

Membre de
UNIVERSITÉ DE LYON



École Nationale
des Travaux Publics de l'État

Direction de la Recherche

Département Génie Civil et

Bâtiment

FRE CNRS 3237



Direction de la Recherche

courriel : lgmdgcb@entpe.fr

rue Maurice Audin

69518 Vaulx-en-Velin Cedex

téléphone : +33 (0)4 72 04 7066

télécopie : +33 (0)4 72 04 71 56

<http://www.entpe.fr>

Influence de l'ajout de ciment et/ou de chaux - ciment sur le matériau en provenance de Lorentzen en vue de son utilisation dans la construction d'un mur en pisé à Dehlingen

Ali MESBAH

October 2011

1 Introduction

Dans le cadre des campagnes de valorisation des matériaux locaux, un projet de construction d'un Centre d'interprétation dans la commune de Dehlingen a été présenté par «nunc architecte» et accepté par la Communauté de Communes d'Alsace Bossue.

Le laboratoire Géo-matériaux (LGM) a été contacté pour une étude de caractérisation d'échantillons de sol disponible près de cette commune, nous l'appelons « matériau Dehlingen ». Deux Big Bag de ce matériau ont été livrés et stockés dans notre laboratoire.

Dans cette étude nous aurons à effectuer:

- a. études de caractérisations physiques du matériau ;
- b. étude du compactage...
- c. études de caractérisations mécaniques sur matériau stabilisé et non stabilisé.

2 Essais d'identification

Objet de l'étude

Le but de ce travail est d'étudier l'influence des stabilisants: du ciment, de la chaux ou un mélange chaux+ciment à proposition égale à 2%, sur les caractéristiques mécaniques et la tenue à l'eau du matériau.

2.1.- Identification visuelle

Le matériau de base est un sol argileux schisteux de couleur marron clair. Afin de réaliser des essais mécaniques au laboratoire (essais Proctor et/ou essai de compactage statique), la terre sur laquelle des essais d'identification ont été réalisés a été tamisée à 20 mm, :

2.5.- Taux de matière organique

Le taux de la matière organique contenu dans le matériau a été mesuré par la méthode « perte au feu », suivant la norme XP.P94-047 est de 2,74%.

2.2.- Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique du matériau étudié a été réalisée par voie humide conformément à la norme NF P94- 056 sur une masse de 5120 g et complétée par de l'essai sédimentométrique.

La courbe ci-après (figure 1).

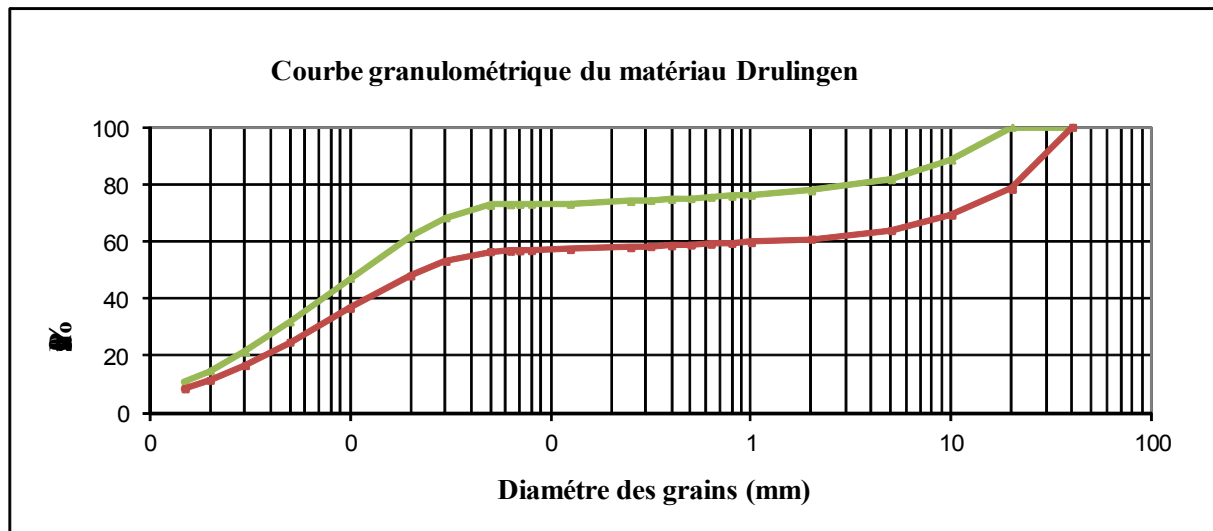


Figure 1: courbe granulométrique et sédimentométrique du matériau Dehlingen,.

Limite d'Atterberg

Elles ont été réalisées sur la fraction 0/400 μm du matériau. Les résultats obtenus sont

- Limite de liquidité $W_L=45.21\%$
- Limite de plasticité $W_P=36.94\%$
- Indice de plasticité $I_P=8.27\%$

Essai au bleu de Méthylène

L'essai au bleu a été réalisé sur un échantillon de 30 g provenant de la fraction 0/0.08mm du matériau. La valeur obtenu est : $VB_{0/0,080\text{mm}} = 4.5$.

