

RÉDUCTION DU TEMPS DE DÉMOULAGE DE LA TERRE COULÉE À L'AIDE DU PLÂTRE

DUPUIS Timothée, LEVY Dylan

École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris Malaquais. 14 rue Bonaparte 75006 Paris

Étudiants en Master 2 – Département Transitions –

Enseignant : Thierry Ciblac, Loïc Couton, Robert Le Roy

ABSTRACT

Le sujet de cette recherche concerne la terre coulée. Ce matériau est un sujet d'actualité afin de trouver une alternative à la construction du béton. La terre coulée est trop lente à sécher dans un coffrage et le but de cet article est de trouver un composant permettant une prise plus rapide du mélange. L'ajout du plâtre est nécessaire au mélange pour qu'il puisse premièrement prendre et tenir sur son propre poids, lorsque le coffrage est retiré. Le mélange peut alors sécher dans un temps qui est semblable à celui du béton. Le but étant de se comparer au béton afin d'avoir le même mode constructif et le même temps de séchage sur chantier. Les expériences sont précédées de tests avec d'autres composants et méthodes permettant de trouver le plâtre comme solution finale. Différents types de plâtres retardant ont été testé afin de pouvoir gérer son temps de prise. Le mélange de terre coulée et de plâtre retardé mène à de futures perspectives de construction.

Mots clefs : terre coulée, plâtre, construction

The subject of this research concerns poured earth. This material is a topical topic in order to find an alternative to the construction of concrete. The poured earth is too slow to dry in a formwork and the purpose of this article is to find a component that allows a faster setting of the mixture. The addition of plaster is necessary to the mixture to first take and hold on its own weight when the formwork is removed. The mixture can be dry in a time that is like concrete. The goal is to compare with concrete in order to have the same constructive mode and the same drying time on site. The experiments are preceded by tests with other components and methods to find the plaster as the final solution. Different types of retardant plasters have been tested in order to manage its setting time. The mixture of poured earth and delayed plaster leads to future construction prospects.

Keywords: poured earth, plaster, construction

INTRODUCTION:

Les constructions en béton ont longtemps répondu à un besoin d'urgence. Aujourd'hui l'évolution des systèmes constructifs offre la possibilité de travailler de nouveaux matériaux plus respectueux de l'environnement. A la différence avec le béton qui produit 7% des émissions de CO₂, la Terre quant à elle est un matériau éco-responsable et recyclable à l'infinie.

La Terre coulée possède des propriétés de mise en œuvre proche de celles du béton et donne la possibilité d'utiliser la même chaîne de production. Le problème de la Terre coulée est son temps de séchage à l'intérieur du coffrage ainsi que sa résistance aux différentes charges, ce qui rend complexe sa mise en œuvre dans des constructions à grande échelle. Il faut donc optimiser ce temps en jouant sur ces propriétés intrinsèques.

Cette étape passe par l'ajout de différents composants qui viennent modifier sa structure, et modifier sa résistance, lui permettant de tenir sur son propre poids et de pouvoir être décoffré plus rapidement. Une problématique découle naturellement de cette volonté et de ce constat.

Comment optimiser le temps de décoffrage de la terre coulée ?

De nombreuses recherches ont été effectuées sur la thématique de la Terre coulée. Des études sur son comportement et sur ces différents modes d'application. Un des problèmes majeurs qui a été rapporté dans l'ensemble des articles et recherches effectuées jusqu'à présent fait état de

plusieurs points de complication. Il existe de nombreuses manières pour utiliser la terre comme matériau de construction. Mais chacune d'entre elles possède des limites qui empêchent une mise en application complète des méthodes proposées. Il s'agit donc majoritairement d'hypothèses qui tentent de soulever des solutions éventuelles sans mise en application réelle.

Historiquement, la terre a déjà été utilisée comme moyen de construction mais sans jamais atteindre les propriétés et les résultats se rapportant aux constructions en béton.

L'objectif de ce mémoire est donc de soulever de nouvelles hypothèses, recoupant celles existantes, et amenant à des expériences dans le but de rendre crédible ces solutions qui apparaissent comme innovantes pour le monde de demain. Pour cela, il semble important de passer par plusieurs étapes d'analyse, notamment sur la terre et sa composition, ainsi qu'effectuer des recherches sur les différents composants qui peuvent lui être associés afin de modifier ses caractéristiques physiques et ses possibilités d'utilisation.

Ces phases d'analyse et de recherche seront ensuite complétées par des expériences visant à démontrer la faisabilité et l'efficacité des hypothèses proposées.

Ces recherches et ces expériences ont pour objectif de justifier l'utilisation de la terre comme une solution innovante dans la thématique de l'éco-conception.

MATERIAUX ET METHODES :

I. LES COMPOSANTS

1. LA TERRE

1.1 Les types de terre :

L'étude du principe de Terre coulée passe dans un premier temps par l'analyse du matériau terre. Il existe de nombreuses compositions de terres. Chacune d'elles possèdent des caractéristiques particulières qui les rendent uniques sur le plan de leurs compositions granulométriques, de leur composition intrinsèque. Ces caractéristiques participent à une catégorisation géante qui les relie à des emplois bien particuliers. En effet, la terre n'est pas seulement utilisée dans le domaine de la construction ou de l'innovation architecturale. Ce sont ces vertus qui délimitent ses compétences, ses limites et son domaine d'action. Il existe de nombreux types de terre comme :

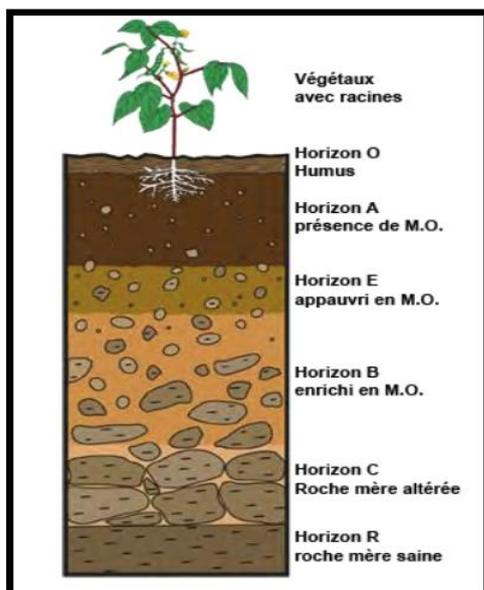


Figure 1 : Les différents horizons d'un sol (Descroix, n.d.)

La terre argileuse

(Petites particules très compactes, grande densité qui empêche la circulation de l'air, de l'eau. Elle est très vite saturée en eau. Dure, sèche et fibreuse. Elle garde la fraîcheur et l'humidité)



La terre calcaire

(Facile à travailler, sèche, friable. Elle draine efficacement le sol)



La terre sableuse

(Composées de grosses particules, terre légère ne retenant pas l'eau. Très friables et peu dense)



La terre siliceuse

(Très pauvre en calcaire, se dessèche et se refroidit très vite)

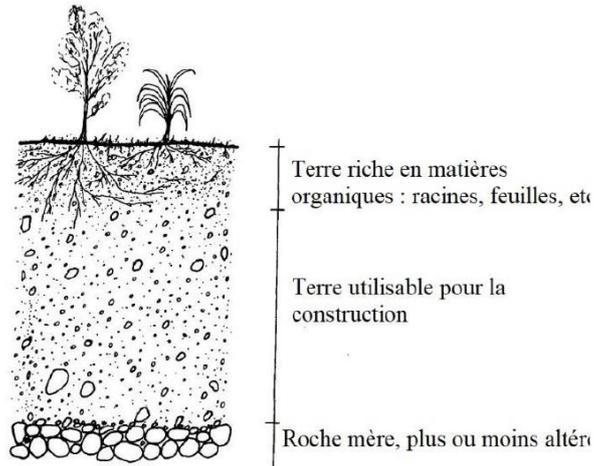


Figure 2 : Composition des sols. Coupe dans la couche de terre (Guérin, 1985)

La terre tourbeuse

(Terre très acide, riche en matière organique et pauvre en nutriments. Elle absorbe énormément l'eau. Texture spongieuse)



La terre humifère (ou limoneuse)

(Terre plutôt grumeleuse proche de la terre argileuse, se tasse très vite par temps humide)



La terre est un matériau hétérogène car il change en fonction de sa composition intrinsèque, de la nature de ses grains. De base la terre est un matériau qui découle du sol. Le type de terre dépend donc de la variation et de l'altération de la roche-mère. Cette altération est en trois parties connue et regroupée sous le nom de la pédogénèse. Elle regroupe à la fois une première variation liée au climat. Une seconde liée à la dégradation et donc au temps. Une troisième partie qui correspond à la modification de la roche-mère par l'ajout de d'autres composants qui majoritairement arrivent avec la pluie ou la sécheresse des sols.

1.2 La consistance des sols :

La consistance des sols et leur composition est une donnée essentielle pour la bonne compréhension de ce matériau. L'étude de la géotechnique permet de qualifier la terre en fonction de la plasticité des sols avec notamment grâce aux **limites d'Atterberg**. Limites qui permettent de définir des indicateurs relatifs à la teneur en eau d'un sol. Un élément important d'identification pour prévoir certaines propriétés. Une catégorisation des états en fonction de la teneur en eau.

