

Cellule Sous Tension ®

Etude des capacités structurales des murs



Stagiaire :

Serge Bonnardon

Tuteur enseignant :

François Fauqueux

Tuteur entreprise :

Patrick Ribet Scop Caracol

Projet transversal

IUT1 St Martin d'Hères

Année 2009-2010

Sommaire

1 - Remerciements	p 3
2 - Introduction	p 4
3 - La paille	p 5
4 - Les techniques de construction en paille	p 8
5 - La C.S.T.	p 11
6 - Etude théorique	p 12
7 - Essais	p 19
8 - Interprétations	p 23
9 - Conclusion	p 29
10 - Bibliographie	p 30
11 - Annexe A : la technique de la CST	p A1
12 - Annexe B : Mammouth & Trident	p A8
13 - Annexe C : les murs pour essais	p A12
14 - Annexe D : matériel et protocole d'essai	p A16
15 - Annexe E : les essais	p A19
16 - Annexe F : les mesures	p A26
17 - Annexe G : les tests de Louvain la Neuve	p A35
18 - Annexe H : tests sur enduit	p A37
19 - Annexe I : dimensionnement à l'EC5 des montants	p A38

1 Remerciements

Je tiens à remercier toute l'équipe pédagogique du département Génie Civil de l'IUT1 de Grenoble pour le soutien, l'aide et la disponibilité apportée tout au long de ma formation et plus particulièrement pendant l'élaboration de ce projet.

Merci à François Fauqueux, du département Génie Civil, mon tuteur enseignant, pour sa grande disponibilité ainsi qu'à Alain Pétrone, technicien au laboratoire d'essai du département Génie Civil pour la réalisation des essais sur les murs.

Un remerciement tout particulier à Tom Rijven pour sa grande disponibilité et sa participation à la réalisation des murs ainsi qu'aux essais.

Merci à Patrick Ribet de la Scop Caracol pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail d'étude sur les murs CST.

2 Introduction

La construction paille connaît depuis quelques années un fort développement. Cependant à l'échelle nationale ces constructions ne représentent que quelques centaines de bâtiments.

La paille, "déchet" de l'agriculture, possède cependant plusieurs qualités recherchées pour la construction de bâtiments. C'est un isolant peu cher, peu sensible au feu (sous la forme de bottes compressées), facile à manipuler et naturel. Elle est écologique, car peu transformée et très renouvelable (1 an).

On peut se demander pourquoi, malgré ses qualités, la paille est peu employée en construction ?

Ce n'est pas un matériau traditionnel de construction.

Les règles de mise en oeuvre sont tout juste en cours d'élaboration et seuls quelques professionnels l'utilisent dans leur activité quotidienne.

Mal connue des professionnels, les assureurs sont réticents pour participer à de tels projets.

Cependant, grâce à l'actualité, la construction paille a le vent en poupe, les particuliers sont très intéressés par ce matériau sympathique, dont on vante les qualités à la télévision. Mais ceux qui souhaitent construire en utilisant de la paille doivent faire preuve de ténacité car les embûches sont nombreuses.

Il existe plusieurs techniques de construction utilisant la paille. Parmi celles-ci, j'ai choisi la CST (Cellule Sous Tension) qui utilise de la paille, du bois et de la terre.

La CST est l'oeuvre de Tom Rijven, grand migrateur de la construction écologique. Sa technique privilégie les matériaux d'origine végétale (paille et bois) ou minérale sans transformation (terre), sans oublier que l'être humain doit rester au coeur de l'acte de construire.

Les études concernant la CST sont encore peu nombreuses. Des essais de résistance mécanique ont été réalisés récemment, en Belgique, à l'université de Louvain la Neuve (2009). Tom Rijven a écrit un livre expliquant la mise en oeuvre de sa technique (Entre paille et terre, aux éditions Goutte de Sable).

L'objet de cette étude est de mieux comprendre le fonctionnement mécanique des murs CST soumis à des charges verticales ou horizontales.

