

# Formulation d'un béton à base de sol argileux : étude de l'effet de la proportion des fines et de l'ajout de chènevotte

Duc Chinh NGO, Nadia SAIYOURI, Zoubir Mehdi SBARTAI

Université de Bordeaux, I2M, Département GCE

[duc-chinh.ngo@u-bordeaux.fr](mailto:duc-chinh.ngo@u-bordeaux.fr)

[nadia.saiyouri@u-bordeaux.fr](mailto:nadia.saiyouri@u-bordeaux.fr)

[zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr](mailto:zoubir-mehdi.sbartai@u-bordeaux.fr)

---

RESUME. L'aspect écologique d'un bâtiment ou d'un ouvrage, tout comme la sécurité et la pérennité mécanique, prend une place importante dans la construction. On assiste ces dernières années à des changements de comportement et une volonté de voir les bétons classiques être remplacés par des bétons contenant une forte proportion de produits variés dits «écologiques». Ces bétons écologiques ont pour objectif de réduire la consommation du ciment, la production de CO<sub>2</sub> et maintenir des propriétés acceptables.

Les résultats issus des travaux sur les sols traités aux liants montrent que ces derniers permettent de modifier considérablement les propriétés mécaniques des sols argileux. De même, nous notons que pour le résultat attendu, les dosages dépendent de la texture du sol utilisé, de sa structure, du mode de mise en œuvre, etc. Très peu d'études sur la réalisation d'un béton à base de sol pour une mise en œuvre classique dans un chantier existent.

Cet article vise à optimiser un éco-béton à base de sol excavé revalorisé. Un nouveau matériau issu du mélange de sol argileux, de sol sableux et de faibles quantités de ciment, de chaux et de fibres de chanvre a été testé dans cette étude. La mise en œuvre se fait par vibration comme pour un béton classique pour atteindre une plasticité convenable aux conditions requises sur un chantier. Des essais mécaniques de compression ont été réalisés sur des compositions différentes en proportions de sol sableux, sol argileux, chaux, ciment, et fibres de chanvre (chènevotte). Des mesures ultrasonores ont permis de suivre la maturation des échantillons.

Les résultats obtenus montrent que : quelle que soit la proportion des fines argileuses, la résistance de ce béton reste supérieure à 1 MPa, ce qui est suffisant pour une application de remplissage. La variation des proportions de chanvres a un faible effet sur la résistance mécanique du béton étudié.

En perspectives de ces travaux, une étude plus large est en cours pour évaluer le retrait, les propriétés thermiques et les propriétés de transfert du matériau étudié. L'effet des cycles séchage humidification sont également envisagés pour évaluer le comportement de ce matériau vis à vis des variations environnementales.

ABSTRACT. As safety and mechanical durability, the ecological aspect of building, takes an important place in construction. In recent years, there are some changes in behavior and willingness to see traditional concretes be replaced by those containing a high proportion of products called "ecological" variety. The aims of these ecological concretes are to reduce the consumption of cement, CO<sub>2</sub> production and to maintain acceptable properties.

The results of previous works on soil treated with binders show that they can significantly change the mechanical properties of clay soils. Also, we note that for the expected result, dosages depend on the skeleton, the procedure method, etc. There are a few studies on the realization and the application of soil concrete on the construction field.

The aim of this article is to optimize an ecological concrete from upgraded excavated soil. A new soil concrete from the clay soil mixture, sandy soil and small quantities of cement, lime and hemp fibers was tested in this study. This implementation is done by vibration as normal concrete to achieve the proper plasticity conditions on construction site. The compression tests were carried out on different samples made in proportions sandy soil, clay soil, lime, cement, and hemp fiber (shives). Ultrasonic method have allowed to follow the maturation of samples.

The results obtained show that for any proportion of fine clay, the compressive strength of these concretes is greater than 1 MPa which is sufficient for a filling application. The variation of the proportions of hemp fiber has a low effect on strength of concrete.

In perspectives of this work, studies on the evaluation of shrinkages, thermal properties and transfer properties of this material will be carried out. The effect of wetting-drying cycles is also envisaged to evaluate the behavior of this material in conjunction with environmental effects.