(Cf : La teneur en eau d'un matériau correspond à la masse d'eau d'un échantillon ramenée à la masse sèche. Elle s'exprime en pourcentage)

- **Etat liquide :**
→ Teneur en eau élevée, le sol est liquide avec une résistance au cisaillement nulle. La granulométrie de cet état montre que l'ensemble des grains sont séparés par l'eau.
- **Etat plastique :**
→ Il s'agit d'un sol stable qui ne résiste pas à un effort et qui subit une déformation en fonction de cet effort. Associé à un mouvement, cet état perd sa consistance et atteint un point de non-réversibilité.
- **Etat solide :**
→ Il s'agit d'un sol stable qui ne subit qu'une très faible déformation. La présence très faible d'eau dû au retrait ou à l'absence complète d'eau lui donne ce caractère solide.

Les changements d'états que peut provoquer la modification de la teneur en eau sont calculés grâce à des indices et des limites répertoriés afin de faciliter la catégorisation des sols et des types de terres. Il existe de nombreux indicateurs qui permettent une analyse complète de la terre ou des terres utilisés pour les expériences comme :

- **La limite de liquidité :**
→ Limite (**WL**) qui caractérise la transition entre un état plastique et un état liquide
- **La limite de plasticité :**
→ Limite (**Wp**) qui caractérise la transition entre un état solide et un état plastique. Limite qui indique la teneur en eau pondérale.
- **La limite de retrait :**
→ Limite (**Wr**) qui caractérise la valeur minimale d'eau au-dessous de laquelle une diminution de cette valeur ne produit pas de réduction de l'échantillon de terre, où :

$$\rightarrow \mathbf{Wr} = \frac{\text{Teneur en eau} - [(\text{Volume initial} - \text{Volume final}) / \text{Poids spécifique de l'échantillon}]}{100}$$

Et où **la teneur en eau** est calculée avec :

$$\rightarrow \frac{[(\text{poids humide} - \text{poids sec}) / \text{poids sec}] \times 100}$$

1.3 Indices et degrés de plasticités :

Pour comprendre le matériau terre et ses différents états, il est important aussi de déterminer les indices de plasticité mis en lien avec les degrés de plasticité pour pouvoir déterminer pour chaque usage la plasticité nécessaire. L'indice de plasticité mesure l'étendue de la teneur en eau dans laquelle le sol ou le matériau se trouve à l'état plastique.

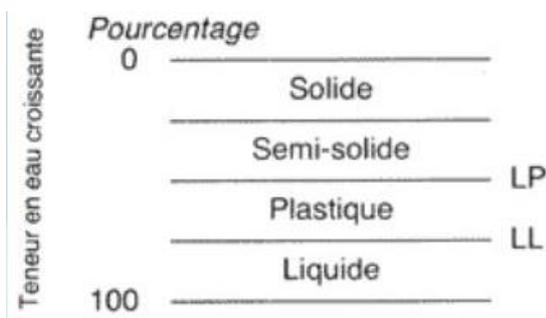


Figure 5 : Limites d'Atterberg – (Articles « SOL »)

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Moyennement plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
$I_p > 40$	Très plastique

L'indice de plasticité d'un matériau se calcul avec la formule suivante :

$$\rightarrow I_p (\text{indice de plasticité}) = W_L (\text{Limite de liquidité}) - W_p (\text{Limite de plasticité})$$

La terre argileuse par exemple, du fait de sa réaction particulière à l'eau, et de ses diverses propriétés, peut être utilisée dans des domaines tels que l'esthétisme, ou encore dans le jardinage. Sur le plan architectural, elle est également utilisée dans de nombreux domaines comme celui de la finition ou de la décoration. Le côté structurel de la terre argileuse et les caractéristiques optimum qu'elle possède dans l'utilisation et la construction architecturale représentent l'intérêt premier de cette étude. En effet, cette terre répond au mieux aux exigences engendrées par l'architecture. Des critères relatifs à la densité, à la granulométrie, aux diverses réactions chimiques et physiques ainsi qu'à la résistance de ce matériau.

Catégorie	Sol	IP (pourcentage)	Degré de plasticité
I	Sable ou limon	0- 1	Non plastique
	+ traces d'argile	1- 5	Très faible plasticité
	+ un peu d'argile	5-10	Faible plasticité
II	Limon argileux	10-20	Moyenne plasticité
III	Argile silteuse	20-35	Grande plasticité
	Argile	>35	Très grande plasticité

Figure 6 : Plasticité de divers sols limoneux et argileux – (Article « SOL »)

1.4 Les mises en œuvre majeures :

La terre argileuse peut apparaître sous différentes formes et avoir plusieurs origines. C'est un matériau universel. Elle peut venir des sols, des poussières, des résidus de chantier etc... En outre, elle peut être produite partout. En analysant diverses terres argileuses, une observation générale ressort visant à démontrer que leur composition impactait leur réaction sur divers plans comme ; la réaction à l'eau, la densité du mélange, le taux de gâchage maximal ou encore la résistance et l'association avec d'autres composants.

Dans le domaine de la construction, de nombreuses références ont utilisé la terre comme matériau principal. En effet, associé avec des composants comme de l'eau, du sable, de la paille ou encore des éléments fabriqués comme le plâtre, son comportement et ses propriétés évoluent. L'état de l'art de la terre est très développé et encore en cours de développement. Grâce aux recherches effectuées sur la terre au cours de l'histoire, l'homme a su la travailler, modifier son apparence, modifier ses caractéristiques. Elle apparaît sous deux formes majoritairement présente comme :

La terre crue :

→ Béton de terre - Pisé - Torchis
(Base de terre crue argileuse, ajout possible de fibre, de sable, de chaux, d'urine pour modifier ses caractéristiques. Principalement utilisé comme mortier, enduit, remplissage d'une ossature, empilée (Bauge), coffrée (Pisé), découpée ou modelée sous la forme de brique crues (Brique de terre compressée...)

→ Mortier de terre
(Base argileuse ou de terre crue, utilisé comme un moyen de finition et de consolidation des constructions en bois, en pierre ou en terre)

La terre cuite :

→ Brique de terre
→ Bloc de terre
→ Tuiles de terre

Ces différentes morphologies de terre sont utilisées dans de nombreuses typologies de la construction. Elles sont par exemple utilisées dans :

Les sols

→ Terre battue
→ Tranchée
→ Terrassement

Les planchers

→ Dalles, carrelage et faïence
→ Isolation sous dalle
→ Entrevous

Les murs

→ Mortier de terre
→ Béton de terre
→ Enduit de terre

Les ornements

→ La Faïences collées pour la décoration intérieure

Les toits

→ Tuiles en terre cuite
→ Toiture végétale
→ Voûte nubienne (utilisation de matériaux et d'outils simple pour construire des maisons en voûte)

1.5 Les Caractéristiques techniques de la terre :

La multiplication de ces usages et de ces mises en œuvre permet de catégoriser les types de terre en fonction de leur usage. Cette catégorisation est également permise grâce aux connaissances diverses sur la composition intrinsèque de la terre et de ses dérivés. Les caractéristiques techniques de la terre par exemple permettent de faire des hypothèses et un rapprochement direct avec les différentes mises en œuvre possibles. Pour la terre crue par exemple ;

Masse volumique qui varie entre 1200 kg/m³ et 1600 kg/m³ pour une terre crue basique (en tas) et qui peut aller jusqu'à 2000 kg/m³ pour une terre mise en œuvre (le pisé, ou le béton de terre

La terre est un matériau qui peut être comparé au béton sur plusieurs points notamment sur le plan de la compression. Non pas dans les chiffres mais plutôt dans les caractéristiques de mise en œuvre. Les deux matériaux peuvent être comparés sans altération ou modification de l'un ou de l'autre. Pour la terre, la **résistance à la compression** varie en fonction de la forme et de la composition.

Sur un élément terre du style pisé :

→ Résistance à la compression égale à 20 kg/cm² (2 MPa)

Sur un élément terre reconfiguré comme de l'adobe (maçonnerie):

→ Résistance à la compression qui varie entre 20 kg/cm² et 50 kg/cm² (2 et 5 MPa)

Sur un élément béton :

→ Résistance à la compression du béton : 200 kg/cm² à 500 kg/cm² (20 à 50 MPa)

La différence de résistance entre le béton et la terre est très importante. C'est ce qui offre une légitimité importante au béton dans le domaine de la construction de grande ampleur. De plus en plus de recherches sont menées pour arriver à une composition de terre qui propose une résistance à la compression qui se rapproche de celle du béton mais sans jamais pouvoir l'atteindre. Essayer d'atteindre un point de résistance suffisant pour une utilisation de la terre comme un matériau de construction à grande échelle et sur des points de structure dans un premier temps comme les murs porteurs.

La terre crue est un principe constructif qui fonctionne mais qui est difficile à mettre en œuvre. Un processus long qui empêche d'utiliser de façon universelle cette technique et de l'appliquer aux constructions de grande ampleur comme pour le béton. Voilà pourquoi de nombreuses recherches comme celles menées par CRAterre ou Amaco visent à trouver de nouvelle façon d'utiliser la terre et trouver une alternative fiable au béton.

