Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. **36**, March 2003, pp 108-117

Comparaison de méthodes d'essais de mesures des caractéristiques mécaniques des mortiers de terre

(Empirical comparison of testing methods on measurements of the mechanical characteristics of soil mortars)

A. Pkla[1], A. Mesbah[1], V. Rigassi[2] et J. C. Morel[1]

(1) Département Génie Civil et Bâtiments URA 1652 CNRS, École Nationale des Travaux Publics de l'État, 69 518 Vaulx en Velin cedex, France

(2) CRATerre-EAG, 60 Avenue de Constantine, BP 2636 F 38036 Grenoble cedex 2, France

Article reçu le : 21 mars 2001; Article accepté le : 14 janvier 2002

RÉSUMÉ

Il existe encore très peu d'études sur les mortiers de terre, mais déjà les procédures d'essais sont différentes selon les auteurs. Cependant toutes les procédures utilisées pour les mortiers classiques sable:chaux:ciment ne sont pas applicables sans un minimum de précautions du fait de l'activité de l'argile et de la faible raideur des mortiers de terre. L'article présente certaines procédures d'essais, leur comparaison pour le cas de la résistance à la compression montre des écarts importants. Pour les mesures de maniabilité et de résistance à la traction, les premiers résultats obtenus peuvent servir de base à une discussion sur le choix des procédures d'essais. On donnera ensuite les premiers éléments permettant de corréler les mesures faites sur mortier avec le comportement des maçonneries.

ABSTRACT

There are few studies on soil mortars, yet different procedures are utilized. All the testing procedure for classical sand-lime-cement mortars cannot be used without appropriate checking because of the activity of clay and because of the stiffness of the soil mortar which is much lower. This article presents some laboratory procedures used on soil-cement mortars; their comparison in the case of the compression strength measurement shows some major differences in the results. For the measurement of workability and tensile strength, the first results can give a base for the choice of a procedure.

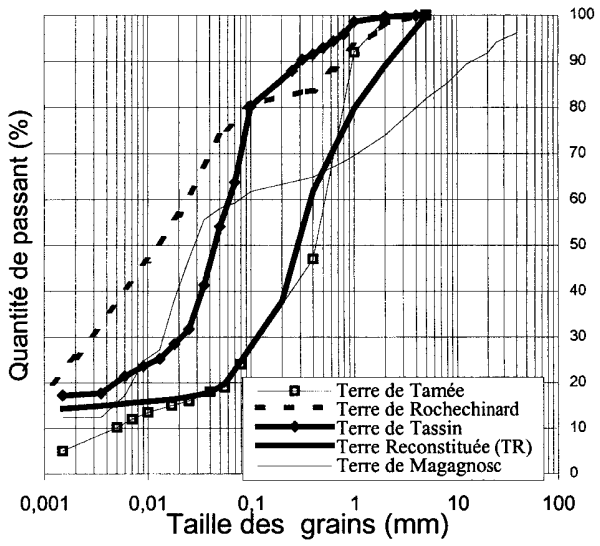
Finally some elements will be given to correlate the soil mortar characteristics with the masonry behaviour.

1. INTRODUCTION

Construire en maçonnerie de bloc de terre crue est l'une des techniques qui utilise le sol comme matériau (aussi appelé terre). Les blocs de maçonnerie peuvent être compactés (BTC : bloc de terre comprimé) ou moulés (adobes). Les blocs peuvent être stabilisés (avec du ciment ou de la chaux en général) ou non [1, 2]. Comme spécifié dans l'Eurocode 6 [3] pour les maçonneries classiques de pierre ou de briques cuites, les performances des deux composantes blocs et mortiers vont déterminer la performance de la structure maçonnée, [4].

Les performances mécaniques des BTC sont obtenues par des procédures de laboratoire qui sont bien définies maintenant, notamment par [5-7]. Par contre, il y a moins d'informations sur les procédures et donc le comportement des mortiers de terre, si bien que les mortiers classiques sable:ciment:chaux sont souvent utilisés avec des BTC. Cela conduit à un coût plus élevé et un impact sur l'environnement plus important [8] par rapport à l'utilisation de mortiers de terre seule ou de terre stabilisée (ciment ou chaux) où le liant hydraulique est inférieur à 15% en poids sec. De plus, l'utilisation d'un mortier à forte teneur en ciment peut causer des problèmes sur la structure si le mortier a une résistance beaucoup plus forte que les BTC.

Ainsi il est préférable d'utiliser un mortier de terre avec des BTC ou des adobes. Ces mortiers donnent même une meilleure résistance de la maçonnerie comparée à l'utilisation de mortiers sable:ciment pour une même teneur en ciment [9, 10]. Cependant, pour le moment, il est impossible de donner une composition standard du mortier de terre comme on peut le faire avec les mortiers sable:chaux:ciment pour lesquels la connaissance des proportions de chaque composant est suffisante pour assurer le comportement mécanique. L'une des raisons de l'utilisation de mortiers de terre réside dans la contrainte (ou le choix) d'utiliser la terre du site, ce matériau naturel est alors très variable selon les sites ; d'où l'importance de la mesure de la résistance du mortier de



Sol	Magagnosc	Rochechinard	Tassin	Tamée
C2% <2µm	12,4	25,5	17,5	6
Limite de liquidité (%)	29	38	30	60
Indice de plasticité (%)	9	18	9	31
VBS	1	2,5	1,4	2,2
A_{cB} Activité de bleu	8	10	8	37

C2%= teneur en poids sec de l'argile du sol en %
VBS=Valeur de bleu de la fraction 0/D (total)
A_{cB}=100xVBS/C2%

Fig. 1 - Caractéristiques géotechniques des sols utilisés pour faire des mortiers de terre, origine : Sud-Est de la France.

terre. Ce papier décrit des procédures d'essais utilisées sur les mortiers de terre et leur influence sur les caractéristiques de quelques mortiers de terre. La Fig. 1 donne les caractéristiques des terres utilisées dans cette étude.

Il y a deux approches pour déterminer les propriétés d'un mortier : tests directement sur le mortier ou sur un élément de maçonnerie (bloc + mortier). La mesure de la consistance est évidemment faite sur le mortier seul et la mesure de la résistance de l'interface bloc-mortier est évidemment faite sur un élément de maçonnerie. La résistance à la compression du mortier peut être étudiée par les deux approches, [4, 10]. Mais il n'y a pas encore, à notre connaissance, de corrélation entre la résistance à la compression du mortier et celle de la maçonnerie, ce qui est le but de l'étude des mortiers.

Mais avant de travailler sur cette relation, la résistance en compression du mortier et ses autres caractéristiques doivent être bien définies, ce qui n'est pas le cas actuellement. Notre étude va s'intéresser aux tests sur mortier seul et non pas au sein d'un élément de maçonnerie.

2. MESURES À L'ÉTAT PLASTIQUE

Il y a cinq quantités mesurées habituellement dans cet état pour les mortiers classiques (sable:chaux:ciment) : maniabilité, consistance, rétention d'eau, teneur en air et teneur en eau. Toutes ces quantités sont liées les unes aux autres, ce qui rend délicate leur mesure, puisque différentes procédures peuvent être utilisées pour mesurer le même phénomène.