MOTS-CLÉS : *Matériau écologique, béton à base de terre, béton d'argile, résistance en compression, ultrasons, durabilité*

KEY WORDS : *Ecological material, soil concrete, clay concrete, compressive strength, ultrasonic method, durability*

---

## 1. Introduction

De nos jours, le béton ordinaire est largement utilisé pour la construction des bâtiments et des infrastructures. Le ciment est un liant principal dans ce type de matériau. Cependant, il présente des contraintes environnementales telles que l'épuisement des ressources naturelles (extraction du calcaire), la pollution, l'augmentation de CO<sub>2</sub> dans l'air (calcination du CaCO<sub>3</sub>). Il est nécessaire de diminuer la quantité du ciment en utilisant d'autres liants comme le sol argileux, une faible proportion de ciment et de chaux. Dans ce contexte, les constructions à base de terre crue sont recommandées à utiliser. Par contre, la résistance mécanique et la durabilité de ce matériau sont encore faibles et elles ont besoin d'être améliorées. Donc, le traitement des sols aux liants est une des techniques appliquées. Les paramètres importants durant le traitement sont à considérer : les limites d'Atterberg, la résistance en compression,

Dans la littérature, les travaux montrent que de 2% à 4% de chaux, les limites d'Atterberg augmente légèrement et puis se stabilise; elle diminue lorsque la quantité chaux atteint 8% [BEL 96, KHA 02, LAS 09]. D'autres études indiquent la limite de liquidité diminue et la limite de plasticité augmente avec l'augmentation du ciment [SAR 09]. L'augmentation de chaux et ciment entraîne l'augmentation de la résistance en compression et la diminution de la valeur au bleu méthylène [AFE 00, ZOH 12, KHA 02]. Les travaux précédentes portent sur la variation de chaque liant afin d'améliorer la propriété mécanique du sol. Une étude récente [HIB 13] sur le sol traité en variant plusieurs compositions (3% de chaux, 8% de ciment et 0,6% des fibres de lin) a donné des bonnes performances.

Dans cette étude, nous avons développé une méthode expérimentale qui consiste à fabriquer des compositions différentes du béton à base de terre (béton de terre). Les composants principaux sont le sol sableux, le sol argileux, le ciment, la chaux, les fibres chanvre (chènevottes) et l'eau. Les différentes compositions ont été testées pour étudier l'effet du sol argileux et des fibres de chanvres sur la résistance mécanique du béton.

Pour cela, nous avons réalisé des formulations différentes du béton de terre en faisant varier les quantités du sol argileux et des chènevottes. Les essais de compression, les mesures ultrasonores et les mesures perméabilités ont été effectués sur les éprouvettes de différentes dimensions. Ils ont pour but de quantifier la résistance mécanique, la vitesse ultrasonore et la perméabilité.

L'effet des conditions de la cure a été également considéré. Pour cela, deux états différents des éprouvettes ont été mises en œuvre: (1) à l'air libre et (2) dans une condition de l'humidité relative contrôlée.

## 2. Programmation expérimentale

L'étude expérimentale a été réalisée sur 5 compositions (sol argileux, sol sableux, ciment, chaux et fibres). Pour étudier l'effet des conditions de maturation, les compositions ont été testées dans deux conditions : dans une condition contrôlée de l'humidité et dans un environnement de laboratoire à l'air libre.

### 2.1. Matériaux utilisés

#### 2.1.1. Sol argileux

Dans notre étude, nous avons utilisé le sol argileux qui a été caractérisé par la méthode granulométrique, sédimentation, ses limites d'Atterberg et l'essai au bleu méthylène. Les caractéristiques principales de ce sol sont présentées dans le tableau 1.

Essai	Critère	Valeur	Notes
Limites d'Atterberg	Limite de liquidité $W_L$	33,69%	
	Limite de liquidité $W_P$	19,30%	
	Indice de plasticité $I_P$	9,99%	Sol argileux minéral de moyenne plasticité
Granulométrie	Limon (0,002 à 0,06 mm)	1,65% (en masse)	
	Sable (0,06 à 2 mm)	30,32% (en masse)	
	Gravier (>2 mm)	68,03% (en masse)	
Bleu méthylène	VBS	5,72	Sol argileux

*Tableau 1. Caractéristiques du sol argileux*

#### 2.1.2. Sol sableux

Dans cette étude, le sol sableux venant d'un chantier à proximité de Bordeaux a été également utilisé. Les caractéristiques principales de ce sol sont présentées dans le tableau 2.