Les terres comme "la terre ocre" (appellation du fabricant), la terre ES (appellation du fabricant), la terre 16 (appellation du fabricant), sont des terres argileuses possèdent une composition intrinsèque intéressante pour l'étude et l'utilisation dans le milieu de la construction et principalement pour la mise en lien avec la thématique de la terre coulée. Une mise en œuvre très peu développée qui prend sa place dans les réalisations architecturales avec les principes de pisé et d'adobe. Elle est avant tout une méthode de mise en œuvre simplifiée, reproductible et accessible à un plus large panel de personnes et d'entreprises.

1.6 La terre coulée :

Cette nouvelle technique apparue en 2010, découle de nombreuses recherches et expérimentations sur la terre comme matériau de construction. Des ingénieurs comme Martin Pointet, Bernard Schmitt, Cécile Plumier, et Jean-Marie Le Tiec, en partant du principe de la terre à pisé, ont décidé de faire un rapprochement avec la chaîne de conception du béton en jouant sur les caractéristiques et la composition de la terre pour lui permettre d'être coulée entre deux banches étanches et ainsi la coffrer, sans compactage à la manière d'un ciment classique. En plus de rendre plus simple la mise en œuvre dans le domaine de la construction, le principe de la terre coulée impacte également les thématiques budgétaires et écologiques, éco-responsables (énergie grise, valorisation des circuits de proximité, réemploi et déconstruction).

Etat de l'art de la terre coulée :

La terre coulée est composée de terre qui elle-même est chargée en sable, graviers et fines argileuses avec une juste proportion. Si la composition globale n'est pas équilibrée, elle peut le devenir et être reformulée avec l'ajout de sable, ou de graviers à granulométrie variée pour atteindre la composition voulue. Pour les premiers tests de terres coulées qui ont été effectuées par diverses institutions spécialisées comme CraTerre ou Amaco, des adjuvants sont ajoutés pour obtenir une texture idéale. De l'eau dans un premier temps avec un taux de gâchage qui dépend de la composition de la terre utilisée qui n'est pas constante. Du ciment dans un second temps à faible dose (3%) soit 5 fois moins que dans un béton classique afin de tenir les ouvrages lors du débranchage. Une fois le mélange

réalisé, il faut le couler entre deux banches étanches et chasser les bulles d'air à l'aide d'une aiguille vibrante.

La terre en comparaison du béton :

Dans le monde de la construction, la terre est un élément qui n'apparaît pas comme suffisamment connu ou développé pour être utilisé à grande échelle. Il s'agit pourtant du matériau le plus vieux du monde. Les constructions en béton demeurent majoritaires pour de nombreuses raisons comme : **La simplicité de mise en œuvre** avec un système simple. **Le coût**, en effet, le béton appartient aux matériaux qui coûtent le moins cher. L'avantage de la terre reste qu'il s'agisse d'un élément universel, que l'on trouve absolument partout et qui ne coûte rien à produire. **La résistance**, le béton, est 10 fois plus résistant que la terre. Pourtant la terre montre l'efficacité de la technique des murs porteurs intérieurs et extérieurs sur des bâtiments d'un à trois étages. **La durabilité** du béton. La terre reste un matériau sensible aux éléments naturels comme l'eau. Un principe fondamental de l'architecture. Comme faire durer un bâtiment dans le temps. Pourtant de par sa composition, le béton reste un matériau polluant responsable d'une grande partie des rejets de gaz à effet de serre. La terre quand t-a elle est un matériau caractérisé comme éco-responsable car sans aucun ajout de matière ou d'éléments non-naturels.

Problématique de la terre coulée :

Il faut comprendre que la terre possède de nombreuses limites dans sa mise en œuvre architecturale qui l'empêche d'atteindre une certaine légitimité dans ce domaine. L'une des difficultés majeures réside dans son temps de séchage. Il faut d'abord comprendre que la terre seule ne peut pas tenir sur son propre poids sans être totalement sèche.

Ce temps de séchage complet dépend de la taille de l'échantillon. Pour une éprouvette de 15 centimètres de haut sur 10 centimètres de diamètre mettra près de 1 semaine pour pouvoir être décoffré sur principe applicable de "terre coulée". Pour un séchage complet il faut compter presque 2 semaines. Le deuxième point sur lequel la terre est limitée est sa résistance aux différentes forces qui peuvent lui être appliquées.

La terre possède une résistance à la compression de (2 MPa) ce qui ne rend pas possible la mise en œuvre de la terre seule. Voilà pourquoi de nombreuses recherches et expérimentations sont menées afin d'optimiser par l'ajout de nouveaux composants ces points de limites. Malgré cela, les données obtenues restent trop faibles pour faire basculer l'impact de la terre coulée dans l'architecture.

La solution proposée qui consiste à associer la terre avec un peu de ciment permet d'accorder une phase de prise au mélange terre coulée pour pouvoir le décoffrer avant un séchage complet. Ce temps de prise est équivalent à 5 jours et le temps de séchage complet est de 1 semaine et demie sur une même éprouvette. La résistance de ce mélange est quand t'a elle, passe de 2 MPa à 4 MPa.



Figure 7 : Maison des associations de Manom par Matthieu Fuchs.



Figure 8 : Tests terre coulée sur coffrage à plat : AMACO et Philippe Madec.



Figure 9 : Mur coulée AMACO et Philippe Madec (sans adjuvants), médiathèque Jean Quarré, Paris

2. LE PLÂTRE :

2.1 La fabrication du plâtre :

La subtilité entre le côté naturel et le côté non naturel d'un matériau est très fine. Le plâtre est un élément que l'on peut qualifier de naturel car il découle d'un matériau transformé qui est le Gypse (une roche calcaire). Il est industriel dans sa fabrication mais naturel dans sa composition.

En effet, l'élément possédant la dénomination plâtre est la résultante d'une action, d'un changement d'état du Gypse. Le Plâtre est un Matériau obtenu par la calcination partielle du gypse et qui, réduit en poudre et délayé dans l'eau, est utilisé à divers usages. Une pâte boueuse facile à travailler. Un procédé de chauffage va déshydrater la structure ionique du gypse. Le broyage donnera un résultat sableux mais fin.

La matière principale qui est le gypse est facile à extraire et à l'image de la terre, peut se trouver partout. Souvent présent en sous-couche des sols, il peut également se trouver en surface. Le gypse est un élément naturellement présent dans la majorité des sols.

2.2 Composition moléculaire du plâtre :

Le plâtre s'obtient par cuisson et broyage de la « pierre à plâtre », le gypse, sulfate de calcium à deux molécules d'eau ($\text{CaSO}_4(\text{H}_2\text{O})_2$).

2.3 Résistance à la compression :

Les propriétés du matériau plâtre après consolidation imposent une résistance en compression de l'ordre de 10 MPa.

Durée (j)	Traction	Compression
1	4 MPa	5 MPa
2	7 MPa	12 MPa
4	8 MPa	28 MPa

2.4 Les avantages du plâtre :

Le premier avantage est que le plâtre est facile à fabriquer. Sa mise en œuvre est rapide et permet une application dans de multiples domaines (Pas exclusif à la construction). Le plâtre est également économique. Il ne nécessite aucun autre additif que l'eau (Taux de gâchage du plâtre). Il est moins cher que les autres matériaux comme le bois.

Sur le plan environnemental, ce matériau est recyclable à 100%. Une fois utilisé, il peut être récupéré et retrouvera toutes ses caractéristiques s'il est remélangé à de l'eau. Cette matière agit également sur la qualité de l'air. Elle capte les particules et les polluants comme le dioxyde de soufre. Il fait partie des éléments de construction qui ne dégagent pas d'énergie grise car il est chauffé à basse température.

Il ne réagit que faiblement et ne dégage pas de gaz nocif qui pourrait porter atteinte à son environnement proche, mais seulement de la vapeur d'eau.

Le plâtre possède des effets bénéfiques au cours des incendies. Il est considéré comme un matériau incombustible. Cette caractéristique est permise grâce à l'eau contenue dans le plâtre. En se vaporisant, elle absorbe la chaleur et retarde la montée en température.

2.5 Inconvénients :

Le plâtre est un mauvais isolant thermique. Il ne conduit pas bien la chaleur. Ce constat est dû à la structure poreuse du plâtre, qui résulte du départ de l'eau lors du séchage.

L'isolation thermique du plâtre est caractérisée par le coefficient de conductivité thermique :

$$\lambda = 0,35 \text{ W/m.K}$$

Plus précisément, λ varie avec la masse volumique et la teneur en eau, voilà pourquoi le λ du plâtre peut varier de 0,3 W/m.K à 0,6 W/m.K pour une masse volumique comprise entre :

$$800 \text{ et } 1300 \text{ kg:m-36}$$

Il ne réagit que faiblement et ne dégage pas de gaz nocif qui pourrait porter atteinte à son environnement proche.

Enfin, le plâtre est un matériau à usage multiple. Il peut être utilisé

Si l'eau est son principal allié, elle est également son pire ennemi. Le plâtre ne tolère pas l'humidité. Il se déforme rapidement et la tache créée par une coulée d'eau nécessite quelques travaux de réfection. Ce petit défaut implique plus d'attentions. Cependant,

le plâtre peut être amélioré pour avoir des caractéristiques hydrofuges afin de supporter l'eau sans problème, du moins jusqu'à un certain degré.

2.6 Mise en œuvre / applications du plâtre :

Selon le gypse utilisé et le processus de fabrication, on obtient des plâtres très différents, destinés à des domaines spécifiques.

