une bonne répétabilité, il est important d'avoir une bonne faisabilité, faisabilité qui est elle-même améliorée par un tamisage important comme on vient de le voir.

Le second élément important à prendre en compte pour avoir une bonne répétabilité c'est l'homogénéité des échantillons et donc respecter au maximum le critère établi par [DUFFAUT] qui dit que la plus petite dimension de l'échantillon doit au moins égale à 10 fois la taille du plus gros granulat. Nous avons représenté sur la figure suivant la résistance à la compression maximale de chaque échantillon cylindres réalisés lors de cette campagne en fonction de sa teneur en eau pour les tamisages à 12mm, 30mm et 50mm. Sur le graphique, nous avons utilisé le code suivant : une couleur par tamisage, un rond plein indique que l'essai a été réalisé par nous-mêmes lors de ce TFE, un rond vide indique que l'essai a été réalisé par Antoine PELTIER. Nous avons tracé les courbes de tendance pour les tamisages à 12mm et à 50mm (pas à 30mm car nous n'avons pas assez de données). On remarque que les courbes de tendance sont très proches ce qui indique que les résultats sont sensiblement les mêmes pour ces deux tamisages. Cependant, on peut remarquer que certains points orange et gris sont relativement éloignés des courbes de tendance ce qui peut indiquer une plus forte dispersion lorsque le tamisage est moins important. Il faut tout de même ne pas faire de conclusions trop hâtives, car cette dispersion peut être dû à d'autres raisons comme par exemple des échantillons pas suffisamment bien réalisés.

On peut donc conclure, dans le cas d'échantillons cylindriques, qu'il est toujours préférable d'utiliser de la terre tamisée suffisamment afin de pouvoir considérer l'échantillon comme homogène et ne pas avoir à se demander quel est le degré d'impact d'une absence de tamisage suffisant sur les résultats, même si l'impact peut être faible comme pour cette campagne d'essais. Un tamisage important est aussi intéressant du point de vue de la faisabilité car les échantillons plus tamisés sont plus faciles à réaliser et aussi plus propres.

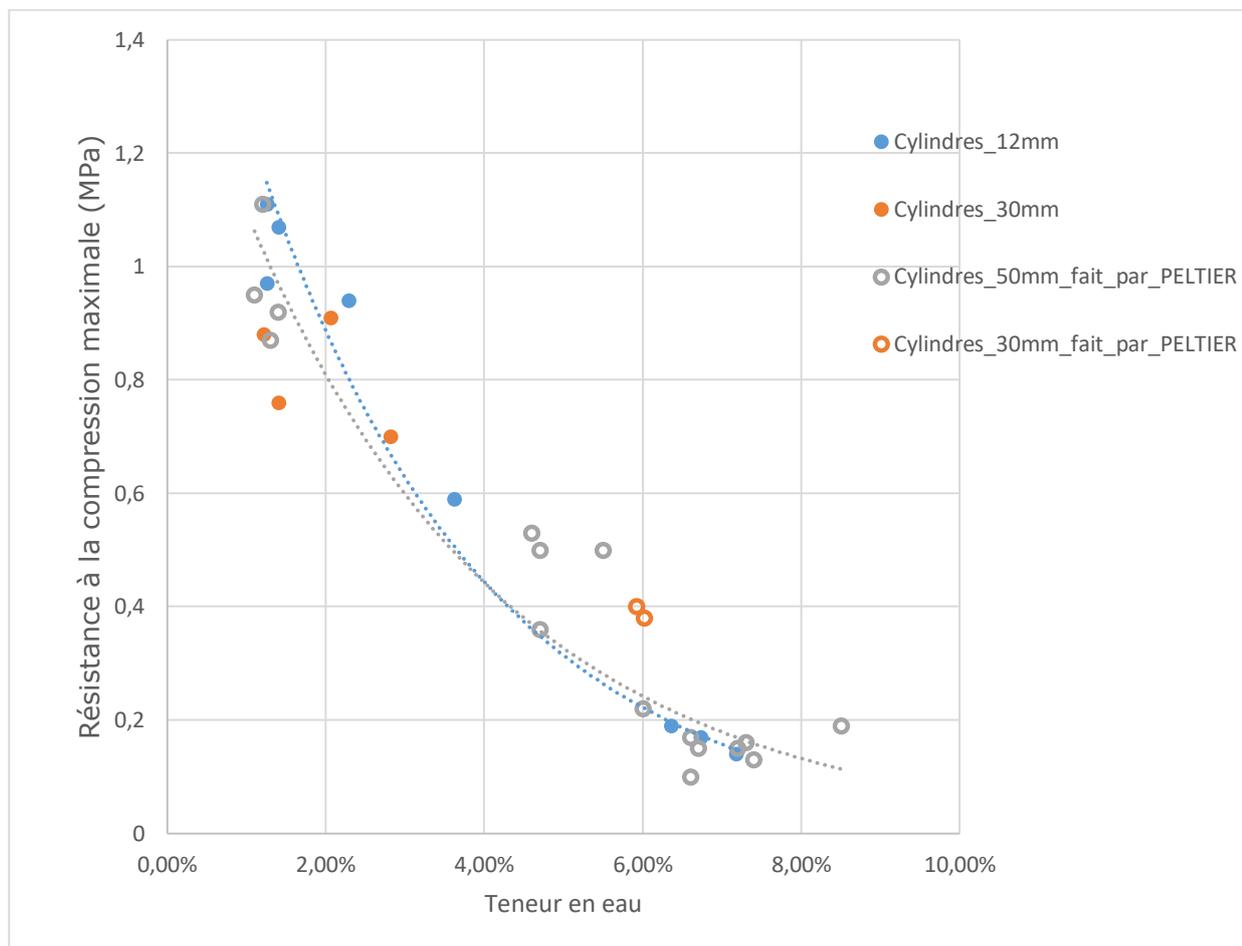


Figure 41 : Courbes de résistances à la compression des essais cylindriques en fonction de la teneur en eau

3.2.6 Manipulation des échantillons

La plupart des échantillons que nous avons fabriqués ont nécessités un surfaçage afin de corriger les défauts ou réparer les parties abimées. Nous allons d'abord voir certains points qui nous ont permis ou qui nous auraient permis d'éviter de trop abimer les échantillons.

La plupart des échantillons que nous avons abimés l'ont plutôt été à cause des manipulations que nous avons effectuées avec plutôt que dû à la disposition des gros granulats étant donné que nous avons fabriqué en majorité des échantillons avec de la terre tamisée à 12mm. Par exemple, après avoir fait un échantillon, nous l'emballions directement dans un film plastique dans le but d'attendre que tous les échantillons soient finis avant de commencer à tous les faire sécher en même temps. Si nous devions refaire une campagne d'essais, nous ne procéderions certainement pas de la même manière car le fait de manipuler un échantillon humide, et donc fragile, l'abime quasiment à chaque fois alors que cette même manipulation sur un échantillon sec a beaucoup moins de chance d'abimer l'échantillon. Nous recommandons donc, une fois l'échantillon fini, de le peser, et de le faire sécher directement. Nous recommandons aussi de faire très attention lors de l'emballage des échantillons car il s'agit d'une manipulation difficile.

Un autre point qui aurait pu être amélioré, c'est au niveau des essais de séchage. Dans notre cas, nous avons réalisé la mesure de la cinétique de séchage sur 6 échantillons différents avec une seule balance, ce qui voulait donc dire beaucoup de manipulation pour déplacer les échantillons et donc beaucoup de moment propice à la dégradation des échantillons. De plus, du fait de hasard de calendrier, avec les week-ends de 4 ou de 3 jours du fait des ponts et des jours fériés, nous avons été obligés d'emballer les échantillons avant ces longues pauses. En effet, nous n'aurions pas pu réaliser de mesures pendant trop de temps et les données auraient été incomplètes. Cela a entraîné de nombreuses manipulations difficiles en plus. Ainsi, si une autre campagne d'essais était à faire, nous aurions procédé différemment. En effet, nous avons remarqué que les résultats des essais de séchage donnaient des résultats identiques peu importe le tamisage ou la géométrie de l'échantillon, et que seul le type de séchage (1D ou 3D) avait une influence. Nous aurions donc réalisé qu'un essai de chaque type (1D et 3D), et nous aurions plutôt essayé d'utiliser un dispositif d'acquisition automatique de la masse comme représenté sur la figure suivante afin de ne pas avoir à réaliser trop de manipulations.



Figure 42 : Photo d'un dispositif d'acquisition de la masse (Photo MOLLION)

3.2.7 Surfaçage des échantillons

Comme nous l'avons vu, les échantillons sont manipulés de nombreuses fois, et cela peut entraîner dans la grande majorité des cas, la nécessité d'appliquer un surfaçage sur les échantillons avant de les tester.

Parmi l'ensemble des échantillons que nous avons fabriqués et cassés, seuls 7 sur 18 n'ont pas eu besoin d'un surfaçage pour la base et pour le haut de l'échantillon. Sur les 7, 4 ont nécessités seulement le surfaçage de l'un de leurs deux côtés. Les 3 échantillons restant n'ont pas eu besoin de surfaçage du tout. Parmi ces 3, il y avait un prisme. Plus haut dans ce rapport, il était écrit qu'il est quasiment impossible de ne pas avoir à surfacé un prisme, ce cas est donc arrivé une fois pour la simple et bonne raison que ce prisme a été réalisé puis cassé le lendemain sans que nous l'ayons décollé de la base en bois du coffrage, manipulation toujours fatale pour au moins l'un des coins.

Le surfaçage des échantillons permet de corriger de nombreux défauts, il est ainsi très utile par exemple quand une face de l'échantillon n'est pas plate, est bombé vers le haut ou le bas, quand les coins ou les bords de la face sont abimés, si l'échantillon n'est pas droit. La face inférieure, grâce au coffrage, est souvent bien plate, ce qui n'est pas le cas pour la face supérieure car cela nécessite de très bien réaliser les finitions du compactage.

Il existe différents types de surfaçage qu'il est possible de réaliser sur les échantillons, surfaçage à la terre argileuse, au plâtre à prise rapide, au plâtre à prise lente, mortier de ciment. Chacun des types de surfaçage présente des avantages et des inconvénients que nous allons détailler. Ces informations nous viennent principalement de notre expérience lors des essais de cette campagne.

Lors de ce TFE, nous avons eu à casser des gros blocs de terre dont le surfaçage en terre argileuse avait été avant le début de mon TFE. Je n'ai donc pas assisté personnellement à sa mise en œuvre mais d'après Stéphane COINTET, la mise en œuvre de ce type de surfaçage n'a rien de difficile, la prise n'est pas trop rapide et son application n'humidifie pas trop le pisé en dessous du surfaçage. Cependant, lorsque nous avons voulu casser les blocs, nous avons remarqué que le séchage de l'eau avait entraîné un retrait du surfaçage plus important au centre de la face du bloc ce qui avait donc créé une cuvette. Nous avons donc dû refaire un surfaçage par-dessus pour compenser.

Les surfaçages au plâtre à prise rapide ou lente se ressemblent fortement. Les deux surfaçages humidifient fortement la zone de terre juste en-dessous du surfaçage et nécessite donc de laisser les échantillons sécher 1 ou 2 jours après pour que la teneur en eau de cette zone diminue à nouveau. La principale différence entre les deux vient de la vitesse de prise. Cette différence est tout de même un avantage intéressant pour celui à prise lente car elle permet de bien mettre en place le surfaçage sans se précipiter et permet aussi d'avoir le temps d'en corriger les défauts. Cependant, le plâtre à prise rapide est plus solide que l'autre qui craque donc légèrement pendant le chargement et fait donc apparaître des légers sauts dans la courbe de contrainte/déformation. Cet inconvénient du plâtre à prise lente est relativement peu gênant. C'est donc ces avantages plus ses relativement faibles inconvénients qui nous a fait choisir le plâtre à prise lente pour nos échantillons.

L'importance du surfacage a notamment été mis en lumière par [BUI] lors de sa thèse. Il a d'abord testé en compression simple, 3 série d'échantillons dont les surfacages avaient été réalisés avec un surfacage au mortier de ciment pas parfaitement plat. Il a ensuite réalisé une nouvelle série d'essais où la densité sèche des échantillons avait augmenté (1.9 pour les premières séries contre 1.94 pour la dernière) et où il avait amélioré le surfacage en passant cette fois une deuxième couche de surfacage appliquée avec une règle en bois afin d'avoir un surfacage parfaitement plat. Au niveau des résultats, il a trouvé une augmentation de la résistance à la compression de 60% (1.36MPa contre 0.84MPa) pour la série avec le surfacage amélioré. Il est vrai que le surfacage n'est pas le seul facteur qui explique cette augmentation mais on peut supposer qu'il a tout de même une part non négligeable dans l'augmentation de la résistance à la compression surtout que l'augmentation de la densité n'est pas si importante.