3 La paille

Résumé des caractéristiques de la paille :

(Les valeurs ayant une source française officielle ont été privilégiées, même si celles-ci sont défavorables)

λ : **0,07 w/m.k** (CSTB, Champs sur Marne, 2001)

E : **0,1 Mpa** sur champ, 0,09 Mpa à plat, en petite déformation (Master Génie Civil, UFR Mécanique de Grenoble, 2010)

μ : **1** (CEBTP, St Rémy les Chevreuse, 2001)

Rw : **53 dB(A)** (Jasper van derLinden, université technique d'Eindhoven, Pays-Bas, 2003)

Résistance au feu > **15 mn** , bottes disposées à plat (LNE, Trappes, 2001)

Caractéristiques :

Isolation thermique :

La capacité à isoler thermiquement est caractérisée par la **conductivité thermique**. Cette caractéristique est propre à chaque matériau. Plus celui ci est faible, plus le matériau est isolant. Valeur courante pour un isolant : 0,04. Symbole : λ .

La valeur de la conductivité thermique de la paille a été mesurée en France par le CSTB dans le cadre du projet de Montholier. Sa valeur est de 0,07 w/m.k .

La mesure a été faite dans le sens des fibres (bottes à plat) dont on sait qu'il est plus défavorable.

La plupart des données étrangères oscillent entre 0,04 et 0,065.

Les performances thermique de la paille s'altèrent peu en fonction de l'humidité :
 $0,064 (0 \% \text{ HR}) < \lambda < 0,069 \text{ à } 0,72 (90 \% \text{ HR})$
(ce qui n'est pas le cas des isolants traditionnels)

Comportement mécanique :

Le comportement mécanique d'un matériau est entre autre caractérisé par son module d'Young, qui relie la contrainte de compression et la déformation du matériau.

Plus il est élevé, moins le matériau se déforme sous charge.

Valeurs courantes : béton 25 000 MPa, bois 10 000 MPa. Symbole : **E** .

Les essais réalisés en 2010 à l'IUT1 de Grenoble par les étudiants de Master Génie Civil de l'UFR Mécanique de Grenoble, donnent : 0,09 MPa à plat et 0,1 MPa sur champ, en petite déformation.

On peut considérer que les valeurs sont similaires à plat ou sur champ.

Le module d'young, mesuré en 2007 par Danielewicz & Reinschmidt, université Magdebourg Stendal, Pays-Bas, sur des bottes de paille moyennes (185x85x48) est de 0,75 Mpa.

Capacité portante (murs paille) :

Grosses bottes non enduites : 25,5 tonnes / m².

Petites bottes enduites : 7 à 8 tonnes / m².

Transmission de la vapeur d'eau :

La transmission de la vapeur est donnée par la perméabilité à la vapeur. Cette grandeur caractérise la capacité d'un matériau à transmettre une quantité de vapeur. Plus elle est proche de 1, meilleur est la transmission. Si la vapeur est stockée dans le matériau, elle peut être la source d'un développement de moisissures. Symbole : μ .

Les mesures effectuées par le CEBTP (Centre d'Expertise du Bâtiment et des Travaux Publics) donnent une valeur de : 1. Ces mesures ont été effectuées en 2001, dans le cadre du projet de Montholier.

Des mesures à l'étranger donnent : $\mu = 2$ à 2,5 (terre : 5 à 8, ciment : 30).

Isolation phonique :

La capacité d'un matériau à arrêter un bruit est donnée par l'indice d'affaiblissement acoustique. Sa mesure est normalisée. Symbole : R_w .

La valeur mesurée par Jasper van derLinden, à l'université technique d'Eindhoven, aux Pays-Bas, en 2003, est de : 53 dB(A).

Compte tenu de la présence d'un enduit très fin, on peut espérer des valeurs de l'ordre de 55 dB(A) pour un mur réel.

Résistance au feu :

La résistance au feu a été mesurée en 2001 dans le cadre du projet de Montholier, par le LNE (Laboratoire National d'Essai). Sa valeur est supérieure à 15 mn, qui était l'objectif visé pour une construction de type maison individuelle. Les essais ont été réalisés sur un mur paille enduit à la chaux.

Les essais réalisés à l'étranger donnent des résultats allant de 30 à 90 mn.

Le risque de départ d'incendie est particulièrement important pendant le chantier. Risque due

à la présence de paille en vrac et à la non protection par un enduit des ballots (étincelles, mégots...).