Essai	Critère	Valeur	Notes
Granulométrie	Limon (0,002 ó 0,06 mm)	0,64 % (en masse)	
	Sable (0,06 ó 2 mm)	72,54 % (en masse)	
	Gravier (> 2 mm)	26,82 % (en masse)	
Essai au bleu méthylène	VBS	0,67	Sol sablo limoneux

**Tableau 2.** Caractéristiques du sol argileux

### 2.1.3. Chènevottes

Les fibres de chanvre, appelées chènevottes ont été choisies en tant que granulat végétal. La longueur des chènevottes est de 5 à 25 mm. L'épaisseur de ces fibres est inférieure à 2mm. La masse volumique des chènevottes en vrac est de l'ordre de 110 kg/m<sup>3</sup> dans les conditions ambiantes (température et humidité relative du laboratoire). Ces fibres ont pour rôle le renforcement de la structure : empêcher la fissuration au séchage, accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité relative, alléger la masse volumique du béton et améliorer les propriétés thermiques.

### 2.1.4. Ciment

En se basant sur les deux critères principaux (le taux du clinker et l'impact CO<sub>2</sub>), nous avons choisi le ciment CEM V (SV) 42,5N pour les formulations testées du béton à base de sol.

### 2.1.5. Chaux

Nous avons choisi la chaux vive (chaux pure tradi 100 NHL5) un produit de Saint Astier, conforme à la norme européenne EN 459-1 pour les formulations testées.

## 2.2. Formulations

Le dosage de sol argileux a été varié de 20% à 40% et le dosage de chènevotte de 0% à 1,2% d'où 9 formulations ont été réalisées selon le tableau 3 suivant :

N°	Sol (%)	Sol argileux (%)	Sol sableux (%)	Ciment (%)	Chaux (%)	Fibres (%)	Eau (%)
1	65,86	20	80	7,21	2,14	0	25,4
2	64,66	20	80	7,21	2,14	0,6	25,4
3	64,05	20	80	7,21	2,14	1,2	25,4
4	65,86	30	70	7,21	2,14	0	25,4
5	64,66	30	70	7,21	2,14	0,6	25,4
6	64,05	30	70	7,21	2,14	1,2	25,4
7	65,86	40	60	7,21	2,14	0	25,4
8	64,66	40	60	7,21	2,13	0,6	25,4
9	64,05	40	60	7,21	2,14	1,2	25,4

**Tableau 3.** Les formulations des bétons testés en % massique

## 2.3. Conception des éprouvettes

Pour l'essai de compression, nous avons réalisé les éprouvettes cubiques de dimension 10\*10\*10 cm<sup>3</sup>.

Pour comprendre l'effet de la condition de cure (maturation) des éprouvettes sur la résistance en compression du béton, deux conditions de cure ont été testées :

- Premier cas : après la réalisation des éprouvettes, ces éprouvettes ont été stockées dans l'air libre (la température est de l'ordre de 25°C et l'humidité relative de 70%).
- Deuxième cas : éprouvettes stockées dans une boîte plastique fermée (la température normale de 25°C et l'humidité relative 90 à 100 %).

## 2.4. Matériel et méthode de mesure de la propagation du son

Dans cette étude nous avons utilisé un système portable qui est composé d'un générateur d'impulsion PUNDIT (Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester). Ce système permet de réaliser des mesures sur éprouvettes en laboratoire, sur corps d'épreuve du site test et sur ouvrages réels. Le générateur envoie une

impulsion électrique qui est convertie en ondes de pression (longitudinales) par l'émetteur piézoélectrique. Les ondes ultrasonores traversent le matériau couplant et se propagent dans le béton. Elles sont reçues par le récepteur et sont converties en une impulsion électrique et transmises au générateur. À partir du temps de propagation T, la vitesse ultrasonore, notée V en m/s, est calculée pour chaque mesure par la relation suivante :

$$V = \frac{L}{T} (m / s)$$

avec L : la distance considérée entre émetteur et récepteur.

Avant chaque mesure, l'étalonnage de l'appareil a été réalisé. La procédure de mesure est présentée sur la figure 1.