Classement du matériau

Sol limoneux peu plastique, suivant la classification GTR il est de classe A1. D'après le coefficient d'activité $Ca = IP/\% \text{ argile} = 8,3/12 = 0.7$, ce sol est peu actif (tableau1).

| Dmax | tamisats à | tamisats à | Ip | % Matière | VB | VBS | Classeification | Coefficient d'activité |
|------|------------|------------|-----|-----------|-----|-----|-----------------|--------------------------------|
| mm | 80 μ | 2 μ | | organique | | | GTR | $Ca = I_p / \% \text{ argile}$ |
| 20 | 73% | 12% | 8,3 | 2,74 | 4,5 | 2,6 | A1 | 0,7 |

Le tableau 1 classification du matériau.

Les limites d'Atterberg réalisés sur de fractions 0/400 μm ($IP = 8,27$) ainsi que la valeur de bleu de méthylène ($VB_{0/80 \mu\text{m}} = 4,5$), montrent que les fractions fines du matériau contient des argiles très sensible à l'eau.

$0 < Ca < 0.5$ inactif - $0.5 < Ca < 0.75$ peu actif - $0.75 < Ca < 1.25$ activité normal - $1.25 < Ca < 2$ actif - $2 < Ca$ très actif

3 Caractérisations mécaniques

Compactage (NF P 94 – 093)

Principe général – fabrication d'éprouvettes homogènes

Le but de ce travail est de comparer l'influence de l'ajout de chaux et/ou du ciment sur le comportement de matériau Dehlingen en vue de son utilisation dans la construction d'une structure en pisé.

Dans la technique du pisé, le matériau est mis en œuvre dans de coffrage par compactage dynamique au moyen du damage manuel ou mécanique. Cette technique de construction sur chantier se rapproche des essais « Proctor normal ou modifié » en laboratoire. Ces essais permettrons de déterminer le taux d'humidité du matériau pendant le compactage afin d'obtenir la densité sèche maximale. Ils permettront également de contrôler sa mise en œuvre sur le chantier.

En ce qui concerne l'étude du comportement mécanique du matériau (résistance en compression et/ou en traction), les éprouvettes Proctor ($\varnothing = 152\text{mm}$, $h = 152\text{mm}$) ne sont pas utilisables, vu le gradient de densité obtenu lors du compactage dynamique (Guide Techniques des Terrassements LCPC Fascicule I, page 78).

Pour palier ce problème, il faut procéder par la fabrication d'éprouvettes homogènes avec symétrie de révolution représentative de celles obtenus par les essais Proctor.

Ces éprouvettes sont fabriquées dans un moule de compactage statique, mis au point au Laboratoire Géo-matériaux (LGM). Il permet de fabriquer, sous une contrainte qui varie entre 0.5 Mpa et 10 Mpa, des éprouvettes cylindriques et homogènes.

Ce moule est constitué de deux demi-coquilles fixées sur un axe extérieur, ainsi que deux cylindres fixes et mobiles (se situant dans l'ordre en bas et haut des deux demi-coquilles). L'ensemble est capable de se déplacer indépendamment des deux pistons le long de son axe, permettant un double compactage et de réduire le gradient de densité sur la hauteur des éprouvettes.

Dans l'objectif de diminuer le gradient de densité sur la hauteur des éprouvettes, la quantité de terre foisonnée introduite dans le moule est choisie de manière à obtenir un élancement final compris entre 1.3 et 1.6, soit des éprouvettes de tailles, $\varnothing = 11.2\text{cm}$, $h \approx 16\text{cm}$.

Le tableau (2) ci-dessous présente le résumé des différents matériaux testés

| Matériaux | % ciment | % chaux |
|--------------------------------|----------|---------|
| Matériau tamisé à 20 mm (brut) | 0 | 0 |
| Matériau brut + ciment | 4 | 0 |
| Matériau brut + chaux | 0 | 4 |
| Matériau brut + ciment+chaux | 2 | 2 |
| Matériau brut + ciment | 6 | 0 |

Le tableau 2 : matériaux testés

Courbes Proctor matériau brut.

Afin d'étudier l'influence de l'énergie sur le comportement du matériau brut pendant le compactage, nous avons réalisé les essais suivants

- essais Proctor normal soit : 596 kJ/m³
- essais Proctor modifié soit : 2714kJ/m³
- essais Proctor intermédiaire soit : 1490 kJ/m³

La figure ci-dessous donne les courbes obtenues pour ces différentes énergies ;