Nous proposons, pour les mesures de maniabilité et consistance, une étude comparative de méthodes empiriques car ce sont des méthodes très utilisées en pratique. Des mesures rhéologiques ne sont encore pas possibles pour les mortiers de terre, et ne peuvent s'appuyer directement (à cause de l'argile) sur les méthodes développées pour les mortiers de béton par exemple.

Tableau 1 – Teneur en air (méthode à l'alcool de NF EN 413-2), ouvrabilité au cône d'Abrams, maniabilité de mortiers de terre

Mortier	Teneur en eau (%)	Teneur en air, % en volume	Rétention d'eau (%)	Ouvrabilité (essai d'affaissement, NF P 18-451 1981)		Maniabilité (NF EN 413-2)	
				Affaissement (cm)	Diamètre Galette (cm)	1er essai	2e essai
mortier normalisé MC5	12,5	8 à 20	80 à 95			5 à 30s	
TR* (1:0)	13	9,8	98,2	12,5	30	8 s	10 s
TR*:ciment (25:2)	17	5,9	98,9	0	20	> à 5 min	> à 5 min
TR*:ciment (25:2)	21	4,8	97,9	4,5	22	45 s	30 s
Tamée (1:0)	22	6,5	99,0	1,5	22	> à 5 min	> à 5 min
Tamée: ciment (25:2)	23	6,0		0,5	20,5	> à 5 min	> à 5 min
Tamée: ciment (25:2)	25,5	4,1		1,5	22	> à 5 min	> à 5 min
Tamée: ciment (25:2)	29	2,4	94,6	7	23	> à 5 min	> à 5 min
Tassin (1:0)	25,5	3,9	97,8	0,5	21	> à 5 min	> à 5 min

* *TR:Terre Reconstituée.*

2.1 Mesure de la teneur en air

Nous avons utilisé la méthode à alcool selon la norme NF EN 413-2 [11] sur trois terres différentes avec des teneurs en ciment (que nous exprimerons toujours en poids sec) de 25:2 (voir Tableau 1). À part la terre reconstituée non stabili-

sée, toutes les teneurs en air sont inférieures à 7%. C'est bien une particularité des mortiers de terre qui est due à la capacité des fines argileuses à adsorber de l'eau. Les mortiers de terre ont donc des teneurs en eau plus grandes que les mortiers classiques (voir aussi section 2.4) et donc des teneurs en air plus petites (l'air ne pouvant chasser l'eau adsorbée).

Pour le cas de la terre reconstituée, une mauvaise qualité du malaxage pourrait expliquer cette valeur plus élevée, l'air ayant été moins bien chassé par l'eau ajoutée lors de l'opération. Dans le cas des sols reconstitués (mélange argile-sable), il est préférable de laisser un temps de réaction du mélange plastique de 24 h à 1 semaine pour garantir une bonne homogénéité.

2.2 Mesure de la rétention d'eau

Les premières mesures de rétention d'eau sur mortier de terre, à notre connaissance, ont été publiées par [10]. Ces mesures donnent une capacité de rétention d'eau plus importante que pour les mortiers classiques (sable:chaux:ciment). Nous avons fait des essais complémentaires vue la variabilité des terres utilisées sur sites (les tests de [10] quant à eux ont été effectués sur des terres reconstituées contenant une kaolinite seulement). Cette capacité à retenir l'eau n'est pertinente que corrélée avec les blocs de terre de la maçonnerie puisque les migrations d'eau et de particules vont dépendre des deux milieux en présence. Là encore il y a très peu d'études sur les maçonneries en terre [9, 12]. Cet aspect est d'ailleurs même toujours du domaine de la recherche pour les maçonneries de briques cuites et mortiers sable:chaux:ciment [13].

Cette meilleure capacité de rétention d'eau va être en général favorable à un meilleur comportement d'interface bloc-mortier [12] car freinant une migration trop rapide de l'eau vers les blocs et l'atmosphère. On notera que ceci est encore accentué par la nature des blocs de terre qui sont en général moins absorbants que les briques cuites (d'après nos essais).

La rétention d'eau mesurée selon NF EN 413-2 [11], pour tous les mortiers de terre du Tableau 1, est supérieure à 95% et donc à celle du mortier classique normalisé MC5 qui varie entre 80 et 95%. Ces résultats sur des terres naturelles confirment ceux de Walker [10] pour des terres reconstituées contenant de la kaolinite.

2.3 Mesure de la maniabilité et de la consistance

Nous allons aborder ici un peu plus en détail la façon de qualifier la rhéologie de la pâte de mortier frais. De nombreuses recherches sont en cours sur ce sujet sur les mortiers de béton, intérêt relancé par la découverte récente des bétons autonivelants [14], et encore sur les mortiers sable:chaux:ciment pour maçonneries. La complexité de ce domaine tient au fait que le mortier de terre est :

i- un milieu multi phasique (argile-sable-eau-ciment/chaux-air),

ii- ces phases agissant fortement dans le temps sur sa rhéologie (voir section 2.3.4),

iii- en interaction avec des blocs (eux aussi de caractéristiques très diverses),

iv- en interaction avec l'air ambiant et donc sujet aux conditions climatiques lors de la pose.

Malgré cette complexité, les maçons expérimentés trouvent naturellement un compromis entre toutes ces contraintes, et donc la convenance d'un mortier est d'abord une appréciation de maçon avant d'être une mesure de laboratoire. Un mortier facile à mettre en œuvre doit tenir dans la truelle sans coller, bien s'étaler et adhérer sur une surface verticale quand on le jette sur celle-ci.

Ces propriétés sont scindées en deux mesures appelées [15] :

• Consistance (résistance à la déformation) qui est mesurée par un essai de type pénétromètre que l'on appelle plongeur ou « cone impression » en anglais. L'utilisation d'une table d'écoulement et de l'essai « dropping ball » en anglais est aussi possible. Dans le cas de l'utilisation de la table d'écoulement, il est nécessaire d'étalonner la table avec un mortier satisfaisant les critères de bonne consistance au plongeur, sinon cet essai donne une valeur de maniabilité.

• Maniabilité (statique ou dynamique) mesurée par un essai d'affaissement ou un essai d'écoulement. Dans le cas de l'essai d'affaissement on mesure alors l'ouvrabilité, les anglo-saxons confondent l'ouvrabilité et la consistance [16].

Les normes [17] donnent une spécification sur la consistance qui va déterminer la teneur en eau adéquate du mortier. Ensuite on mesure la maniabilité du mortier pour cette consistance donnée.

L'approche « en deux points : consistance et maniabilité » est justifiée par le fait que depuis environ 25 ans, on considère que le comportement des mortiers classiques (sable:chaux:ciment) suit un modèle de fluide de Bingham [18] avec deux paramètres physiques appelés constantes de Bingham (contrainte seuil de cisaillement et viscosité plastique). Pour qualifier complètement un mortier suivant cette loi il suffit de mesurer ces deux grandeurs physiques. Il faut donc au minimum deux mesures expérimentales différentes dont une dépendant du temps (ou d'une vitesse par exemple) pour la mesure de la viscosité plastique. Il est admis par [19, 20] que la valeur de l'affaissement au cône d'Abrams donne indirectement la contrainte de seuil.

