

## **PROJET DE SEMESTRE 2008**

### **RAPPORT TECHNIQUE**

#### **RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES MURS TRADITIONNELS**



**PROFESSEUR : DESCHENAUX CHRISTIAN**

**ETUDIANTS : KREBS JONATHAN**

**DUNAND FRANÇOIS**

**SANTOS MAURO**



## TABLE DES MATIERES

1.	<b>PROJET</b> .....	P. 3
1.1.	BUTS.....	P. 3
1.2.	GÉNÉRALITÉS DE LA CONCEPTION PARASISMIQUE .....	P. 4
2.	<b>MÉTHODOLOGIE</b> .....	P. 8
2.1.	FABRICATION DU MUR TESTÉ.....	P. 8
2.2.	FABRICATION DES ÉCHANTILLONS.....	P. 9
2.3.	FABRICATION D'UN MUR DANS LA PRATIQUE .....	P. 10
3.	<b>TERRE UTILISÉE</b> .....	P. 12
3.1.	INTRODUCTION.....	P. 12
3.2.	LIMITE DE LIQUIDITÉ.....	P. 12
3.3.	LIMITE DE PLASTICITÉ.....	P. 14
3.4.	TAMISAGE .....	P. 15
3.5.	SÉDIMENTOMÉTRIE .....	P. 16
3.6.	CLASSIFICATION DU SOL .....	P. 17
4.	<b>ESSAIS RÉALISÉS SUR ÉCHANTILLONS</b> .....	P. 19
4.1.	DESCRIPTION.....	P. 19
4.2.	ATTENTES .....	P. 19
4.3.	RÉSULTATS .....	P. 20
4.4.	ANALYSE .....	P. 21
5.	<b>ESSAI RÉALISÉ SUR MUR</b> .....	P. 24
5.1.	DÉROULEMENT.....	P. 24
5.2.	RÉSULTATS .....	P. 25
5.3.	ANALYSE .....	P. 26
6.	<b>CONCLUSION</b> .....	P. 27
7.	<b>ANNEXES</b> .....	P. 28
7.1.	PROTOCOLES DES ESSAIS .....	P. 28
7.2.	INTERVIEW D'UN SPÉCIALISTE DU PISÉ À GENÈVE.....	P. 52
8.	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	P. 54

# 1. Projet

## 1.1 Buts

L'objectif de cette étude était dans un premier temps d'étudier les possibilités de construction de murs low-cost, présentant une intéressante résistance aux séismes. Par la suite il aurait été intéressant d'analyser le comportement de ces murs sous l'effet de sollicitations verticales et horizontales de cisaillement. Pour ce faire, nous avons pensé utiliser le dispositif permettant de solliciter les murs en maçonnerie indépendamment par des charges verticales et horizontales conçu et réalisé l'année passée pour le projet de semestre. Une telle étude, sollicitant beaucoup de temps pour la collecte des diverses recherches, nous avons dû restreindre notre ambition primaire. Le choix du matériel servant à la construction fut déterminant pour la suite des opérations. Nous avons longtemps hésité entre la molasse et la terre, mais le choix définitif se porta sur la seconde option, ceci pour des raisons de temps et de finances. En effet, un mur en molasse prend plus de temps et coûte plus cher qu'un mur de terre. De plus, la terre est le matériel le plus répandu et le plus facile à trouver dans la plupart des régions du monde. Les recherches sur ce type de matériel, utilisé dans la confection de murs étant assez limitées, nous ne pouvions entreprendre des démarches plus avancées sur le banc d'essai de cisaillement. Pour cela, les propriétés mécaniques doivent être connues et surtout la résistance à l'effort normal, ceci afin d'optimiser les résultats des essais de cisaillement.

Notre projet, révisé, portera donc sur la démarche et la méthodologie d'essais de compression sur les murs en terre.

Des protocoles d'essais seront établis et tous les détails de construction seront décrits.

Il faut également relever que la terre et les outils servant à la construction peuvent fortement influencer les résultats obtenus.

## 1.2 Généralités de la construction parasismique

### Murs en pierres sèches

L'étude des dégâts liés aux tremblements de terre, principalement dans les pays sous-développés, nous permet d'affirmer que les constructions en pierres sèches ont une très faible résistance sismique. Le mode de construction en est la cause principale. C'est aussi le seul facteur que l'on peut modifier sans changer de technologie de construction. Pour mémoire, les constructions traditionnelles en pierres sèches sont réalisées en imbriquant des pierres de formes et de tailles différentes sans utiliser de mortier. On peut facilement comprendre pourquoi ces murs ne supportent pas les accélérations horizontales induites par un séisme. La résistance du mur ne repose que sur les frottements des pierres entre-elles.

Les principales améliorations que l'on peut apporter aux constructions en pierre sèche sont : l'utilisation de pierres de formes et de tailles régulières, de liants tels que du mortier de ciment et de sable ainsi que l'ajout d'une structure en bois « prise » dans le mur et disposée de manière à reprendre les efforts horizontaux.

L'utilisation de pierres de formes et de tailles régulières a pour effet d'augmenter les surfaces de contact et donc les forces de frottement à l'intérieur du mur. Ces grandes pierres sont aussi plus stables lors de tremblements de terres que les petites pierres rondes, souvent utilisées pour combler les vides, qui ont tendance à tomber du mur dès les premières secousses, fragilisant d'autant plus le mur. De plus il est intéressant de placer à intervalles réguliers des pierres transversales disposées perpendiculairement à l'axe du mur afin d'améliorer la cohésion entre les deux faces de celui-ci.



La construction de murs en pierres liées par mortier de boue est une technique fréquente en Asie. Cependant ce ne sont plus des murs en pierres sèches à proprement parler. L'amélioration de ce genre de murs consiste à remplacer le mortier traditionnel par un mortier de ciment et de sable nettement plus résistant. Notre travail étant orienté vers les constructions en pierres sèches, nous ne traiterons pas de cette technique.

L'ajout d'une structure en bois capable de reprendre les efforts horizontaux nous semble être la possibilité d'amélioration la plus bénéfique pour une construction en pierres sèches.

Il existe plusieurs variantes dont l'efficacité et la facilité de mise en œuvre diffèrent fortement.

La plus simple consiste à poser un linteau de bois à environ un demi-mètre sous le sommet du mur. Celui-ci permettra d'harmoniser les déplacements horizontaux et d'éviter qu'une partie du mur ne cède en se désolidarisant.

Une variante de cette solution serait de remplacer le linteau formé d'une seule poutre de bois, par un chaînage. L'intérêt principal de cette solution est que l'on peut construire ce chaînage à partir d'éléments de dimensions plus raisonnables et aussi que l'on peut imbriquer les pierres dans le chaînage, ce qui améliore de manière notable le contact entre les pierres et la structure en bois.

Le principe que nous voulions mettre en œuvre était de disposer deux chaînages, l'un en bas du mur, l'autre en haut et de les lier entre eux par des poutres de bois verticales et diagonales. Ceci aurait permis de reprendre les efforts horizontaux dans la structure de bois et ainsi d'éviter la ruine du mur.

Pour conclure, l'amélioration technique la plus conséquente est de construire des cadres en béton armé dans lesquels les murs en pierres sèches seront ensuite construits. Cependant cela augmente considérablement les coûts de construction sans parler du fait que ce procédé nécessite une main d'œuvre qualifiée et des matériaux « élaborés ».

### Murs de terre pilée (pisé)

Pour ce type de murs, on reprend globalement les mêmes principes que pour les murs en pierres sèches, c'est-à-dire le renforcement par une structure en bois. Cependant l'ajout de paille et de liant pourrait amener de meilleures résistances et un comportement plus favorable.



## Murs d'adobe

Il existe plusieurs facteurs sur lesquels on peut influencer la qualité d'un mur d'adobe. Le premier est la nature et la forme des briques. On préférera un format d'environ 40 x 40 x 10 cm et on veillera à compacter le plus possible la brique lors de sa fabrication. Le deuxième est l'utilisation de briques autobloquantes, dont la forme permet de les imbriquer les unes dans les autres. Le troisième est la qualité du mortier de pose, la résistance au cisaillement du mur dépend de celle des joints verticaux. Le quatrième est la construction en briques armées. Pour cela il faut prévoir des réservations dans les briques pour les renforcements horizontaux et verticaux (bambou ou acier par exemple). Le cinquième et dernier consiste à disposer des chaînages en bois, éléments constructifs hautement parasismiques. Ceux-ci doivent être placés en haut et en bas du mur et reliés par des éléments verticaux et obliques. De cette amélioration découle la construction en pisé confiné où les cadres en béton reprennent les efforts de cisaillement.



## Construction en clayonnage

Ce procédé de construction, principalement utilisé dans les cas d'urgence, peut être amélioré en remplaçant l'enduit par des adobes.



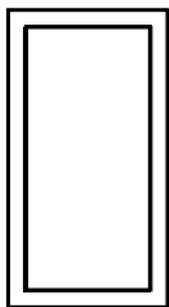
## Constructions en boudins de terre

Ces constructions sont faites de sacs de jute remplis de terre, assemblés à une structure en bambous. On peut aussi imaginer préparer les sacs à l'avance et les remplir de terre d'une traite. Il n'existe pas de proposition d'amélioration pour de telles constructions, qui sont pour la plupart expérimentales.

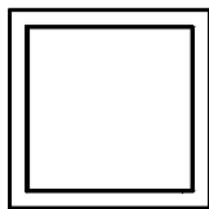


## En général

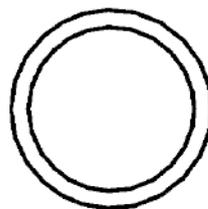
Plus le plan est compact, plus il est stable ! Il faut donc privilégier les plans concentriques ou carrés et éviter ceux en L ou en T. De plus, il est préférable de faire dépasser les murs dans les angles du bâtiment. Cela augmente de manière non négligeable la stabilité d'ensemble.



bad



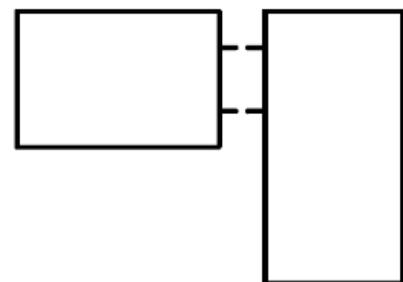
good



ideal



dangerous



safe

## 2. Méthodologie

### 2.1 Fabrication du mur testé

#### Préparatifs

Après la réalisation des plans du mur, il a fallu trouver de la terre et acheter des coffrages. Comme nous n'avions absolument aucune expérience dans ce domaine et que nous étions limités dans les dimensions des panneaux pour leur transport, nous avons conçu et acheté un système de coffrage, qui aurait pu être optimisé avec des panneaux plus adéquats au mur.



#### Réalisation

Nous avons commencé par construire le coffrage et y ajouter des renforcements latéraux afin d'éviter un gonflement des parois lors de la construction du mur. Ensuite nous avons chargé le malaxeur avec de la terre en ayant pris soin d'éliminer le plus de pierres possible. Lors du malaxage, nous avons ajouté de l'eau afin de garantir une certaine cohésion. Comme il n'y a pas de proportions ni en volume ni en masse, le moyen de savoir si le taux d'humidité est optimal consiste à compacter légèrement une petite boulette de terre et de la lâcher de la hauteur du nombril. Si elle se partage en deux ou trois morceaux, le taux est optimal. Si elle se partage en plus de morceaux, la terre est trop sèche, il faut donc ajouter de l'eau et si elle ne se sépare pas c'est qu'il y a trop d'eau et qu'il faut ajouter de la terre pour équilibrer le mélange.



Pour construire le mur, le procédé est assez simple ; une fois le malaxage effectué et le mélange optimal, nous prenons des sceaux remplis de terre que l'on verse dans le coffrage. Ensuite on veille à bien répartir la terre sur toute la surface du mur, jusqu'à ce qu'une hauteur de  $\sim 8\text{cm}$  soit atteinte. Après cela, nous damons le tout de manière uniforme afin d'obtenir une surface plane et bien compactée. S'il y a encore des cailloux dans le mélange, il faut veiller à les placer au milieu du mur, de façon à ce que ceux-ci ne soient pas dans les bords. Cela donnerait un mauvais aspect au mur et surtout des problèmes de cohésion car les pierres peuvent se détacher plus facilement. Une fois le mur totalement damé, le coffrage peut-être retiré de suite, sans aucune précaution particulière.

Finalement, il faut le mettre dans un endroit protégé, ceci afin qu'il puisse sécher pendant 1 mois.

## 2.2 Fabrication des échantillons

Dans l'optique d'avoir des résultats valables et afin de pouvoir comparer les essais entre eux, nous avons procédé de manière identique pour construire chaque échantillon.