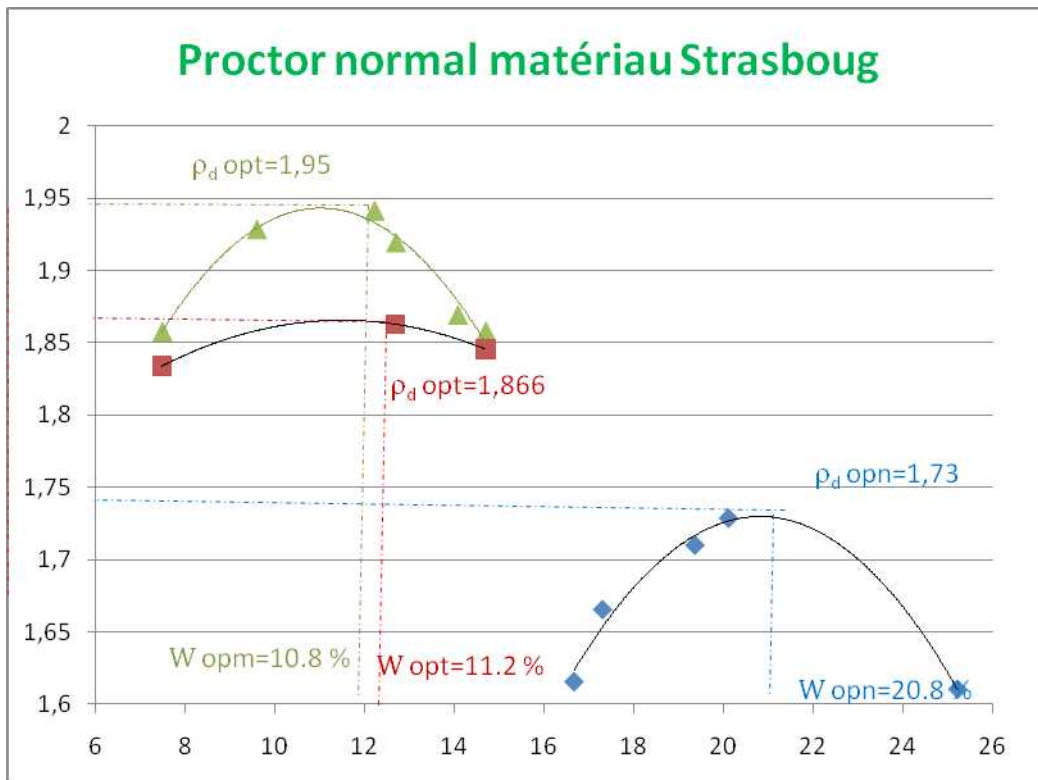


Figure 2: courbes Proctor du matériau,.

On constate sur ce graphe :

$W_{\text{opt}}=20.8\%$ $\rho_{d\text{opt}}= 1.73$

$W_{\text{opt}}=10.8\%$ $\rho_{d\text{opt}}= 1.95$

On constate que :

Dans la zone des faibles énergies de compactage, une augmentation de celle-ci implique une forte diminution de teneur en eau et entraîne une augmentation importante de la densité sèche.

Par contre à partir d'une certaine limite, la forte augmentation d'énergie n'entraîne pas une forte diminution de teneur en eau et ne provoque pas un gain important de densité sèche.

Nous avons délibérément choisi les paramètres optimaux du Proctor normal du matériau comme notre base de référence d'étude, afin de déterminer les performances minimales que le matériau peut offrir.

Recherche de la force équivalente

Nous avons cherché à déterminer une force de compactage statique permettant de fabriquer des éprouvettes cylindriques et homogènes équivalentes à celles obtenus à l'optimum de l'essai Proctor normal. Cette force va nous servir de référence pour la fabrication des tous les échantillons de notre étude, sur lesquels nous allons réaliser les essais mécaniques.

Pour cela, une quantité importante de matériau brut a été préparée à la teneur en eau d'optimum Proctor normal ($W_r=21\%$).

A l'aide du moule de compactage statique, nous avons fabriqué des éprouvettes cylindriques à différentes force de compactage (photo en annexe). L'objectif étant de trouver une force qui donne la même densité que celle de l'essai Proctor, soit $\gamma_d \approx 1.73$.

La force obtenue est de 27kN, comme on peut le voir dans le tableau ci-dessous.

C'est cette force, qui à été choisi et fixée pour la fabrication de toutes les éprouvettes de notre étude.

| Force [kN.] | Masse [g.] | Hauteur [mm.] | W [%] | r_d [g.cm ⁻³] |
|-------------|-------------|---------------|-----------|-----------------------------|
| 26 | 3189 | 155 | 21 | 1,725884 |
| 25 | 3170 | 156 | 21 | 1,704603 |
| 23 | 2813 | 140 | 21 | 1,685506 |
| 27 | 3058 | 148 | 21 | 1,733263 |
| 28 | 2998 | 144 | 21 | 1,746457 |
| 30 | 3195 | 153 | 21 | 1,751734 |

Le tableau 3 : densité des éprouvettes en fonction des forces de compactage

Cure de stockage

Des séries d'éprouvettes, à l'état brut ou stabilisé, ont été confectionnées à 27kN et stockées dans des conditions de cure (20°C et 60% Hygrométrie).

Les éprouvettes non traitées, ont été conservées dans la chambre directement après la fabrication. Les éprouvettes traitées, ont été emballées dans un plastique pendant les 15 premiers jours et stockées dans la chambre de conservation. Puis, elles ont été déballées et gardées dans cette chambre avant de subir des tests mécaniques.

A partir des résultats de ces essais, il est possible d'évaluer l'influence de l'ajout de la chaux, du ciment et ou mélange chaux-ciment sur le comportement mécanique ainsi que la tenue à l'eau du matériau.

Essais de tenue à l'eau

L'eau absorbée par le matériau pendant une période humide, entraîne une perte de résistance. C'est pourquoi il est important d'étudier la quantité d'eau absorbée par le matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques. Ceci permettra de connaître ces caractéristiques dans le cas le plus défavorable.

Pour l'essai de capillarité, les éprouvettes ont été posées sur un lit de sable soumis à une pression capillaire constante très faible. Le niveau piézométrique se trouve à 5 mm au dessous de l'éprouvette. Les éprouvettes sont pesées pendant $48 \text{ h} \pm 0.1 \text{ g}$ près, à des intervalles de temps séparés de: 0h, 1h, 2 h, 3h, 7h, 9h, 26h, 31h, et 48h.

L'analyse des résultats portera sur la vitesse d'absorption d'eau et la quantité d'eau absorbée. Les courbes résultantes représentent $\Delta P/P$ en fonction de \sqrt{t} , avec t en heures (figures 2 & 3).