On peut trouver le second paramètre (la viscosité plastique) à l'aide de rhéomètres adaptés aux bétons ou en mesurant un temps d'affaissement intermédiaire avec un cône d'Abrams modifié [21]. Ces développements récents s'appliquent à des bétons « fluides » *i.e.* avec un affaissement dépassant les 10 cm. Dans ce cas [21] propose même une loi de comportement de Herschel-Buckley à trois paramètres.

Nous prévoyons de faire rapidement des mesures rhéologiques sur mortiers de terre afin de valider le comportement de Bingham ou pas. Mais l'urgence est de valider des essais pratiques qui sont déjà utilisés *in situ* afin de les intégrer dans une pratique plus large.

2.3.1 Mesure de la consistance

On peut espérer, comme pour les mortiers classiques, trouver pour les mortiers de terre une fourchette de consistance acceptable par un maçon qualifié. C'est à partir de cette spécification que la teneur en eau de fabrication du mortier est déterminée.

La consistance a été mesurée par deux tests par [10]. Les 2 tests au plongeur et table d'écoulement donnent des résultats très dispersés pour des mortiers qui sont pourtant, d'après l'avis subjectif du maçon, de bonne consistance. Ces résultats ont été obtenus sur des terres reconstituées (sable-kaolinite) avec des teneurs en argile de 10 à 40%.

2.3.2 L'essai d'affaissement

L'essai d'affaissement au cône d'Abrams (« slump test » en anglais) mesure l'ouvrabilité et n'est utilisé en France que pour les bétons. Son utilisation pour les mortiers est cependant courante pour les Anglo-saxons qui mesurent alors « the consistency ». D'après Walker [10] qui a utilisé un cône d'Abrams de plus petite taille [16] que celui des bétons, c'est cet essai qui convient le mieux aux mortiers de terre reconstitués contenant uniquement de la kaolinite, par rapport aux essais de la section 2.3.1. L'affaissement de ces mortiers varie entre 5 et 25 mm, mesures selon [10].

Nous avons procédé à des essais au cône d'Abrams pour béton [22] qui donnent des affaissements de 15 à 70 mm pour les mortiers les plus acceptables du point de vue d'un maçon pour leur mise en place à l'état frais, voir Tableau 1. Des essais avec un cône plus petit (adapté au mortier) nécessitent de lubrifier le cône avec de l'huile [10].

2.3.3 Maniabilité

Selon les normes en vigueur pour les mortiers classiques, il y a trois principaux essais pour quantifier la maniabilité [15] :

– La table d'écoulement. Utilisée pour des mortiers de terre par [23] selon la norme [24] pour ce qui est du nombre de coups, le diamètre de la galette donnant la maniabilité adéquate qui a été déterminée par un maçon expérimenté.

– Le Mo-meter utilisé en Scandinavie

– Le maniabilimètre [11] qui mesure un temps d'écoulement.

Ces essais ont été établis pour des mortiers classiques (ciment:chaux:sable) et donnent une cohésion (« cohesivity » en anglais). Quand on les utilise avec des mortiers de terre, on a vu (Tableau 1) que les valeurs données par les normes ne sont pas applicables à la terre (voir aussi [10]).

La maniabilité dynamique mesurée avec le maniabilimètre semble a priori inappropriée pour les mortiers à maçonner. En effet, ces mortiers ne sont pas vibrés lors de leur mise en œuvre contrairement aux bétons. C'est d'ailleurs pour ces derniers que le maniabilimètre NF EN 413-2 [11] a été conçu. Mais nous disposons de nombreuses informations sur cette maniabilité dynamique et donc il nous a semblé intéressant de faire des recherches dans cette voie. De plus, la norme française [17] donne des prescriptions de cette maniabilité pour les mortiers.

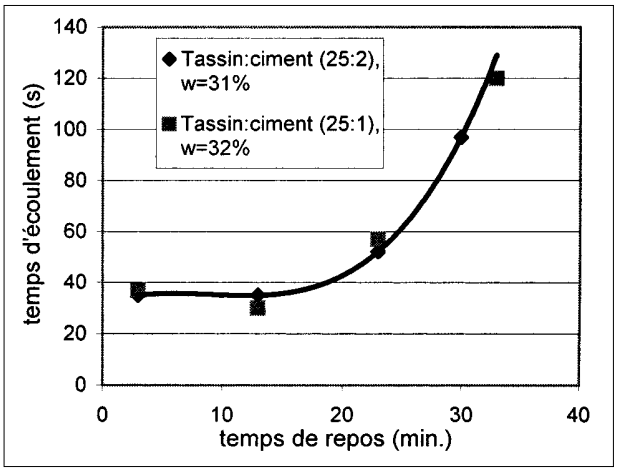


Fig. 2 - Variation de la maniabilité en fonction du temps.

Les études précédentes sur mortiers de terre au maniabilimètre [11] ont montré que [25] :

– L'addition de fibres de Sisal augmente la teneur en eau et diminue le temps d'écoulement. La quantité d'eau supplémentaire dépend alors de la surface spécifique des fibres.

– L'addition d'un plastifiant ne change pas le temps d'écoulement mais réduit la teneur en eau. C'est donc un moyen de freiner l'apparition des fissures de retrait.

Les valeurs de temps d'écoulement au maniabilimètre données dans le Tableau 1 montrent que cet appareil ne convient pas pour tous les mortiers de terre puisque trois mortiers sur quatre, adaptés à la construction en terre, donnent un temps d'écoulement infini. Nous proposons simplement d'abandonner l'usage de cet appareil plutôt que de le modifier. Il est en effet nécessaire, dans l'état actuel des connaissances, d'utiliser des appareils de mesure simples et peu coûteux (par exemple non électriques).

2.3.4 Variation de la maniabilité dynamique en fonction du temps

Sur chantier, le mortier n'est pas utilisé en totalité instantanément. Une partie de la gâchée reste au repos avant d'être utilisée au fur et à mesure des collages des blocs. Si le mortier contient un liant hydraulique (ce qui n' est pas toujours le cas pour les mortiers de terre), il ne faut pas le remouiller. On voit sur la Fig. 2, que même les mortiers de terre avec peu de ciment (ici avec une forte teneur en argile de C2% = 17,5% et plutôt une consistance humide selon le Tableau 1) perdent leur maniabilité d'une manière significative à partir de 20 minutes et après 35 minutes ce mortier n'est plus utilisable. Ceci dans des conditions tempérées (France) *i.e.* à l'ombre et température de 20°C environ.