Il peut y avoir :

Les plâtres de construction, à granulométrie variable (Grosses ou fines), utilisés pour tous les travaux de scellement, pour l'assemblage des briques plâtrières et pour le lissage des revêtements

Les plâtres à projeter, utilisés pour réaliser les enduits intérieurs à la main ou à la machine :

Les plâtres à modeler, pour les réparations, les décors, les moulages de précision.

Les plâtres à modeler de haut de gamme permettent d'obtenir des moulages d'une finesse extrême.

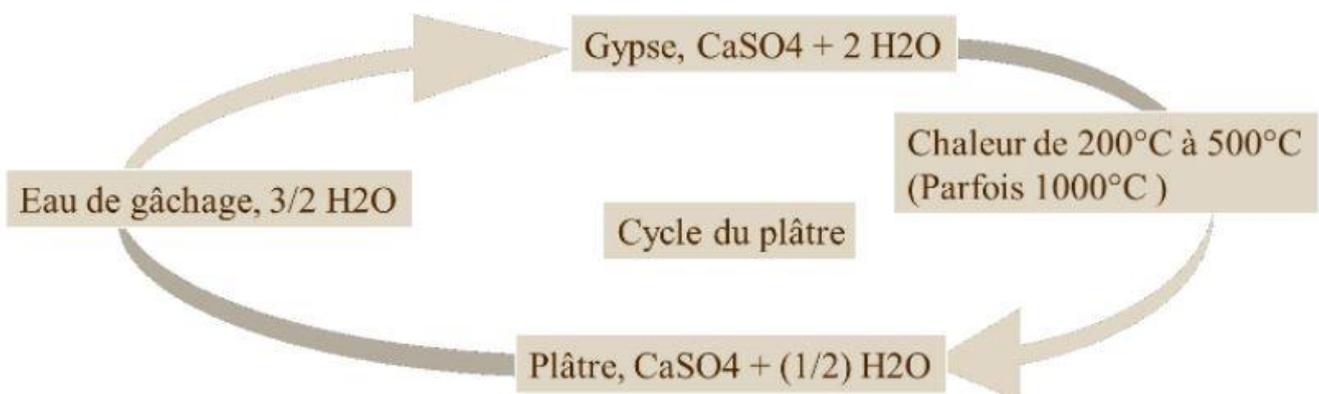


Figure 10 : Cycle du plâtre (Ph. Bertone)

II. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

1. Test de coulabilité des terres

Les premières expériences se portent principalement sur la terre argileuse et plus précisément 4 terres qui possèdent des caractéristiques différentes.

Le but de cette première partie est de choisir une terre possédant les caractéristiques nécessaires à la réalisation d'une terre coulée de bonne qualité. Celle-ci doit être autoplaçante avec un taux de gâchage moindre, afin d'optimiser le temps de séchage du mélange dans son coffrage

Il faut pour cela établir un protocole de plusieurs tests d'étalements pour s'initier aux mélanges terre et eau. Il est important de comprendre à partir de quel moment la terre devient autoplaçante (cela veut dire qu'elle peut

se positionner de façon autonome dans un coffrage au moment où elle est coulée).

L'un des premiers tests consiste à prendre de la terre à quantité constante et augmenter son taux de gâchage de 10 % en 10% jusqu'à obtenir une grille de consistance se rapportant à différents usages. Cela a permis de démontrer que la terre argile ocre à un besoin en eau minimal par rapport aux autres terres. Elle atteint plus facilement l'étalement recherché afin d'être coulée.

Pour être autoplaçante, l'argile ocre à un besoin en eau de 40%. L'argile 16 avec ce même taux de gâchage n'est pas autoplaçante mais à un seuil d'étalement plus important que l'argile ES qui elle possède une granulométrie encore différente. L'argile Kaolin de par sa structure granulométrique est très friable et à besoin de beaucoup plus d'eau que les autres terres.

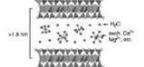
Caractéristique des terres	Kaolinite	Montmorillonite		
Formule générale	$(Si_2)(Al_2)O_5(OH)_4$	$(Si_4)(Al_{2-x}R_x^{2+})O_{10}(OH)_2CE_xnH_2G$		
Structure et épaisseur du feuillet				
Terres utilisées pour les expériences	Kaolinite	Terre ocre	Terre ES	Terre 16

Figure 11 : Caractéristiques des minéraux argileux utilisé (Kouka, stabilisation des matériaux de construction durables)

	TEST 1	PHOTO	TEST 2	PHOTO	TEST 3	PHOTO	TEST 4	PHOTO
TERRE OCRE ARGILE	100g (Terre) 10% d'eau		100g (Terre) 20% d'eau		100g (Terre) 30% d'eau		100g (Terre) 40% d'eau	
TERRE ARGILE 16	100g (Terre) 10% d'eau		100g (Terre) 20% d'eau		100g (Terre) 30% d'eau		100g (Terre) 40% d'eau	
TERRE ARGILE ES	100g (Terre) 10% d'eau		100g (Terre) 20% d'eau		100g (Terre) 30% d'eau		100g (Terre) 40% d'eau	
TERRE ARGILE KAOLIN	100g (Terre) 10% d'eau		100g (Terre) 20% d'eau		100g (Terre) 30% d'eau		100g (Terre) 40% d'eau	

Figure 12 : Tableau : Test De coulabilité et d'étalement des terres. (Taux de gâchage – Timothée DUPUIS / Dylan LEVY)



Figure 13 : Photo mini cône d'Abrams

Le test suivant consiste en l'utilisation d'un cône Abrams permettant de mesurer de façon précise l'étalement et l'affaissement d'une terre à taux de gâchage constant. Celui-ci est normalement utilisé pour connaître l'affaissement et l'étalement du béton. Le béton dispose d'un seuil d'étalement et l'artisan peut se référer à celui-ci pour déterminer si son mélange est correct. Le cône est posé sur le diamètre le plus grand. Le mélange est ainsi coulé à l'intérieur jusqu'à remplissage total du cône. En retirant le cône, le mélange s'affaisse et son étalement s'agrandit. Il faut attendre une minute avant de prendre les mesures.

TERRE OCRE (école)	TERRE 16	TERRE ES	KAOLINITE
Gâchage à 30%	Gâchage à 30%	Gâchage à 30%	Gâchage à 30%
			
Gâchage à 40%	Gâchage à 40%	Gâchage à 40%	Gâchage à 40%
			

Figure 14 : Tableau : Etalement des terres à l'aide du cône d'Abrams (taux de gâchage, les tous 10%)

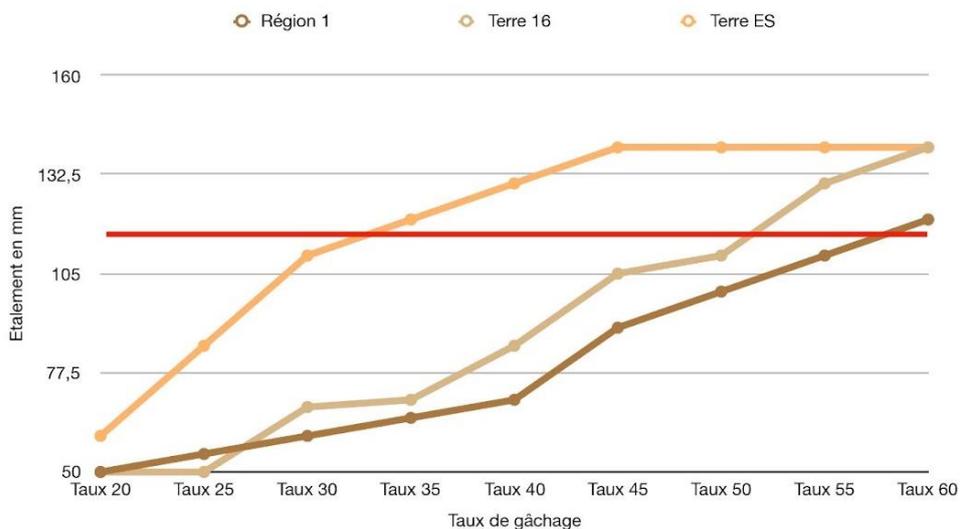


Figure 15 : Evolution de l'étalement par rapport au taux de gâchage (Timothée DUPUIS – Dylan LEVY)

Le test du cône Abrams

confirme que la terre Ocre bénéficie d'un plus grand étalement que les autres terres.

Malheureusement, il est impossible de se procurer cette argile en quantité suffisante pour les prochaines expériences. Par la suite, il est important de comparer l'étalement de la terre 16 et de la terre ES, avec un taux de gâchage espacé de 2% pour les quatre tests. La terre 16 est la plus efficace en comparant l'affaissement et l'étalement des deux terres. Elle sera utilisée pour la suite des expériences.

Il n'y a pas de seuil d'étalement pour la terre coulée et les différentes caractéristiques du béton et de la terre empêchent d'utiliser le même seuil que

celui du béton. Il est donc indispensable de créer un nouveau seuil d'étalement propre à la terre coulée.

L'expérience du seuil d'étalement démontre que le taux de gâchage utilisé pour les expériences précédentes n'est pas assez important. Les anciens tests correspondaient plus à un S3 qui appartient à un seuil "très plastique" mais qui ne peut pas être repositionnable.