A chaque essai que nous avons réalisé, nous avons noté chaque défaut de l'échantillon ou remarque que nous pouvions faire son état avant essai ou sur le déroulement de l'essai en lui-même. Sur la figure ci-dessous, nous avons représenté les résistances à la compression de tous les petits échantillons que nous avons réalisés (prismes tamisés à 12mm, cylindres tamisés à 12 et 30mm) en fonction de leur teneur en eau d'essai. Sur ce graphique, nous avons entouré en rouge tous les points des essais sur lesquelles nous avons constaté un défaut de surfacage (surfacage bombé vers le haut dans quasiment tous les cas). On peut immédiatement remarquer que tous les points situés bien en dessous des courbes de tendance sont entourés. Il ne s'agit sûrement pas de la seule explication à la faible résistance à la compression de ses essais mais on ne que constater ces essais et les essais de BUI vont tous dans le même sens et témoignent donc du fort impact négatif que peut avoir un mauvais surfacage sur la résistance à la compression.

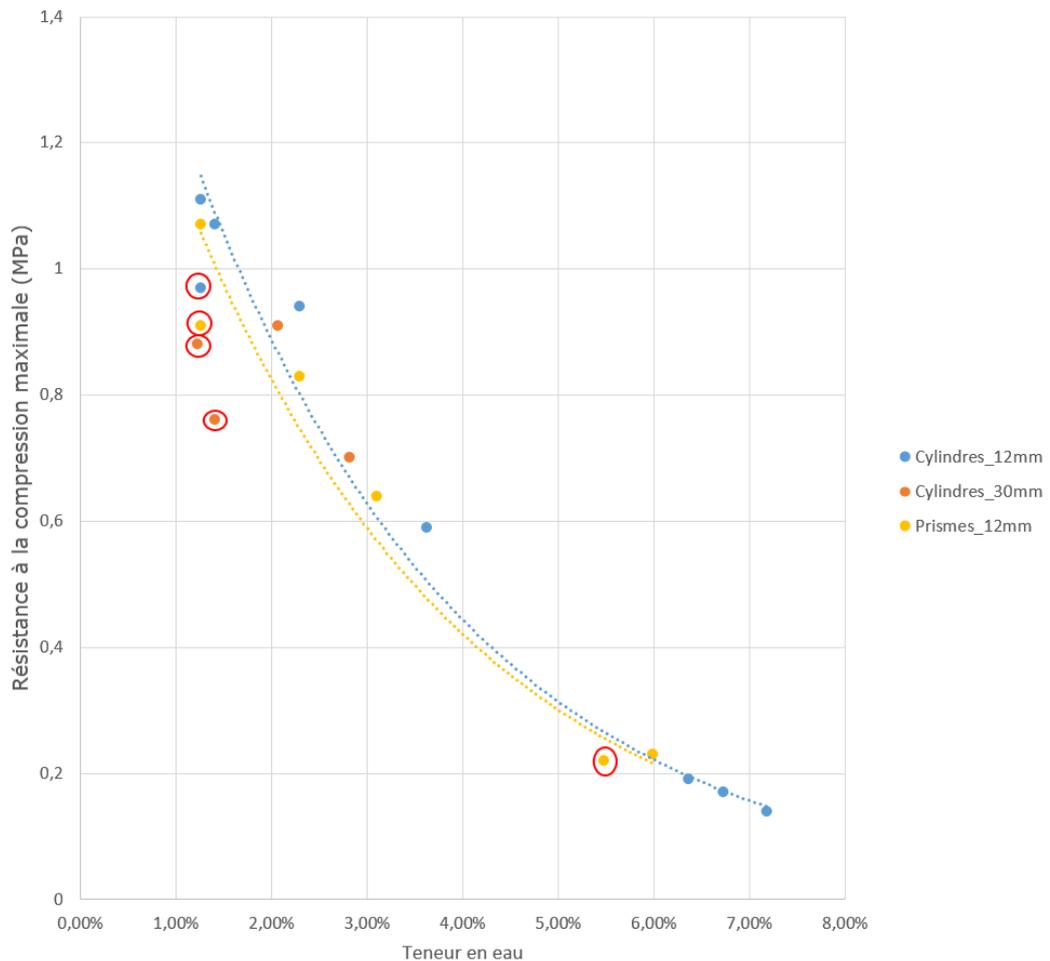


Figure 43 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en eau pour tous les petits échantillons

Tous nos essais qui présentaient un défaut de surfaçage avait un surfaçage trop bombé vers le haut, sauf un, dont le surfaçage n'avait vraiment pas été bien réussi car il était bancal comme on peut le voir sur la photo ci-dessous. La courbe contrainte/déformation de l'échantillon que l'on peut voir sur la figure ci-dessous montre bien que l'échantillon ne s'est pas comporté comme un échantillon parfaitement réalisé et on comprend effectivement pourquoi la valeur de la résistance à la compression de cet échantillon était bien inférieure à la courbe de tendance.

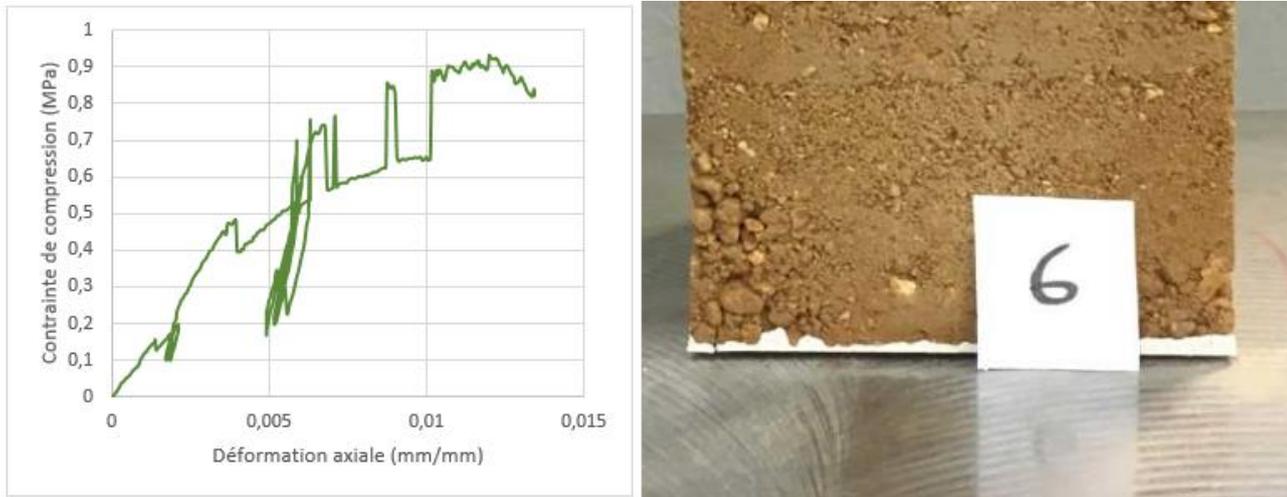


Figure 44 : Photo et courbe contrainte/déformation de l'échantillon dont le surfaçage était bancal

L'importance de la bonne réalisation du surfaçage vient donc d'être mis en évidence. Un surfaçage bien réalisé doit être bien plat, et il ne faut pas hésiter à perdre un peu de temps en refaisant une couche de surfaçage par-dessus un surfaçage mal réalisé afin de le corriger. Sur la figure, on peut voir comment il est possible de réaliser un bon surfaçage en réalisant un coffrage sur les côtés de l'échantillon avec de planches de bois ou un collier en métal en fonction de la géométrie de l'échantillon, et en utilisant une règle au-dessus en allant préalablement vérifié le parallélisme du coffrage avec le support afin d'avoir un échantillon bien droit et bien plat à ses extrémités.

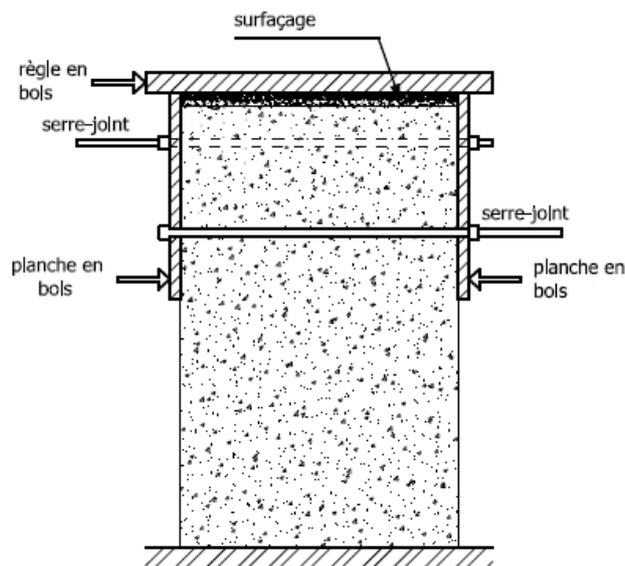


Figure 45 : Schéma de principe de réalisation d'un bon surfaçage réalisé par [BUI]

3.2.8 Utilisation des résultats des essais de séchage

Dans le cadre de la construction, la connaissance de la cinétique de séchage peut se révéler très utile. En effet, on sait que la résistance à la compression d'un échantillon dépend énormément de sa teneur en eau au moment de l'essai. Souvent, lors d'une construction en pisé et comme c'est le cas pour l'immeuble de Confluence, un bloc qui vient d'être fabriqué est immédiatement mis en place. Or ce bloc est à teneur en eau de fabrication qui est une teneur en eau élevée à laquelle la résistance à la compression est faible. Il est donc important de savoir combien de temps il faut attendre pour que le bloc sèche suffisamment pour que sa résistance à la compression augmente et qu'elle soit suffisante pour permettre à ce bloc de supporter les éléments de construction qui viendront se positionner au-dessus de lui (autre bloc, plancher, ...). Ainsi, si l'on connaît la cinétique de séchage des blocs, la teneur en eau de fabrication et l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en eau, on peut savoir exactement à quel moment les blocs tout juste mis en place, seront capable de supporter le poids des suivants. La connaissance de l'ensemble de ces éléments permettrait ainsi l'optimisation de l'avancement du chantier. Ce point est relativement important, surtout quand on sait que les retards dans les délais coûtent cher dans les chantiers de construction et aussi quand on sait que la mise en œuvre du pisé dans la région lyonnaise ne dure pas toute l'année, mais seulement jusqu'à octobre à cause du gel notamment, et qu'il est donc impératif de finir un chantier avant cette limite sous peine de devoir patienter jusqu'à avril pour pouvoir le continuer.

Il existe plusieurs façons de procéder afin de connaître cette cinétique de séchage. La première consiste à évaluer cette cinétique par des essais de séchage sur un ou plusieurs blocs standards de dimension la plus proche possible de l'ensemble des blocs utilisés pour le chantier. On couple ensuite ces essais de séchage avec des essais de compression simple à différentes teneurs en eau soit sur les mêmes types de blocs, soit sur des petits échantillons de laboratoire. Dans ce dernier cas, cela nécessite de connaître les liens qu'il existe entre les échantillons de laboratoires et les blocs de grandes dimensions de chantier. Ce dernier point est par ailleurs l'un des objectifs de ce TFE qui sera développé dans la partie suivante.

La seconde façon de procéder est de réaliser les essais de cinétique sur des petits échantillons de laboratoire, puis de réaliser une modélisation numérique de ce séchage avec le logiciel COMSOL par exemple. L'utilisation du logiciel nécessite d'avoir au préalable déterminé quelques paramètres de la terre nécessaire à la modélisation comme les courbes de rétention d'eau ou la perméabilité à la vapeur, grâce à différents essais comme les essais de perméabilité à la vapeur ou de remontée capillaire. Ensuite, on fait en sorte que les courbes obtenus par le logiciel et par les essais de séchage se superposent afin de déterminer d'éventuels paramètres manquants ou de valider leur valeur. Une fois tous les paramètres déterminés et validés, on peut changer la géométrie à tester dans la modélisation en mettant celle des blocs de chantier et ainsi déterminer leur cinétique de séchage par logiciel. Ensuite, on couple ces essais de séchage avec des essais de compression simple à différentes teneurs en eau sur des petits échantillons de laboratoire. Enfin, on utilise les liens qu'il existe entre les échantillons de laboratoire et les blocs de grandes dimensions de chantier pour déterminer le comportement des gros blocs vis-à-vis de leur teneur en eau.