2.4 Teneur en eau

Nous allons comparer des teneurs en eau jugées adéquates, pour différentes terres et par différents auteurs. Cette maniabilité adéquate est déterminée soit par différents maçons ou par un temps d'écoulement de 16s au

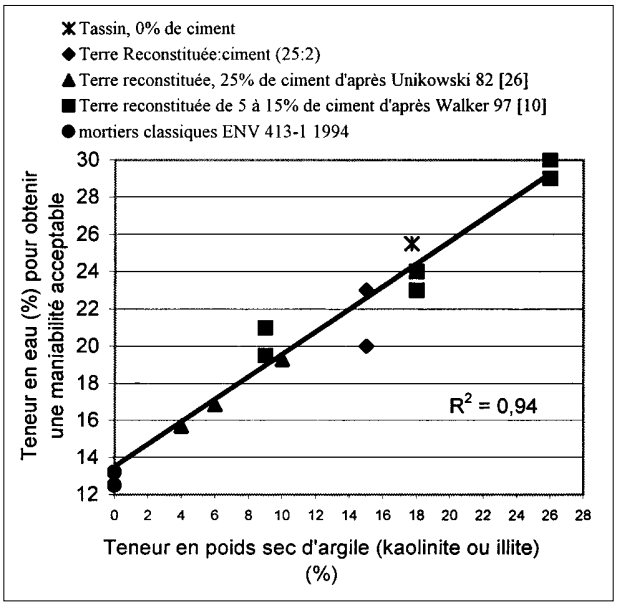


Fig. 3 – Variation de la teneur en eau du mortier afin d'obtenir une maniabilité acceptable. Selon différents auteurs, Tassin, terre naturelle, contient majoritairement de l'illite et minoritairement de la kaolinite.

maniabilimètre de l'EN 412-2 pour le cas des données de [26]. La Fig. 3 présente l'influence de la quantité d'argile (ici une kaolinite pour toutes les terres reconstituées, Tassin qui est une terre naturelle, contient un mélange de kaolinite et d'illite, cette dernière étant majoritaire, voir A_{cB} Fig. 1) sur la teneur en eau des mortiers de terre. On notera que la teneur en eau dépend moins de la quantité de ciment que de la quantité d'argile et de la qualité de l'argile. Les données de [26] sont obtenues avec une teneur en ciment trop grande pour la construction en terre.

On remarque aussi que pour une même terre, la teneur en eau de fabrication augmente avec le taux de ciment ainsi que selon l'activité des argiles voir Tableau 1, ceci aussi bien pour Terre Reconstituée qui contient de la kaolinite, que pour Tamée qui contient majoritairement de la smectite.

2.5 Conclusions

Si on considère que les mortiers ont un comportement de fluide de Bingham (ce qu'il faudra vérifier) il suffit de mesurer 2 paramètres pour caractériser complètement chacun d'eux. En attendant de faire des mesures rhéologiques directes, il semble que l'essai au cône d'Abrams soit utilisable pour de nombreuses terres. L'essai au maniabilimètre n'est par contre pas adapté aux mortiers de terre.

3. MESURE DU RETRAIT DE SÉCHAGE

Un des principaux problèmes avec les mortiers de terre, et spécialement avec les mortiers non stabilisés (100% terre), est l'apparition de fissures de retrait. Ces fissures peuvent avoir un effet sur l'homogénéité de la maçonnerie et sur sa durabilité s'il n'y a pas d'enduit, l'eau pouvant pénétrer par les fissures.

Le Tableau 2 donne le retrait de quelques terres mettant en évidence l'influence de la stabilisation. Si on rajoute du ciment, il est nécessaire de dépasser le taux de 25:2, sinon les pertes de résistance mécanique sont trop grandes, voir les sections 4, 5 et 6 et les figures qui s'y rapportent (avec les BTC c'est différent du fait de l'action du compactage et de la teneur en eau plus petite). Bien sûr si on considère l'éprouvette de mortier non stabilisé saturé, alors ceci n'est plus vrai puisque la résistance du mortier de terre saturé est proche de 0. Dans le cas de teneur en ciment en dessous de 25:4, le ciment n'est pas le liant, mais un stabilisant vis-à-vis de l'eau, l'argile étant le liant principal.

Un retrait supérieur à 10% pose aussi des problèmes pour obtenir des éprouvettes cylindriques homogènes avec un élancement de 2, l'interaction parois du moule-éprouvette pendant la cure pouvant détruire cette dernière.

Une autre méthode pour diminuer le retrait de séchage consiste en l'addition de sable (éventuellement en plus du ciment) ou de fibres naturelles [23]. Mais dans le cas d'ajout de sable seul, la résistance à la compression va diminuer puisque le taux de liant (argile) va diminuer.

4. ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE

4.1 Revue bibliographique

Il se dégage des études sur mortier de terre quatre procédures utilisant les éprouvettes suivantes :

- prisme 4 x 4 x 8 cm^3 d'élancement 2 avec du frettage au contact de l'éprouvette avec la presse [23]
- cylindre (diamètre 7 cm, hauteur 14 cm) d'élancement 2 sans frettage (ENTPE)
- cubes de 7 cm avec frettage [4, 9]
- cubes de 5 cm avec frettage [10] sur éprouvettes saturées.

Le premier résultat de ces tests est de comparer les mortiers entre eux, il est donc nécessaire de vérifier que chaque procédure donne le même résultat. La finalité de ces études étant la corrélation avec la maçonnerie.

La Fig. 4 donne la résistance à la compression pour le mortier « Rochechinard » avec 25:1 de ciment. Ce mor-

Tableau 2 – Retrait total après séchage

Sol	Teneur en eau de fabrication (%)	Nombre d'échantillons testés	Retrait volumique (%)	Écart type
TR*:ciment 25:2 (en poids sec)	16,4	4	5,4	1,8
Tamée 1:0	22	6	11,3	1,8
Tamée:ciment 25:2 (en poids sec)	22	6	4,7	0,57
Tamée:ciment 25:2 (en poids sec)	28	5	3,8	1,4

* *Terre Reconstituée.*

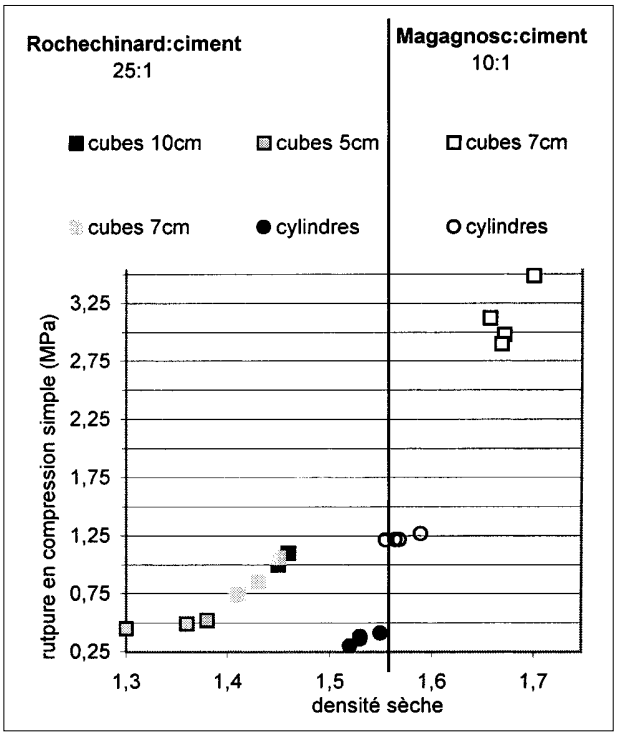


Fig. 4 - Effet de la taille et forme de l'éprouvette, tous les essais sur cubes sont frettés, les cylindres sont de diamètre 7 cm et hauteur 14 cm et sans frettage.

tier n'est pas utilisable pour la construction car de résistance trop faible. Les trois dernières procédures précédentes sont utilisées. Les éprouvettes testées en fonction de leur géométrie et de leur taille n'ont pas la même densité sèche. Cela signifie qu'ils ne peuvent pas avoir la même résistance, puisque l'on sait que la résistance augmente avec la densité sèche [1]. Les cubes de 10 cm ont une densité sèche plus grande par rapport aux autres cubes, il peut y avoir moins de frottement sur les surfaces du moule par rapport au volume.