Insectes et rongeurs :

La présence d'**insectes** et/ou d'**acariens**, dans les habitations en paille, est liée à des problèmes d'humidité dans la paille, qui créent un milieu favorable à leur prolifération. La suppression de l'humidité anormale dans la paille résoud le problème de la présence de ces animaux.

On ne connaît pas d'attaque de constructions paille par les **termites** sauf dans le désert de Sonora, sud-ouest des Etats-Unis. L'attaque est faite par l'espèce *Gnathamitermes perplexus*, présente partout où pousse le créosotier. Seules les habitations enduites de terre seraient touchées.

En France, on peut estimer qu'il n'y a pas de risque.

La paille comporte en principe peut de grains résiduels susceptibles de nourrir **souris** et autres **rongeurs**. Les murs en paille présentent donc peu d'intérêt pour eux.

Lorsque les murs sont enduits, il n'y a pas plus de chance de voir des rongeurs y créer leur nid que pour un autre type de construction.

4 Les techniques de construction en paille

Il existe plusieurs techniques de construction avec des bottes de paille. La paille peut être utilisée pour sa capacité d'isolant ou participer à la structure du bâtiment.

Nous distinguerons :

- Ballots porteurs.
- Ossature bois.
- Poteaux poutres.
- Parois préfabriquées.
- Greb (Groupe de Recherche Ecologiques de la Batture).
- CST (Cellule Sous Tension).

Ballots porteurs :

Aussi appelée technique Nebraska.

Description : empilage de bottes disposées généralement à plat, montés à joints croisés.

Paille : la paille est utilisée comme élément porteur.

Finition : enduit terre, chaux ou chaux ciment.

Les bottes sont précontraintes par des sangles tendues entre la fondation et la lisse haute. Cette compression est de 3 à 4 % de la hauteur initiale. Elle sert à limiter le tassement initial sous charge et le fluage ultérieur.

Le mur peut être armé par un treilli, principalement métallique, cloué à la lisse basse et à la lisse haute et parfois liaisonné de part et d'autre du mur.

Cette technique se prête aussi à la réalisation de murs courbes.

Une des difficultés est l'intégration des menuiseries due au tassement de la paille. De plus leur répartition doit être étudiée pour ne pas trop affaiblir le mur sur les faces où elles sont plus nombreuses.

Les bâtiments ont 1 niveau avec des petites bottes mais on peut atteindre 3 niveaux avec des grosses bottes.



Paille comprimée entre lisse basse et haute

Ossature bois :

Description : cette technique consiste en une ossature bois de faible section dans laquelle la paille joue le rôle d'isolant.

Etude Cellule Sous Tension



Paille : non porteuse.

Finition : enduit, bardage ou plaques.

Les bottes sont comprimées pour éviter le phénomène de tassement. Le calepinage des montants doit permettre d'insérer les bottes. Sinon il faut recouper les bottes à la taille nécessaire (travail long et pénible).

La paille est posée à l'abris, lorsque la toiture est installée.

**Bottes de paille insérées
entre les montants bois**

L'ossature est dimensionnée selon le DTU 31.2, cas général, ou une autre norme de dimensionnement des bâtiments en bois. Elle peut être préfabriquée en atelier.

La technique des éléments préfabriqués est une variante de cette méthode.

Cette technique est très courante en France.

Poteaux poutres :

Description : le bâtiment est constitué d'une structure poteaux poutre en bois. La paille est insérée entre les poteaux.

Paille : non porteuse.

Finition : principalement enduit, mais aussi bardage ou plaques si des supports existent pour les maintenir en position.

La paille peut être mise en oeuvre avec ou sans structure de maintien. On peut utiliser indifféremment une des techniques de construction paille, pour remplir les vides de la structure.



<http://notremaisonenpaille.unblog.fr>
Structure poteaux poutres

La mise en oeuvre des bottes se fait hors d'eau car la toiture est réalisée avant le remplissage des murs.

Parois préfabriquées :

Aussi appelée technique Autrichienne.

Description : les éléments de paroi sont réalisées en atelier, puis transportées sur chantier.

Etude Cellule Sous Tension



Paille : non porteuse.

Finition : enduit, bardage ou plaques.

Les bottes de paille sont insérées entre des montants. Les montants ont un contreventement bois (panneaux ou lattes).