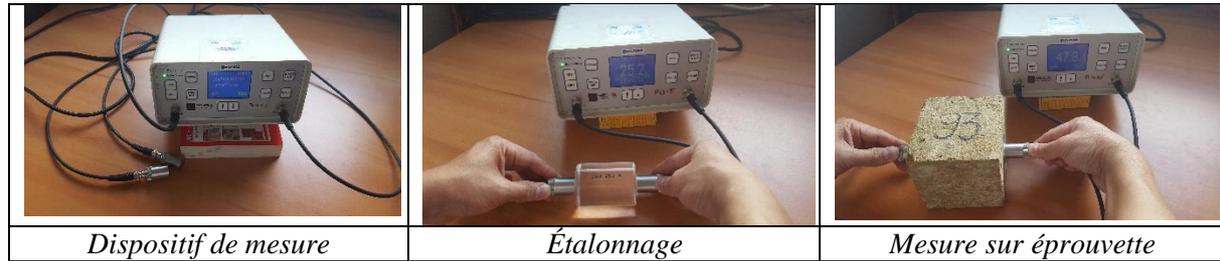


Figure 1. Mesure de la vitesse de propagation du son

### 3. Résultats et discussions

Pour chaque mesure, 3 éprouvettes ont été testées et la valeur moyenne de ces mesures a été considérée ainsi que l'écart type.

#### 3.1. Essai de compression

- Epreuves conservées dans l'air libre

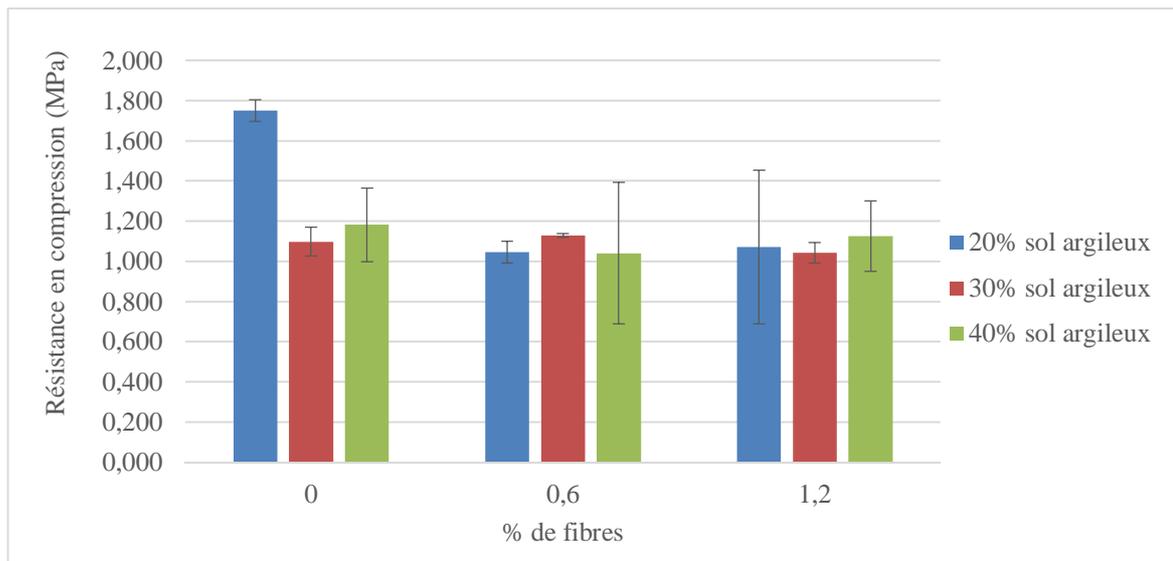
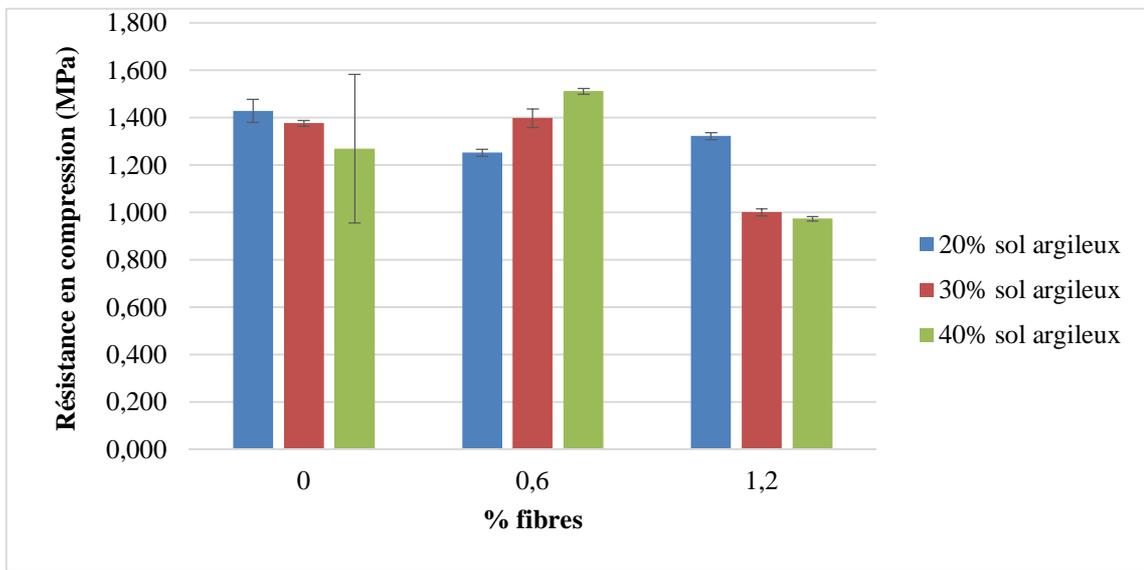