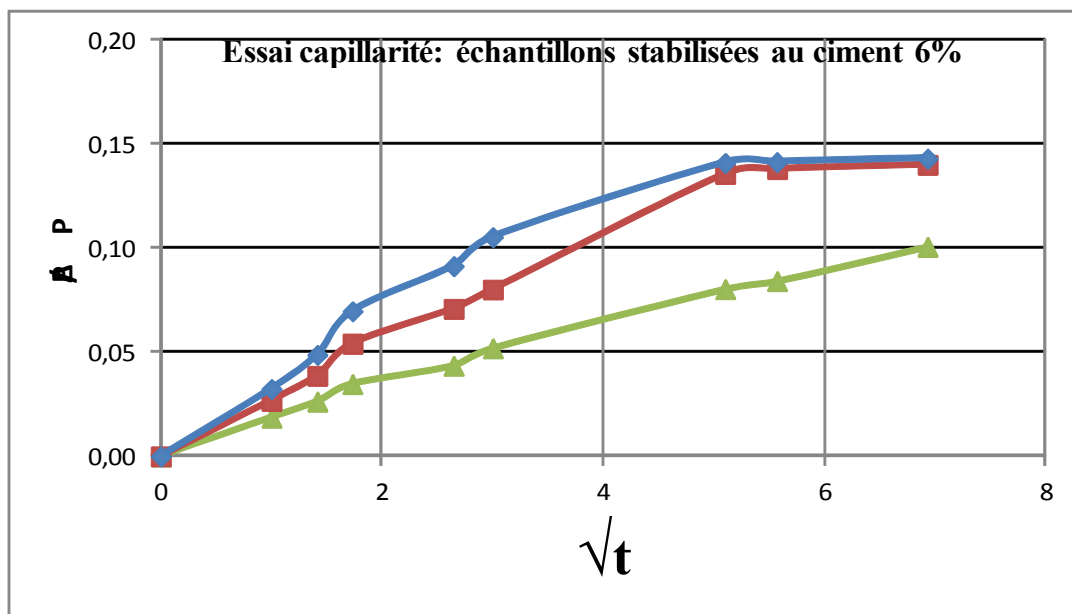


Figure 3: Courbe d'absorption du matériau stabilisé au ciment 6%

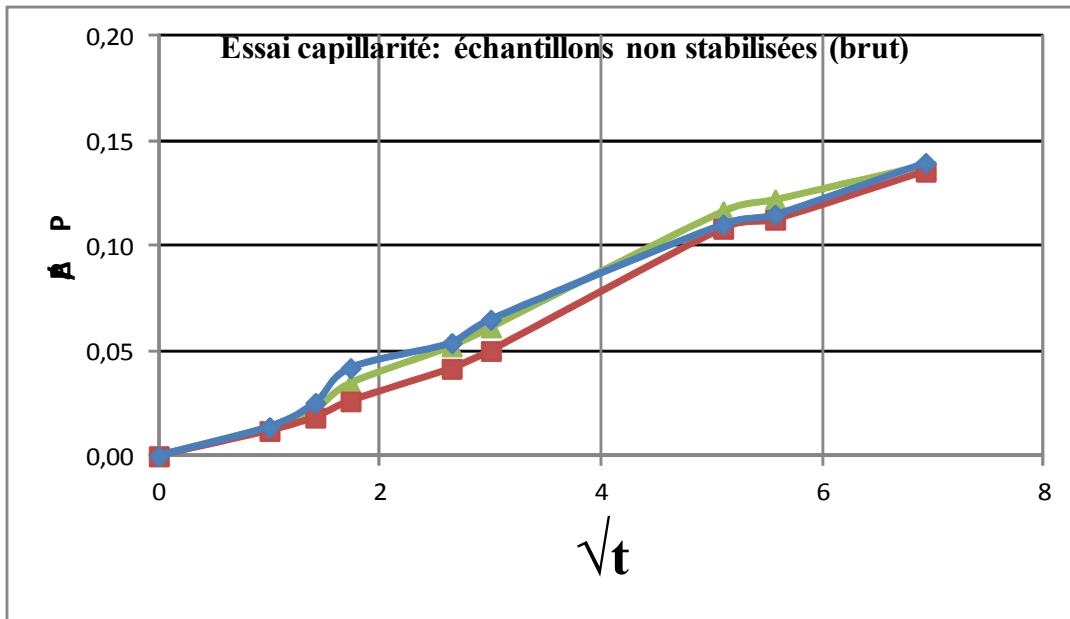


Figure 4: Courbe d'absorption du matériau non stabilisé (brut)