Matériel utilisé :

- 3 moules cylindriques de  $\varnothing 15\text{cm}$  x  $30\text{cm}$  de hauteur
- 2 moutons manuels normalisés du laboratoire de géotechnique
- Bétonnière du local de bétonnage
- Sceaux
- Terre
- Eau
- Paille
- Chaux hydraulique

### Echantillons en terre naturelle

Tout d'abord, il faut huiler les moules et mettre du scotch sur le trou du fond, afin de pouvoir sortir l'échantillon à l'air comprimé. Après, prendre de la terre et mettre celle-ci dans la bétonnière, puis malaxer dans un premier temps. Ensuite humidifier cette terre jusqu'à ce que le taux d'humidité soit optimal selon le test de la boulette lâchée depuis le nombril.

Une fois l'humidité désirée atteinte et la terre bien mélangée, on la vide dans des sceaux et l'on remplit nos moules de couches de  $\sim 6\text{cm}$  de terre.

Après cela, on compacte chaque couche par 35 coups donnés avec le mouton manuel et on renouvelle l'opération jusqu'au remplissage complet du moule.

Le plus important dans l'opération est de bien tasser la terre et donc il faut être sûr que l'on donne un nombre de coups suffisants. Dans notre cas, nous avons choisi d'effectuer 35 coups dans une première évaluation et il s'est avéré que cela convenait parfaitement.

Ensuite, démouler immédiatement l'échantillon et le peser. Laisser à sécher pendant 1 mois.

### Echantillons en terre naturelle + 1% de paille

La procédure est la même que pour l'échantillon de base, sauf qu'au moment où l'on malaxe la terre, il faut y ajouter de la paille. Cette opération nécessite une adjonction d'eau supplémentaire du fait de la présence de la paille. En ce qui concerne le pourcentage d'adjonction, celui-ci se fait par rapport au poids de la terre en présence. N'ayant pas de référence par rapport à une valeur d'adjonction, nous avons choisi d'en ajouter une quantité qui nous semblait visuellement suffisante. Pour que le mélange se passe bien, il faut un peu déchiqeter la paille, afin que celle-ci ne se prenne pas dans les palles du malaxeur et qu'elle s'imprègne bien dans la terre.

Le reste de la démarche est identique au premier cas.

### **Echantillons en terre naturelle + 5% de chaux hydraulique**

La procédure est la même que pour l'échantillon de base, sauf qu'au moment où l'on malaxe la terre, il faut y ajouter de la chaux hydraulique. Visuellement, après malaxage, on ne peut pas distinguer la différence par rapport au premier échantillon, d'où l'importance de bien établir des protocoles d'essais des échantillons. Nous avons pris comme base de pourcentage d'adjonction les conseils avisés de M. Favre, de l'entreprise de construction de murs en terre ARBIO.

Les 5% de chaux, sont par rapport au poids de terre en présence.

Lors de l'ajout de la chaux, ne pas oublier d'utiliser des masques afin de se protéger des poussières fines dégagées lors de l'ajout.

Lors du compactage des échantillons, on note une certaine résistance accrue par rapport aux premiers échantillons, soit grâce à l'ajout de chaux, ou alors parce que la matière était un peu plus sèche. Les résultats des essais nous confirmerons cela.

Le reste de la démarche est identique au premier cas.

### **Echantillons en terre naturelle + 1% de paille + 5% de chaux hydraulique**

La procédure est la même que pour l'échantillon précédant, sauf qu'avant de malaxer la terre mélangée à la chaux, il faut encore y ajouter de la paille. Ici aussi, nous avons gardé le même pourcentage de 1% de paille. Aucune mesure particulière n'est à observer en plus de celles citées ci-dessus. Le mélange est très similaire, visuellement, au 2<sup>ème</sup> échantillon.

Le reste de la démarche est identique au premier cas.

## **2.3 Fabrication d'un mur dans la pratique**

Ce descriptif est tiré des observations que nous avons faites lors de la visite du chantier de l'entreprise ARBIO à Genève.

La terre est un tout-venant livré en vrac sur le chantier. Elle doit être argileuse pour pouvoir être exploitée. Cette terre est abritée de l'eau au moyen d'une bâche, car la terre ne doit pas être trop humide afin d'assurer un compactage optimum.

Tout d'abord le coffrage est installé. On préférera les banches de grandes dimensions, tenues entre elles par des tirs-forts aux panneaux de coffrage, ceci pour leur rapidité de mise en place et leur plus grande rigidité. En effet, les poussées horizontales des murs en pisé sont nettement supérieures à celles des murs en béton. Ceci est dû à leur mise en œuvre par damage. Le coffrage est lui aussi protégé de l'eau au moyen d'un bâchage provisoire pour les raisons suscitées.

La première étape consiste à séparer les pierres de la terre. Pour cela on fait passer la terre à travers un tamis à larges mailles. Les pierres sont mises de côté, elles peuvent le cas échéant servir de décoration en étant disposées contre les coffrages.

La terre est ensuite introduite dans la bétonnière avec 5 à 7 % de chaux hydraulique (pourcentage au volume), on ajoute l'eau jusqu'à obtenir la bonne consistance. Pour juger cette consistance, on effectue le test dit de la "boulette". Il consiste à former une boulette avec le mélange présent dans la bétonnière et à la laisser tomber de la hauteur du nombril. Le résultat est estimé en fonction de l'éclatement de la boulette au sol. Si elle explose, le mélange est trop sec ; si elle se fragmente en quelques morceaux, le mélange est bon ; enfin si elle reste entière, le mélange est trop humide. Si le mélange est trop sec, on y rajoute de l'eau, s'il est trop humide, on l'assèche en ajoutant plus de chaux. Le rôle de la chaux est principalement d'améliorer la résistance aux chocs des bords de murs, on peut donc se contenter de gâchées spéciales (à la chaux) pour les coins et utiliser un mélange terre eau pour le reste du mur.

Le "bon" mélange est ensuite acheminé à proximité du coffrage. Il est disposé en couches de 12 à 15 cm qui, une fois compactées, seront réduites à environ 8 cm. La hauteur des couches disposées est contrôlée à l'aide d'un témoin (barre métallique avec un scotch de couleur par exemple), leur régularité étant un élément primordial pour garantir la qualité du mur.

Le compactage peut alors commencer. Il est effectué à l'aide de dames pneumatiques, qui ont des formes et des tailles différentes afin de pouvoir atteindre tous les recoins du coffrage, spécialement les coins et les espaces sous les tirs forts. Il n'y a pas de nombre de coups limite à donner, le damage est poursuivi jusqu'à ce que le mélange ne se comprime plus.

Le mur est ainsi construit couche par couche, jusqu'à atteindre la hauteur finale.

Si, comme dans le cas que nous avons observé, le mur à une hauteur importante, il faudra prévoir des systèmes adaptés pour apporter la terre jusqu'au coffrage. En l'occurrence, il a été prévu de monter la terre à l'aide de poulies.



En ce qui concerne le décoffrage, il peut être effectué immédiatement. Une hauteur de dépassement de la hauteur finale du mur, d'une vingtaine de centimètres, est nécessaire à la construction de nouvelles couches, c'est dans cette zone que les efforts dus au damage sont transmis au coffrage. Lors de la reprise de la construction après une longue interruption (une nuit ou un week-end), l'humidité de la dernière couche construite doit être contrôlée et le cas échéant rectifiée avant la reprise de l'exécution, cela afin de garantir la cohésion entre les couches. Il faut noter que l'on peut aussi garantir la cohésion en disposant une couche de chaux entre les deux couches de pisé.

## 3. Terre utilisée

### 3.1 Introduction

Chaque type de terre ayant des valeurs de résistance différentes, il est primordial de connaître notre sol. En effet, les valeurs de résistance mesurées en essais ne sont valables que pour ce type de sol.

Cette classification est effectuée sur les bases du cours de géotechnique, c'est-à-dire la norme SN 670816.

### 3.2 Limite de liquidité

#### Introduction

La limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité permettent de classer les sols fins et la partie fine des sols grossiers.

#### Définition

La limite de liquidité d'un sol est la teneur en eau de ce sol pour laquelle il passe de l'état liquide à l'état plastique.

#### Principe

La limite de liquidité est déterminée au moyen de l'appareil de Casagrande, constitué d'une coupelle métallique fixée sur un socle de caoutchouc de dureté normalisée et actionnée par une came. Celle-ci permet l'élévation de la coupelle à une hauteur de 10 mm qui subit une chute libre sur le socle, ce qui provoque un choc.

On travaille alors une certaine quantité de matière homogénéisée à une consistance très plastique à liquide. Cette pâte est ensuite étendue dans la coupelle de l'appareil.

La pâte est, par après, placée sur l'appareil et soumise à des chocs répétés. Ensuite, à l'aide d'un outil spécifique, on creuse une rainure dans l'axe de la coupelle.

On prend alors note du nombre de chocs nécessaires pour que le fond de la rainure se referme sur 10 mm

La limite de liquidité  $w_L$  est définie par la teneur en eau à laquelle il faut amener le matériau pour que la rainure se referme de 10 mm en 25 coups.



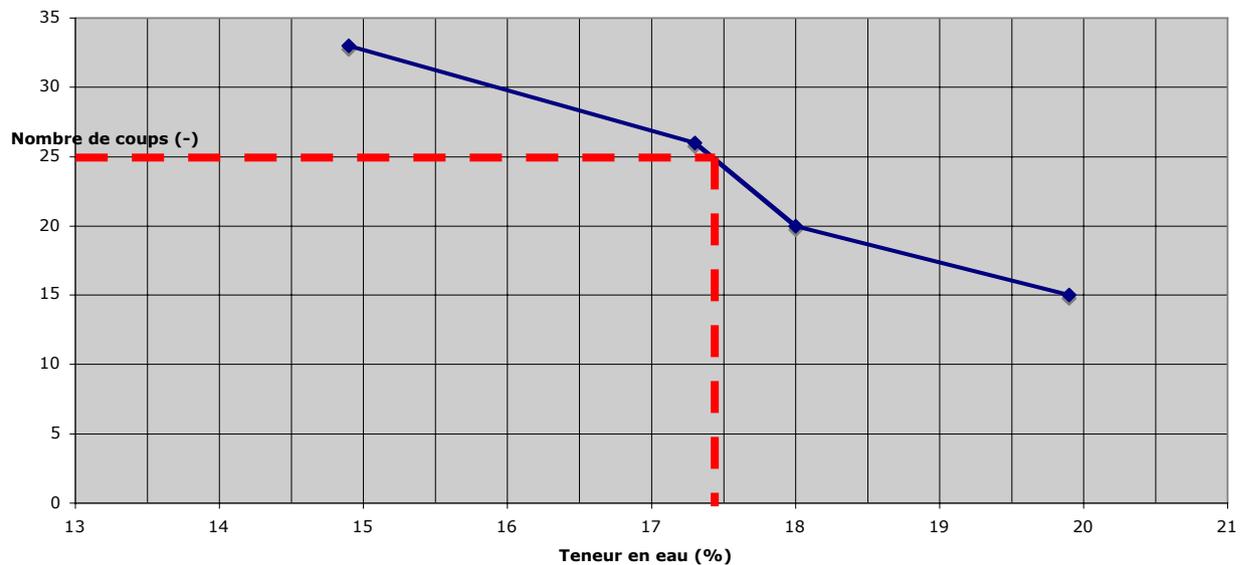
## Outils

- Echantillons de matière
- Appareil de Casagrande
- Four



## Résultats

N°	Nombre de coups	Poids godet à vide [g]	Poids godet à plein humide [g]	Poids godet à plein sec [g]	Teneur en eau [%]
1	33	19.5	46.5	43.0	14.9
2	20	20.7	40.4	37.4	18.0
3	15	18.9	43.0	39.0	19.9
4	26	20.4	51.6	47.0	17.3



On estime la valeur de la limite d'élasticité en lisant la teneur en eau à 25 coups. On voit clairement que notre valeur est de **17.4%**.

### 3.3 Limite de plasticité

#### Définition

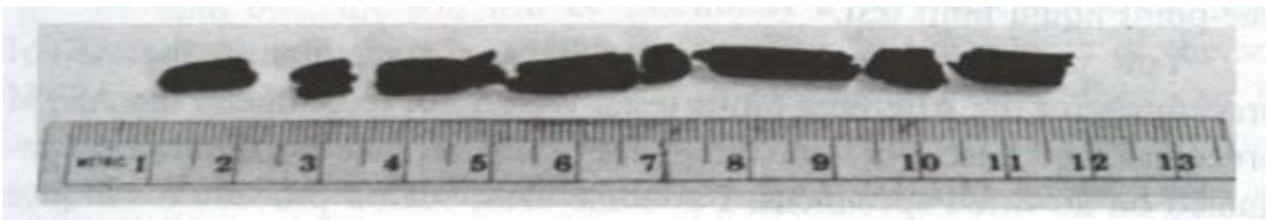
La limite de plasticité d'un sol est la teneur en eau de ce sol pour laquelle elle passe de l'état plastique à l'état solide.