Sur la figure ci-dessous, nous avons représenté les courbes de séchage que nous avons obtenus pour les essais de séchage en 3D sur différents types d'échantillons. Les valeurs de teneur en eau des échantillons ont été ramenés à leurs teneur en eau équivalente pour un tamisage à 50mm. On remarque rapidement qu'il y a deux phases différentes de séchage, la partie où la teneur en eau est supérieure à 4% d'un côté où le séchage est très rapide, et la partie où la teneur en eau est inférieure à 4% où le séchage devient progressivement de plus en plus lent.

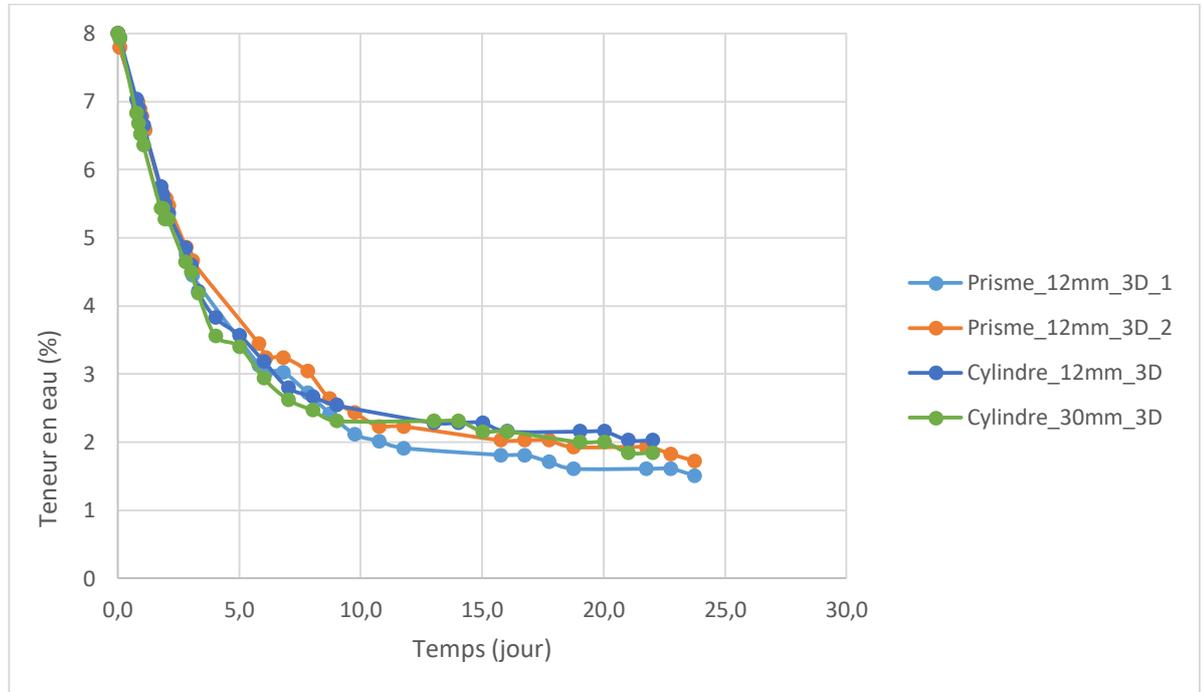


Figure 46 : Courbes des séchages en 3D

Sur la figure ci-dessous, nous avons représenté les résultats des essais de compression des petits échantillons que nous avons réalisés lors de ce TFE. Nous avons réuni ces résultats par teneur en eau en utilisant la limite de teneur en eau de 4% que nous avons trouvé sur les essais de séchage. Nous manquons malheureusement d'essais dans la plage de teneur en eau de 4% à 5%, mais nous pouvons remarquer en traçant les courbes de tendance des deux groupes, que leur pente et donc leur comportement est différent, et que la limite entre ces deux comportements est située dans la zone de la limite des deux phases de séchage, à savoir aux alentours des 4%. On remarque ainsi que la résistance à la compression augmente fortement avec la diminution de la teneur en eau une fois que le palier des 4% de teneur en eau a été atteint et que cela concorde avec les résultats des essais de séchage. En revanche, avant ce palier des 4% de teneur en eau, l'augmentation de la résistance à la compression se fait plus lentement.

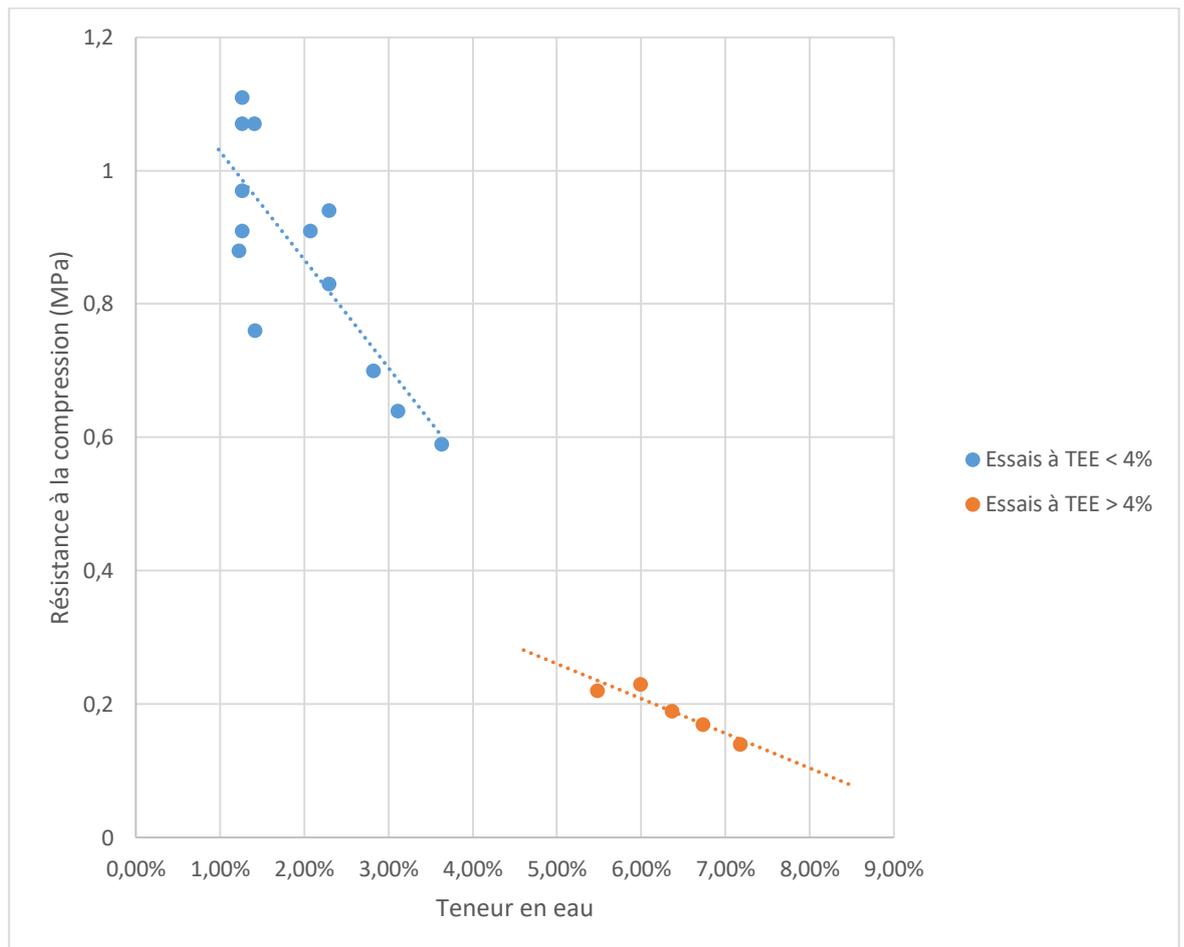


Figure 47 : Résultats des essais de compression réunis par groupe de teneur en eau

On s'intéresse aussi aux courbes de rétention d'eau comme celle représentée sur la figure ci-dessous et qui correspond à la courbe obtenue sur les mesures de succion réalisée sur un cube de pisé de 16cm de côté. Nous avons choisi d'utiliser la courbe de rétention de ce cube car son tamisage (12mm) est suffisant pour considérer le cube comme homogène et que son allure ne présentait pas de défauts contrairement aux autres essais sur les autres cubes. La raison de ces défauts était probablement des erreurs de mesures, facilement explicables quand on sait que l'on mesure des différences de masse de feuilles papiers filtre de moins d'un gramme. Sur la courbe de rétention d'eau, nous remarquons aussi la présence de deux phases dont la séparation se trouve à environ 5%. La séparation pour les courbes de séchage était plutôt vers les 4% et cette différence dans la valeur de changement de phase pourrait s'expliquer par le fait que l'on a mesuré la succion en surface du cube, zone plus sèche que le centre du cube, alors que la valeur de teneur en eau est mesurée sur la totalité du cube. Pour ne pas avoir cette différence, il aurait sûrement été préférable que l'on laisse les échantillons s'homogénéiser plus longtemps avant de réaliser les essais dessus, la teneur en eau de surface aurait ainsi eu plus le temps de s'équilibrer avec celle du centre et donc de se rapprocher de la teneur en eau moyenne.

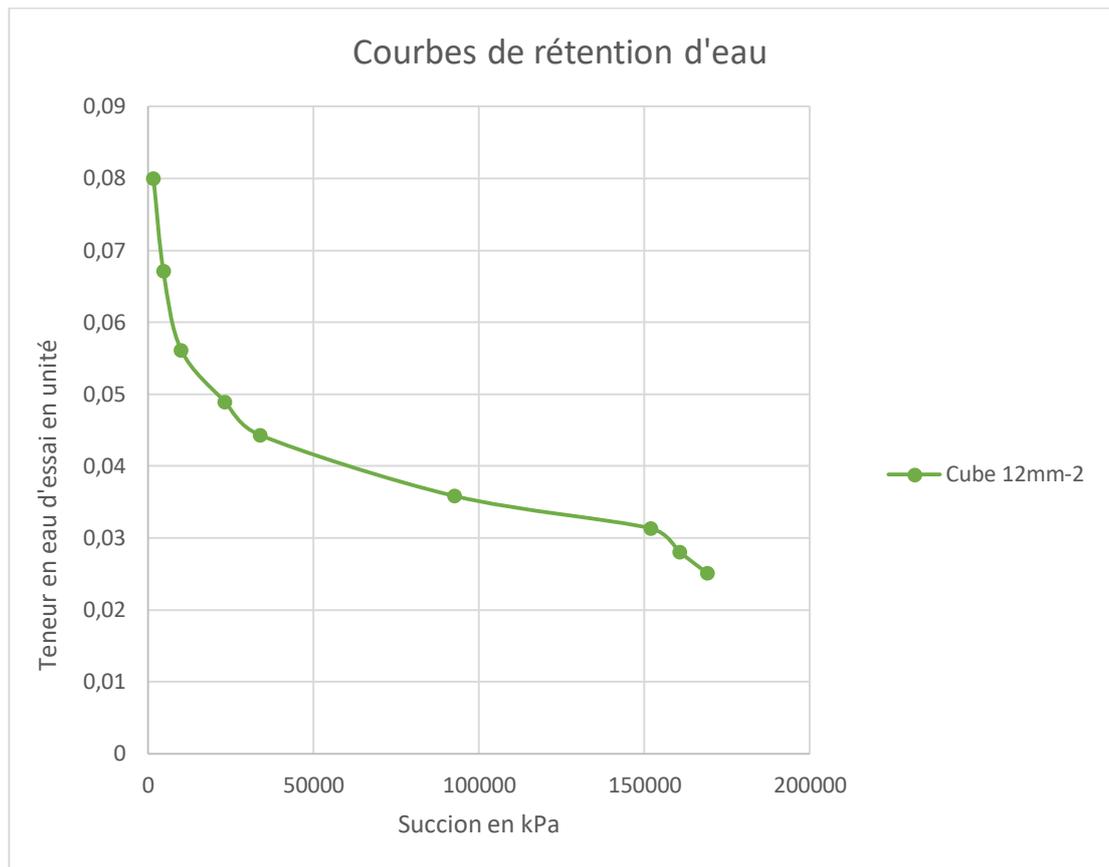


Figure 48 : Courbes de rétention d'eau pour un cube tamisé à 12mm

La première phase de la courbe de séchage correspondrait à la phase d'évacuation de l'eau liquide présente dans la porosité ouverte du pisé, ce qui expliquerait donc l'évacuation facile et rapide de l'eau de l'échantillon et donc la diminution rapide de la teneur en eau. La seconde phase débiterait quant à elle à la fin de l'évacuation de cette eau, et l'eau qui s'échapperait désormais de l'échantillon pendant cette phase serait l'eau prisonnière dans la porosité fermée de l'échantillon. Cette eau s'échapperait désormais par diffusion de vapeur et non plus par diffusion d'eau liquide.