Pour qu'elle soit autoplaçante, la terre 16 doit avoir un taux de gâchage situé entre 50 à 55%, ce qui correspond au seuil S4. Ce test est primordial pour la suite des expériences. Pour que les mélanges soient validés, ils doivent avoir un étalement entre 100 et 110 mm de diamètre.



Figure 16 : Tableau : Etalement des terres à l'aide du cône d'Abrams (taux de gâchage, les tous 2%)

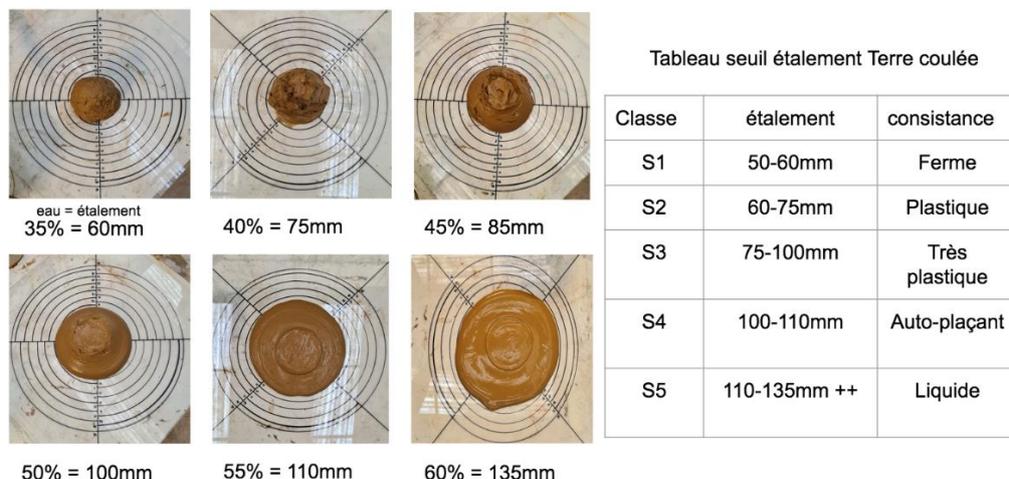


Figure 17 : Tableau : Test de coulabilité afin d'obtenir une grille de seuil relative à la consistance de la terre

2. Rappel des premiers mélanges

Dans la suite des expériences il y a alors deux approches :

A-utiliser le SHMP avec le gel casting
B-chercher un nouveau fluidifiant pour remplacer le SHMP dans le mélange terre/Plâtre.

Ces expériences n'ont pas été concluantes mais il est important d'expliquer leurs procédés afin de comprendre l'évolution des expériences réalisées.

2.1 Terre / gélifiant / SHMP

L'ajout d'un gélifiant dans le mélange est l'une des premières hypothèses. Avec le procédé du gel casting, le mélange Terre / Eau / Gélifiant peut se figer dans son coffrage et ainsi tenir sur son propre poids. Le coffrage peut alors être retiré et le mélange finira par sécher. Il y a un défaut majeur avec l'**agar-agar**. L'eau doit être bouillante pour que le gélifiant fasse effet. Il ne peut donc pas être réalisé sur chantier.

La gélatine utilise une eau tiède, ce qui est réalisable sur chantier. Le mélange est très fluide avant de se geler quelques minutes plus tard. Mais au bout d'une semaine, il y a une apparition de moisissure dû la présence de matière organique. **L'alginate de sodium** gèle instantanément. Dès lors de l'ajout de l'alginate au mélange terre/ Eau, il se fige instantanément.

Une hypothèse serait de rajouter un Super-plastifiant au mélange. Il permettrait d'utiliser moins d'eau au départ tout en fluidifiant l'ensemble.

L'un des plus utilisé avec la terre argileuse est le **SHMP** (l'hexaméthaphosphate de sodium SHMP), qui a pour avantage de rendre le mélange plus liquide.

Il y a moins d'eau ce qui veut dire que le séchage sera plus rapide.

Mais le superplastifiant est très puissant et il faut donc ajouter un composant qui va casser le phénomène pour sécher dans le coffrage. **Frederic Kéroui**, a notamment testé le SHMP avec du plâtre. Celui-ci a mal réagi aux plâtres et à causer des craquelures sur les parois et un manque de prise au centre des éprouvettes. On peut donc faire l'hypothèse d'utiliser le superplastifiant avec le procédé du gel casting.

L'ajout du SHMP avec le mélange Terre/Eau prend 6 jours à sécher (comparer à 4 jours avec seulement Terre et Eau). L'ajout d'alginate divise le temps de séchage par deux, mais aucune éprouvette ne peut être démoulée à cause de la fissuration du mélange. On peut donc en déduire que le superplastifiant SHMP ne fonctionne pas avec le procédé du gel casting.



Figure 18 : Tableau : Protocole A : SHMP / Alginate

2.2 Terre / Chryso / plâtre / Alginate

Le but est de trouver un super plastifiant qui réagit bien avec les propriétés du plâtre. Le Chryso Optima 175 est le fluidifiant testé. Celui-ci est utilisé pour le béton. Comparé à l'alginate qui se fige dans le coffrage, on dit que le plâtre "prend" ce qui veut dire que le mélange peut tenir sur son propre poids. Le problème de ce mélange est la rapidité avec laquelle il prend.

C'est pour cela que l'ajout du Chryso Optima 175 va ralentir la prise.

Il faut beaucoup de solutions pour que le mélange fonctionne, près de 3%. Celui-ci sèche en 35 Heures et il n'y a aucun incident lors du décoffrage.

Par la suite l'ajout d'alginate de sodium pourrait gélifier le mélange et optimiser le temps de séchage. Le temps de démoulage passe alors à 22 heures.

Après retrait des éprouvettes, le but est de comparer les expériences au test de compression afin d'évaluer quel mélange est le plus efficace.

Les données montrent que le mélange qui résiste le mieux à la compression est le celui terre/plâtre. On remarque que lorsqu'on ajoute du Chryso, le résultat est environ trois fois moins important. Le Chryso dénature le mélange et l'ajout d'alginate diminue encore plus sa résistance. Il y a donc trop de composants ce qui dénature les deux principaux composants qui sont la terre et le plâtre. Le mélange terre/plâtre est le plus efficace mais sèche trop vite. Il est possible d'émettre l'hypothèse d'utiliser un plâtre retardant.

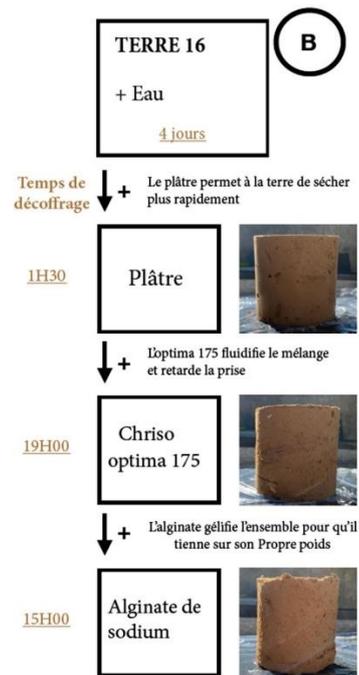


Figure 19 : Tableau : Protocole B : Plâtre / Terre / Chryso / Alginate

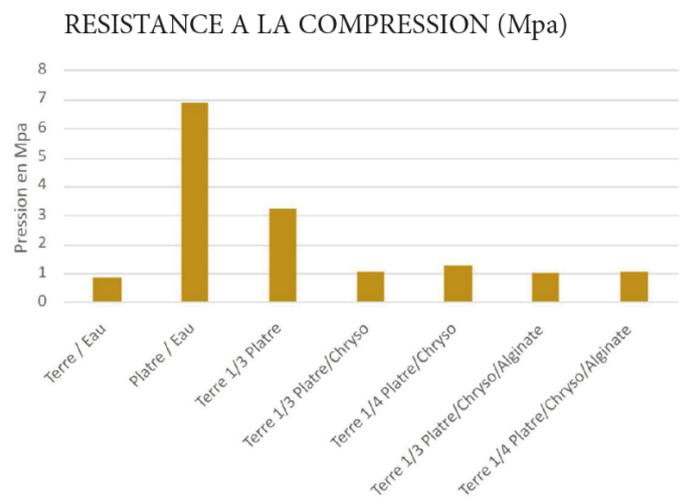


Figure 20 : Graphique : Résistance à la compression

Composition	Terre 1000g Eau (50%)	Plâtre Eau (40%)	Terre 3/4 plâtre 1/4 Eau 47%	Terre 3/4 plâtre 1/4 Eau 38% Chryso 30ml (3%)	Terre 3/4 plâtre 1/4 Eau 40% Chryso 30ml (3%)	Terre 3/4 plâtre 1/4 Eau 42% Chryso 30ml (3%) Alginate 2,5g	Terre 3/4 plâtre 1/4 Eau 44% Chryso 30ml (3%) Alginate 2,5g
Pression en kN	5,8	47,7	22,3	7,3	8,7	6,8	7,4
Pression en Mpa Avec 0,0069 m ²	0,84	6,91	3,23	1,05	1,26	0,98	1,07

Figure 21 : Tableau : Résultats des mélanges en compression

2.3 Réduction du temps de démoulage de la terre coulée avec l'ajout de plâtre

On rappelle que le but de cet article est de trouver le meilleur composant à ajouter à la terre coulée pour qu'elle puisse être décoffrer plus rapidement. Le mélange qui résiste le plus à la compression est le test plâtre/ terre avec 3,23 MPa. En ajoutant 1/3 de plâtre dans le mélange terre eau, celui-ci est 3,8 fois plus résistant à la compression. C'est pour cela que l'ajout d'autres composants n'était pas indispensable et dénature le mélange. En effet le plâtre type "neige 1" a été retenu. Celui-ci est un sulfate de calcium héli hydraté ($\text{Ca So}_4 \text{ H}_2\text{O}$ 1/2), cuit à basse température afin

d'éviter d'émettre une trop grande quantité d'énergies grises. Le premier plâtre testé dispose d'une granulométrie fine afin de permettre un bon enrobage et le plâtre "neige 1" est une forme cristalline dite bêta. Le second plâtre type "Base S" est sous la forme Alpha.