Figure 2. Effet de sol argileux et des fibres sur la résistance en compression à 28 jours

Cette figure montre que l'effet du sol argileux est considérable sur la résistance mécanique. Quand le sol argileux est de 20% les fibres influencent sur la résistance en compression du béton. Cette résistance diminue avec l'augmentation des fibres.

Les résultats montrent aussi qu'avec le sol argileux à raison de 30% à 40%, les fibres influencent légèrement sur la résistance en compression du béton. Les fibres ajoutées dans le béton font diminuer la masse volumique du béton. Cela influence la structure du béton, augmente sa porosité dont la résistance en compression du béton diminue en fonction avec le dosage des fibres.

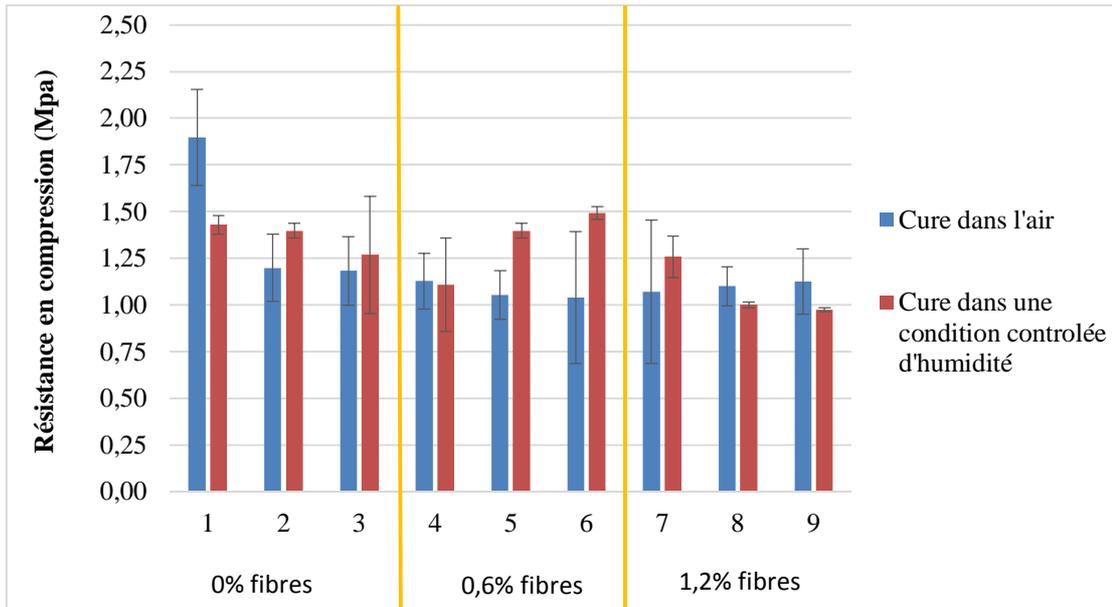
- La cure des éprouvettes est faite dans une condition d'humidité relative contrôlée.



**Figure 3.** Effet de sol argileux et des fibres sur la résistance en compression à 28 jours

On observe sur la figure 3 que : lorsque le pourcentage de fibres est de 0,6%, la résistance en compression augmente avec l'augmentation pourcentage de sol argileux de 20% à 40%. Cette valeur varie de 1,2 MPa à 1,5 MPa. Par contre, lorsque le pourcentage de fibres est de 1,2%, l'influence de fibres la résistance en compression est faible avec la quantité du sol argileux de 30% à 40%.