#### Principe

Cette limite est déterminée par un essai manuel. Celui-ci est également décrit dans la norme SN 670'345. Tout d'abord, on forme une boulette avec le matériau. Ensuite, on roule cette boulette sur un support de bois ou de verre de manière à obtenir une petite baguette de 3 mm de diamètre.

La limite est obtenue au moment où la baguette se brise en petits morceaux.

On procède alors à la mesure de la teneur en eau  $w_p$  par dessiccation des petits morceaux.



#### Outils

- Echantillons de matière
- Support de bois ou de verre
- Four

#### Résultats

N°	Poids godet à vide [g]	Poids godet à plein humide [g]	Poids godet à plein sec [g]	Teneur en eau [%]
1	9.0	13.1	12.6	13.9
2	9.3	13.0	12.5	15.6
3	8.9	13.5	12.9	15.0
4	8.3	9.9	9.8	6.7
<b>Moyenne</b>				<b>14.8</b>

#### Remarques

Le quatrième échantillon ne contenait pas assez de matière, son résultat étant visiblement aberrant, nous n'en tenons pas compte dans le calcul de la moyenne.

### 3.4 Tamisage

#### Principe

Cet essai permet la détermination des fractions granulométriques des éléments de dimensions supérieures à 0.1 mm environ.

L'essai peut être exécuté soit au moyen d'une colonne de tamis superposés, ou en les utilisant l'un après l'autre.

La quantité de matériau retenue par un tamis s'appelle le refus, par opposition au tamisât qui est la quantité de matériau qui passe au travers du tamis.



#### Outils

- Passoires à trous carrés pour les grains supérieurs à 8 mm
- Passoires à trous carrés pour les grains supérieurs à 5 mm
- Tamis pour les éléments supérieurs à 0.1 mm



#### Résultats

Diamètre [mm]	Tamisât [%]	Refus [%]
16	96	4
8	85	15
4	76	24
2	63	37
1	48	52
0.25	23	77
0.1	13	87

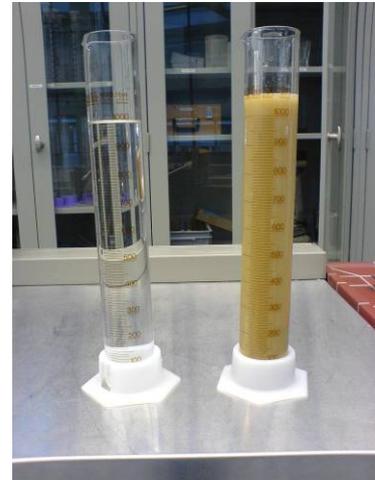
### 3.5 Sédimentométrie

#### Principe

La granulométrie des fractions limoneuses et argileuses (grains inférieurs à 0.1 mm) se détermine par sédimentation. Cette méthode consiste à mesurer la densité décroissante, au cours de la décantation, d'une suspension de 50 g d'éléments fins dilués dans un litre d'eau, à l'aide d'un aréomètre.

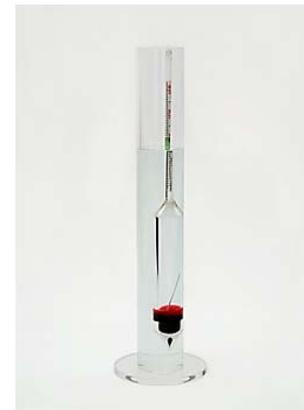
En supposant les grains sphériques, la loi de Stokes permet de calculer la vitesse de chute de ces grains en fonction de leur diamètre, de leur poids volumique et de la viscosité de l'eau, entre autre.

Cette méthode est utilisée pour calculer les diamètres décroissants des grains en suspension et leur pourcentage pondéral correspondant. Par conséquent, on obtient la courbe granulométrique des éléments fins.



#### Outils

- Un litre d'eau
- 50 g d'éléments fins
- Un aréomètre
- Un récipient



#### Résultats

Densité [g/ml]	Temps [sec]	Valeurs R	H <sub>r</sub> [mm]	Diamètre [mm]	d <sub>K</sub>	P	px	P <sub>tot</sub> [%]
0.9985	0							
1.015	30	16.5	153.875	0.072	3.176	52.397	13	6.9
1.011	60	12.5	170.875	0.054		39.694		5.2
1.0075	120	9.0	185.750	0.040		28.580		3.8
1.004	300	5.5	200.625	0.026		17.466		2.3
1.0054	900	2.0	215.500	0.016		6.351		0.8

#### Remarques

$$H_r = 224 - R \cdot 4.25$$

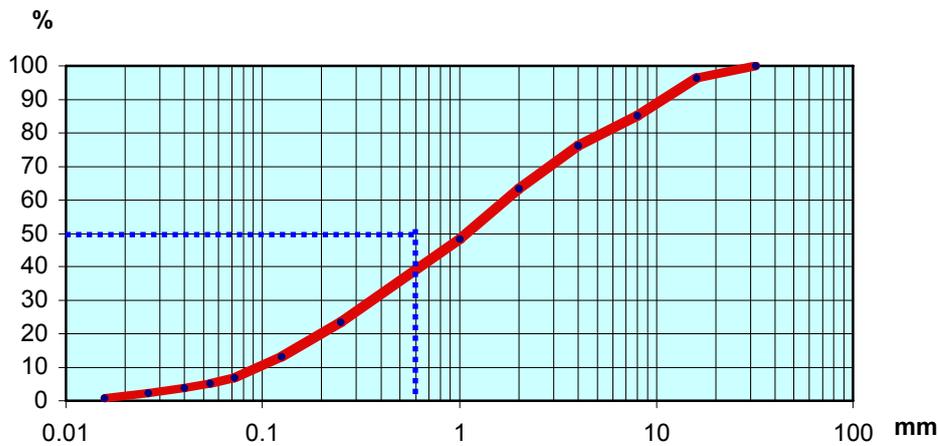
$$d = 0.032 \cdot \sqrt{\frac{H_r}{t}}$$

$$K = \frac{100}{M_d} \cdot \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_w}$$

$$P_{tot} = \frac{px}{100} \cdot K \cdot R$$

### 3.6 Classification du sol

#### Courbe granulométrique



#### Remarques

On constate que plus de 50% de l'échantillon ( $D_{50}$ ) a un diamètre de grain supérieur à 0.06 mm. Il s'agit donc d'un sol grossier.

On observe encore que le pourcentage pondéral du sable est plus grand que celui du gravier. De plus, le pourcentage pondéral de gravier est supérieur à 15%. Il s'agit donc d'un sable avec gravier.

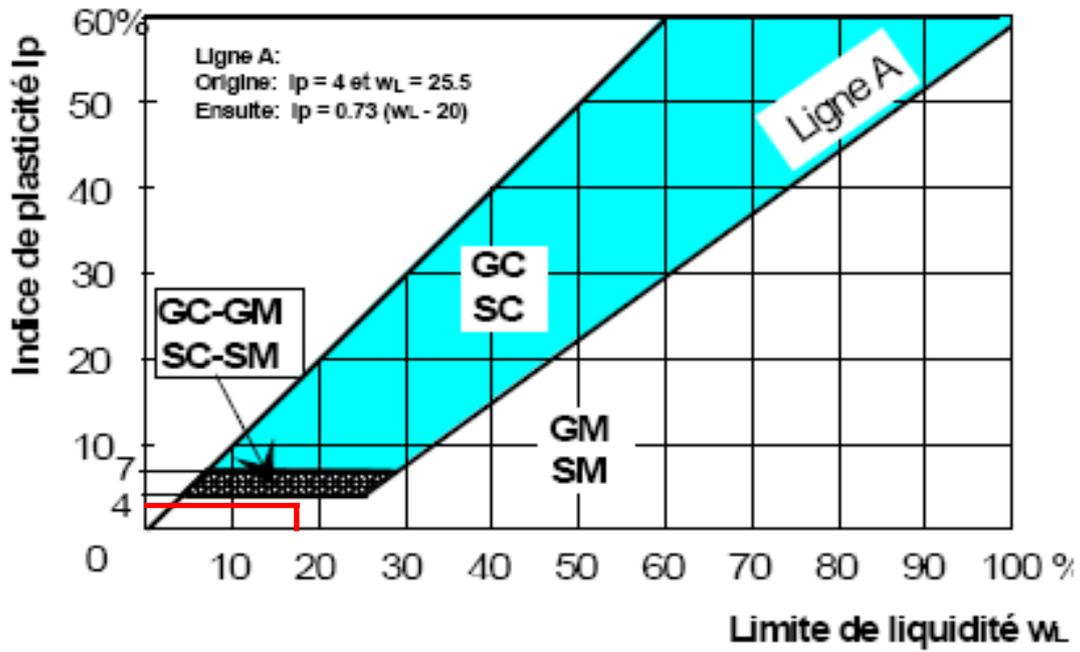
#### Type de sol

$$I_p = w_L - w_p$$

$$w_L = 17.4$$

$$w_p = 14.8$$

$$I_p = 2.6$$



En introduisant nos valeurs dans le tableau ci-dessus, on observe que nous obtenons un sol de type SM.

Notre sol est donc un **sable limoneux avec graviers**.

## 4. Essais réalisés sur échantillons

### 4.1 Description

Comme nous n'avons pas trouvé de résultats détaillés pour la résistance à la compression de murs en terre dans nos recherches bibliographique, nous avons décidé de concevoir des échantillons et de faire des essais sur ceux-ci, soit :

- 3 échantillons en terre naturelle
- 3 échantillons en terre naturelle + 1% de paille
- 3 échantillons en terre naturelle + 5% de chaux hydraulique
- 3 échantillons en terre naturelle + 1% de paille + 5% de chaux hydraulique  
(Les pourcentages sont en fonction du poids)

Cela nous permettra dans un premier temps d'avoir des valeurs de référence de résistance à la compression pour le mur en terre qui sera testé par la suite. Ensuite, nous pourrions établir une comparaison des résultats, afin de voir le niveau d'efficacité des moyens de renforcements cités ci-dessus.

### 4.2 Attentes

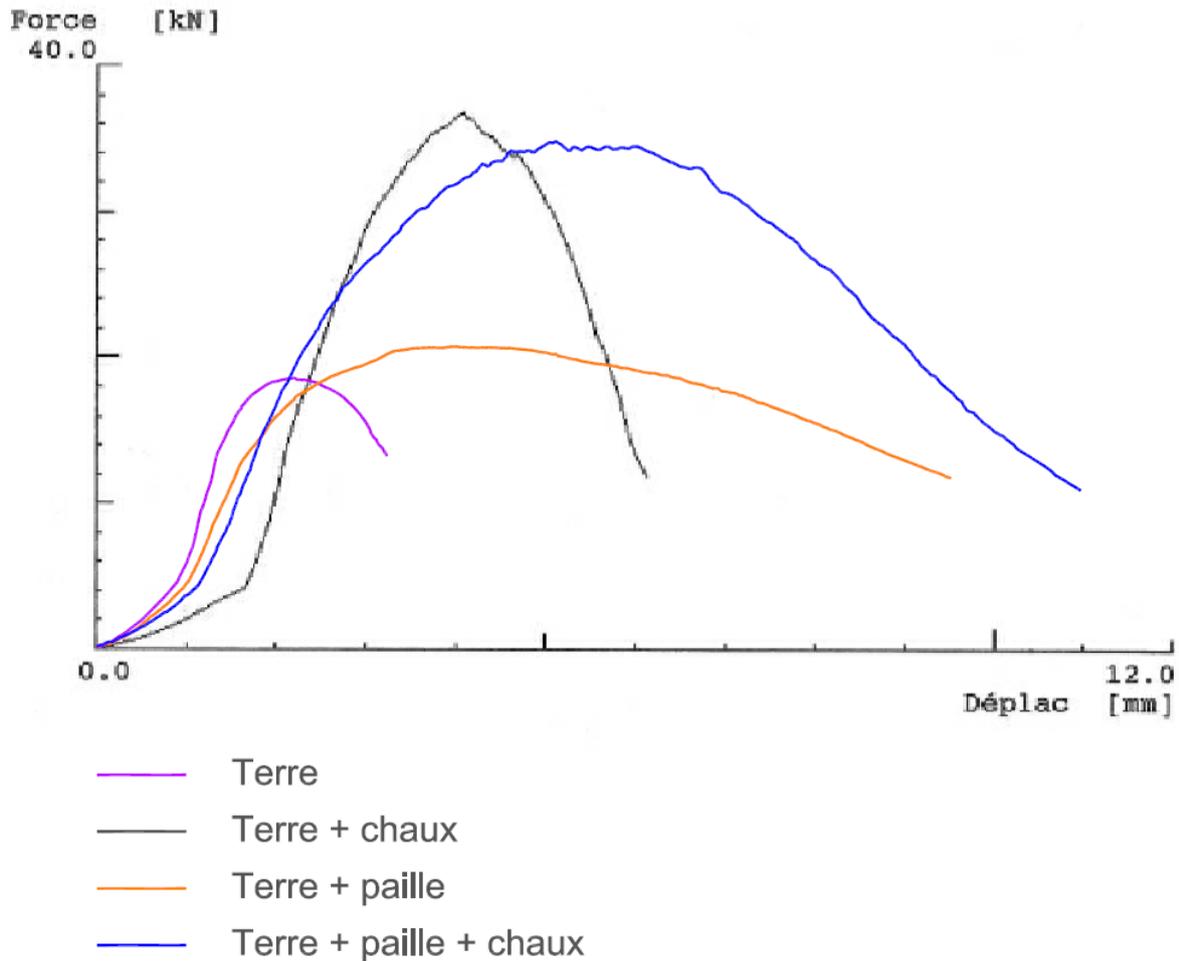
Notre expérience étant basée principalement sur des testes de matériaux ayant une structure plutôt homogène (béton, briques), nous ne savions pas trop qu'espérer de la terre compressée. La littérature nous annonçait une contrainte maximale de  $1 \text{ N/mm}^2$  mais absolument rien concernant un éventuel ajout de paille ou de ciment. La terre compressée est un matériau plutôt friable, ce qui nous a fait nous attendre à un écroulement assez rapide des cylindres en de petits morceaux. Pour ceux ajoutés de chaux, nous nous attendions à une augmentation de la résistance et de la cohésion, mais impossible de dire de combien. Pour les cylindres ajoutés de paille, nous espérions qu'elle se comporterait à la façon des fibres que l'on ajoute au béton. Sur ce plan là nous avons cependant quelques craintes : d'une part les brins de paille n'étaient-ils pas trop longs et d'autre part ne risquaient-ils pas de faire des sortes de nids qui auraient affaiblis la résistance des cylindres.