Ainsi, les pentes des deux phases différentes seraient chacune régit par la valeur d'un coefficient différent, à savoir le coefficient de perméabilité à l'eau liquide pour la première phase et le coefficient de résistance à la vapeur pour la deuxième phase. Ces deux coefficients font notamment partis des coefficients nécessaires lorsque l'on veut trouver les courbes de séchage par modélisation numérique.

En analysant les courbes de succion en fonction de la teneur en eau et les courbes de résistance à la compression en fonction de la teneur en eau, on peut remarquer l'importance du rôle de la succion dans la valeur de la résistance à la compression. En effet, pour des teneurs en eau élevée et jusqu'à 4/5%, on remarque que la succion augmente très peu avec la diminution de la teneur en eau, et que de la même manière, la résistance à la compression augmente elle aussi très peu. En revanche, dès qu'on a passé le cap des 4/5%, on voit que la succion augmente fortement avec la diminution de la teneur en eau, et que la résistance à la compression augmente elle aussi fortement avec cette diminution. Cette constatation rejoint ce qui avait été évoqué dans la partie bibliographique, à savoir que la succion entraîne une attraction entre les grains car ces mêmes grains attirent et sont attirés par l'eau qui les relie, le matériau aura donc tendance à se rigidifier cela aura pour effet l'augmentation de la résistance globale d'un échantillon de pisé.

3.2.9 Modélisation du séchage par le logiciel COMSOL

Dans la partie précédente, nous avons expliqué de quelles manières il était possible d'utiliser un logiciel afin de modéliser le séchage, et ainsi de pouvoir prévoir la durée de séchage nécessaire pour que les blocs de chantier atteignent une résistance suffisante pour continuer la construction. Et ce, en utilisant uniquement les résultats de différents essais réalisés sur des petits échantillons. Lors de ce TFE, nous avons donc tenté d'effectuer des modélisations pour les séchages en 1D et en 3D, cependant les essais en 3D n'ont pas pu aboutir à des résultats exploitables vraisemblablement par manque de temps ou d'ordinateurs suffisamment puissants.

L'équation que nous avons utilisée pour le calcul est issue de l'équation de conservation de la masse et s'écrit au final :

$$\rho_{ms} \frac{\partial w}{\partial HR} \frac{\partial HR}{\partial t} = \text{div} \left(\frac{\mu_{air}}{\mu} \cdot P_{vsat} \cdot \text{grad}(HR) + D_p \cdot K_r \cdot \text{grad}(HR) \right)$$

Où ρ_{ms} est la masse volumique sèche, w la teneur en eau, HR l'humidité relative, μ_{air} le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air (homogène à des secondes), μ le coefficient de résistance à la vapeur du matériau (sans unité), P_{vsat} la pression de vapeur saturante, K_r le coefficient de perméabilité relatif et D_p un coefficient dépendant de la conductivité hydraulique du matériau saturé (noté D_{ww} en m^2/s) suivant la relation :

$$D_p = \rho_{ms} D_{ww} \frac{\partial w}{\partial HR}$$

Dans notre cas, l'ensemble de ces paramètres avaient été déterminé au préalable par diverses expériences cependant nous voulions vérifier les valeurs que nous avons pour μ et D_{ww} . D_{ww} régit le comportement du séchage pour la 1^{ère} phase où c'est l'eau liquide qui s'échappe du matériau, μ régit le comportement de la seconde phase quand c'est l'eau piégé qui s'échappe par transfert de vapeur.

Pour réaliser cette modélisation, nous avons dû mettre bout à bout les courbes de rétention d'eau obtenues lors de ce TFE et par Antoine PELTIER afin d'avoir la courbe complète de HR en fonction de w . Nous avons modélisé l'échantillon en 1D. La modélisation a été réalisée sur 30 jours de séchage avec une sortie toute les demi-journées.

Dans un premier temps, nous avons fait varier la valeur de D_{ww} pour voir laquelle permet à la courbe de la modélisation de se rapprocher le plus de la courbe moyenne des deux séchages 1D. On a représenté ces courbes sur la figure ci-dessous et l'on constate que la courbe correspondant à la valeur $D_{ww} = 0.7 m^2/s$ correspond le mieux. Dans un second temps, nous avons lancé des simulations avec le D_{ww} trouvé et en faisant varier μ . Nous obtenons le graphe de la figure 48. Il apparaît que les courbes pour les valeurs de $\mu = 7$ et de $\mu = 10$ sont très proches de la courbe de la moyenne des séchages. Et donc que la valeur réelle de μ se trouve entre 7 et 10. Comme il s'agissait des valeurs qui avaient été trouvées par des essais fait au préalable, la modélisation confirme donc ces essais. L'étape suivante aurait été de faire la modélisation 3D afin de bien vérifier que toutes les valeurs sont correctes, et on aurait pu ensuite passer à la modélisation du séchage des blocs de chantier.

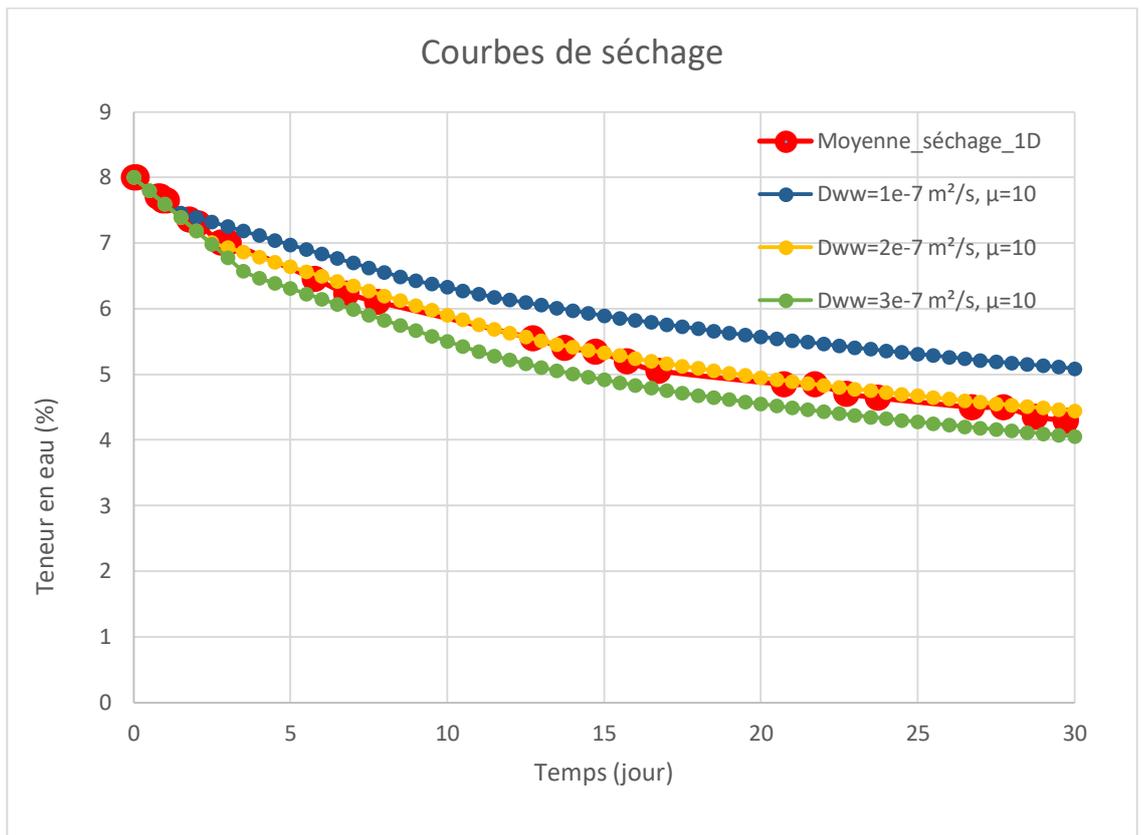


Figure 49 : Courbes séchages avec variations de D_{ww} , μ fixé

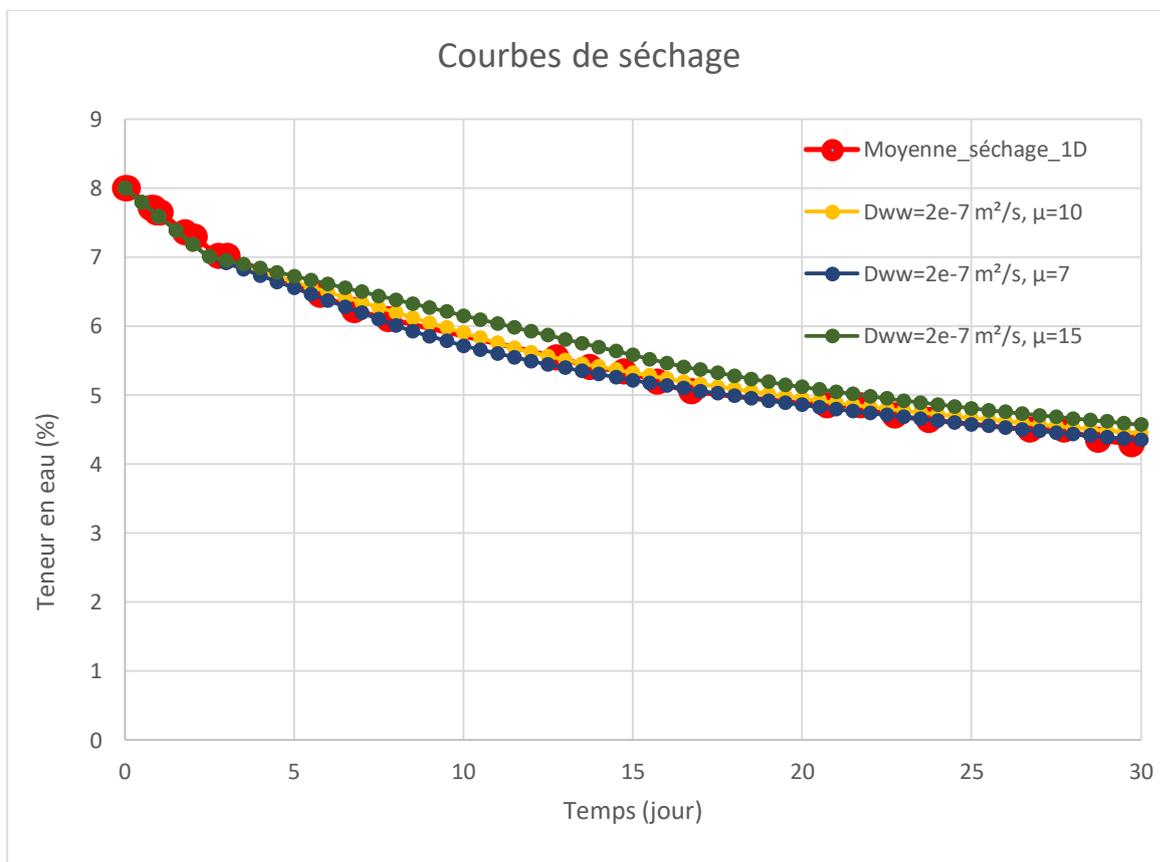


Figure 50 : Courbes de séchage avec variation de μ , D_{ww} fixé

3.3 Etude des liens entre les échantillons de laboratoire et le comportement réel des structures en pisé

3.3.1 Introduction

Cette seconde et dernière étape de l'analyse des liens qu'il existe entre les résultats des essais de laboratoire qui ont été réalisés lors de la campagne d'essai commencée par Antoine Peltier et le comportement réel des structures en pisé qui sera représenté par des essais réalisés en laboratoire sur des blocs de grandes dimensions (30x30x60cm³) réalisés sur chantier par Nicolas Meunier de la même manière que les blocs servant à la construction de l'immeuble de bureau. Nous utiliserons aussi pour cette analyse les résultats des blocs et des échantillons réalisés avec l'autre terre qui vient du même endroit et qui était la terre initialement choisie pour la réalisation du chantier.