La résistance à la compression pour les cubes de 10 cm devrait être plus petite que celle des cylindres, puisqu'ils ont une densité sèche plus petite (le moule cubique apporte plus de frottement dans les coins qu'un moule cylindrique). La résistance est pratiquement deux fois plus grande que celle obtenue sur cylindre. On obtient le même résultat avec la terre « Magagnosc » qui est cette fois-ci utilisée en construction (à droite de la Fig. 4). Tenant compte des remarques sur Rochechinard, nous avons particulièrement tassé l'éprouvette lors du remplissage des moules cubiques pour obtenir alors une densité plus grande.

Cette différence de résistance entre cube et cylindre est principalement due au frettage sur les faces en contact avec la presse. Le frettage bloque les déplacements latéraux à l'interface éprouvette-presse. Ce blocage crée un confinement puisqu'il bloque les déformations latérales. Ce phénomène est sûrement moins important avec des mortiers plus rigides (cas des mortiers sable:chaux:ciment). Comme ils sont plus rigides il y a moins de déplacement latéral et donc moins de frottement.

Pour les cylindres d'élancement 2 comparés au cube (élancement 1) le frottement est moins important comparé au volume : au milieu de l'éprouvette les déformations sont moins modifiées par le blocage des extrémités de l'éprouvette. Dans le cas de la procédure [25] (sur cylindre, deuxième procédure) il y a un dispositif expérimental d'antifrettage décrit à la section suivante.

En conclusion les essais sur cube, avec frettage, donnent plus d'information sur l'interface presse-éprouvette que sur l'éprouvette elle-même. Cet essai ne doit pas être utilisé si on recherche les caractéristiques intrinsèques du matériau.

4.2 Essai sur cylindre

On dispose à l'interface éprouvette-presse une membrane en latex avec de la graisse de silicone (Fig. 5a). L'utilisation d'éprouvette d'élancement 2 avec peu de frettage aux extrémités va donner des déplacements linéaires au sein de l'éprouvette, et donc donner des valeurs de déformation constante dans toute l'éprouvette. Il est donc possible d'obtenir la déformation direc-

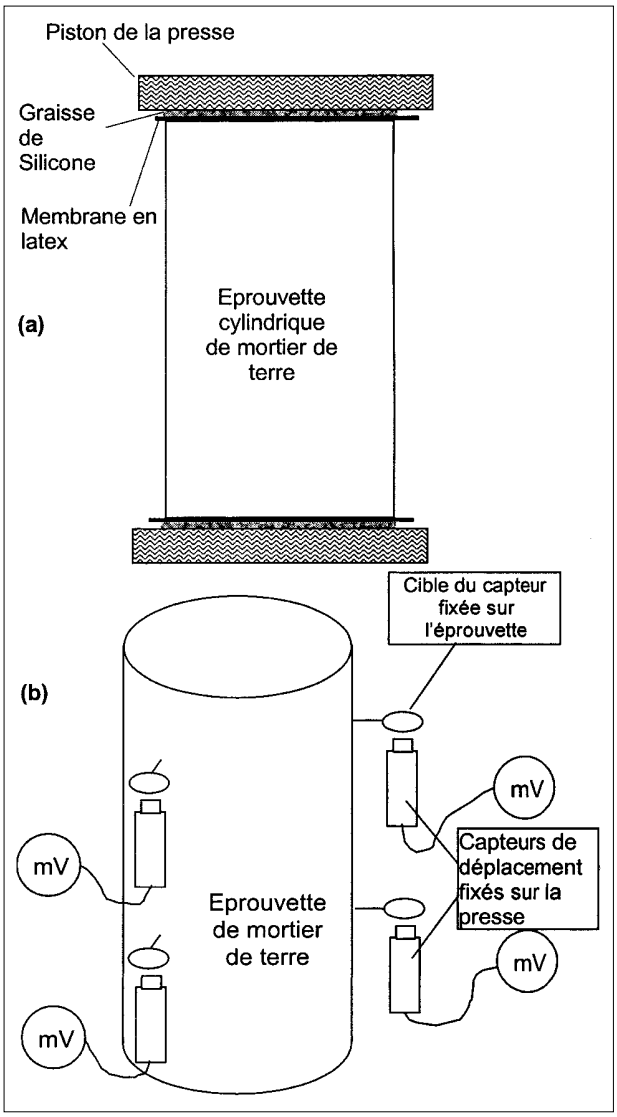


Fig. 5 - Dispositif de mesure des déplacements.

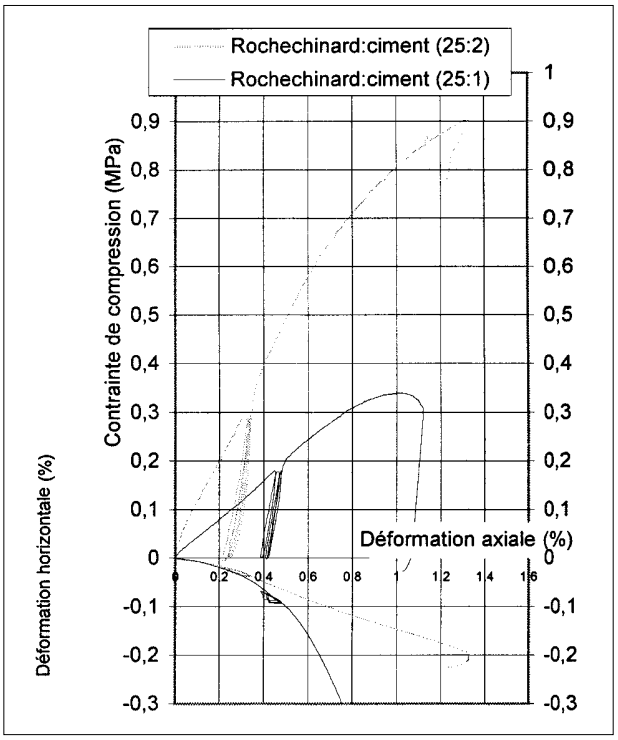


Fig. 6 - Comportement en compression simple de cylindre avec antifrettage, terre Rochechinard.