Concernant le mur, ses dimensions étant plus grandes que celles des échantillons, il était nettement plus probable que des cailloux trop gros se glissent parmi la terre malgré nos précautions. Ceci pourrait avoir comme effet que toute une partie du mur se fissure le long des cailloux et s'écroule d'un coup ruinant la résistance de celui-ci.

## 4.3 Résultats

### Echantillons représentatifs

Force - Déplac - DIAGRAMME



Type d'échantillon	Force à la rupture	Allongement à la rupture	Contrainte à la rupture
Terre 3	20.04 kN	2.05 mm	1.13 N/mm <sup>2</sup>
T + C 3	37.40 kN	4.05 mm	2.12 N/mm <sup>2</sup>
T + P 2	21.52 kN	3.76 mm	1.22 N/mm <sup>2</sup>
T + P + C 3	36.24 kN	5.12 mm	2.05 N/mm <sup>2</sup>

## Echantillons rectifiés avec du mortier

Type d'échantillon	Force à la rupture	Allongement à la rupture	Contrainte à la rupture
Terre 1	15.94 kN	2.00 mm	0.91 N/mm <sup>2</sup>
Terre 2	17.30 kN	2.99 mm	0.99 N/mm <sup>2</sup>
T + C 1	29.26 kN	4.08 mm	1.68 N/mm <sup>2</sup>
T + C 2	32.20 kN	4.27 mm	1.85 N/mm <sup>2</sup>
T + P 1	20.08 kN	3.87 mm	1.14 N/mm <sup>2</sup>
T + P 3	20.16 kN	5.41 mm	1.15 N/mm <sup>2</sup>
T + P + C 1	30.66 kN	6.61 mm	1.77 N/mm <sup>2</sup>
T + P + C 2	27.30 kN	5.76 mm	1.56 N/mm <sup>2</sup>

Les quatre premiers échantillons qualifiés de « représentatifs » ont été ceux qui avaient le meilleur aspect et qui ne nécessitaient aucune rectification avant d'entreprendre l'essai. Ceux rectifiés au mortier, ont été jugés moins bons que les premiers. Dans les résultats obtenus, on remarque bien que le choix des échantillons a été bien effectué, en effet on obtient toujours des résultats légèrement moins bons dans les échantillons rectifiés.

## 4.4 Analyse

### Cylindres en terre

Les résultats obtenus lors des essais sur les échantillons en terre sont conformes à ceux que nous avons pu rencontrer dans la littérature. Notre résistance moyenne à la compression est de 1.01 N/mm<sup>2</sup>. On peut ainsi conclure que notre terre et notre méthodologie de mise en œuvre sont correctes. Les résultats obtenus sur les échantillons en terre permettront une bonne comparaison de l'augmentation de résistance des échantillons améliorés.



## Cylindres en terre et paille

La résistance moyenne obtenue sur ces cylindres est de  $1.17 \text{ N/mm}^2$ , soit une augmentation de 16%. Cette augmentation est étonnante du fait qu'à priori l'ajout de fibres n'est pas utile pour la résistance à la compression. Cependant à ces contraintes-là, il semblerait que la paille reprenne les efforts de traction interne de l'échantillon et retarde la rupture du cylindre. On constate aussi une amélioration du comportement de l'échantillon. La fissuration intervient à des contraintes plus élevées et l'ouverture des fissures est limitée. L'allongement à la rupture est deux fois plus grand. On remarque aussi qu'aucun éclat ne se détache avant la ruine.



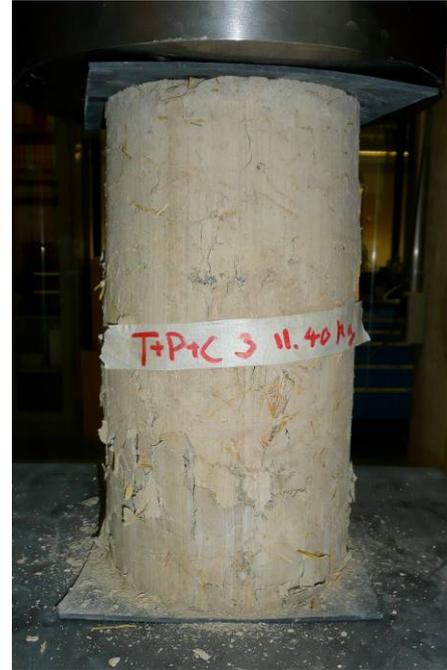
## Cylindres en terre et chaux

La résistance moyenne obtenue sur ces cylindres est de  $2.03 \text{ N/mm}^2$ , soit une augmentation de 101%. Bien que nous attendions une augmentation de la résistance, on peut noter que pour seulement 5% d'adjonction de chaux, l'augmentation est très intéressante (facteur de 2). Au niveau du comportement, bien que l'allongement à la rupture soit très proche de celui des cylindres de terre et de paille, la rupture est plus fragile et l'on constate qu'une fois la charge de ruine atteinte, notre échantillon ne supporte plus de charge.



## Cylindres en terre chaux et paille

La résistance moyenne obtenue sur ces cylindres est de  $1.79 \text{ N/mm}^2$ , soit une augmentation de 78%. Le premier constat que l'on peut faire est que, si la paille a amélioré la résistance du cylindre en terre, elle diminue celle du cylindre en terre et chaux. Cependant au niveau du comportement, le constat est bien différent. L'échantillon en terre paille et chaux a de loin le meilleur compromis entre ductilité et fragilité. On peut voir sur les courbes la formation d'un « mini palier » à la contrainte maximale. Ce comportement est très intéressant car, bien qu'il casse sous une charge inférieure de 20% au cylindre en terre et chaux, le cylindre en terre, chaux et paille ne cède pas immédiatement après avoir atteint sa résistance maximale, c'est un bon point au niveau sécuritaire.



## 5. Essai réalisé sur mur

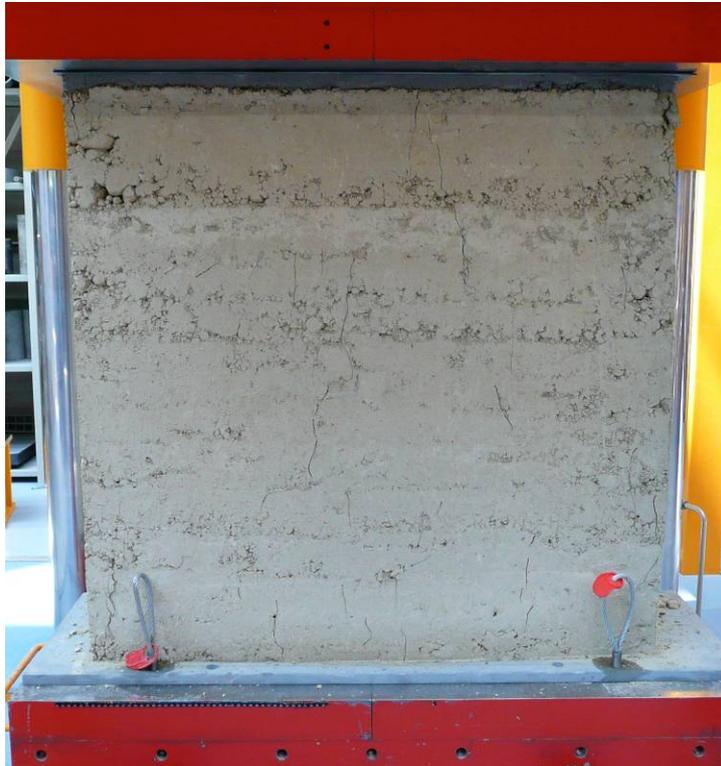
### 5.1 Déroulement

Afin d'affiner les résultats obtenus, on place deux capteurs mécaniques supplémentaires de chaque côté du mur. Ils nous permettront de savoir si la rupture est excentrée et si oui de quel côté elle a lieu en premier.

Nous avons décidé de faire des arrêts lors de la mise en charge de l'essai afin de procéder aux lectures des capteurs ainsi qu'au traçage des fissures. Nous procéderons aussi à des lectures des capteurs en cours de charge.

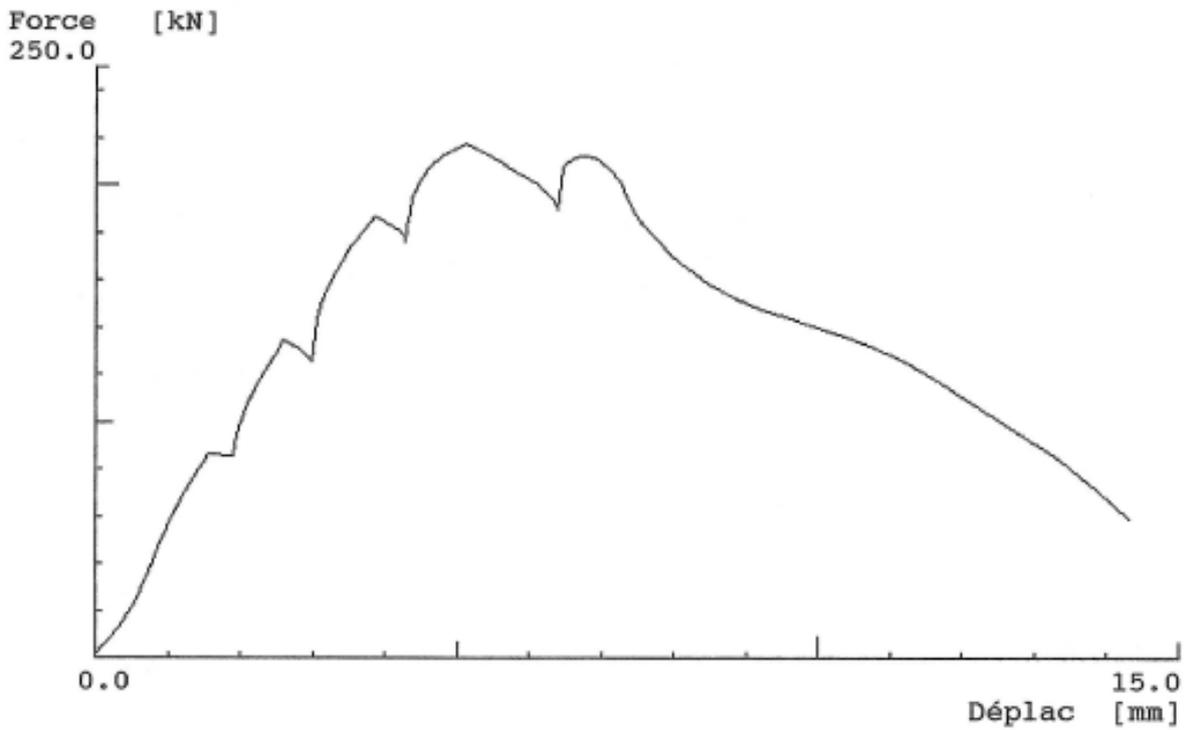
Compte-rendu :