L'intérêt de cette analyse vient du fait qu'il est toujours plus complexe de fabriquer et de tester des blocs de grandes tailles que des échantillons de petites tailles que l'on peut facilement réaliser en laboratoire. Ainsi, le fait de pouvoir connaître le comportement de blocs de grandes tailles en étudiant uniquement le comportement de petits échantillons de laboratoires serait un grand pas vers une utilisation plus importante du pisé étant donné la difficulté de caractériser le comportement des structures réelles qui est un véritable frein à l'utilisation du pisé.

Les échantillons de grandes tailles ont toujours été réalisés avec de la terre tamisée comme sur chantier (50mm) alors que nous avons testé trois tamisages différents pour les petits échantillons. L'objectif était de voir si un tamisage plus important pour les petits échantillons permettait ou non une représentation plus fidèle du comportement des gros blocs.

Il est important de noter, que tous les échantillons et blocs que nous avons testés et dont nous allons analyser les résultats, ont un élancement de 2. Cela nous permet donc de nous affranchir de la considération de l'impact de l'élancement sur les résultats de la résistance à la compression que nous avons vu lors de l'étude bibliographique.

3.3.2 L'ensemble des résultats des expériences réalisées

La figure ci-dessous représente la résistance à la compression maximale de tous les essais réalisés lors de ce TFE et par Antoine PELTIER en fonction de leur teneur en eau d'essai. Sur ce graphique nous avons donc représenté les quatre types de petits échantillons réalisés (prismes_12mm, cylindres_12mm, 30mm, 50mm) et les blocs de grandes dimensions. Nous avons utilisé le code suivant : une couleur par tamisage, les ronds pour les essais cylindriques, les carrés pour les essais prismatiques, si l'élément est plein c'est que l'essai a été réalisé par nous-même, s'il est vide c'est qu'il a été réalisé par Antoine PELTIER. On a aussi représenté sur le graphique, les courbes de tendance des échantillons tamisés à 12mm et de ceux tamisés à 50mm. On remarque rapidement qu'il y a beaucoup de blocs ou d'échantillons avec une résistance à la compression très élevée pour leur teneur en eau dans les essais réalisés par Antoine PELTIER.

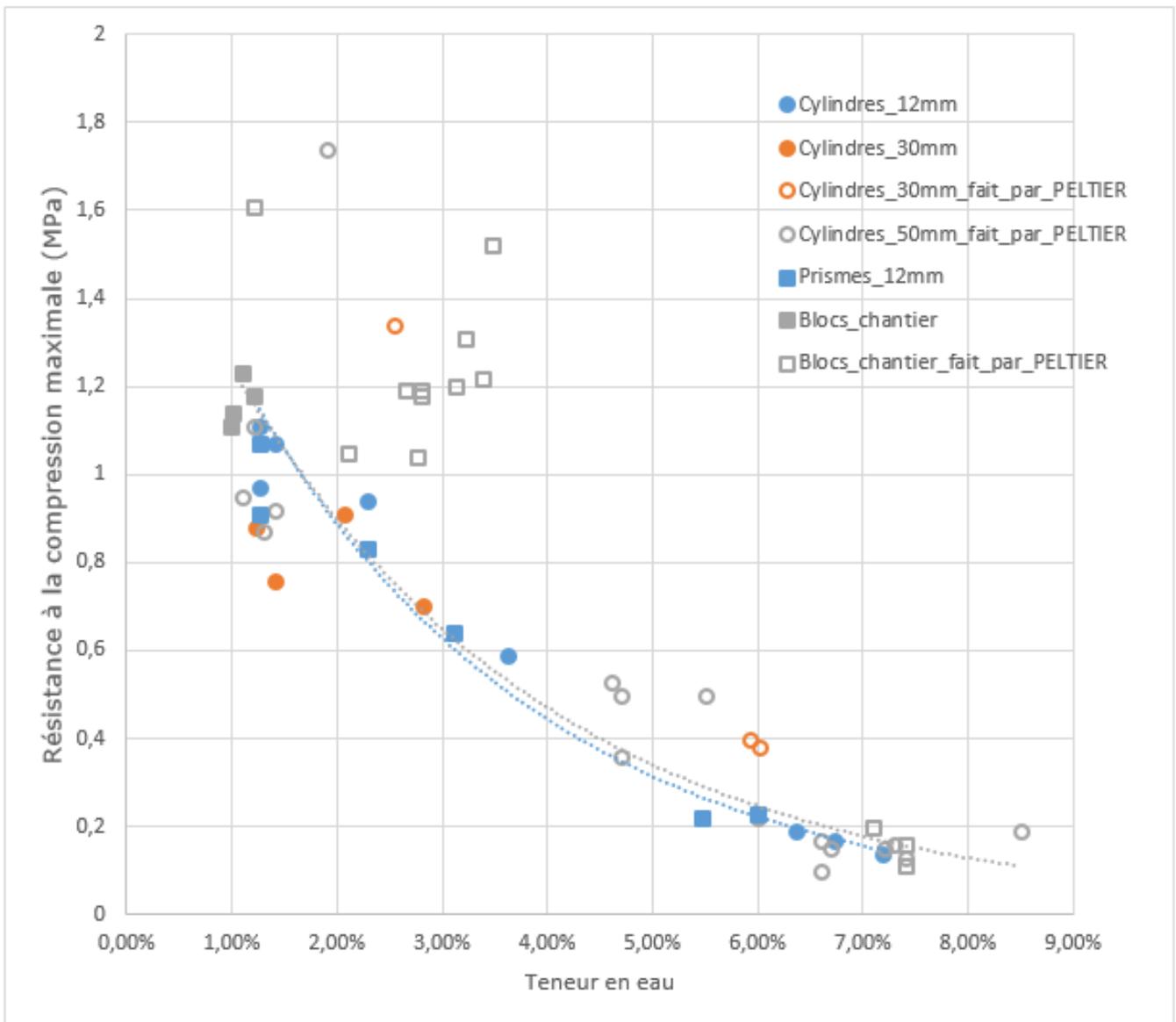


Figure 51 : Résistance à la compression de l'ensemble des essais en fonction de la teneur en eau

Comme évoqué au paragraphe précédent, on remarque que tous les essais que nous avons réalisés lors de ce TFE sont soit proches de la courbe de tendance, soit en-dessous en partie à cause d'un défaut de surfaçage. En revanche, les seuls essais qui se trouvent de beaucoup au-dessus de la courbe sont uniquement des essais qui ont été réalisés par Antoine PELTIER avant le début de mon TFE. D'un côté, il est facile d'envisager et d'expliquer une valeur inférieure à cause de défauts de l'échantillon, autant il est beaucoup plus difficile d'expliquer comment des résultats peuvent être autant au-dessus des courbes de tendance. Nous avons essayé d'identifier plusieurs raisons qui pourraient expliquer de tels résultats. Une explication pourrait être le fait qu'une partie des échantillons dont les valeurs de résistance sont très élevées ont été séchés à l'étuve à 50°C et non à l'air libre comme lors de ce TFE. Il est possible que ce type de séchage rapide soit responsable d'une forte hétérogénéité de teneur en eau dans les échantillons. Cette hétérogénéité aurait par la suite pu entraîner une erreur dans la mesure de teneur en eau d'essai des échantillons ou même changer légèrement le comportement des échantillons.

Pour l'analyse des résultats que nous allons faire dans ce TFE, nous avons choisi de ne pas prendre en compte les résultats des essais dont les valeurs de résistance à la compression étaient trop élevées. En effet, nous n'avons pas réalisé ces essais nous-même, impossible donc de comprendre clairement la source de ces valeurs. De plus, les valeurs de ces essais sont également très dispersées, il est donc impossible d'en faire ressortir un quelconque comportement. Ainsi, pour l'analyse des résultats, nous allons donner la priorité aux essais que nous avons nous-même réalisés et aux essais d'Antoine PELTIER dont les valeurs ne sont pas trop élevées par rapport au comportement de nos propres essais. Nous nous baserons également sur les essais réalisés avec la terre n°2.

3.3.3 Exploitation des résultats obtenus avec la terre n°2

Lors de l'analyse que nous allons réaliser, nous allons nous intéresser à l'impact du tamisage sur les petits échantillons en comparaison avec les gros blocs. Cependant, avant de nous intéresser aux essais de la campagne, nous allons voir ce que l'on peut observer pour la terre n°2 de Confluence dont tous les essais effectués, gros blocs comme petits échantillons, ont été réalisés avec le même tamisage, et dont les plus gros granulats étaient de moins de 20mm. Tous les blocs et cylindres avaient été réalisés sur chantier par Nicolas MEUNIER. Les cylindres avaient été testés par Stéphane COINTET avant le début de mon TFE, les blocs ont quant à eux été cassés pendant mon TFE. Nous avons réalisé le début de la courbe granulométrique sur les gros blocs que nous avons en notre possession et dont les résultats sont les suivants :

Passant en mm	20	16	14	12,5	10
Pourcentage	100	98,0	95,0	92,0	84,0

Reprenons la figure ci-dessous où sont représenté les valeurs des résistances à la compression de chacun des échantillons et blocs réalisés avec la terre n°2 en fonction de la teneur en eau.

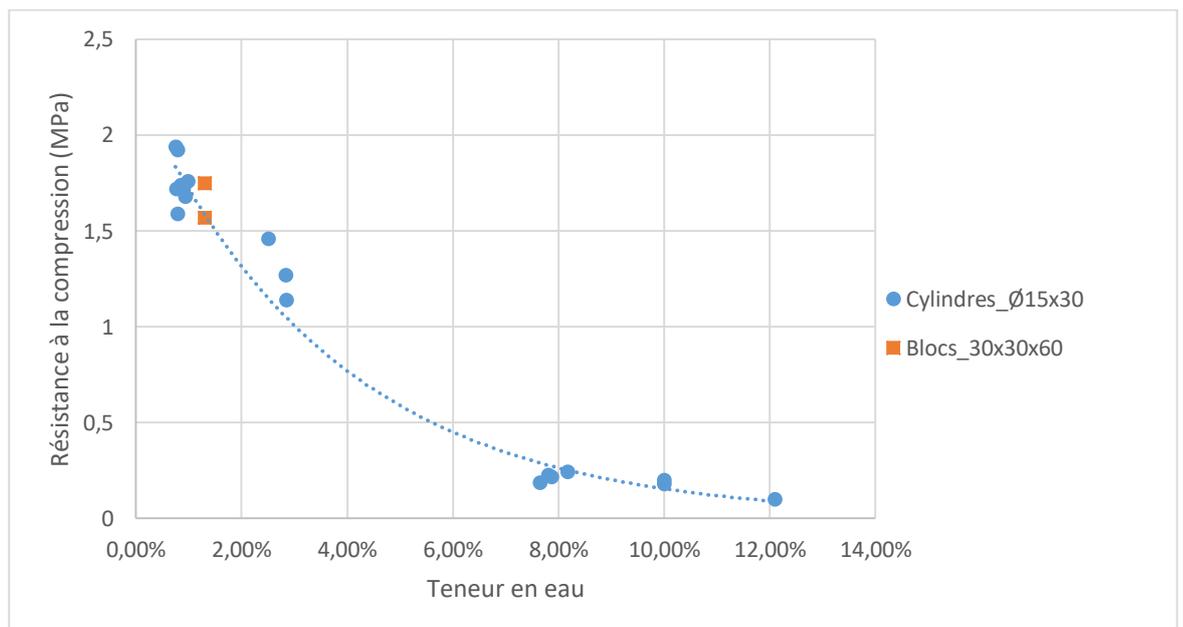


Figure 52 : Résistance à la compression des essais réalisés avec l'autre terre

On remarque rapidement qu'il n'y a quasiment aucune différence notable entre les valeurs des gros blocs et les valeurs des échantillons de laboratoires. Il est vrai cependant qu'un faible nombre d'essais de gros blocs a été réalisés et uniquement sur des blocs secs. Cela représente un frein à la mise en place de conclusion mais nous pouvons tout de même en faire les analyses en restant toutefois prudent.

Lors de l'étude bibliographique, nous avons mentionné une étude réalisée par [MANIATIDIS] où ont été comparés les résultats de la casse de petits et de grands échantillons à élancement similaire. Lors de son étude expérimentale, il avait trouvé que la résistance à la compression de petits cylindres était supérieure à celle de plus grands cylindres. Il avait, par la suite, attribué ce résultat à l'hétérogénéité des grands échantillons à la fois au niveau de la présence de gros granulats en plus grande quantité au centre de l'échantillon et aussi à une différence de teneur en eau entre le centre de l'échantillon, plus humide, et les extérieurs.