- Comparaison de méthode de cure des éprouvettes :



**Figure 4.** Résistance en compression des éprouvettes par 2 méthodes de cure

On observe dans les deux cas de cure des éprouvettes que la condition de cure des éprouvettes influence légèrement la résistance en compression du béton. La résistance mécanique diminue avec l'augmentation de la quantité des fibres, de l'ordre de 1-2 MPa en condition de l'air libre. Dans la condition de l'humidité relative contrôlée, l'effet des fibres sur la résistance mécanique est très faible.

En général, les éprouvettes qui sont cure dans la condition contrôlée d'humidité relative, atteignent les valeurs plus grandes (de 15% à 35%) que celle qui sont en maturation dans l'air libre. Dans les deux cas de maturation on observe qu'avec les fibres sont de 1,2%, l'influence des fibres sur la résistance en compression est faible lorsque la quantité du sol argileux de 30% à 40%.

### 3.2. Essai de propagation du son

Pour étudier l'effet de la condition de cure des éprouvettes sur la vitesse de propagation du son des bétons fabriqués nous avons mesuré cette vitesse dans les deux conditions de cure.

- Eprouvettes conservées dans l'air libre (0% de fibre)

La figure 5 montre la relation de vitesse de propagation du son en fonction du temps avec la variation du sol argileux lorsque les éprouvettes sont conservées dans l'air libre. On constate que la vitesse propagation du son diminue avec l'augmentation de sol argileux.

En général, la vitesse de propagation du son d'un matériau dépend sa rigidité et sa porosité. Donc, la vitesse de propagation du son de béton de terre augmente avec l'augmentation de son durcissement et diminue avec l'augmentation de sa porosité.

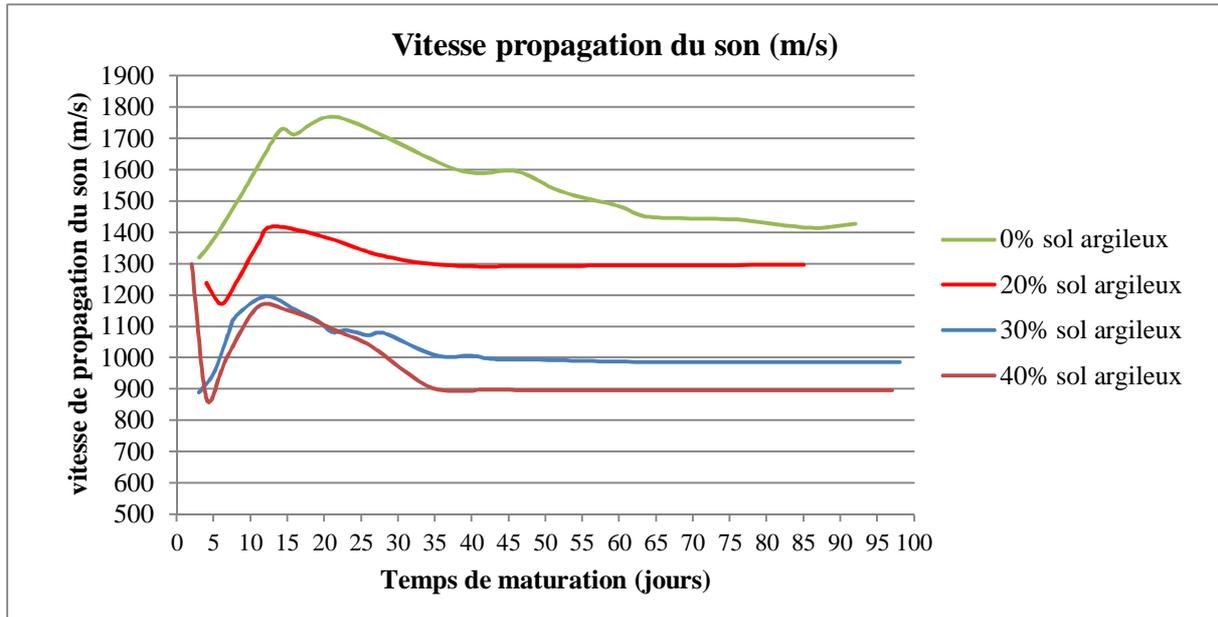


Figure 5. Vitesse de propagation du son (cure dans l'air libre)