- 80 kN : Fissuration de la face arrière du mur
- 100 kN : Premier arrêt. Relaxation à 85 kN
- 120 kN : Fissuration du côté droit du mur
- 150 kN : Fissuration des deux autres côtés restants
- 150 kN : Deuxième arrêt. Relaxation à 112 kN
- 200 kN : Rupture du coin droit
- 200 kN : Troisième arrêt. Relaxation à 163 kN
- 220 kN : Environ charge maximale. Grandes ouvertures des fissures sur les côtés.
- 221 kN : Quatrième arrêt. Charge maximale obtenue. Relaxation à 177 kN



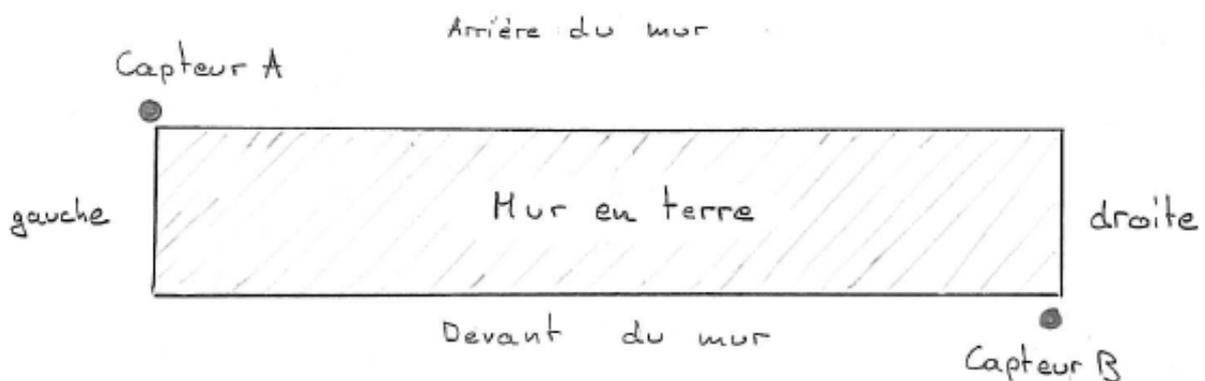
## 5.2 Résultats

### Force - Déplac - DIAGRAMME



Type	Force à la rupture	Allongement à la rupture	Contrainte à la rupture
Mur en terre	225.20 kN	5.42 mm	0.75 N/mm <sup>2</sup>

### Disposition des capteurs



### Tableau des déformations

Charge kN	Vérin mm	Capteur A mm	Capteur B mm
0	0.00	0.00	0.00
50	0.95	0.73	0.85
100	1.86	1.42	1.76
120	2.50	1.70	2.15
140	2.75	2.03	2.55
150	2.90	2.20	2.75
160	3.30	2.45	3.04
180	3.70	2.79	3.43
200	4.20	3.23	3.95
220	5.10	3.92	4.76
221	6.30	5.07	6.92
180	7.50	6.03	8.25
150	8.90	-	-
135	10.50	-	-
100	13.00	-	-
40	15.00	-	-

### 5.3 Analyse

Dès 220 kN, la déformation la plus grande a lieu du côté droit du mur, c'est donc là que se produit la rupture.

Notre mur a supporté une charge de 221 kN soit 20 tonnes. La contrainte maximale est de  $0.75 \text{ N/mm}^2$ , ce qui est plutôt bon comparé à la résistance de  $1 \text{ N/mm}^2$  obtenue sur cylindre. En effet, notre mur contient plus d'imperfections que nos cylindres.

Bien que la contrainte maximale ne soit pas très élevée, elle est largement suffisante compte tenu de l'utilisation que l'on veut faire de ce genre de mur. En effet nous n'utiliserons jamais le pisé pour réaliser des piles de pont.

De pareils murs sont destinés à la construction de maisons d'un niveau, voire deux. Leur résistance est donc tout à fait appréciable.



## 6. Conclusion

Le but initial de cette étude était de tester la résistance sismique des murs traditionnels. Cependant, comme expliqué précédemment, nous avons dû restreindre l'étendue de notre travail et se contenter d'étudier leur résistance à la compression. Cette étude est de toute manière indispensable à l'étude de la résistance au cisaillement, car il faut connaître la résistance du mur à la compression avant de le cisailer. En effet lors de ce dernier essai un effort normal doit être introduit dans le mur afin de simuler l'effet des charges qu'il reprendrait en réalité. N'ayant pas pu trouver une étude assez poussée sur les murs en terre dans la littérature, nous étions donc tenus de caractériser par nous-mêmes ces murs.

Notre étude a démontré le bon comportement de notre mur et sa bonne résistance à la compression. Nous avons aussi pu vérifier les améliorations que l'on pouvait amener à de tels murs en y ajoutant de la chaux, de la paille ou les deux.

En définitive cette étude préalable de la résistance à la compression des murs en terre permettra certainement à nos successeurs de mener les essais de cisaillement sur murs en terre. En effet, nos résultats sont valables pour n'importe quel sable limoneux avec gravier, il est donc aisé de reprendre cette étude étant donné que ce type de sol est très fréquent dans la région. De plus notre méthodologie de fabrication a prouvé sa qualité, l'amélioration principale consisterait à se munir d'une dame pneumatique pour la construction de murs de plus grandes dimensions.

## Remerciements

Pascal Favre, ARBIO SA  
Martin Pointet, spécialiste de la construction en pisé  
Yannis Schaller  
Arthur Perroud  
Christian Deschenaux

## 7. Annexes

### 7.1 Protocoles des essais

#### ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE

##### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 1

Fribourg, le 12 juin 2008

##### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T1
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau
Masse de l'éprouvette humide :	11.850 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30% Température : ~19°C

##### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.907 kg
Masse volumique :	2057 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	15.94 kN
Contrainte à la ruine :	0.90 N/mm <sup>2</sup>

---

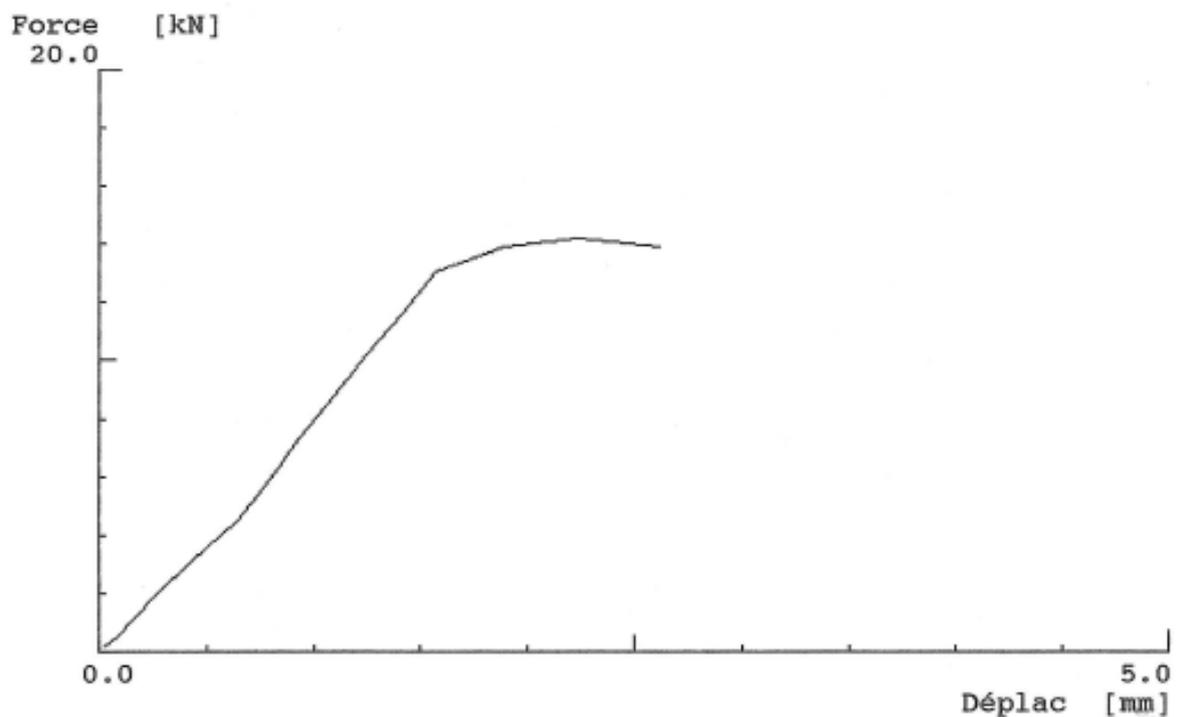
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T1
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou Lx1	:	149.10 mm
Section de base	:	17460.04 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	15.94 kN
Allongement à la Force max	=	2.00 mm
Allongement à la Force finale	=	3.39 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 2

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T2
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau
Masse de l'éprouvette humide :	11.900 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.835 kg
Masse volumique :	2044 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	17.30 kN
Contrainte à la ruine :	0.98 N/mm <sup>2</sup>

---

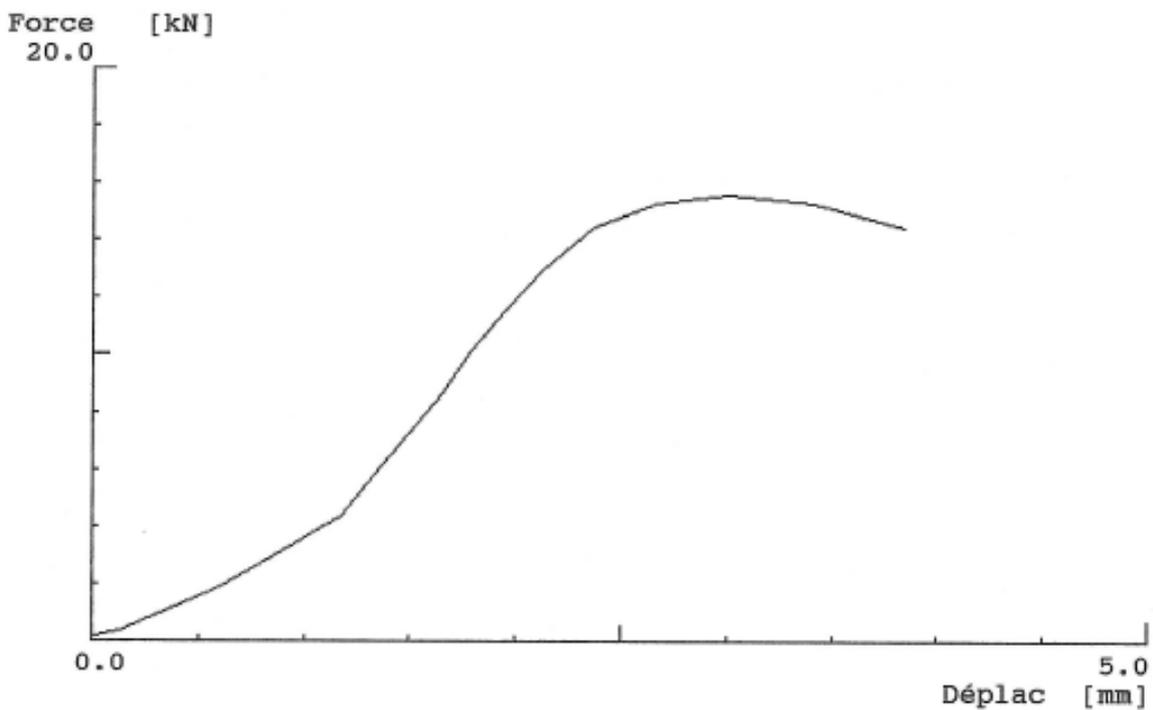
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T2
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou LxI	:	149.00 mm
Section de base	:	17436.62 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	17.30 kN
Allongement à la Force max	=	2.99 mm
Allongement à la Force finale	=	4.64 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 3

Fribourg, le 4 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T3
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau
Masse de l'éprouvette humide :	11.850 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	4 juin 2008
Age de l'éprouvette :	23 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.790 kg
Masse volumique :	2035 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	20.04 kN
Contrainte à la ruine :	1.13 N/mm <sup>2</sup>