Les expériences précédentes sont testées avec un plâtre "neige 1" que l'on peut trouver dans le commerce. Celui-ci est dit "retardant" à 0,005%. On sait depuis la fin du XVIIIème siècle, grâce à **Lavoisier**, que la prise du plâtre est un phénomène de dissolution / recristallisation. Les retardateurs agissent donc soit en diminuant la solubilité de l'héli-hydrate (sans affecter celle du gypse), soit en contrariant la cristallisation.

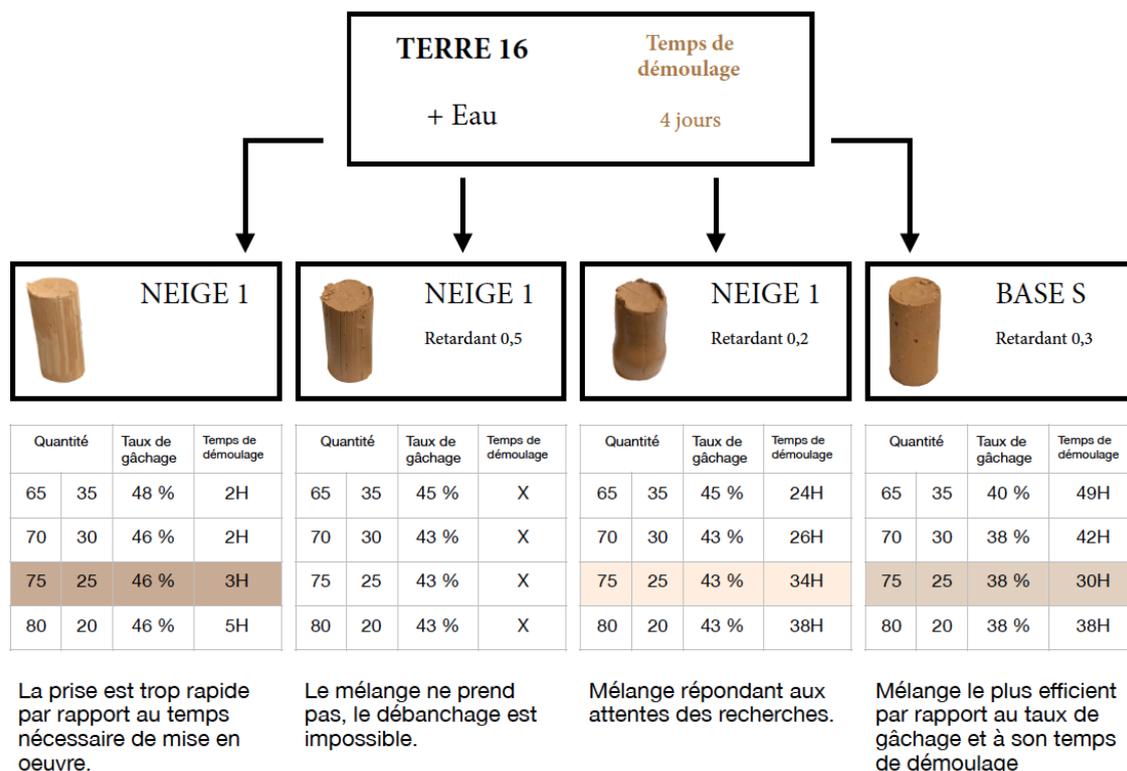


Figure 22 : Procédé expérimental Terre / Plâtre : Temps de séchage par rapport au taux de gâchage

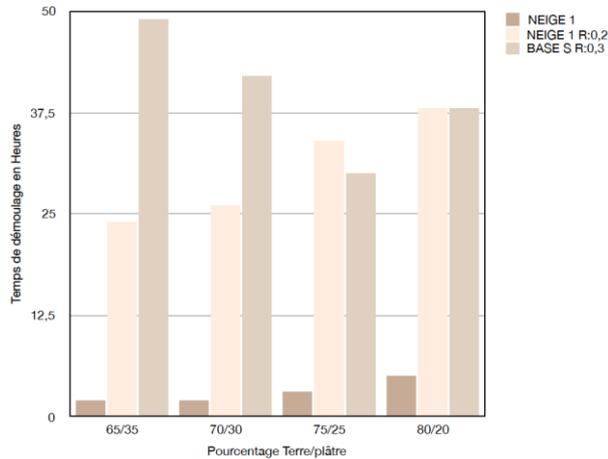


Figure 23 : Graphique : Temps de décoffrage / Pourcentage

La quantité de plâtre dans l'éprouvette est l'une des étapes les plus importantes. Le plâtre ne doit pas dénaturer la terre coulée. Le but étant de mettre le moins de plâtre possible dans le mélange tout en utilisant celui-ci pour le consolider. Pour chaque éprouvette il y a quatre quantités différentes afin de savoir laquelle séchera dans une tranche de 24H à 35H (temps autorisé pour le décoffrage du béton sur le chantier).

Le test du poids est primordial afin de créer un protocole de démoulage. La taille des éprouvettes est de 10 cm de haut et 5 cm de diamètre. Ce test consiste à positionner un poids de 1 kg sur le dessus du mélange. Si celui s'enfonce, le mélange n'est pas démoulable. Entre 0,2 mm et 0 le mélange peut être retiré.

Toutes les éprouvettes de ce tableau sont premièrement testées avec un cône d'Abrams afin d'avoir un étalement S4 (se référer au tableau de seuil de la terre coulée, dans test de coulabilité), c'est pour cela que le taux de gâchage diffère d'une éprouvette à une autre.

Le tableau montre premièrement que le plâtre "neige 1" sans retardant sèche entre deux et cinq heures ce qui est trop

rapide pour un chantier. Lorsque l'on teste le plâtre neige 1 avec un retardant de 0,5%, celui-ci ne prend pas. En effet, il impact le mélange et les éprouvettes ne peuvent pas être démoulés car le plâtre ne prend pas.

Il faut donc baisser le pourcentage de retardant et tester le mélange avec un plâtre type neige 1 composé d'un retardant à 0,2%. Le résultat est concluant avec un assemblage qui utilise le moins de plâtre.

L'éprouvette n°3 est composée de 75% de terre et 25% de plâtre et celle-ci se démoule dans un temps souhaité.

Le plâtre type "Base S" est testé avec un retardateur de 0,3%. La troisième éprouvette est aussi choisie premièrement pour ces résultats mais aussi pour tester en compression les deux mélanges avec le même taux de terre/plâtre soit 75/25%.

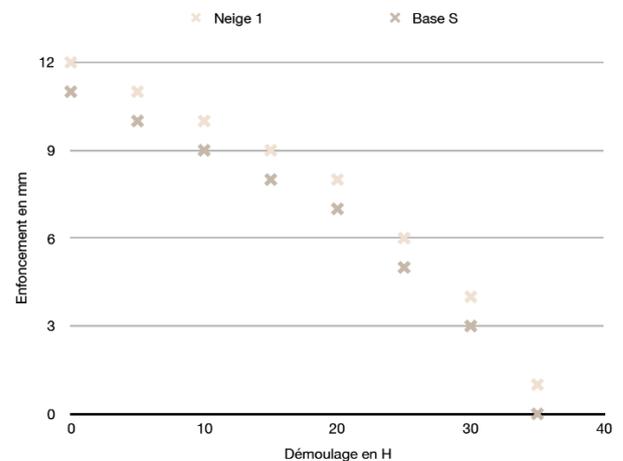


Figure 24 : Graphique : Retrait des mélange terre / Plâtre en heure

Les deux éprouvettes choisies doivent être comparées au test de compression. Mais avant cela un protocole de retrait des éprouvettes est créé. A partir du démoulage, l'éprouvette est pesée et mesurée tous les cinq jours. Ce test permet de savoir quand le mélange est totalement sec.