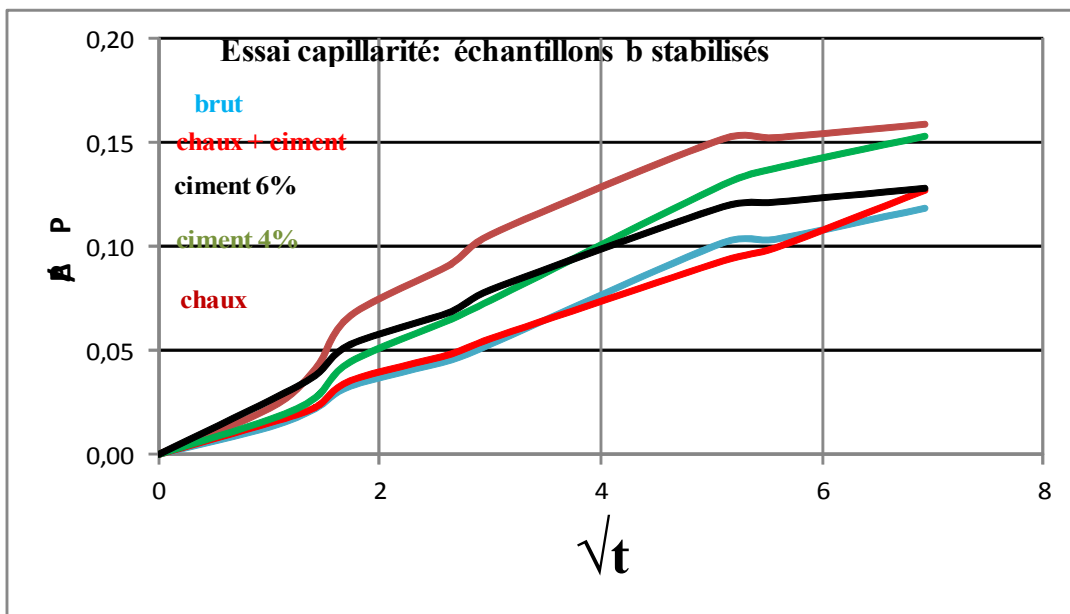


Figure 5: Courbes d'absorptions d'eau, différents traitements

La remontée capillaire des échantillons traités à 6% de ciment reste assez faible par rapport au traitement à 4% de ciment ainsi qu'à la chaux pure. Elle se stabilise au bout d'environ 30 heures de mise à l'épreuve. Alors que dans le cas des autres traitement les échantillons continuent à augmenter leurs absorptions.

Le traitement au 6% de ciment donc a un effet très positif sur la tenue à l'eau du matériau. C'est pourquoi nous préconisons ce traitement, au moins pour la première partie basse des murs

Essais mécaniques

Les essais de résistances en compression simple ainsi que les essais de tractions par fendage ont été réalisés sur les éprouvettes.

- une série juste après cure ;
- une série d'éprouvettes après avoir été soumises à l'essai de capillarité (l'état humide).

Essai de résistance en compression simple

Après conservation, des séries d'éprouvettes ont été soumises aux tests mécaniques :

Une série juste à la sortie de la chambre de conservation

Une série après avoir été soumise au test de capillarité

A partir des résultats de ces essais, il est possible d'évaluer l'influence de l'ajout du ciment, de la chaux et mélange chaux-ciment sur le comportement mécanique ainsi que la tenue à l'eau du matériau.

Afin d'assurer le comportement homogène du matériau lors des essais de compression, le dispositif d'essai a été muni d'une rotule et d'un système anti-fretage intercalé en haut et en bas de l'éprouvette. Ce système est constitué d'une membrane de néoprène graissée, posée sur une plaque en Téflon, pour supprimer le frottement sol-presse qui crée des contraintes radiales non négligeables (voir le dispositif photo ci dessous).



Photo 1 : Dispositifs de réalisation des essais de compression simple

Les essais sont pilotés en déplacement à une vitesse constante de 0.0208mm/s jusqu'à la rupture. Tout le long des essais nous avons enregistré la force appliquée ainsi que le

déplacement du piston. Ceci nous a permis de tracer les courbes contrainte-déformation de chaque éprouvette (voir les courbes en annexe).

La résistance en compression de l'éprouvette est égale.

$$R_c = 10 \times \frac{F}{S}$$

Avec:

R_c : résistance à la compression des éprouvettes en Méga Pascal (MPa)

F : charge maximale supportée par l'éprouvette en kilo Newton (kN)

S : surface moyenne des faces d'essai en centimètres carrés (cm²)

Essais de résistance en traction par fendage ou l'essai brésilien

Essai brésilien (NF P18-408) : méthode simple et reproductible pour évaluer les propriétés mécaniques des matériaux comme le béton.

Le principe de l'essai est d'appliquer une charge répartie sur les deux baguettes posées sur les génératrices opposées d'une éprouvette cylindrique.

L'essai brésilien est aussi appelé essai en traction par fendage

il consiste à comprimer une éprouvette le long de deux génératrices diamétralement opposées. Ceci induit des contraintes de traction à l'intérieur de l'éprouvette, le long du diamètre vertical. La rupture s'obtient le plus souvent par fendage de l'échantillon.

Pour effectuer un essai, il suffit d'amener entre les plateaux d'une presse, un ensemble composé des éléments suivants :

- deux plateaux horizontaux rectangulaires (30 × 30cm), munis de rainures dans lesquelles sont placées des barrettes d'appui en plastique dur, de section carrée de 1cm de côté,
- quatre colonnes d'acier fixées dans les angles du plateau inférieur. Ces colonnes permettent au plateau supérieur, équipé d'une rotule, de coulisser tout en restant parallèle au plateau inférieur, quatre ressorts positionnés autour des colonnes et portant le plateau supérieur.

L'essai est conduit à vitesse de déplacement constante, égale à 0.00208 mm/sec jusqu'à la rupture.