---

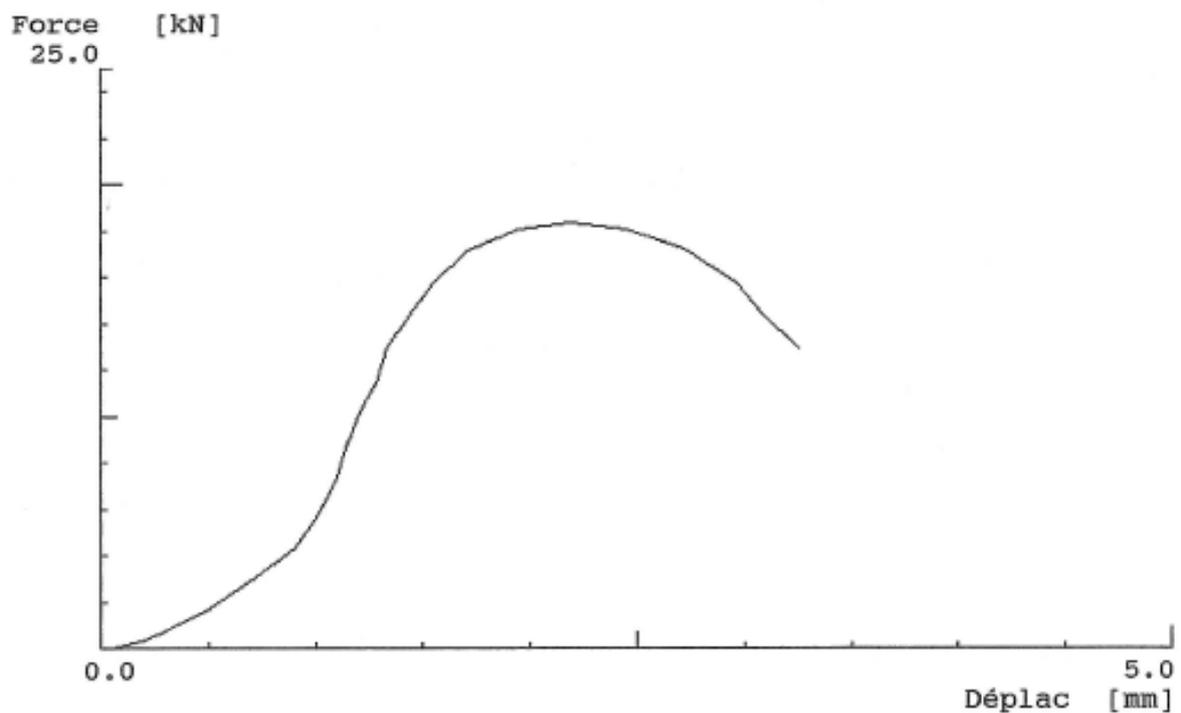
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	04.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T3
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	Cyl TERRE
Diamètre ou Lxl	:	150.00 mm
Section de base	:	17671.46 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	20.04 kN
Allongement à la Force max	=	2.05 mm
Allongement à la Force finale	=	3.49 mm

---

Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + PAILLE

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 4

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + P 1
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 1% paille
Masse de l'éprouvette humide :	11.700 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.751 kg
Masse volumique :	2028 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	20.08 kN
Contrainte à la ruine :	1.14 N/mm <sup>2</sup>

---

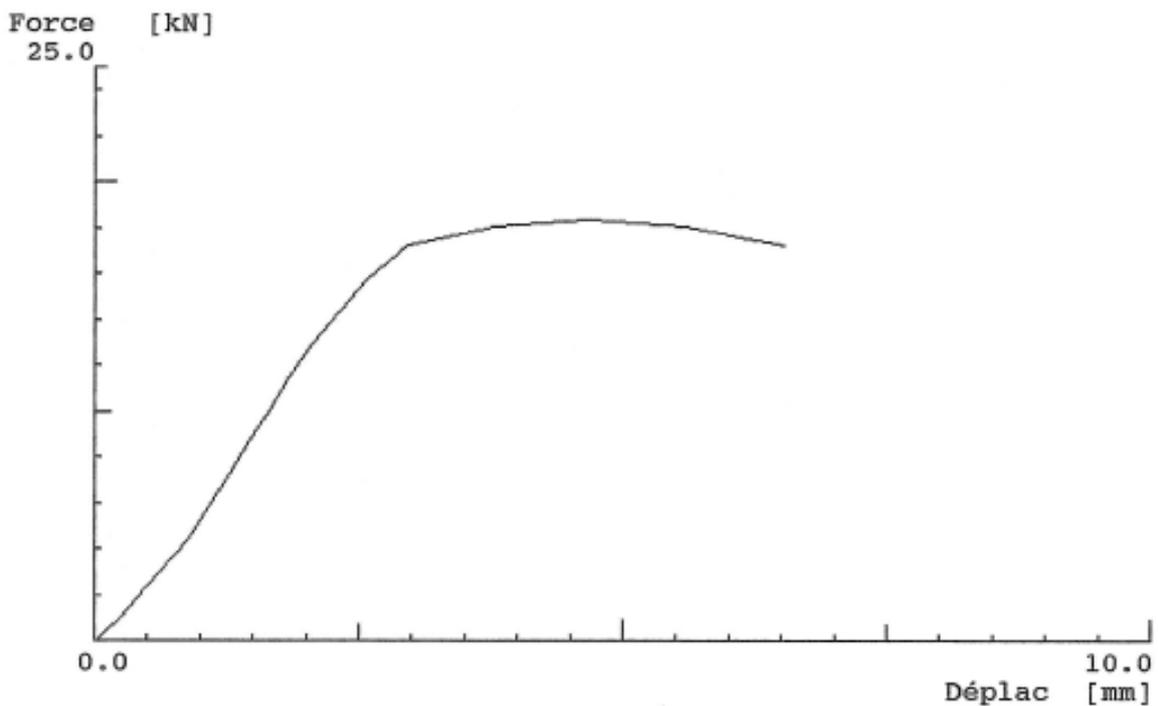
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+P1
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou LxI	:	149.80 mm
Section de base	:	17624.37 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	20.08 kN
Allongement à la Force max	=	3.87 mm
Allongement à la Force finale	=	7.89 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + PAILLE

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 5

Fribourg, le 4 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + P 2
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 1% paille
Masse de l'éprouvette humide :	11.550 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

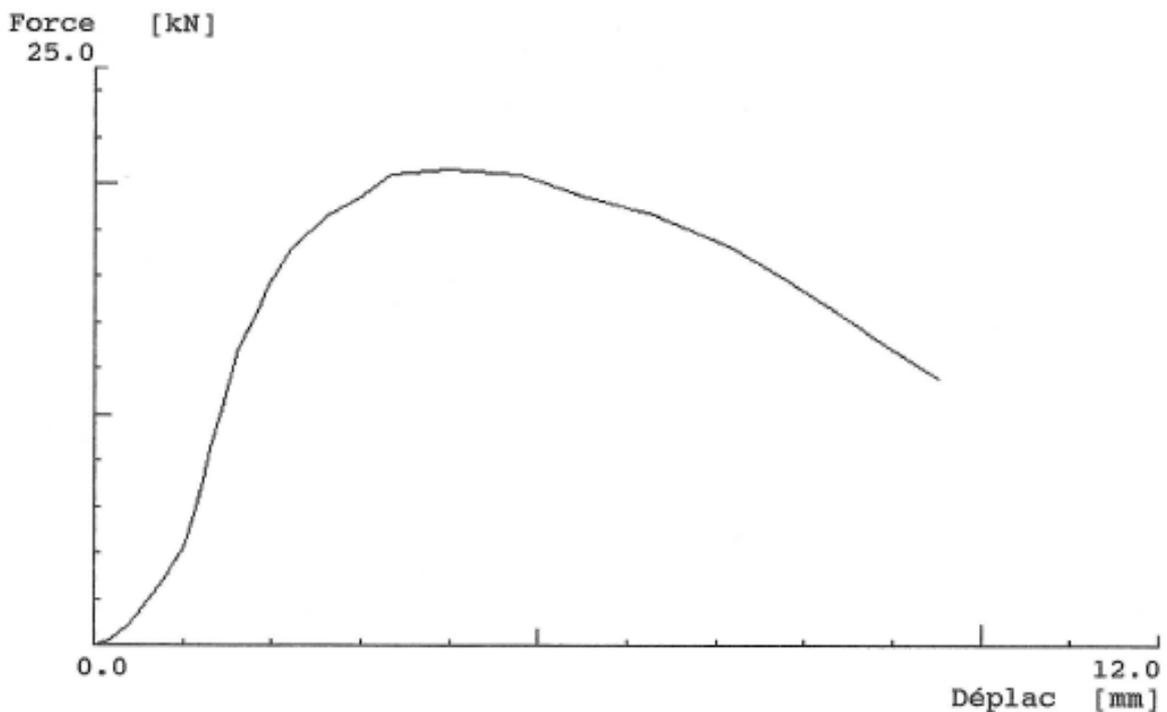
### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	4 juin 2008
Age de l'éprouvette :	23 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.504 kg
Masse volumique :	1981 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	21.52 kN
Contrainte à la ruine :	1.22 N/mm <sup>2</sup>

Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	04.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+P2
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	Cyl TERRE
Diamètre ou Lx1	:	150.00 mm
Section de base	:	17671.46 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

Force max Fm	=	21.52 kN
Allongement à la Force max	=	3.76 mm
Allongement à la Force finale	=	10.83 mm

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + PAILLE

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 6

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + P 3
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 1% paille
Masse de l'éprouvette humide :	11.600 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.650 kg
Masse volumique :	2009 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	20.16 kN
Contrainte à la ruine :	1.14 N/mm <sup>2</sup>

---

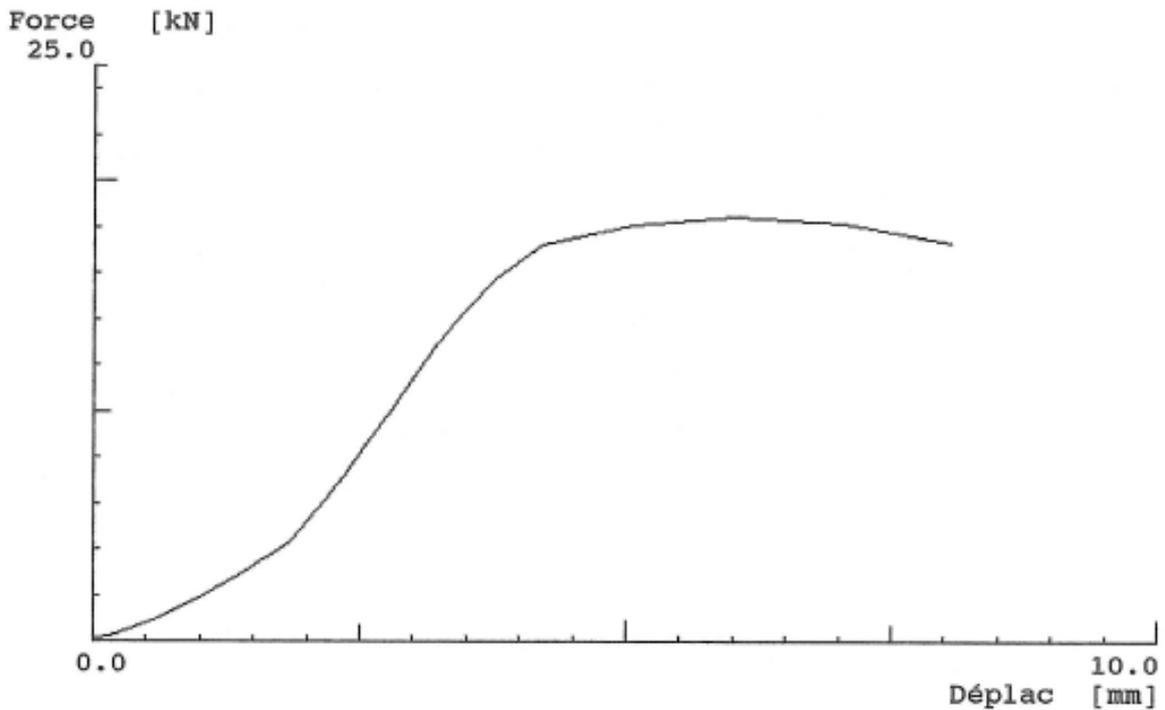
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+P3
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou Lx1	:	149.20 mm
Section de base	:	17483.47 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	20.16 kN
Allongement à la Force max	=	5.41 mm
Allongement à la Force finale	=	9.49 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + CHAUX

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 7

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + C 1
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 5% chaux
Masse de l'éprouvette humide :	11.650 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.791 kg
Masse volumique :	2035 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	29.62 kN
Contrainte à la ruine :	1.68 N/mm <sup>2</sup>