Dans notre cas, les deux gros blocs ont été cassés pendant mon TFE, nous avons donc pu mesurer les paramètres responsables des différences de résistance selon l'auteur de l'étude évoquée précédemment. Ainsi, pour chaque bloc, nous avons mesuré la teneur en eau de la terre après essai en deux endroits différents, un au centre du bloc et l'autre sur les côtés du bloc. Pour les deux blocs, nous avons constaté une différence de moins de 0,5% en termes de teneur en eau entre le centre et les côtés des blocs. Trop faible pour être considéré comme une hétérogénéité de teneur en eau. De même, nous avons mesuré la granulométrie sur les côtés et sur le centre de chaque bloc, et nous avons aussi trouvé des résultats similaires entre les côtés et le centre, ne traduisant donc pas nous plus la présence d'une hétérogénéité au niveau de la disposition des gros granulats.

On s'intéresse désormais à la taille des granulats par rapport à la taille des échantillons cylindriques testés pour voir si l'on peut considérer ces échantillons comme homogène vis-à-vis de l'affirmation de [DUFFAUT] disant que le ratio taille de la plus petite dimension sur taille du plus gros granulat qui doit être supérieur ou égal à 10. Les échantillons étant de dimension Ø15x30cm, leur plus petite dimension est donc de 15cm. On remarque en regardant les valeurs de la granulométrie que nous avons réalisée, que les granulats de plus de 15mm représentent moins de 5% de la composition de la terre (vraisemblablement 3,5% si l'on fait une interpolation entre les valeurs que l'on connaît). Ainsi, on remarque que l'on est très proche de la valeur du ratio donné par [DUFFAUT] et donc que l'on peut quasiment considérer les échantillons cylindriques comme homogènes.

Ainsi, les résultats que nous avons obtenus (résultats similaires et absence d'hétérogénéité), ne permettent ni d'infirmer ni d'affirmer de la véracité des analyses de [MANIATIDIS]. En revanche, dans le cadre de notre étude, à savoir, à élancement constant, en l'absence d'hétérogénéité de teneur en eau ou de proportion de gros granulats et pour un tamisage quasiment suffisant pour considérer les petits échantillons comme homogène, nos résultats nous permettent de penser que dans ces conditions, les gros blocs et les petits échantillons se comportent de la même manière et donnent donc des résultats de résistance à la compression similaire pour des teneurs en eau faibles. Ainsi, il serait donc possible de prédire le comportement réel des structures en pisé en étudiant uniquement le comportement de petits échantillons quand certaines conditions énoncées précédemment sont respectées.

Les résultats ainsi obtenus et les conclusions associées sont très intéressants pour le développement de la compréhension du comportement du pisé. Il est cependant nécessaire, au vu du faible nombre de valeur disponible pour les gros blocs, de réaliser de nouvelles mesures dans le cadre de nouvelles études, plus complètes, avec des terres différentes afin de pouvoir poser des conclusions solides.

3.3.4 Exploitation des résultats obtenus avec la terre utilisée sur chantier

Maintenant que nous avons vu ce qu'il était possible d'analyser à partir de la terre n°2, nous allons désormais nous focaliser la terre qui nous a servi pour la fabrication des éprouvettes qui ont été testés lors de cette campagne d'essais.

Afin d'expliquer les différences qu'il existait entre la valeur de la résistance à la compression des échantillons ayant des teneurs en eau très proche, nous nous sommes intéressés à l'impact de la densité sèche. Dans la bibliographie, nous avons vu que l'augmentation de la densité sèche entraînait une augmentation de la résistance à la compression. Dans le cadre de nos essais, nous avons essayé de voir si ces différences de densité étaient corrélées avec des différences de résistance à la compression mais nous n'avons rien trouvé de concluant, les courbes que nous avons tracées dans ce but montraient juste des nuages de points sans possibilités d'en dégager des grandes tendances.

En termes d'impact des différents paramètres, hors teneur en eau, nous avons remarqué que c'était la qualité du surfaçage qui pouvait entraîner les plus importantes variations de résistance à la compression. Nous avons pu effectivement voir son impact sur les essais que nous avons réalisés lors de ce TFE, en revanche, impossible d'avoir des données là-dessus pour les essais réalisés avant le début de mon TFE.

Ainsi, pour l'analyse multi-échelles, nous allons donc nous focaliser sur l'impact du tamisage et de la taille des échantillons. Tout d'abord voyons l'impact du tamisage sur les essais autres que des essais mécaniques.

Nous allons commencer par l'impact du tamisage sur le séchage des échantillons. Pour cela, nous avons représenté sur la figure ci-dessous, l'ensemble des résultats que nous avons obtenus suite aux essais de séchage. Ces courbes représentent l'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour différents types de séchage pour différents types d'échantillons. La teneur en eau des échantillons a été ramenée à leur équivalent pour un tamisage à 50mm. Pour les échantillons que nous avons fait sécher en 3D, nous ne voyons quasiment aucune différence notable. Tout d'abord nous pouvons signaler que l'absence de différence entre les échantillons cylindriques et prismatiques rejoint ce que nous évoquions précédemment dans ce rapport, à savoir que la géométrie de l'échantillon n'a que peu d'impact lors que les échantillons ont des tailles « similaires ». L'impact du tamisage est lui aussi quasiment négligeable pour le séchage en 3D. Pour le séchage en 1D, la différence entre les courbes semble plus marquée même si leurs allures sont globalement similaires. Cette différence est probablement liée à un problème de reproductibilité des essais qui peut avoir plusieurs origines. Parmi ces origines, on peut par exemple retrouver l'hétérogénéité des échantillons tamisés à 30mm, une perte de matière à cause des manipulations ou l'emballage partiel des échantillons (séchage 1D) mal réalisé. Ainsi, la constatation de cette différence peut traduire le fait qu'un échantillon de ces dimensions est effectivement moins homogène lorsque son tamisage est moins important, ce qui peut avoir un impact sur les performances des échantillons et donc entraîner des problèmes de reproductibilités.

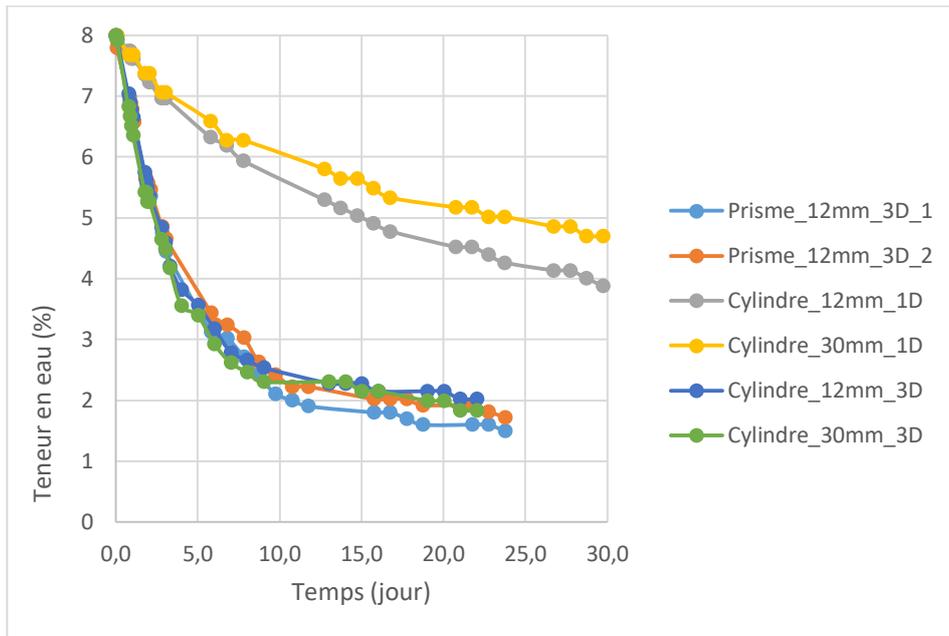


Figure 53 : Courbes de séchage

Nous nous intéressons désormais à l'impact du tamisage sur les courbes de rétention d'eau. Nous avons représenté la moyenne par tamisage des courbes de rétention d'eau sur la figure ci-dessous. On remarque là aussi, que la diminution de l'importance du tamisage a aussi un impact visible sur les courbes de rétention d'eau. Comme pour les courbes de séchage l'impact du tamisage doit probablement entraîner une hétérogénéité au sein de l'échantillon (d'autant plus qu'ici il s'agit de petits cubes de 16cm de côté). Ce phénomène est bien visible surtout pour les cubes tamisés à 50mm dont les courbes sont situés bien au-dessus de celle des autres tamisages.

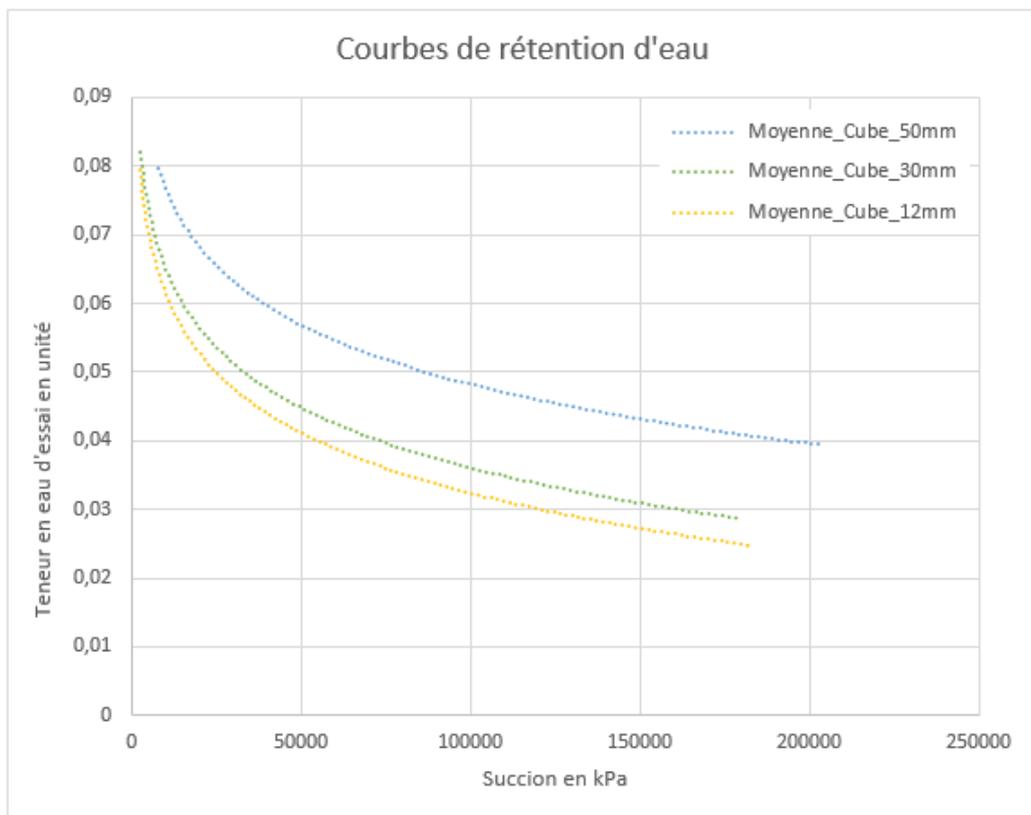


Figure 54 : Moyenne courbes de rétention d'eau par tamisage

Parmi ces valeurs, on peut remarquer que les cylindres tamisés à 50mm sont les essais qui présentent la plus grande dispersion, surtout pour deux échantillons. Cela peut avoir plusieurs explications, la première serait la présence de défaut de fabrication de ces cylindres dont on aurait pas connaissance étant donné que nous n'avons pas réalisé les essais nous-même. La seconde explication pourrait être la non homogénéité de ces cylindres à cause de leur trop faible tamisage et qui aurait entraîné la présence de valeurs éloignées de la moyenne. Une disposition particulière des granulats peut engendrer une augmentation comme une diminution des performances mécaniques.

Au-delà des cas d'éventuels défauts, ou de grande dispersion potentiellement dû des hétérogénéités, nous remarquons un comportement similaire pour l'ensemble des échantillons pour une teneur en eau élevée, avec toutefois une résistance à la compression qui s'emblerait légèrement supérieure pour les blocs de chantier.