Tableau 3 – Caractéristiques mécaniques		
Sol	Rochechinard:ciment 25:1	Rochechinard:ciment 25:2
Module initial MPa (jusqu'à déformation axiale de 0,6%)	36	100
Module de cycle MPa (contrainte maximum du cycle)	250 (0,2)	320 (0,3)
Coefficient de Poisson (jusqu'à déformation axiale de 0,2%)	0,1	0,08
Contrainte de compression à la rupture MPa	0,36	0,93
Densité sèche*, sans dimension	1,52	1,56

* *poids volumique sec/poids volumique de l'eau.*

tement à partir des déplacements de n'importe quel point de l'éprouvette mais pas à partir du déplacement du piston. La Fig. 6 donne les déformations obtenues à partir des capteurs de déplacement fixés directement sur l'éprouvette (Fig. 5b).

Les cycles montrent que le matériau n'est pas élastique. Mais après le premier cycle le comportement devient élastique linéaire dans le domaine des contraintes du premier cycle. Ce type de comportement, sur les BTC, a déjà été obtenu par [27]. Le comportement est pratiquement linéaire pour le premier chargement jusqu'environ la moitié de la résistance à la rupture, cela permet de calculer un module appelé module initial. Le module de cycle est plus grand que ce module initial mais peut dépendre de la contrainte qui limite le cycle (comportement d'endommagement). Les caractéristiques linéaires sont décrites dans le Tableau 3.

Les essais sur éprouvette d'élancement 2 peuvent amener à des comportements en flexion si le piston n'est pas rotulé. C'est pourquoi le déplacement vertical a été mesuré à deux endroits de l'éprouvette à 120°C (Fig. 5). Dans les résultats de la Fig. 6, les déplacements de flexion ont été négligeables. Mais dans tous les cas les phénomènes de flexion vont sous-estimer la résistance du matériau, ce qui va dans le sens de la sécurité.

Un tel système d'anti-frettage a trois inconvénients :

- On ne peut pas utiliser les déplacements du piston de la presse pour la mesure des déformations, puisque la membrane et la graisse sont fortement compressibles.
- La graisse de silicone n'est pas toujours disponible.
- Si le système d'anti-frettage n'est pas efficace, les valeurs obtenues vont être surestimées, ce qui ne va pas dans le sens de la sécurité.

C'est pourquoi il est intéressant de comparer les procédures avec ou sans anti-frettage (voir Fig. 7) dans l'optique de pouvoir utiliser les essais avec frettage, beaucoup plus simples d'utilisation. Le frettage amène une erreur de 20% environ sur la mesure de la résistance à la compression.

5. RÉSISTANCE À LA TRACTION

La résistance à la compression est la performance la plus importante pour les constructions en terre et c'est celle qui va déterminer les choix architecturaux. En effet, la traction peut être supprimée par l'architecture (système d'arc par

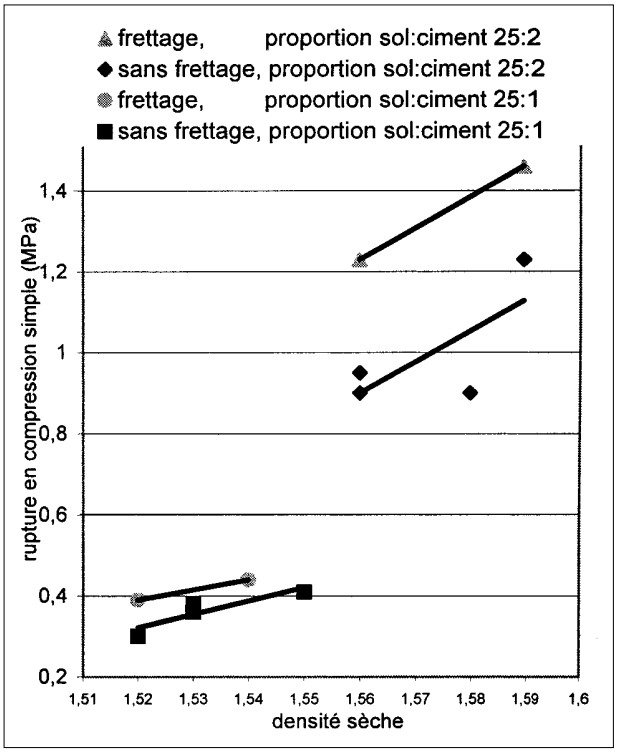


Fig. 7 - Effet du frettage sur les cylindres (diamètre 7 cm et hauteur 14 cm), terre Rochechinard.

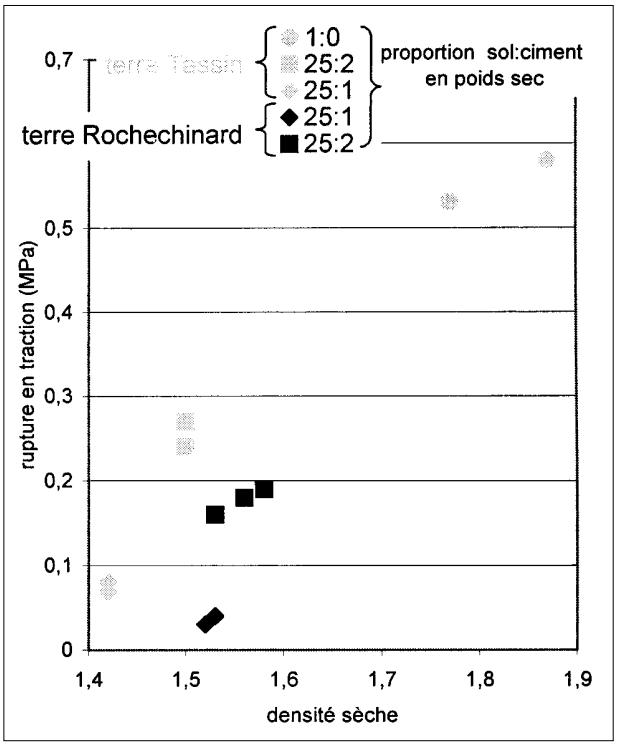


Fig. 8 - Contraintes de rupture à l'essai brésilien.

exemple). Mais bien sûr, dans une approche approfondie du comportement des structures, il est nécessaire de connaître le comportement à la traction.

Par ailleurs, les constructions en terre sont aussi sollicitées en traction et en cisaillement dans le cas de vent important, de séisme, de chargement ponctuel, de tassement différentiel dans les fondations.

La procédure utilisée ici est celle de l'essai brésilien ou essai de fendage, elle est définie par [5, 6] dans le cadre des BTC. De plus la connaissance du comportement en traction va aussi permettre de développer des tests *in situ*. Il est plus facile en effet d'obtenir sur chantier la résistance en traction qu'en compression. Dans ce cas il faut établir un lien entre la résistance à la traction et à la compression.

La Fig. 8 donne les résultats pour deux terres présentés dans la Fig. 1. Une teneur en ciment faible de 25:1 en poids sec diminue fortement la résistance du mortier (voir aussi Figs. 6 et 7).