---

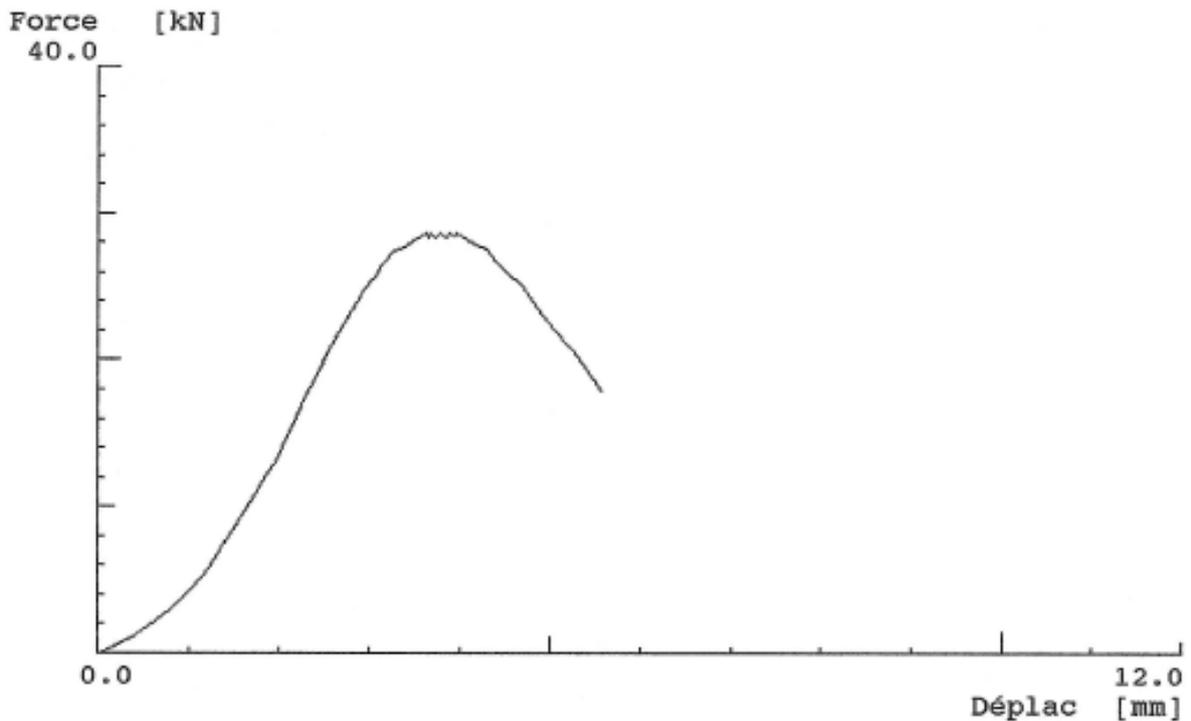
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+C1
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou Lx1	:	149.00 mm
Section de base	:	17436.62 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	29.26 kN
Allongement à la Force max	=	4.08 mm
Allongement à la Force finale	=	5.97 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + CHAUX

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 8

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + C 2
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 5% chaux
Masse de l'éprouvette humide :	11.650 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

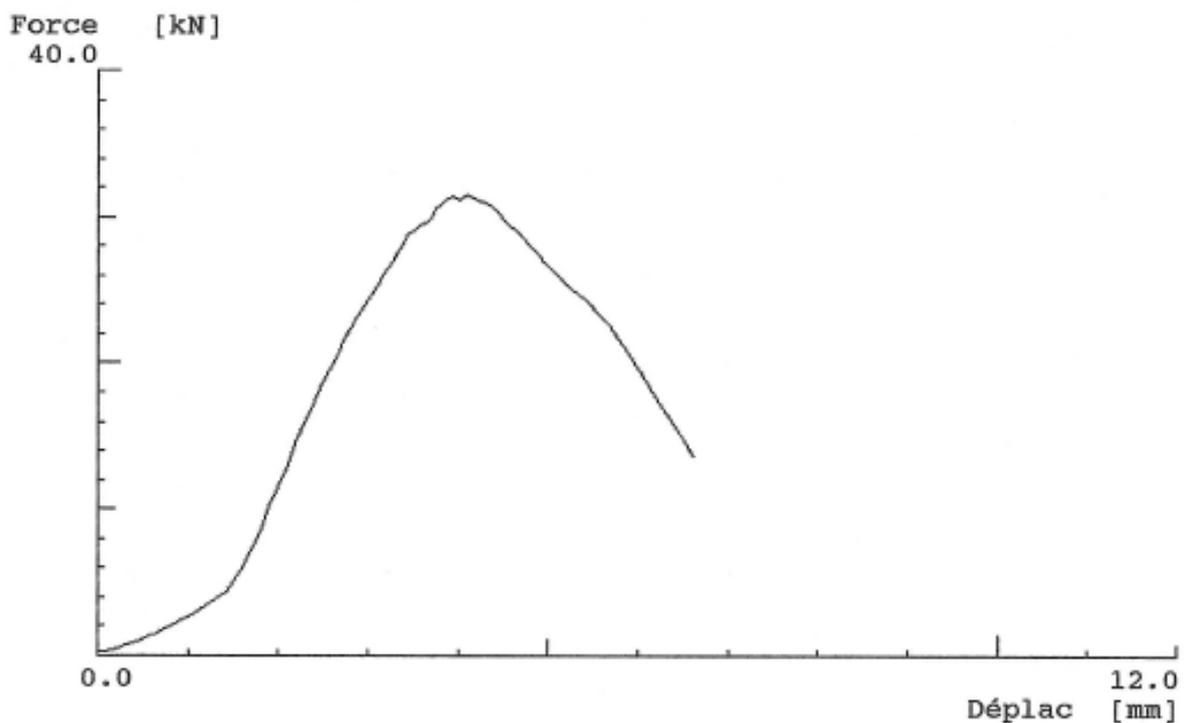
### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.800 kg
Masse volumique :	2037 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	32.20 kN
Contrainte à la ruine :	1.82 N/mm <sup>2</sup>

Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+CY 2
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou Lxl	:	149.00 mm
Section de base	:	17436.62 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

Force max Fm	=	32.20 kN
Allongement à la Force max	=	4.27 mm
Allongement à la Force finale	=	6.91 mm

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + CHAUX

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 9

Fribourg, le 4 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + C 3
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 5% chaux
Masse de l'éprouvette humide :	11.700 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	4 juin 2008
Age de l'éprouvette :	23 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.728 kg
Masse volumique :	2023 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	37.4 kN
Contrainte à la ruine :	2.12 N/mm <sup>2</sup>

---

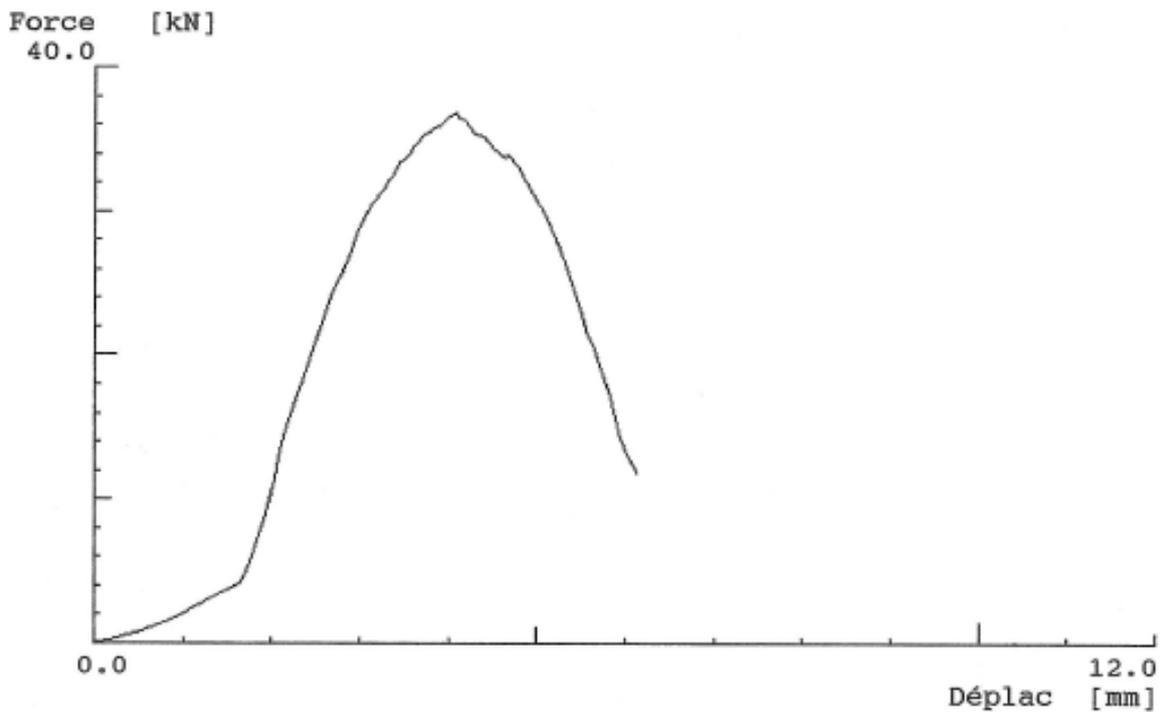
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	04.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+C3
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	Cyl TERRE
Diamètre ou Lx1	:	150.00 mm
Section de base	:	17671.46 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	37.40 kN
Allongement à la Force max	=	4.05 mm
Allongement à la Force finale	=	6.53 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + PAILLE + CHAUX

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 10

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + P + C 1
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 1% paille + 5% chaux
Masse de l'éprouvette humide :	11.250 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.462 kg
Masse volumique :	1973 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	30.66 kN
Contrainte à la ruine :	1.74 N/mm <sup>2</sup>

---

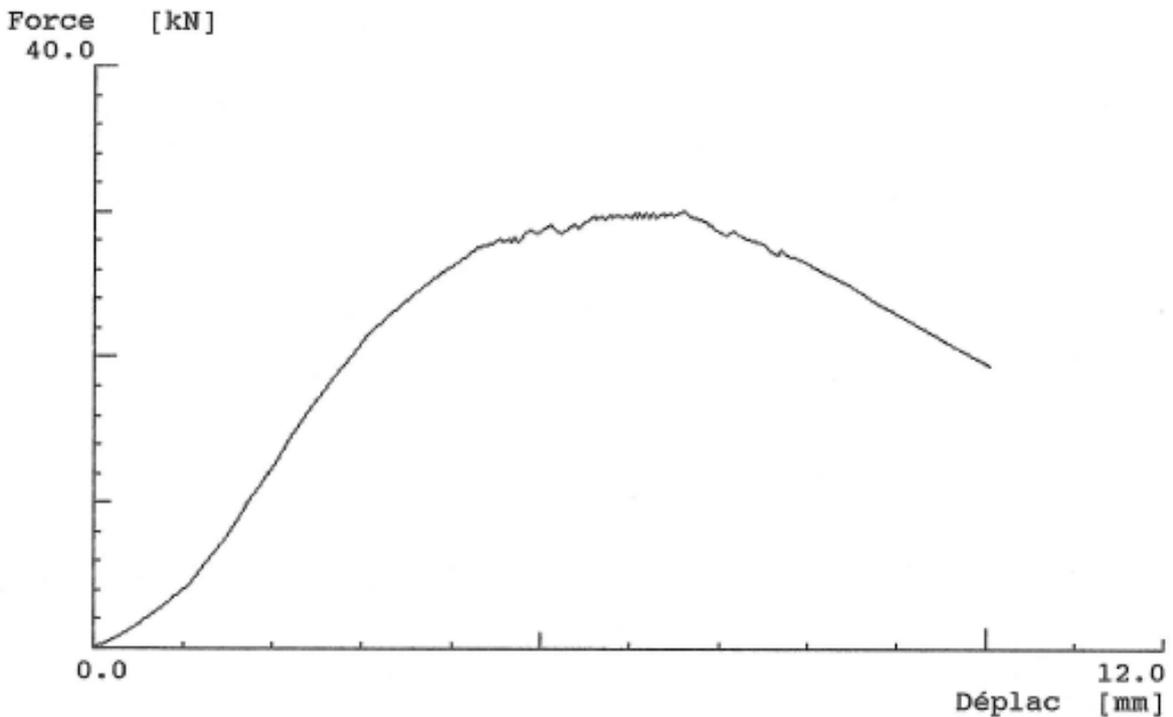
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+P+C1
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou Lx1	:	148.50 mm
Section de base	:	17319.80 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	30.66 kN
Allongement à la Force max	=	6.61 mm
Allongement à la Force finale	=	10.91 mm

---

Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + PAILLE + CHAUX

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 11

Fribourg, le 12 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + P + C 2
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 1% paille + 5% chaux
Masse de l'éprouvette humide :	11.300 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	12 juin 2008
Age de l'éprouvette :	31 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.375 kg
Masse volumique :	1957 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	27.30 kN
Contrainte à la ruine :	1.54 N/mm <sup>2</sup>