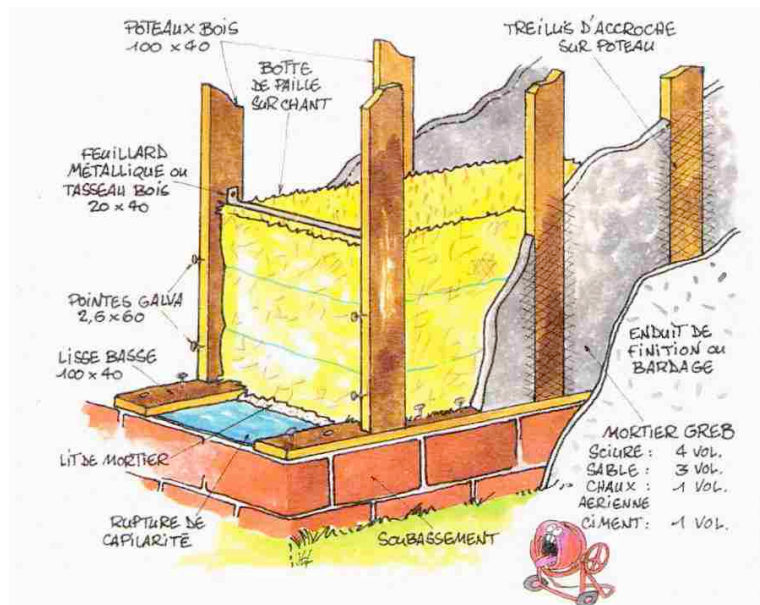
Côté extérieur, utilisation d'un pare pluie. Toutes les finitions sont possibles.

Côté intérieur, utilisation éventuelle d'un pare vapeur et de plaques de plâtre ou d'un enduit.

Éléments préfabriqués

La mise en oeuvre est rapide (quelques jours), mais nécessite un moyen de levage de type grue.

Greb :



Descriptif de la technique du GREB

Description : système constructif composé de deux ossatures légères en bois entre lesquelles viennent se loger les bottes de paille.

Paille : la paille est utilisée comme élément porteur.

Finition : enduit, bardage ou plaques.

Le vide entre les deux ossatures bois est comblé avec un mortier, allégé à la sciure de bois, qui participe au contreventement. Le mortier n'est pas enduit mais coulé dans des coffrages temporaires.

Cette technique est très utilisée en autoconstruction. Elle a été élaborée au Québec dans les années 90. Elle permet de réaliser des bâtiments de 2 niveaux.

CST:

Description : les bottes de paille sont comprimées entre des montants bois et des liteaux. Les ficelles sont coupées.

Paille : la paille comprimée participe au contreventement du mur.

Finition : enduit terre, sur terre fibrée.

L'énergie de tension contenue dans la botte sert au contreventement de la structure.

Les matériaux utilisés sont de préférence locaux.

La terre est tamisée, si nécessaire et armée avec des fibres de paille. Sa mise en oeuvre en couche de corps et enduit demande un peu de temps.



**Bottes comprimées entre montants
et liteaux**

Cette technique est développée dans le chapitre suivant. On peut aussi se reporter à l'annexe A pour plus de précisions.

5 La CST

La CST en pratique :



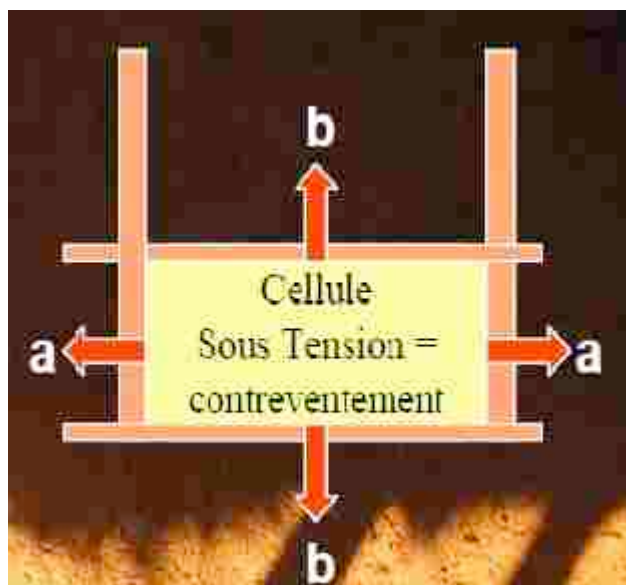
1- Les bottes de paille sont trempées dans une barbotine de terre pour faciliter l'accroche de l'enduit en terre.