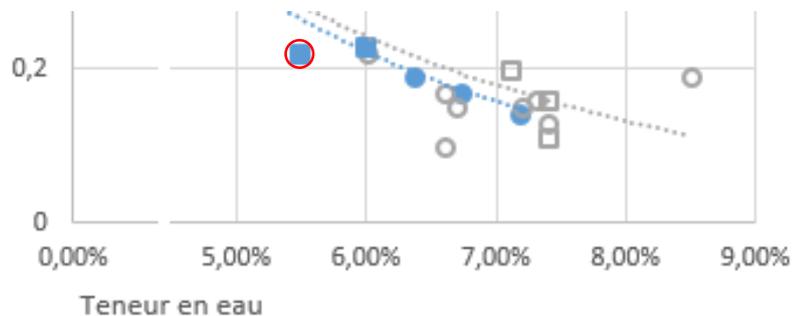


Figure 56 : Capture d'écran pour les teneurs en eau élevés

Les essais pour les teneurs en eau intermédiaires ont été représentés sur la figure ci-dessous. Parmi ces essais, seuls les trois essais avec les plus grandes résistances à la compression ont été fabriqués et testés pendant mon TFE. Nous remarquons rapidement que certains essais sont situés sur la courbe de tendance et suivent donc le comportement de la plupart des essais, en revanche, les cinq autres essais présentent des valeurs de résistance à la compression bien plus importantes que celle de la courbe de tendance. Nous n'avons ni fabriqué, ni assisté au test de ces essais, impossible donc de dire quoi se soit sur leur déroulement ayant pu provoquer cette augmentation de résistance. Comme nous l'expliquions dans les paragraphes précédents, des hétérogénéités pourraient en être à l'origine.

Ainsi, pour les teneurs en eau intermédiaires, étant donné l'absence de l'émergence d'un comportement type et le fait qu'aucun bloc de chantier n'a été testé à ces valeurs de teneur en eau, nous ne pourrons rien déduire à la fois sur le comportement des petits échantillons vis-à-vis du tamisage et vis-à-vis du comportement réel des gros blocs de chantier.

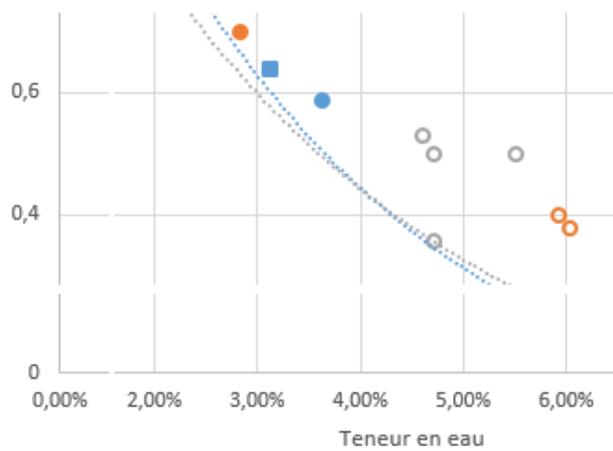


Figure 57 : Capture d'écran pour teneurs en eau intermédiaires

Pour finir, les résultats des essais à des teneurs en eau faibles ont été représentés sur la figure suivante. A part les cylindres tamisés à 50mm, tous les autres échantillons ont été testés lors de mon TFE. Sur la figure, nous avons entourés en rouge les points des essais dont les échantillons présentaient un défaut de surfacage responsable d'une diminution de la résistance à la compression. Parmi les échantillons que nous n'avons pas testés lors de ce TFE, nous pouvons nous interroger sur la présence ou non de défauts ou d'absence d'homogénéité pour les cylindres tamisés à 50mm situé en-dessous des courbes de tendance, au niveau des essais entourés en rouge, étant donné leur valeur de résistance à la compression inférieure. Pour les essais que nous avons entourés en noir, nous pouvons analyser les liens entre les essais de laboratoire et les gros blocs de chantier. On remarque que les essais dont le tamisage est de 12mm et les gros blocs de chantier ont un comportement très similaire avec toutefois une résistance à la compression des gros blocs qui semblerait légèrement supérieure. Il est aussi possible que cette différence ne soit uniquement dû au fait que la teneur en eau des gros blocs est légèrement inférieure à celle des cylindres. Pour les cylindres tamisés à 50mm, malgré la présence de l'un d'entre eux dans la zone entourée, il semble difficile de conclure étant donné la faible représentation d'essais de ce type dans cette zone, surtout que l'on n'en connaît pas les éventuels défauts car ils ont été testés avant ce TFE.

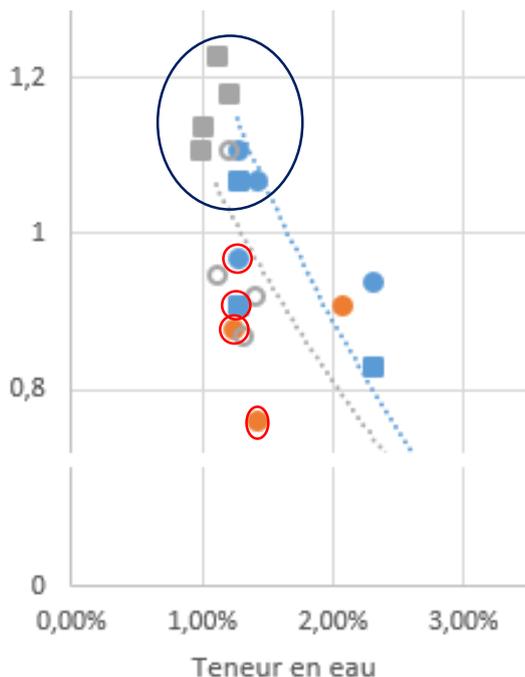


Figure 58 : Capture d'écran des résultats des essais à faible teneur en eau

3.3.5 Conclusions des résultats obtenus par étude des impacts du tamisage sur la résistance à la compression

Ainsi, nous pouvons faire le même type de conclusion sur les liens entre les échantillons de laboratoire et les blocs de chantier pour des teneurs en eau faibles et pour des teneurs en eau élevées. Tout d'abord, le comportement entre les petits échantillons tamisés à 12mm et les gros blocs de chantier est très ressemblant, et les valeurs des résistances à la compression obtenue sont quasiment similaires. On peut toutefois noter que la résistance des gros blocs est en moyenne légèrement supérieure à celle des petits échantillons.

Ensuite, les valeurs de résistance à la compression obtenu avec les cylindres tamisés à 50mm sont elles aussi proches des valeurs des cylindres tamisés à 12mm mais on a aussi remarqué une plus grande disparité des résultats pour le tamisage à 50mm par rapport à celui à 12mm.

Pour les cylindres tamisés à 30mm, nous ne pouvons faire de conclusions aussi pointues étant donné que nous n'avons pas autant de valeurs disponibles et que certaines de ces rares valeurs ne sont pas exploitables du fait de défaut de surfaçage. En revanche, pour des teneurs en eau légèrement plus élevées, les valeurs des résistances à la compression des cylindres tamisés à 30mm que nous avons obtenues coïncident parfaitement avec celles des échantillons tamisés à 12mm et laisse donc présager d'un comportement relativement similaire.

La comparaison des résultats entre les différents tamisages montre que pour prédire le comportement des gros blocs de chantier, il vaut mieux utiliser les échantillons un tamisage important car les résultats obtenus sont moins éparpillés et donc mieux exploitables. Cette disparité des résultats peut s'expliquer par la non-homogénéité des échantillons dont le tamisage n'est pas suffisant pour respecter le critère établi par [DELAGÉ].

La comparaison des résultats entre les différentes géométries pour un même tamisage nous avait montré que ce paramètre n'avait que peu d'importance sur les résultats de résistance à la compression.

Le fait que les résistances à la compression des échantillons de laboratoire soient légèrement inférieures à celles des blocs de chantier est peut-être explicable en partie par la légère différence de teneur en eau entre les blocs de chantier et les échantillons. Cette légère différence, en plus d'être relativement faible, va dans le sens de la sécurité si l'on utilise les valeurs de résistance obtenue sur les échantillons de laboratoire pour dimensionner la taille des blocs de chantier nécessaires.

3.3.6 Mise en évidence de l'importance de l'utilisation des formules de correction de densité et de teneur en eau

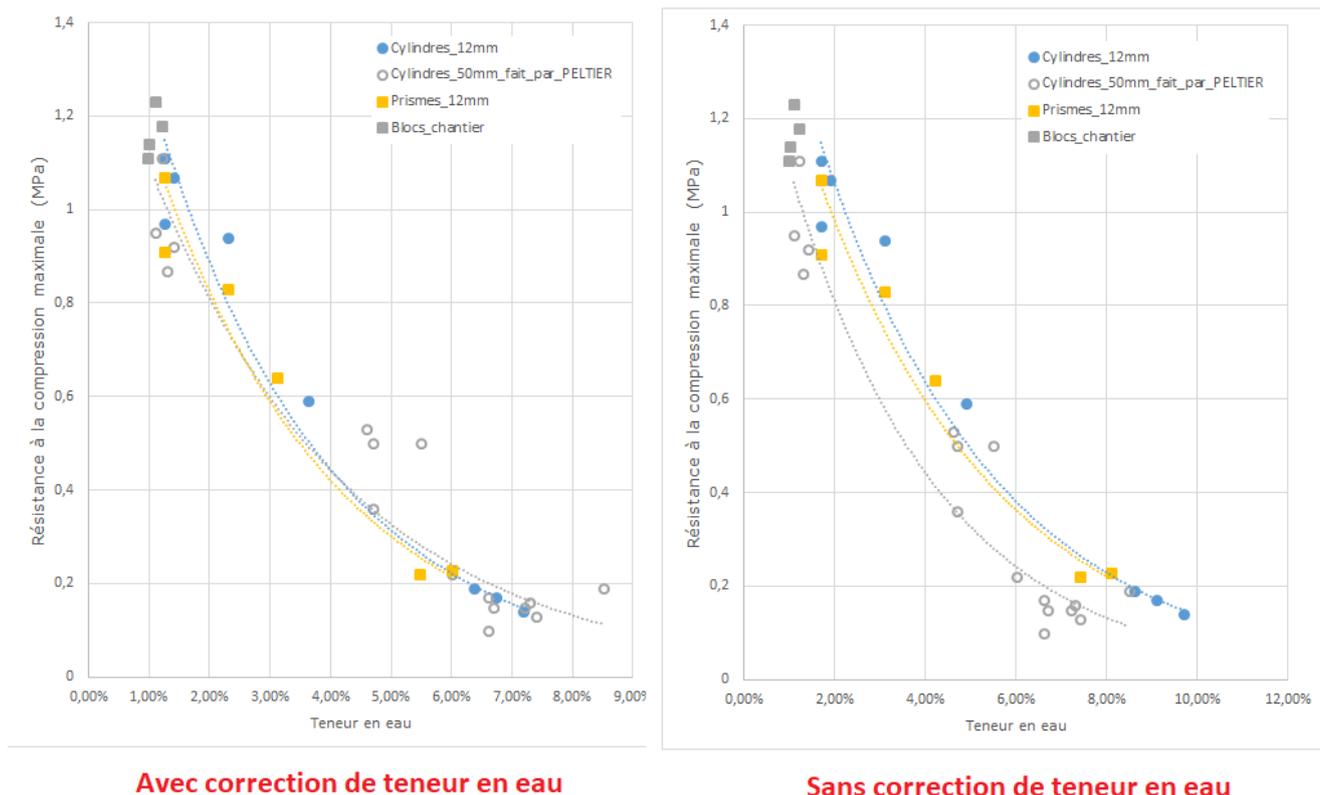
Nous avons vu lors de la partie sur le protocole expérimental, que nous avons utilisé des formules de correction de teneur en eau et de densité pour les échantillons dont la terre utilisée pour leur fabrication était tamisée à 12mm ou à 30mm. Ces formules permettaient d'avoir la même densité au niveau des fines des différents échantillons indépendamment du tamisage, et de connaître la teneur en eau équivalente des fines indépendamment du tamisage.

Pour la mise en évidence de l'importance de la correction de densité, il nous fallait regarder si la valeur de la densité sèche avait eu un impact significatif sur nos résultats. Cependant, nous n'avons pas obtenu dans nos essais, de tels résultats montrant un lien entre augmentation de la densité sèche et augmentation de la résistance à la compression. Nous obtenions un nuage de points sans réelle ligne directrice. Cette constatation vient probablement du fait que les densités sèches des échantillons étaient très proches les unes des autres, ainsi, les légères variations de densité sèche étaient

loin prépondérantes devant des paramètres tels que les bonnes réalisations des échantillons ou des surfaçages. Cette constatation peut aussi venir du fait que tous les échantillons que nous avons réalisés lors de ce TFE ont été fait avec exactement la même densité sèche (en équivalent au tamisage à 50mm), impossible donc d'en étudier l'impact.