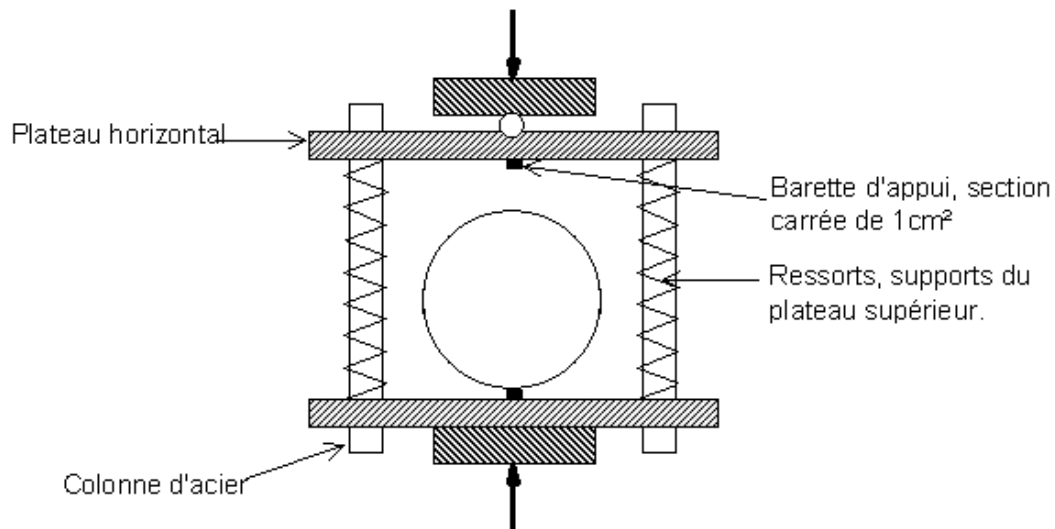


Figure 4: principe d'essais de l'essai brésilien

La résistance en traction de l'éprouvette est égale :

$$R_t = \frac{2F}{\pi dh}$$

Avec

R_t : résistance en traction des éprouvettes en Méga Pascal (MPa)

F : charge maximale supportée par l'éprouvette en kilo Newton (kN)

d : diamètre de l'éprouvette en centimètres (cm)

h : hauteur de l'éprouvette en centimètres (cm).

Dans le but de connaître l'influence des différents traitements sur le comportement du matériau Dehlingen, nous avons comparé la résistance en compression des différentes éprouvettes traitées ou non .

Dans l'objectif de déterminer les caractéristiques du matériau, nous avons préparé 151 éprouvettes pour notre campagne d'essais ;

Résultats des essais mécaniques

Les essais de résistances en compression simple ainsi que les essais de traction par fendage sont illustrés dans ce paragraphe.