La relation entre la résistance à la compression et à la traction est donnée dans le Tableau 4. Pour la terre Tassin, le rapport compression/traction montre le rôle du ciment (stabilisant) et de la teneur en eau pour l'argile (liant) : l'addition de ciment diminue la résistance relative à la traction des mortiers. Des résultats similaires ont été obtenus par [23] mais avec une résistance à la flexion sur prisme d'élancement quatre. Dans des comparaisons de rapport compression/traction entre BTC et adobes (blocs moulés à l'état plastique comme un mortier), le rapport est plus faible pour adobes que BTC, autrement dit les adobes sont relativement plus résistantes en traction (parce qu'éventuellement elles contiennent plus d'argile) mais surtout parce que la teneur en eau de fabrication est plus élevée donc le liant est davantage cohésif.

6. REMARQUES SUR LA CORRÉLATION DES ESSAIS DE LABORATOIRE SUR MORTIER AVEC LE COMPORTEMENT DE LA MAÇONNERIE

Il est facile d'obtenir en laboratoire des éprouvettes de mortier avec la même consistance et maniabilité que ceux *in situ*. Par contre il n'est pas du tout assuré que l'éprouvette cylindrique (ou cubique) ait un comportement représentatif du mortier au sein de la maçonnerie.

Selon [28], sur mortiers classiques, les résistances en compression dépendent fortement de la manière dont ont été fabriquées les éprouvettes. Le mortier dans la maçonnerie n'est pas le même que celui d'une éprouvette de laboratoire de mortier seul, malgré une formulation identique. C'est principalement du à la cure qui est différente dans les deux cas.

Cependant, dans le calcul de la résistance à la compression des maçonneries on essaie la plupart du temps, de corréler les valeurs obtenues en laboratoire sur éprouvettes de mortier seul, avec celles de la résistance de la maçonnerie (approche qui est d'ailleurs celle de l'Eurocode 6 [3]). La Fig. 9 présente des résistances à la compression simple d'éléments de maçonnerie (tous avec les mêmes BTC de terre Tassin sans stabilisant) pour trois mortiers différents issus de la même terre (Tassin:ciment de 1:0, 25:1, 25:2) comparées avec la résistance à compression sur cylindres de ces mêmes mortiers. Les cylindres de mortiers ont été testés selon la seconde procédure de la section 4, sans cependant de dispositif d'antifrettage (les valeurs obtenues sont donc à minorer de 20% environ). La Fig. 9 ne prend en compte qu'une seule terre, c'est pourquoi il faut obtenir des résultats similaires sur maçonnerie à base d'autres terres avant de généraliser les remarques qui vont suivre. Ce travail est en cours mais certains aspect sont déjà confirmés comme l'influence du ciment sur la résistance du mortier seul, Figs. 6, 7 et 8. Les résultats de la Fig. 9 présentent une bonne répétabilité et amènent des commentaires qui devraient aider à diriger de futures recherches.

Tableau 4 – Relation entre les contraintes de compression et traction à la rupture

	Proportions en poids sec terre:ciment	Densité sèche	Contrainte Compression MPa	Densité sèche	Contrainte Traction MPa	Rapport compression/ traction
Tassin	1:0	1,8	2,30	1,82	0,56	4,1
Tassin	25:1	1,58	0,33	1,5	0,08	4,4
Tassin	25:2	1,63	1,25	1,5	0,26	4,9
Rochechinard	1:0	2	2,4			
Rochechinard	25:2	1,56	0,95	1,55	0,17	5,6
Magagnosc	10:1	1,57	1,25			

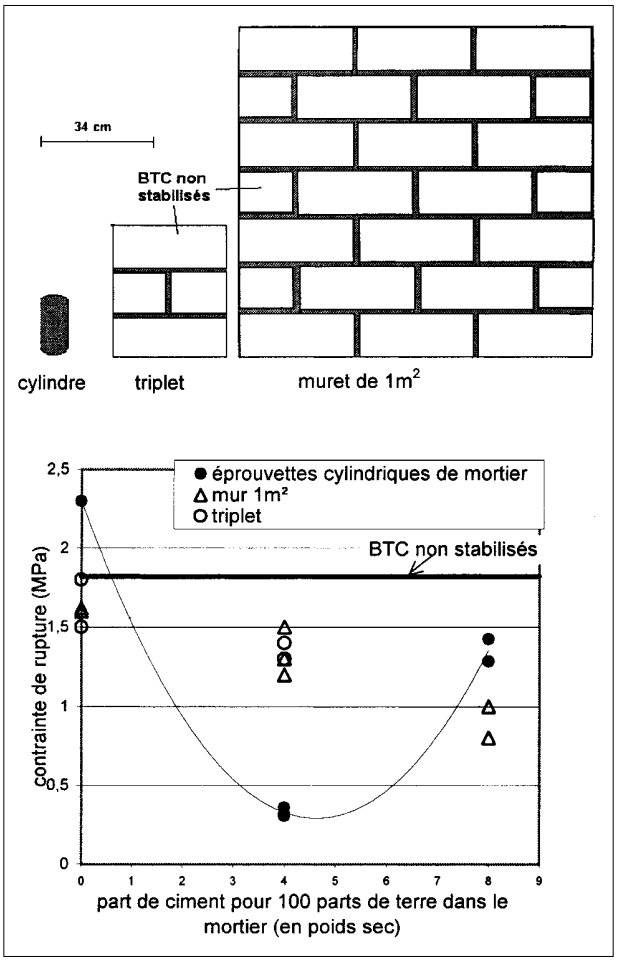


Fig. 9 – Rupture en compression simple sur éprouvettes cylindriques et éléments de maçonnerie, terre Tassin pour mortier et BTC.

Dans la pratique, les BTC utilisés ici (ayant une résistance de 1,8 MPa en compression simple antifrettée) sont les plus faibles utilisés en milieu sec. La limite donnée par la norme française en cours de parution est de 2 MPa en compression simple frettée.

Le mortier à 1:0 n'est pas utilisé en réalité car il ne satisfaisait pas les critères de maniabilité, voir section 2.3.2 et Tableau 1. De plus, il apparaît de nombreuses fissures de retrait sur de telles maçonneries. Pourtant c'est ce mortier qui donne la résistance à la compression la plus grande pour la maçonnerie (Fig. 9).

Le mortier à 25:1 n'est pas utilisé en réalité car ayant une résistance à la compression simple sur cylindre trop petite. Pourtant, il donne une résistance de la maçonnerie plus grande que pour la formulation avec le mortier 25:2 (Fig. 9).

Le mortier à 25:2 est, lui, utilisé dans la pratique, mais c'est celui qui donne une résistance de la maçonnerie la plus faible.

Les résultats de la section 5 pourraient en partie expliquer certains effets, notamment par la mobilisation de la résistance à la traction du mortier. Mais l'interaction mortier-bloc doit être aussi étudiée.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons proposé et comparé différents essais sur mortiers de terre. Les premiers résultats montrent que l'essai au cône d'Abrams est adapté à la quantification de l'ouvrabilité des mortiers de terre et cela sur des terres naturelles, confirmant ainsi les premiers résultats de Walker [10] obtenus sur terres reconstituées. Par contre le maniabilimètre ne convient pas.