Temps en jours	Retrait			
	Éprouvettes Neige 1 Retardant 0,2		Éprouvettes Base S Retardant 0,3	
	Poids g	Taille Cm	Poids g	Taille Cm
T0	269	h: 9,7 D: 4,5	269	h: 9,8 D: 4,8
T0+5	207,6	h: 9,1 D: 4,2	215,7	h: 9,7 D: 4,6
T0+10	203,6	h: 9,0 D: 4,1	213,6	h: 9,6 D: 4,6
T0+15	202,2	h: 9,0 D: 4,1	211,6	h: 9,6 D: 4,5
T0+20	201,5	h: 8,9 D: 4,0	209,5	h: 9,5 D: 4,4
T0+25	201,5	h: 8,9 D: 4,0	209,5	h: 9,5 D: 4,4

Figure 23 : Tableau : Prise de mesure du retrait (Taille / Poids / Temps)

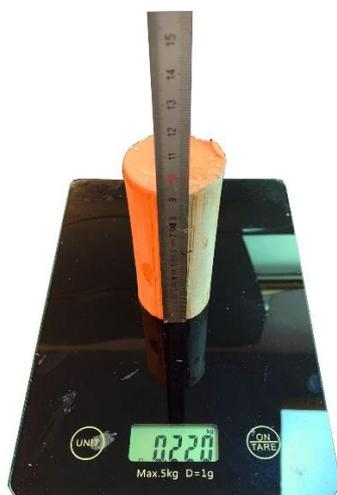


Figure 24 : Photo : Prise de mesure du retrait (taille / poids)



Figure 25 : Photo : Test du poids par rapport à enfoncement.

Lorsque deux résultats à la suite sont identiques, le mélange est sec et peut donc être testé à la compression. On remarque que l'éprouvette neige 1 est passée de 269 g à 201,5 g soit une perte de 1,33% ainsi qu'une perte de plus de 1 cm sur la hauteur et de 0,5 cm sur le diamètre depuis démoulage.

L'éprouvette de la base S a perdu 59,5 g en 25 jours ce qui représente une perte de 1,28%. En comparant les deux mélanges, la base S n'a perdu que 3 mm de hauteur et 4 mm de diamètre depuis le démoulage ce qui est un élément important pour le choix final. En effet, le retrait doit être le moins important concernant le poids mais surtout la taille du mélange fini. Un trop grand retrait impacterait la mise en œuvre du mélange dans une construction à échelle 1.

Le test de compression est celui qui définit laquelle des deux éprouvettes sera retenue pour la création du mur à échelle 1. Le principe est de positionner l'éprouvette en dessous du vérin. Celui-ci est actionné et descend jusqu'à que l'éprouvette cède et donne un résultat qui est la rupture à la compression, ce que peut supporter au maximum une éprouvette. Il y a trois tests de chaque mélange afin de s'assurer que le résultat est le même et qu'il n'y a pas d'erreur (d'où la moyenne et l'écart type dans le tableau)

En comparant les deux mélanges c'est l'assemblage terre/plâtre Base S qui est le plus efficace avec 7,03 MPa contre 4,06 MPa pour le plâtre neige 1. C'est donc avec ce mélange que l'expérience d'un mur à mur à échelle 1 sera réalisée.



Figure 26 : Photo : Compression du mélange Terre / Plâtre



Figure 27 : Photo : Compression du mélange Terre / plâtre Compressé

Compression		
	75% Terre 25% Plâtre (Neige 1 retardant 0,2%)	75% Terre 25% Plâtre (Base S retardant 0,3%)
Moyenne de trois éprouvettes	4,06 Mpa	7,03 Mpa
	6,17 Kn	10,9 Kn
Ecart type des trois éprouvettes	$\sigma=0,0156$	$\sigma=0,162$

Figure 28 : Tableau : résultats compression mélange final

- RESULTATS
ET ANALYSES

1. Expérimentations finales

1.1 L-Box

Le test de coulabilité dans une L-Box permet de voir si le mélange est autoplaçant dans un coffrage complexe. Ce test est important avant de réaliser le mur à échelle 1.

Le principe de la L-Box est de couler le mélange dans le coffrage et de le remplir jusqu'en haut. Une fente est créée en bas pour laisser couler le mélange. Une planche de bois retient l'ensemble Terre / Plâtre pour qu'il ne puisse pas sortir par la fente le temps du remplissage.

Une fois remplis, la planche est retirée et le mélange grâce à son poids propre va couler jusqu'au fond de la L-Box. Le temps d'analyse de cette coulabilité est de 1 minute. Au bout de cet minute, l'écart qu'il reste entre le mélange Terre / Plâtre et le fond du réceptacle nous donne une indication supplémentaire pour savoir si l'indice de coulabilité est bon.



Figure 29 : Photo : L-Box (Timothée DUPUIS / Dylan LEVY)

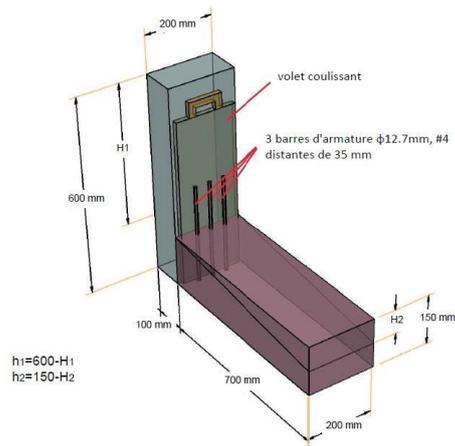


Figure 30 : Schéma explicatif de la L-Box (Devis-Tech 3VM-60)

Une fois le processus terminé, il est important d'observer le positionnement de la terre coulée sur un plan horizontal afin de vérifier que le mélange n'est pas trop liquide et que le seuil de coulabilité est respecté. Ce test de L-Box doit permettre de démontrer que le mélange terre / eau / plâtre Base S (retardant 0,3%) fonctionne dans un coffrage complexe.

L'écoulement observé est uniquement dû au poids propre du mélange. Lors d'une mise en œuvre sur un chantier et à l'image de celle du béton, la terre sera envoyée avec une certaine pression dans le coffrage ce qui favorisera son auto-placement entre les banches. La réussite du test de la L-Box nous montre que même sans une pression appliquée au mélange, l'assemblage Terre / Plâtre peut se positionner de façon autonome dans un coffrage complexe.



Figure 31 : Photo : L-Box après écoulement

1.2 MUR ECHELLE 1

Dans la continuité des diverses expériences menées sur la terre coulée, il est important de s'interroger sur la mise en œuvre architecturale. Pour cela, la réalisation d'un mur à échelle 1 permet de se rendre compte de l'efficacité du mélange proposé (Terre / plâtre). Construire un mur à échelle 1 est la preuve que l'utilisation de la terre coulée dans le domaine de la construction est une alternative intéressante ne visant pas à remplacer les constructions en béton mais plutôt proposer une autre manière de construire plus respectueuse de l'environnement.

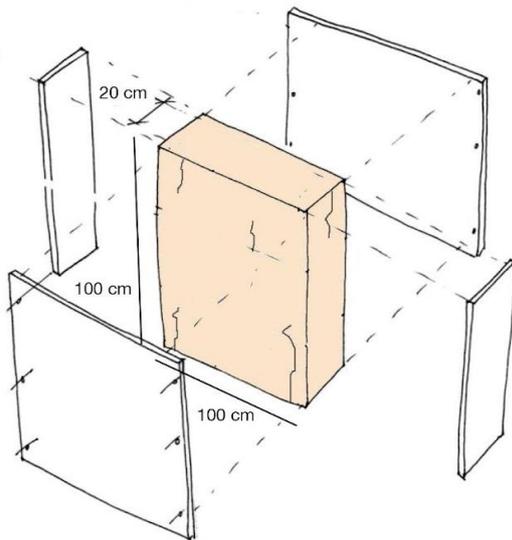


Figure 32 : Schéma : Mur à échelle 1

Le but de cette ultime expérience est de prouver que le mélange peut tenir sur son propre poids, être coulé dans un coffrage, être décoffré et sécher en respectant une certaine temporalité.

Il permet d'évaluer le temps de séchage d'un mur de 1 m de hauteur sur 1 m de longueur et 20 cm de largeur.

Cette expérience est la résultante d'une recherche active visant à légitimer les constructions et l'utilisation du principe de terre coulée en architecture.

EXPERIENCE ET RESULTATS A VENIR...

1.2 RECYCLAGE DU MELANGE TERRE / PLÂTRE

Dans la suite des expériences, le recyclage de ce mélange était-il possible ?

La terre est un matériau recyclable à l'infinie. Le plâtre également. Ce qui fait l'intérêt de ces deux matériaux passe par le fait qu'ils font partie des ressources inépuisables de la planète. L'hypothèse selon laquelle le mélange de ces deux éléments est recyclable, découle naturellement de ces trois constats. Il est important de poser un questionnement sur la faisabilité de cette expérience. Comment recycler un mélange composé de deux éléments relativement différents.

Une première expérience a été menée visant à déconstruire le mélange. Lors de son séchage, l'eau contenue dans l'assemblage terre / plâtre disparaît. Le premier essai consiste à casser une éprouvette jusqu'à obtenir un composé avec une granulométrie similaire à celle avant gâchage. Une fois obtenue, l'idée est d'y ajouter de l'eau avec un taux de gâchage identique que lors du premier assemblage et reprendre les étapes de prise et de séchage de l'éprouvette de base. Le problème de cette méthode se rapporte au composant plâtre. En effet, le plâtre après le premier mélange et après séchage n'est plus actif. Il perd toutes ses caractéristiques, ce qui ne permet pas un remploi de ce nouveau mélange.

Le second essai découlant de la première expérience, passe par une mise en lien avec le procédé de fabrication du plâtre. En effet, le plâtre est un matériau obtenu grâce à la calcification du gypse. C'est ce passage en température qui lui donne ses

caractéristiques et qui en fait du plâtre. Avec le plâtre Base S, une température de 150° est nécessaire pour le rendre de nouveau actif. A cette température, les granulats de terres ne sont pas impactés.