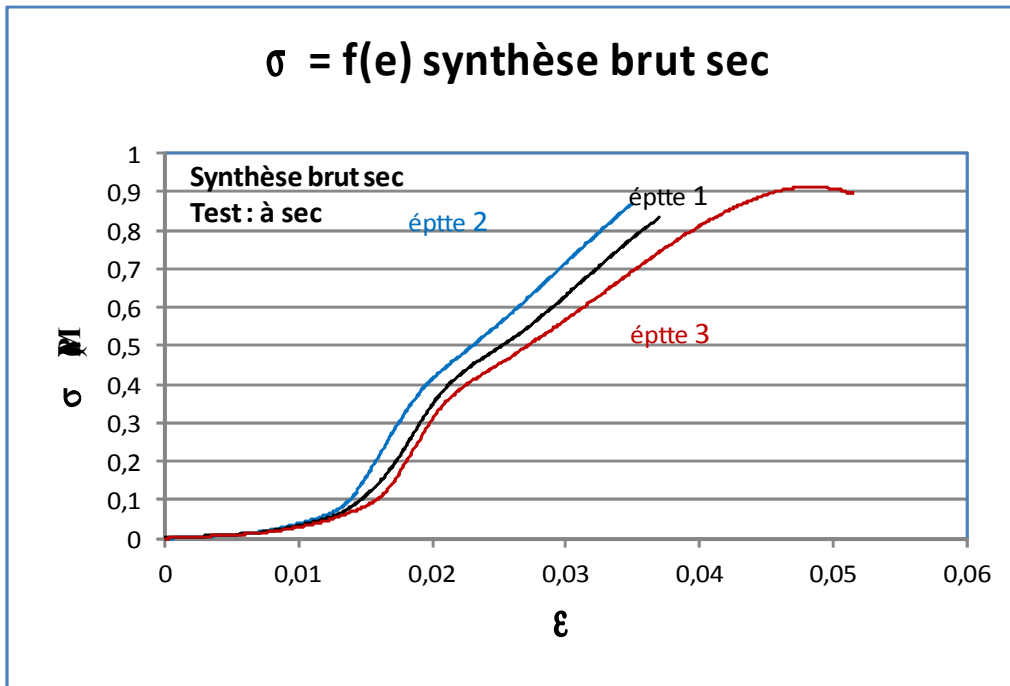


Figure 5: contrainte-déformation en compression du matériau brut

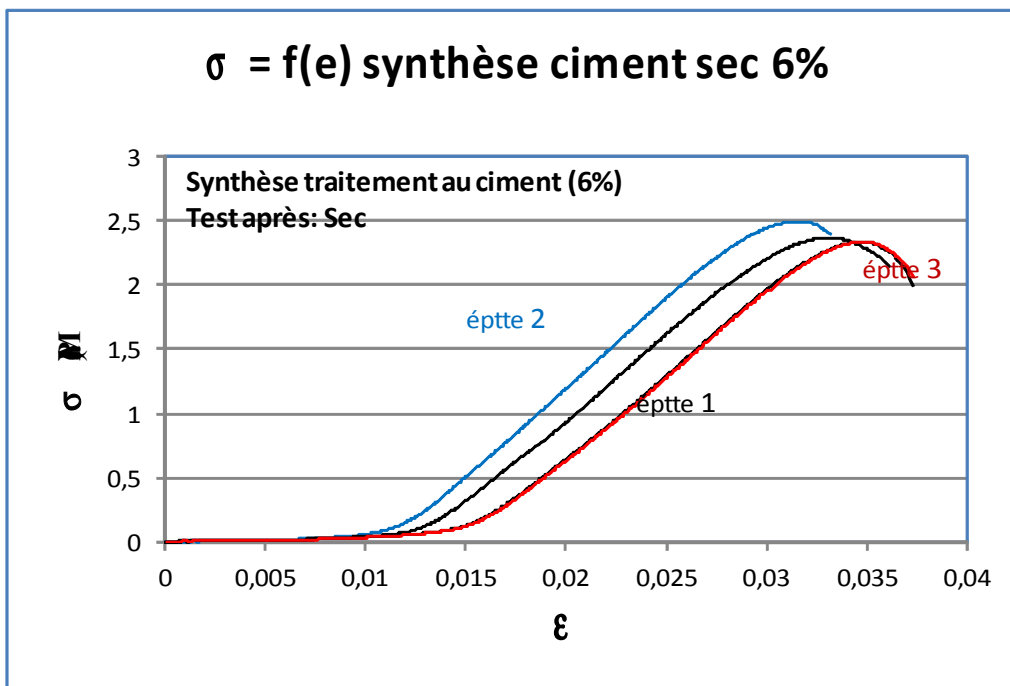


Figure 6: contrainte-déformation en compression du matériau stabilisé à 6 % de ciment