Il faudrait maintenant vérifier si les mortiers de terre ont un comportement de fluide de Bingham à deux paramètres. Dans ce cas, il serait nécessaire de procéder à une deuxième mesure expérimentale qui resterait à définir.

Les mesures de rétention d'eau et de teneur en air peuvent se faire selon les normes déjà en vigueur pour les mortiers classiques.

Dans les procédures de compression simple, il faut effectuer des essais sur éprouvette d'élancement 2 au minimum. Le système d'antifrettage montre que les essais avec frettage surestime de 20% environ la résistance à la compression pour un élancement de deux. Nous montrons aussi que les mortiers n'ont pas un comportement élastique réversible mais plutôt de type endommagement.

Enfin il apparaît que les essais de laboratoire sur mortier seul ne sont pas suffisants pour arriver à un calcul précis des maçonneries. Il est nécessaire d'appréhender le comportement d'interface et notamment quantifier le collage entre bloc et mortiers. Ceci peut conduire à des spécifications de compatibilité entre bloc et mortier, ce qui va amener les questions suivantes :

– Comment prendre en compte la bonne capacité de rétention d'eau des mortiers de terre dans la spécification de la perméabilité des blocs (capacité d'absorption, vitesse d'absorption, et teneur en eau) ?

– Les essais d'interface (cisaillement ou flexion) sont-ils plus significatifs que les essais de compression du mortier (et dans quel domaine) ? De même, pour le mortier, les essais de traction sont-ils plus pertinents que les essais de compression ?

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement Victor Mamou, Mouna Karafi et Odile Roque de l'ENTPE ainsi que Francis Combe, Rémy Lozano-Nicolas, Jérémy Paput, Régis Pascot et leur Tuteur Magali Aupicon de l'IUT de Génie civil de Grenoble, pour leur participation lors des expérimentations. Les auteurs souhaitent remercier aussi Corinne Benito de l'ENTPE pour la frappe et plus particulièrement Peter Walker de l'Université de Bath pour ses commentaires et informations à propos des tests sur mortiers frais. Enfin merci à Samuel Dugelay, Wilfredo Carazas-Aedo et Alba Rivero-Olmos du CRATerre-EAG pour leur contribution aux analyses de terre et aux expérimentations.

RÉFÉRENCES

[1] Olivier, M. et Mesbah A., 'Le matériau terre : Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre compressées', *Bull. liaison Labo. P. et Ch.* **146** (1986) 37-43.

[2] Walker, P., 'Specification for stabilised pressed earth blocks' *Masonry international* **10** (1) (1996) 1-6.

[3] Comité Européen de Normalisation, 'Eurocode 6 : Calcul des ouvrages de maçonnerie - Partie 1-1: Règles générales - Règles pour la maçonnerie armée et non armée', ENV 1996-1-1.

[4] Shrinivasa Rao, S., Venkatarama, B.V. and Jagadish, K.S., 'Strength characteristics of soil-cement block masonry', *The Indian Concrete Journal* (Feb 1995) 127-131.

[5] Olivier, M., El Gharbi, Z. et Mesbah, A., 'Les recherches à l'ENTPE sur la construction en terre', Séminaire ACP - UE sur la normalisation du bloc de terre comprimée organisé par le CDI, Yaoundé, Cameroun, 23 au 27 avril 1996, 12p.

[6] Olivier, M., Mesbah, A., El Gharbi, Z. et Morel, J.-C., 'Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée', *Mater. Struct.* **30** (1997) 515-517.

[7] Hakimi, A., Yamani N. et Ouissi, H., 'Résultats d'essais de résistance mécanique sur échantillons de terre comprimée', *Mater. Struct.* **29** (décembre 1996) 600-608.

[8] Morel, J.-C., Mesbah, A., Oggero, M. and Walker, P., 'Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction', *Building and Environment* **36** (2001) 1119-1126.

[9] Venu Madhava Rao, K., Venkatarama, B.V. and Jagadish, K.S., 'Flexural bond strength of masonry using various blocks and mortars', *Mater. Struct.* **29** (1996) 119-124.

[10] Walker, P. and Stace, T., 'Properties of cement stabilised compressed earth blocks and mortar', *Mater. Struct.* **30** (1997) 545-551.

[11] Comité Européen de Normalisation, NF EN 413-2, Ciment à maçonner, Partie 2 : Méthodes d'essai, 1994.

[12] Walker, P., 'Bond characteristics of earth block masonry', *Journal of Materials in Civil Engineering* (August 1999) 249-256.

[13] Groot, C.J.W.P. and Larbi, J.A., 'The influence of interfacial moisture exchange on mortar-brick bond strength', 6th International seminar on Structural Masonry for developing countries, 11-13 October 2000, Bangalore, India, 148-156.

[14] Sedran, T., 'Les bétons autonivelants', *Bull. de liaison P. et Ch.* **196** (Mars Avril 1995) 53-60.

[15] Bowler, G.K., Jackson, P.J. and Monk, M.G., 'The measurement of mortar workability', *Masonry international* **10** (1) (1996) 17-23.

[16] Standards Association of Australia, 'AS 2701.5, Method for determination of consistency-slump test' 1984.

[17] Comité Européen de Normalisation, NF EN 413-1, Ciment à maçonner, Partie 1 : Spécifications, 1994.

[18] Tatersall, G.H., 'Workability and quality control of concrete', (E & FN SPON, London, 1991)

[19] Tanigawa, Y. and Mori, H., 'Analytical study on deformation of fresh concrete', *Journal of Engineering Mechanics* **115** (1989) 493-508.

[20] Hu, C., 'Rhéologie des bétons fluides, études et recherches des LPC', OA 16, 203 pages, 1995.

[21] De Larrard, F. and Ferraris, C.F., 'Rhéologie du béton frais remanié, III – L'essai au cône d'Abrams', *Bull. des Labo. P. et Ch.* **215** (1998) 53-60.

[22] Norme Française homologuée, 'Béton essai d'affaissement, NF P 18-451', 1981.

[23] Bei, G.E., 'Raw earth, an ancient and modern building material', Master thesis, Katholieke Universiteit Leuven, (1996).

[24] ASTM Specification C230/C230M-98e1 'Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement'.

[25] Olivier, M. and El Gharbi, Z., 'Sisal fibre reinforced soil block masonry', 4th International Masonry Conference, The British Masonry Society, London, UK , 26-28 October 1995, 55-58.

[26] Unikowski, Z.R., 'Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment', Rapport de Recherche LPC n° 110 (fév 1982).

[27] Olivier, M. et Mesbah, A., 'Modèle de comportement pour sols compactés', Proc. of the first international conference on unsaturated soils, Paris, France, 6-8 sept. 1995.

[28] Stöckl, S., Bekhaus, K. and Fritsche, T.H., 'Influence of test method on the results of deformation measurements on uniaxially loaded mortar specimens', *Masonry international* **12** (1) (1998) 32-38.