Il est maintenant possible de se poser la question de l'intérêt de l'utilisation de la formule de correction de densité devant l'absence de mise en évidence de l'impact de la densité sèche sur la résistance à la compression lors des essais de cette campagne. Malgré cette absence de lien, le fait que nous obtenons des résultats proches entre les cylindres tamisés à 50mm et les prismes/cylindres tamisés à 12mm pourrait indiquer que l'utilisation de cette formule de correction n'a pas été inutile. Nous recommandons donc d'utiliser cette formule de correction dans le cas où on souhaite étudier le comportement de gros blocs à partir de petits échantillons fait avec cette même terre mais tamisée.

Pour mettre en évidence de l'importance de la correction de teneur en eau, nous avons représenté sur la figure suivante deux graphiques, le premier à gauche pour lequel nous avons appliqué la correction de teneur en eau sur les échantillons tamisés à 12mm (prismes et cylindres) et le second à droite où nous n'avons pas appliqué de correction. On remarque immédiatement en regardant les courbes de tendance que le comportement des échantillons tamisés à 12mm n'est plus le même que celui des cylindres tamisés à 50mm lorsque l'on applique pas la correction.



Avec correction de teneur en eau

Sans correction de teneur en eau

Figure 59 : Résistance à la compression avec et sans correction de teneur en eau

Ainsi, on vient donc de voir l'importance de l'utilisation des formules de correction lorsque l'on souhaite étudier le comportement d'une terre qui contient de gros granulats, en faisant des essais sur des petits échantillons. En particulier l'utilisation de la formule de correction de teneur en eau dont on vient de voir l'importance. Ces conclusions semblent logiques car l'utilisation de ces formules permettent à celui qui réalise les essais d'avoir toujours une terre dont les fines sont toujours aussi humides et aussi compactées peu importe la présence ou non de gros granulats.

4. Conclusion générale

Le pisé est une technique de construction en terre compactée. L'utilisation du pisé comme matériau de construction en France et dans le monde présente de réels avantages, notamment pour des aspects durables, économiques, sociaux ou de préservation d'un patrimoine. En revanche, le pisé présente certains freins à son utilisation, et principalement la difficulté d'évaluation des performances mécaniques, hygroscopiques ou hygrothermiques. La difficulté d'évaluation des performances mécaniques pose notamment des difficultés à propos de la façon de procéder pour tester les performances d'une terre. En effet, à ce jour, il n'existe pas de protocole de caractérisation faisant consensus afin d'en estimer les performances. De plus, l'étude des performances mécaniques ne se résume pas à la connaissance de la simple résistance à la compression car cette dernière dépend fortement de la teneur en eau, mais aussi d'autres paramètres comme le tamisage, la densité sèche, la géométrie ou encore la taille de l'échantillon.

Mon TFE s'intégrait dans l'action actuellement conduite au niveau international par le comité technique de la RILEM 274. Il avait pour objectif de s'attaquer à ces difficultés, et avait donc pour but la mise en place d'une procédure répétable et simple afin de quantifier la performance du pisé pour la construction d'habitation. Pour répondre à ces objectifs, mon TFE s'était réparti en deux étapes. Dans un premier temps, la mise en place d'une méthodologie de référence pour la fabrication d'échantillons en pisé. Cette méthodologie avait notamment pour objectif de mettre en place tous les éléments à prendre en compte afin d'assurer la meilleure répétabilité des essais possible et donc faire un pas de plus vers une réglementation des constructions en pisé. Dans un second temps, l'étude des liens entre les résultats des essais de laboratoires fait sur de petits échantillons et le comportement réel des structures en pisé. Cette étude devait se faire sur une approche multi-échelle en prenant en compte les hétérogénéités de densité et de teneur en eau liées au fait que les petits échantillons de laboratoires n'ont pas tous été fait avec le même tamisage. Le comportement réel des structures en pisé a été obtenu à partir d'essais de compression sur des blocs de grandes dimensions réalisés sur chantier. Les essais de laboratoires ayant servis à répondre à ces objectifs étaient issue d'une campagne d'essais qui avait déjà commencé avant le début de mon TFE et que nous avons continué et terminé lors de ce TFE.

Pour la partie expérimentale de ce TFE, nous avons donc réalisé les essais de compression simple sur de petits échantillons que nous avons-nous même fabriqués. Sur ces petits échantillons, nous avons fait varier de nombreux paramètres afin d'en étudier les effets. Nous avons ainsi étudié les effets de la teneur en eau, de la géométrie, du tamisage et de la taille des échantillons. Nous avons aussi réalisé lors de ce TFE, les essais de compression sur les gros blocs qui n'avaient pas encore été testés. Tous nos résultats ont été complété par les essais de la campagne qui avaient été réalisés avant le début de ce TFE. Nous avons aussi réalisé des essais de séchage, de succion sur les échantillons, ainsi qu'une modélisation du séchage par logiciel. Sur tous les échantillons que nous avons fait avec de la terre tamisée, nous avons appliqué des formules de correction de densité et de teneur en eau afin de prendre en compte le fait que ces échantillons ne contenant pas de gros granulats.

Pour le premier objectif de ce TFE, à savoir la création de la méthodologie de référence, nous nous sommes uniquement basé sur les échantillons et essais que nous avons réalisés nous-même. En conclusion de cette étape, nous avons défini de quelles façons il fallait choisir certains paramètres et quels étaient leurs influences sur les résultats. Nous avons notamment trouvé que le choix de la géométrie des échantillons (prismatiques ou cylindriques) n'a pas d'influence sur les résultats à conditions que les échantillons soient bien réalisés. En complément, nous avons remarqué que les échantillons cylindriques sont plus faciles à bien réaliser que les échantillons prismatiques surtout quand le tamisage de la terre utilisée est peu important. Nous avons trouvé que les échantillons plus ou moins tamisés donnaient des valeurs de

résistance à la compression proche mais que plus le tamisage était faible, plus la dispersion des résultats des essais était faible. Un tamisage plus important permet donc une meilleure répétabilité car les échantillons étaient à la fois plus homogènes et mieux réalisés. Nous également mis en valeur l'importance de la bonne réalisation du surfaçage afin d'obtenir des essais le plus répétable possible. Un surfaçage mal réalisé réduisait de manière importante la résistance à la compression de l'échantillon. En étudiant les courbes de séchage, de rétention d'eau et de résistance à la compression en fonction de la teneur en eau, nous avons mis en évidence le fait que les échantillons de pisé avaient deux comportements distincts si sa teneur en eau est inférieure ou supérieure à environ 4%. Si elle est supérieure, l'échantillon sèche vite, sa succion et sa résistance à la compression augmente faiblement avec sa diminution de teneur en eau. Si elle est inférieure, inversement, l'échantillon sèche lentement, sa succion et sa résistance augmente fortement avec sa diminution de teneur en eau.

Pour le second objectif de ce TFE, à savoir l'étude des liens entre les essais de laboratoires et le comportement de gros blocs de chantier, nous nous sommes basé sur l'ensemble des résultats exploitables de la campagne d'essais ainsi que sur une autre campagne réalisée sur une terre différente. Avec les résultats de l'autre campagne d'essais, nous avons trouvé que des petits échantillons cylindriques de laboratoires pouvait donner les mêmes résultats de résistance à la compression que des gros blocs de chantier dans certaines conditions (tamisage quasiment suffisamment important pour que les deux types d'échantillons soient considérés comme homogènes, pas d'hétérogénéité de teneur en eau ou de disposition des gros granulats). Avec les résultats de notre campagne d'essais, nous avons trouvé un comportement relativement similaire entre les gros blocs de chantier (tamisage 50mm) et les petits échantillons de laboratoires tamisés à 12mm. Pour les petits échantillons tamisés à 50mm les résultats aussi sont ressemblant mais avec une plus forte dispersion des résultats. Ainsi, les conclusions de ces essais montrent qu'il est possible de prédire le comportement de gros blocs de chantier contenant de gros granulats, à partir du comportement de petits échantillons suffisamment tamisés pour être considérés comme homogènes. Si ces échantillons ne sont pas suffisamment tamisés, les hétérogénéités des échantillons entraînent une plus faible répétabilité des essais. Nous avons aussi mis en évidence lors de ces essais, l'importance de l'utilisation des formules de correction de densité et de teneur en eau évoquées précédemment.

Ce travail constitue une vraie première étape vers la création d'une méthodologie de référence étant donné que de nombreux facteurs entraînant ou non une mauvaise répétabilité ont été identifiés. Ce travail a aussi permis d'identifier les premières hypothèses que l'on peut faire au niveau des similitudes de comportement entre les gros blocs de chantier et les petits échantillons. Cependant, étant donné la faible quantité d'études disponibles traitant de ces questions, il est nécessaire que d'autres études et campagnes d'essais voient le jour et traitent de ces sujets afin de confirmer, infirmer ou compléter ce TFE et ses conclusions, et ainsi faire un pas de plus vers la mise en place de procédures et de réglementations qui permettront de faciliter l'emploi et l'étude du pisé par les professionnels et les laboratoires.

Bibliographie

MICHEL P. et POUDRU F. Le patrimoine construit en terre en France métropolitaine. Actes du colloque international "Le patrimoine européen construit en terre et sa réhabilitation", ENTPE, mars 1987.

LEYLAVERGNE E. (2012) La filière terre crue en France – Enjeux, freins et perspectives. Mémoire de DSA Architecture de Terre, Craterre-ENSAG, 152 p.

PERELLO B. La terre: matériau d'hier et de demain. 2013. (halshs-01096979)

Q.B. Bui, J.C. Morel, S. Hans, N. Meunier, Compression behaviour of nonindustrial materials in civil engineering by three scale experiments: the case of rammed earth, Mater. Struct. 42 (8) (2009) 1101–1116.

C. Rode, R. Peuhkuri, B. Time, A. Gustavsen, T. Ojanen, K. Svennberg, Moisture Buffering of Building Materials, Technical report, Technical University of Denmark, 2005.

F. McGregor, A. Heath, A. Shea, M. Lawrence, The moisture buffering capacity of unfired clay masonry, Build. Environ. 82 (Dec. 2014) 599–607.

CRATERRE : MORISET, Sébastien (dir), JOFFROY, Thierry (dir), BEGUIN, Mathilde, GUILLAUD, Hubert, MISSE, Arnaud, POINTET, Martin, 2018. Réhabiliter le pisé : vers des pratiques adaptées. Arles: Actes Sud. 264 p. Coll. Beaux Arts. ISBN 978-2-330-09258-0.

Morel, J. C., Pkła, A., and Walker, P. Compressive strength testing of compressed earth blocks. Construction and Building Materials 21 (2007), 303–309.

Montgomery, D. E. Dynamically-compacted cement stabilised soil blocks for lowcost walling. PhD thesis, University of Warwick, School of Engineering, 2002.

Piattoni Q, Quagliarni E, Lenci S. Experimental analysis and modeling of the mechanical behavior of earthen bricks. Constr Build Mater 2011;25:2067–75.

J.E. AUBERT et al., An earth block with a compressive strength higher than 45MPa !, 2003

Maniatidis, V., and Walker, P. Structural capacity of rammed earth in compression. Journal of Materials in Civil Engineering 20, 3 (2008), 230–238.

Duffaut, P. Manuel de mécanique des roches, vol. 2 of Collection : Sciences de la terre et de l'environnement. Les Presses - Mines, Paris, 2000.

Bui, Q.B., Morel, J.C., Hans, S., Walker, P., 2014. Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. Constr. Build. Mater. 54, 163–169.

Champiré, F., Fabbri, A., Morel, J.C., Wong, H., McGregor, F., 2016. Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. *Constr. Build. Mater.* 110, 70–78.

Taylor, B., Vardy, S., MacDougall, C., 2006. Compressive strength testing of earthen plasters for straw bale wall application. In *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*. Springer, Dordrecht, pp. 175–183.

DELAGE Pierre. Water retention proprieties and microstructure of various geomaterials, 1995. p. 43-48

BUI Quoc-Bao, these ENTPE, Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécanique

DAIAN Jean-François, Equilibre et transferts en milieux poreux I- Etats d'équilibre. 2010. hal-00452876v1

MUKOKO KALENDA Gustave, these UCL, Comportement des sols latériques compactés dans les remblais et digues de retenue des rejets miniers du Katanga (RDC)

BROOKS K.N., FFOLLIOTT P.F., GREGERSEN H.M. et THAMES J.L. (1991) - Hydrogeology and the management of watershed. Iowa state univ. press, Ames, Iowa.

CRONEY (D.). – The movement and distribution of water in soils . *Géotechnique*, 3 (1), p. 1-16 (1952).

MOLLION Vincent, TFE ENTPE, Etude du comportement mécanique du pies, Etude de l'influence de l'eau sur les propriétés mécaniques de ce matériau