---

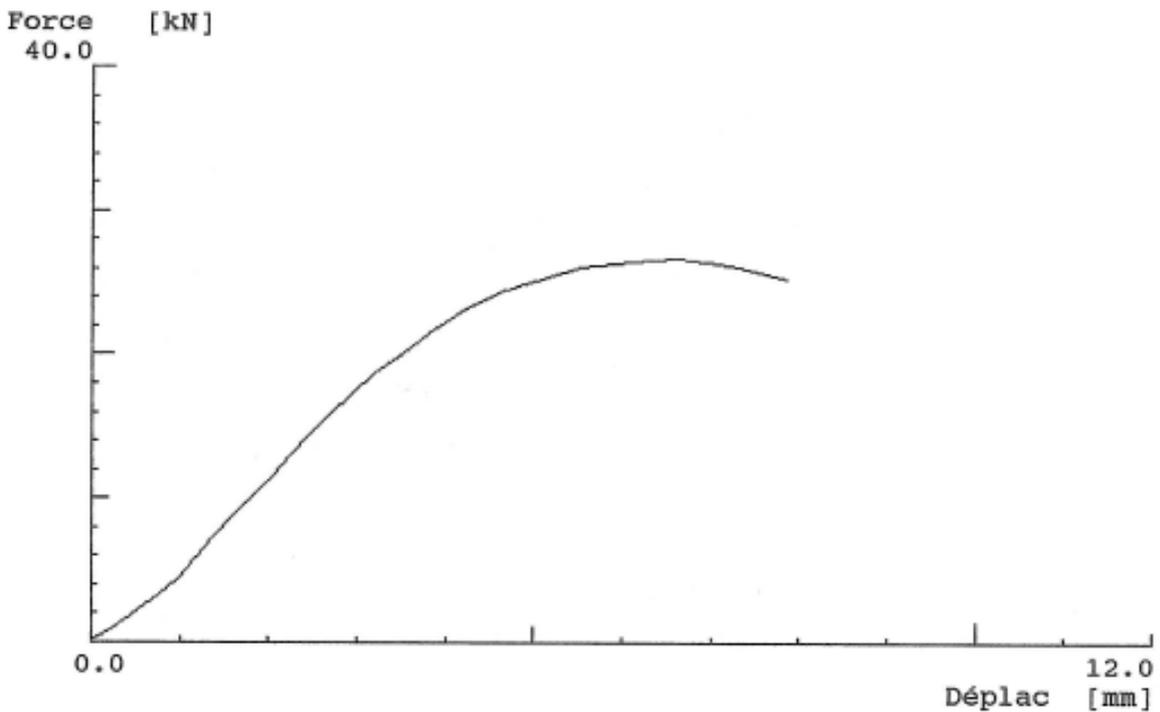
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	12.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+P+C2
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	MUR TERRE
Diamètre ou LxI	:	149.50 mm
Section de base	:	17553.85 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	27.30 kN
Allongement à la Force max	=	5.76 mm
Allongement à la Force finale	=	9.15 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME





## ECHANTILLON EN TERRE NATURELLE + PAILLE + CHAUX

### Essai de compression

Rapport d'essai n° : 12

Fribourg, le 4 juin 2008

### DESCRIPTION DE L'ÉPROUVETTE

Désignation :	T + P + C 3
Dimensions :	ø 15 x 30cm
Composition :	terre + eau + 1% paille + 5% chaux
Masse de l'éprouvette humide :	11.40 kg
Date de fabrication :	12 mai 2008
Conditions de conservation :	humidité : ~30%
	Température : ~19°C

### RESULTATS DE L'ESSAI

Date de l'essai :	4 juin 2008
Age de l'éprouvette :	23 jours
Masse de l'éprouvette sèche :	10.43 kg
Masse volumique :	1967 kg/m <sup>3</sup>
Charge de la ruine :	36.24 kN
Contrainte à la ruine :	2.05 N/mm <sup>2</sup>

---

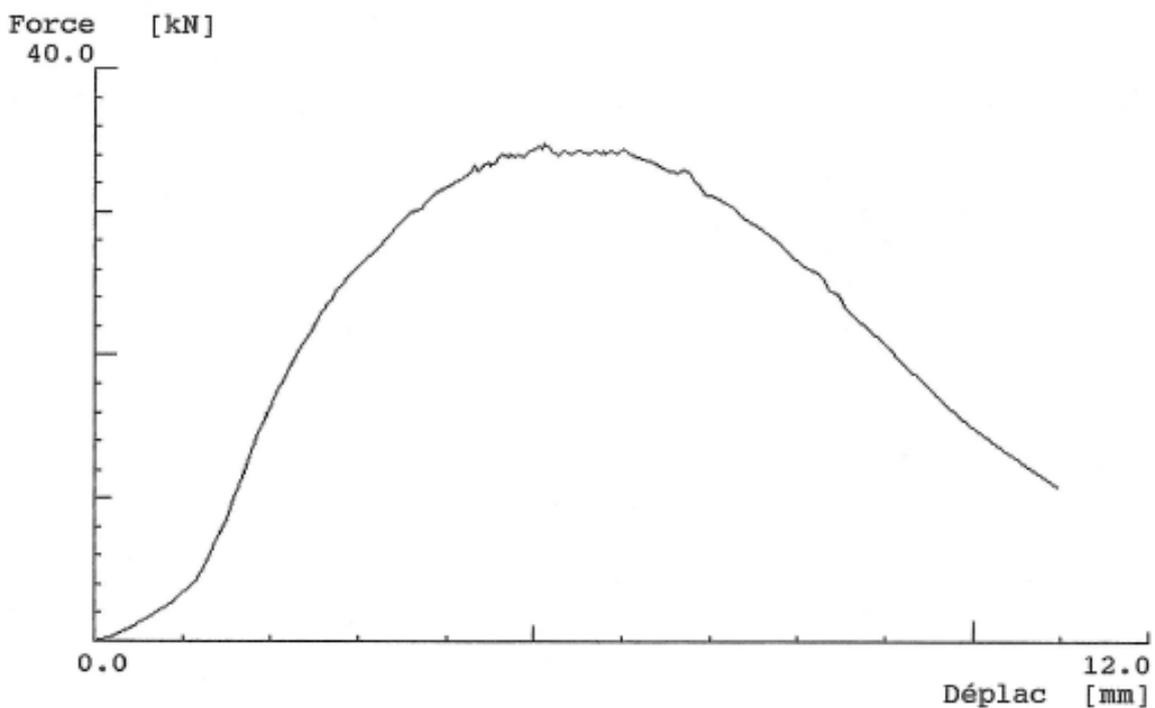
Série d'essai	:	MUR
Date d'essai	:	04.06.2008
No. d'essai	:	COMPRESS
No. d'éprouvette	:	No-T+P+C3
Nom	:	Projet "PISE"
Matériau	:	Cyl TERRE
Diamètre ou Lxl	:	150.00 mm
Section de base	:	17671.46 mm <sup>2</sup>
Remarques	:	
	:	
	:	
	:	

---

Force max Fm	=	36.24 kN
Allongement à la Force max	=	5.12 mm
Allongement à la Force finale	=	11.79 mm

---

#### Force - Déplac - DIAGRAMME



## 7.2 Interview d'un spécialiste du pisé à Genève

### 1. Y a-t-il un type de paille utilisé de préférence (paille, foin, etc...) ?

Plutôt que d'utiliser de la paille, nous utilisons de préférence des fibres animales, tels que poils de veau ou de cochon, ceux-ci ayant une taille plus adaptée et une résistance accrue.

### 2. Est-elle déchiquetée ou non ?

En ce qui concerne le renforcement avec de la paille, il est préférable de la déchiqueter, afin d'avoir des brindilles de taille similaire aux fibres utilisées dans le béton.

### 3. Y a-t-il adjonction d'un liant hydraulique ? Lequel ?

Dans le cas ici présent, sur demande de l'ingénieur, nous stabilisons le mur avec de la chaux hydraulique. Mais je pense que la chaux n'apporte pas grand-chose de plus. Pour moi, dans le cas de renforcement, l'utilisation de ciment sera plus efficace, surtout dans les angles pour avoir une meilleure résistance aux chocs ou autres dégâts éventuelles.

### 4. En quel pourcentage ? (poids ou volumique)

La stabilisation à la chaux hydraulique est de l'ordre de 5 à 7% du volume de terre.

### 5. Comment le mélange est-il effectué (terre, ciment, paille) ?

Ici, nous avons une bétonnière, mais l'idéale serait de disposer d'un grand malaxeur.....

### 6. Combien d'eau y ajoutez-vous, car la paille et le liant en demandent plus ?

Pour savoir la quantité d'eau à ajouter, le meilleur test est celui de la boulette lâchée depuis la hauteur du bassin et ensuite de voir si celle-ci se sépare en trois parties. Si elle reste en boule, trop d'eau dans le mélange. Si elle s'éclate en trop de parties, trop sec.

### 7. Comment les joints entre 2 étapes de murs sont-ils faits ?

Traditionnellement, si la surface était trop sèche, on appliquait un petit lit de chaux afin d'avoir une bonne reprise pour l'étape suivante, mais ici, aucune précaution particulière n'est envisagée.

### 8. Un tel mur peut-il être porteur ?

Absolument, d'ailleurs celui-ci sera porteur de la dalle au dessus.

### 9. Quel entretien exige un tel mur ?

Il faut bien le protéger des remontés d'humidités et le protéger également de la pluie. Pour un mur extérieur, la surface exposée peut être enduite d'une fine couche de 5mm de chaux ou alors en terre stabilisée. Dans le cas présent, un enduit de cellulose sera appliqué.

### 10. Quelle est la durée de vie de ce type de mur ?

Tout dépend de l'entretien effectué, mais ceux-ci durent facilement 200 à 300 ans voir même plus. Les plus anciens datent du 18<sup>ème</sup> siècle.

### 11. Peut-on visser, clouer des objets contre ce type de murs ?

Tout à fait. La seule précaution est d'avoir un ancrage d'au moins 10cm.



**12. Les murs en pisé ont-ils une résistance aux séismes appréciable ?**

On sait que ces murs ne sont pas très bons par rapport au séisme.

**13. Quel genre de renforcement disposeriez-vous pour améliorer cette résistance ?**

Un renforcement avec un cadre en bois conduirait déjà très certainement à une résistance accrue.

**14. La construction d'une maison en pisé est-elle envisageable dans nos régions ?**

La suisse possédant des terres argilo-graveleuses permettrait facilement des constructions en terre. Il faut savoir que la cadence de construction de murs en terre est de  $1\text{m}^2$  par jour et par personne. Le mur ici présent fait  $4.70 \times 7.00 \times 0.45$

Les étapes sont des couches de  $\sim 12\text{cm}$  non compactées  $\Rightarrow \sim 8\text{cm}$ , compactées.

La résistance d'un tel mur à la compression est de  $1\text{MPa}$

L'élanement vaut  $1/8$  mais ici nous atteignons  $1/14$  donc, bon comportement du mur.

**15. Si tel n'est pas le cas, que devrait-on adapter ?**

Eventuellement voir si des normes exigent des conditions particulières ou non.

**16. Avez-vous des ouvrages de référence à nous conseiller ?**

Rammed Earth, Martin Rauch

Traité de construction en terre, CRAterre.

**Autres données techniques :**

- L'accumulation thermique du pisé est  $\sim 10$  fois meilleur que celle du béton
- Réversibilité complète du mur
- Bonne régulation hygrométrique

Entretien avec M. Martin Pointet, Caracol SA, partenariat avec ARBIO SA.

**Caracol SA**

32, rue Guynemer

38100 Grenoble

04 76 48 33 47

[caracolscop@cegetel.net](mailto:caracolscop@cegetel.net)

## 8. Bibliographie

Construction manual for earthquake-resistant houses build of earth, Gernot Minke

Bathar construction, *an illustrated guide for craftsmen*, Swiss agency for Development and Cooperation

Confined masonry, *an illustrated guide for masons*, Swiss agency for Development and Cooperation

Study for developing and disseminating earthquake-resistant technologies for enhanced seismic safety of buildings in Nepal, Amod Mani Dixit & Surya Narayan Shrestha

Guidelines for earthquake-resistant construction of non-engineered rural and suburban masonry houses in cement sand mortar in earthquake affected areas, Architectes de l'urgence & UN-Habitat

How to make stone masonry buildings earthquake resistant?, IITK

Guidelines for earthquake-resistant reconstruction and new construction of masonry buildings in Jammu and Kashmir State, Prof. Arnan S. Arya

Earthquake.resistant stone masonry,  
<http://www.staff.city.ac.uk/earthquakes/MasonryStone/PlainStoneMasonry.htm>

Traité de construction en terre, Hugo Houben & Hubert Guillaud, 1995

Construire parasismique, Milan Zacek, 1996

Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings, Miha Tomazevic, 1999

Murs de pierres sèches, *manuel pour la construction et la réfection*, 1996

Les murs en pierre, *Neuchâtel et Chaumont, conseils pour la construction et la restauration*, 2004

Murs en pierre, *conception, réalisation et entretien*, Jaqueline Bauerhofer & Isabelle Leblon & Jean-Paul Peccard, 1981

Pierre sèche, Pierre Coste, Claire Cornu, Danièle Larcena & René Sette, 2008-06-15

Building with earth, *Design and technology of a sustainable architecture*, Gernot Minke, 2006

Earth building, *Methods an materials, repair and conservation*, Laurence Keefe, 2005

Rammed earth, Martin Rauch, 2001