Figure 32 : Photo : Mélange Terre / Plâtre concassé et pesé après four

L'hypothèse serait donc, après avoir concassé le mélange sec, de le faire chauffer à 150° pour à la fois réactiver le plâtre mais également extraire toutes les particules d'eau encore présentes dans le mélange. Pour savoir si toutes ces particules d'eau sont parties, il est important de peser le mélange concassé à plusieurs reprises jusqu'à obtenir une variation de poids nulle.

Cette action permet d'obtenir un composé presque similaire avec celui de base. Il faut ensuite le mélanger avec l'eau à taux de gâchage identique et le couler dans un coffrage.

Cette expérience permet de se rendre compte que les temps de prise et de séchage ne diffèrent que très peu, mais également que la résistance à la compression du nouveau mélange reste inchangée.



Figure 33 : GRAPHIQUE : Mise en relation entre la perte de poids et le temps lors du passage au four du mélange

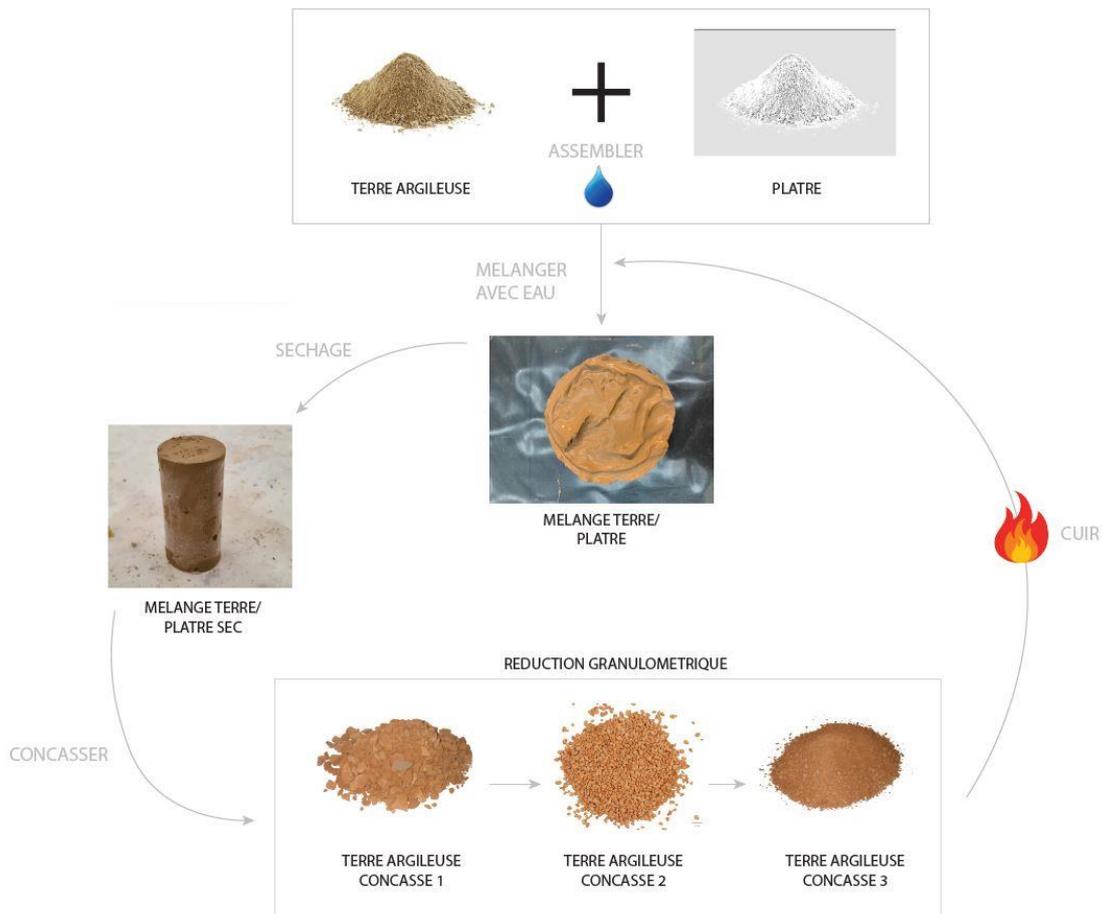


Figure 34 : Schéma de recyclage du mélange Terre / plâtre

CONCLUSION

1. Mélange terre coulée / Plâtre

Cet article permet d'aborder le problème du temps de démoulage de la terre coulée. En effet, si le mélange n'est composé que d'argile et d'eau, celui-ci est trop long à sécher. La terre a besoin d'air pour pouvoir sécher et donc être démoulée. Les expériences démontrent qu'avec l'ajout de plâtre dans le mélange, celui-ci peut "prendre" à l'intérieur du coffrage sans nécessité d'air. Une fois pris, le coffrage peut être retiré car le plâtre a consolidé la terre coulée pour qu'elle puisse tenir sur son propre poids. La terre peut ensuite continuer à sécher. Grâce au plâtre Base S (retardant 0,3%), la terre coulée peut être décoffrée dans un temps semblable à celui du béton. Les expériences montrent qu'en 35 heures, le mélange peut être décoffré. L'ajout de 25% de plâtre dans la terre coulée améliore la résistance à la compression du mélange.

2. Recyclage (constat)

Séparément, les deux composants sont recyclables. L'hypothèse serait de dire qu'il n'est pas nécessaire de diviser les deux composants et qu'ils peuvent être chauffés ensemble sans impacter la composition de la terre. Une fois chauffé, le mélange peut alors être coulé à nouveau. Ce sujet peut être une ouverture pour un nouvel article qui pourrait tester ce phénomène de recyclage à plusieurs reprises et voir l'impact qu'il a en compression. Le but est de proposer une alternative au béton grâce à la terre coulée, qui est disponible naturellement et recyclable à l'infinie.

3. Structure et résistance (ouverture article)

L'amélioration au niveau structurel de ce mélange est primordiale afin de pouvoir construire à grande échelle. L'ajout de fibres végétales comme la technique du torchis pourrait être une piste de recherche. Le but serait de tester de nouveaux moyens pour consolider la terre coulée et ainsi être comparable au béton.

REMERCIEMENTS

Nous remercions très sincèrement Marc Potin, de la Plâtrerie Vieujot à Montmorency, qui nous a accompagnés pendant deux années, nous laissant accès à son atelier de fabrication. Son aide précieuse et ses nombreuses connaissances dans le domaine, nous ont permis d'avancer dans nos recherches. Disposant de toutes les matières, il a su nous diriger et nous aider dans la finalité de nos expériences. Marc Potin n'a pas hésité à prendre de son temps personnel pour nous expliquer le fonctionnement de nombreux procédés.

Merci à Robert Leroy, Thierry Ciblac et Loïc Couton pour leur encadrement et leurs suivis tout au long de ces semestres, qui ont su faire évoluer cette recherche afin d'obtenir un résultat et une réponse espérée au début du séminaire.

Merci également à Monsieur Benoit Verant, de l'atelier bois à l'école ENSAPM pour son savoir-faire et sa patience.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] -**Kouka Amed Jérémy OUEDRAOGO**, “Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques”, (2019)
- [2] -**Mango-Itulamya**, “Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée”. Thèse de Doctorat. Université de Liège, Liège.
- [3] -**Alban Pinel**, “Transition liquide-solide dans des dispersions d’argiles contrôlée par un biopolyme”. Université de Lyon, (2017)
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01920833>
- [4] -**Alban Pinel**, “Towards poured earth construction mimicking cement solidification: demonstration of feasibility via a biosourced polymer”. (2017)
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01656294>
- [5] -**Daria Ardant, Coralie Brumaud . Guillaume Habert**, “Influence of additives on poured earth strength development”, (27 May 2020)
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01006024/document>
- [6] -**Simon Guihéneuf**, “Formulation et renforts de blocs en matériau terre pour une utilisation structurelle”, (Rennes 2020)
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03194559>
- [7] -**Jorge de Brito**, “Lime as an Anti-Plasticizer for Self-Compacting Clay Concrete”, (Avril 2016)
<https://www.mdpi.com/1996-1944/9/5/330>
- [8] -**Patrice DOAT, Laetitia FONTAINE, Romain ANGER**, “Béton d’Argile Environnemental 2010-2013”, (juillet 2016)
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01179451/document>
- [9] -**Mariette Moevus, Yves Jorand**, “Earthen construction: an increase of the mechanical strength by optimizing the dispersion of the binder phase”, (Mars 2015)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131713002767>
- [10] -**Elena Castellini**, “Sodium hexametaphosphate interaction with 2:1 clay minerals illite and montmorillonite”, (2013)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169131713002767>
- [11] -**Hugo Gasnier**, “Construire en terres d’excavation, un enjeu pour la ville durable. Art et histoire de l’art. Université Grenoble Alpes, 2019”. Français. Tel-02165900
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03194559>
- [12] -**Sylvain Meille**, “Étude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure ». Matériaux. INSA de Lyon, 2001. Français. Tel-00477188
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00477188/document>
- [13] - Etude sur les limites de plasticité et la consistance des sols :
https://www.fao.org/fishery/docs/C/Drom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706f/x6706f08.htm