De 0 à 7 jours, la porosité du béton augmente fortement parce que la quantité d'eau dans le béton diminue (à cause de l'évaporation et l'eau perdue pendant les procédures hydratation). Dans ce temps là, la vitesse de durcissement des éprouvettes augmente légèrement. Les résultats montrent la vitesse de propagation du son diminue (1300/900 m/s avec 40% sol argileux, 1250/1150 m/s avec 30% sol argileux). Cela justifie que, dans les premiers jours de maturation, la vitesse de propagation du son due à l'augmentation de porosité du béton est plus importante que celle-ci due à l'augmentation de durcissement.

De 7 à 14 jours, la porosité du béton augmente légèrement et le durcissement du béton augmente fortement. Donc la vitesse de propagation du son du béton augmente (1100/900 m/s avec 30/40% sol argileux, 1200/1400 m/s avec 20% sol argileux) : l'influence de l'augmentation de durcissement est considérablement par rapport aux résultats obtenus dans les premiers jours de maturation. Sur la figure 5, la vitesse de propagation du son atteint la valeur maximale lorsque le procédure de maturation de 11 à 14 jours (1400 m/s avec 20% sol argileux, 1200 m/s avec 30/40% sol argileux).

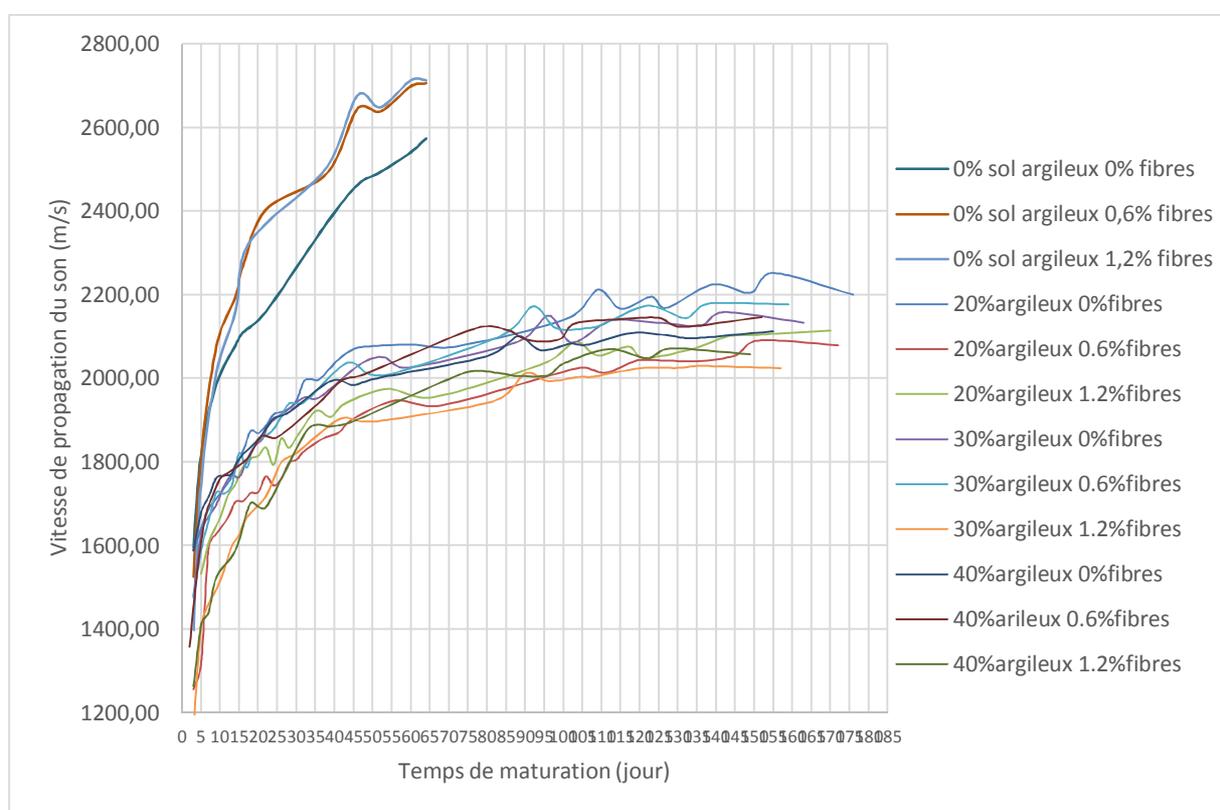
De 14 à 35 jours, on observe que la vitesse de propagation du son du béton diminue (1200/900 m/s avec 30/40% sol argileux, 1400/1300 avec 20% sol argileux). Le mécanisme dans cette période est considéré comme dans les premiers jours de maturation.