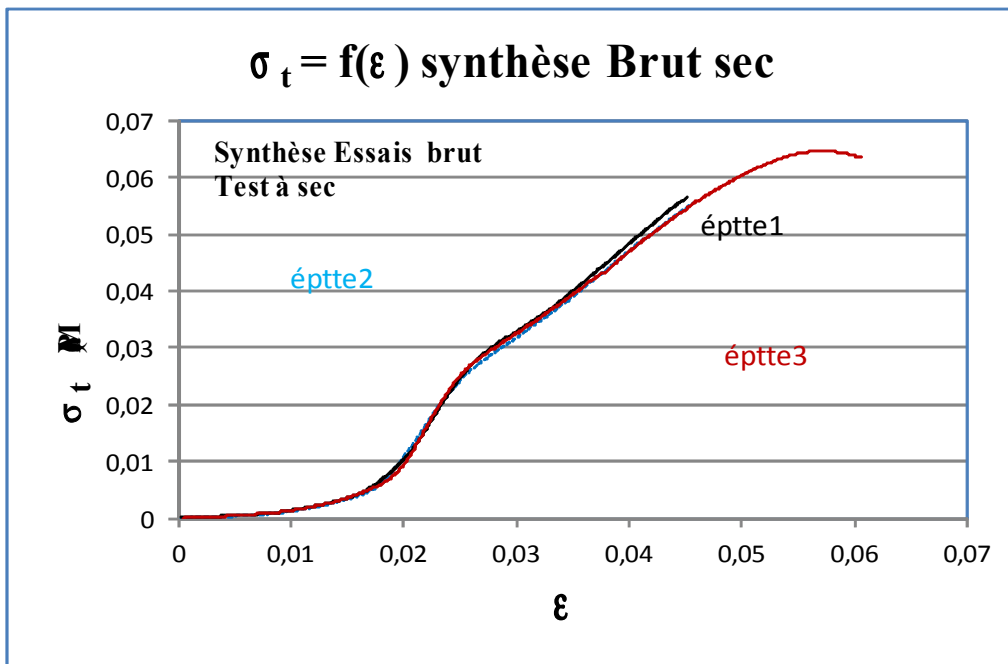


Figure 7: contrainte-déformation en traction du matériau brut

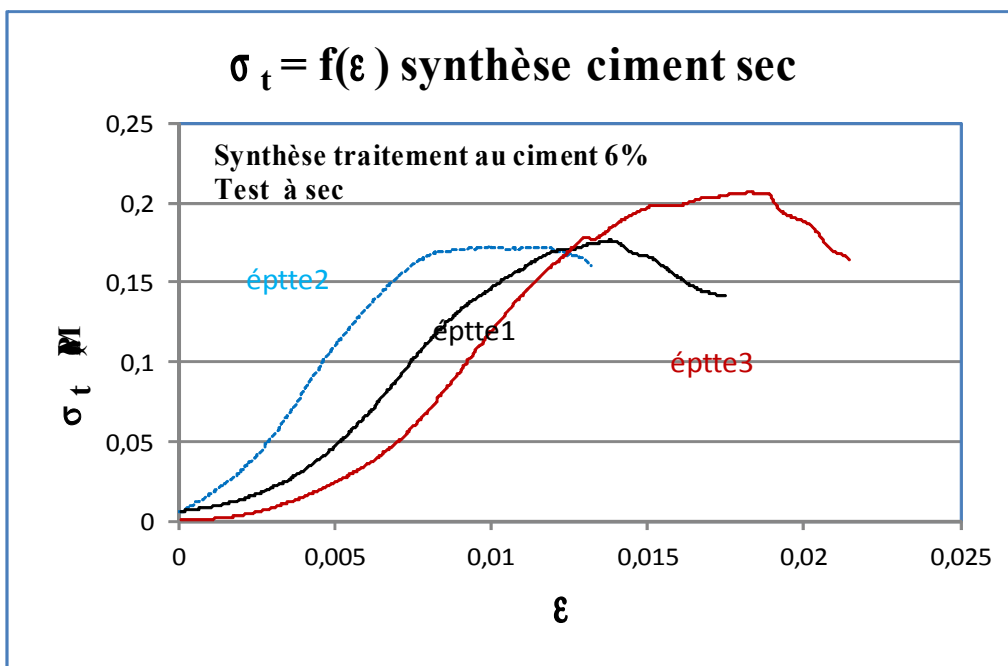


Figure 8: contrainte-déformation en traction du matériau Stabilisé à 6% Ciment

Les résultats obtenus par des essais mécaniques sont notés dans les tableaux ci-dessous.

| Age (jour) | échantillons | Rc sèche max | | | | Rc humide max | | | |
|---------------|----------------|--------------|-------|-------|---------|---------------|-------|-------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | moyenne | 1 | 2 | 3 | moyenne |
| 30 | ciment 4% | 1,899 | 1,639 | 1,819 | 1,786 | 0,263 | 0,509 | 0,300 | 0,358 |
| 60 | ciment 4% | 2,293 | 2,157 | 2,198 | 2,216 | 0,412 | 0,788 | 0,615 | 0,605 |
| 30 | ciment 6% | 2,368 | 2,493 | 2,336 | 2,399 | 0,788 | 0,752 | 1,035 | 0,859 |
| 30 | chaux 4% | 1,153 | 1,154 | 1,160 | 1,156 | 0,195 | 0,233 | 0,115 | 0,181 |
| 60 | chaux% | 1,298 | 1,239 | 1,476 | 1,338 | 0,194 | 0,263 | 0,132 | 0,197 |
| 30 | chaux + ciment | 1,562 | 1,747 | 1,793 | 1,701 | 0,347 | 0,412 | 0,436 | 0,398 |
| 60 | chaux + ciment | 2,157 | 2,604 | 2,586 | 2,449 | 0,394 | 0,755 | | 0,574 |
| 30 | brut | 0,914 | 0,872 | 0,833 | 0,873 | 0,053 | 0,051 | 0,054 | 0,053 |
| 60 | brut | 0,932 | 1,042 | 0,937 | 0,970 | | | | |

Le tableau 4: caractéristiques mécaniques en compression simple des éprouvettes

| Age (jour) | échantillons | Rt sèche max | | | |
|---------------|----------------|--------------|-------|-------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | moyenne |
| 60 | ciment 4% | 0,197 | 0,234 | 0,162 | 0,198 |
| 30 | ciment 6% | 0,206 | 0,173 | 0,176 | 0,185 |
| 60 | chaux | 0,102 | 0,093 | 0,104 | 0,100 |
| 60 | chaux + ciment | 0,211 | 0,200 | 0,279 | 0,230 |
| 60 | brut | 0,065 | 0,056 | 0,057 | 0,059 |

Le tableau 5: caractéristiques mécaniques en traction par fendage des éprouvettes

| Age (jour) | échantillons | Module d'Young sec | | | | Module d'Young humide | | | |
|---------------|----------------|--------------------|---------|---------|---------|-----------------------|--------|--------|---------|
| | | 1 | 2 | 3 | moyenne | 1 | 2 | 3 | moyenne |
| 30 | ciment 4% | 92,176 | 90,570 | 142,110 | 108,286 | 33,924 | 51,803 | 22,446 | 36,058 |
| 60 | ciment 4% | 112,060 | 101,578 | 129,315 | 114,318 | 9,138 | 30,874 | 14,814 | 36,058 |
| 30 | ciment 6% | 129,859 | 136,626 | 124,758 | 130,414 | 65,635 | 65,763 | 58,162 | 63,187 |
| 30 | chaux 4% | 67,865 | 54,087 | 57,636 | 59,862 | 5,959 | 13,284 | 14,497 | 11,247 |
| 60 | chaux% | 60,753 | 60,772 | 64,834 | 62,120 | 5,779 | 9,882 | 8,526 | 8,062 |
| 30 | chaux + ciment | 100,990 | 113,972 | 101,990 | 105,650 | 25,873 | 27,686 | 20,888 | 24,816 |
| 60 | chaux + ciment | 141,581 | 140,087 | 151,253 | 144,307 | 53,941 | 13,739 | | 33,840 |
| 30 | brut | 28,727 | 32,661 | 37,475 | 32,954 | | | | |
| 60 | brut | 23,954 | 30,778 | 27,614 | 27,449 | | | | |

Le tableau 6: module des éprouvettes issues des essais de compression simple

Conclusion

Le matériau Dehlingen étudié dans ce document à été testé dans des conditions les plus défavorables, afin d'illustrer les caractéristique minimum que ce matériau peu garantir.

En général, les éprouvette après la conservation sont mises à l'aire libre avant de réaliser des différents tests.

En ce qui concerne le choix de stabilisant, le matériau Dehlingen étudié dans ce document voit ses caractéristiques nettement améliorées par l'adjonction de 6% de ciment. Nous préconisons ce traitement pour les partie basse des murs.

Le traitement mixte (chaux 2% - ciment 2%) peut être envisagé pour les parties supérieures.