La vitesse de propagation du son est stable (constance) après 35 jours parce que la porosité du béton et son durcissement sont quasiment constantes.

- Eprouvettes sont cure dans une condition contrôlée de l'humidité relative (avec des fibres)

La figure 6 présente la relation de vitesse de propagation du son en fonction du temps avec la variation du sol argileux lorsque la cure des éprouvettes est faite dans une condition d'humidité relative contrôlée.

Dans cette condition la quantité d'eau des éprouvettes perd principalement due au procédure hydratation et légèrement due à l'évaporation.



**Figure 6.** Vitesse de propagation du son (cure dans une condition d'humidité relative contrôlée)

Nous observons que la vitesse de propagation du son diffère suivant les modes de cure des éprouvettes (Figure 5 et Figure 6). En condition d'humidité relative contrôlée (Figure 6), la vitesse de propagation du son augmente avec le temps de maturation jusqu'à 90 jours (de 2000 à 2200 m/s), et puis augmente légèrement (de 2000-2100, 2100 à 2200).

De plus, la figure 6 montre aussi qu'avec le sol argileux de 0% (100% de sol sableux), la vitesse de propagation du son est toujours plus élevée que celle-ci avec l'addition de sol argileux. Les fibres influencent légèrement sur la vitesse de propagation du son.

#### 4. Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail était d'étudier le comportement du béton à base de sol. Nous nous sommes intéressés à l'utilisation maximale de sol argileux pour maximiser les propriétés thermiques et acoustiques. Des fibres de chènevotte ont été rajoutées pour alléger le matériau et réduire le retrait et la fissuration. Deux conditions de cure des éprouvettes ont été testées dans cette étude.

La résistance du béton testé diminue avec l'augmentation des fibres quand le pourcentage de sol argileux est de 20% et presque constante quand le pourcentage de sol argileux est de 30% à 40%. Le pourcentage maximal de sol argileux de 40% est la meilleure composition pour fabriquer ce type de béton car il présente un optimum entre quantité d'argile, résistance et ouvrabilité suffisantes.

Les fibres en proportions de 0% à 1,2% influencent légèrement la vitesse de propagation du son et la résistance en compression. Donc les fibres peuvent être utilisées pour améliorer d'autres propriétés du béton étudié (thermiques et acoustiques).

Le béton à base de sol est un matériau écologique : l'utilisation des sols locaux sont les composants principaux. Il serait intéressant de poursuivre les plans d'expérience visant l'évaluation de sa stabilité dimensionnelle vis-à-vis du retrait et des cycles séchage/humidification, ainsi que ses propriétés de transfert (porosité, thermique, perméabilité).

#### 5. Bibliographie

[AFE 00] Afès, M., Didier, G., 2000. *Stabilisation des sols gonflants: cas d'une argile en provenance de Mila (Algérie)*. Bull. Eng. Geol. Environ. 59, 75683.

- [BEL 96] Bell F.G. (1996): *Lime stabilization of clay minerals and soil*. Engineering Geology. vol. 42, n° 4, pp 223 ó 237.
- [HIB 13] HIBOUCHE, A., 2013. Sols traités aux liants Performances hydro - mécaniques et hygro - thermiques. Applications en BTP. Thèse de doctorat de L'UNIVERSITE DU HAVRE, 321 p.
- [KHA 02] Khattab S.A.A., 2002. Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de doctorat de l'université d'Orléans. 249 p.
- [LAS 09] Lasledj A, 2009. Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques. Thèse de doctorat de l'université d'Orléans. 370 p.
- [SAR 09] Sariosseiri, F., Muhunthan, B., 2009. *Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils*. Eng. Geol. 104, 1196125.
- [ZOH 12] Zoheir, G.B., Smaine, M., Mokhtar, D., 2012. *Effet du ciment sur le comportement physico-chimique d'un matériau de la région de Sidi bel Abbès 10*.