2- Réalisation d'une ossature bois dans laquelle viennent se loger les bottes de paille. (écartement inférieur de 5cm à la taille des bottes de paille)



3- Les bottes sont comprimées et maintenues par 2 liteaux. Les ficelles sont coupées.



Les bottes de paille comprimées sur 4 faces assurent le contreventement de la structure.



5- Une **couche de corps** est appliquée en intérieur et extérieur



6- La **couche de finition** est appliquée en intérieur et extérieur

La technique de la CST :

La CST (Cellule Sous Tension) est une technique de construction paille qui vise à minimiser son impact sur l'environnement en utilisant des matériaux renouvelables et locaux. Bois, paille et terre peuvent être trouvés sur place ou à proximité. La terre peut provenir des fondations ou d'un chantier voisin.

La combinaison de la paille et de la terre dans la paroi permet au mur de "respirer" et de réguler l'humidité intérieure.

Les détails sur la mise en oeuvre de la technique se trouvent en annexe A.

Cette technique est principalement utilisée en autoconstruction, souvent dans le cadre de chantiers participatif.

6 Etude théorique

Les caractéristiques de résistance aux sollicitations horizontales et verticales de murs construits avec la technique de la CST sont mal connues.

Préalablement à la réalisation de murs d'essai, une réflexion sur le possible fonctionnement du mur permettra de cibler les essais à réaliser et les valeurs attendues.

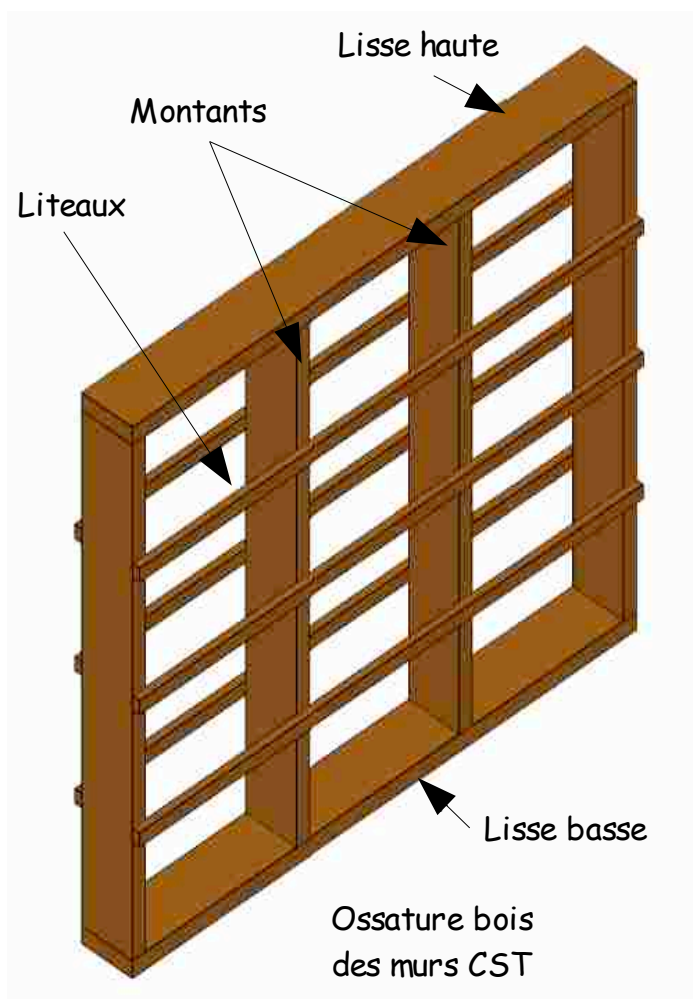
Un mur CST peut être assimilé à une ossature bois, remplie de paille et enduite de terre.

Les capacités mécaniques des enduits terre étant mal connues, de même que l'ensemble terre, paille et bois constitué par un mur CST, nous nous intéresserons à l'ossature bois que l'on peut tenter de dimensionner avec l'Eurocode 5.

L'ossature bois :

Une première approche consiste à réduire le mur à son ossature.

La construction bois est un domaine bien étudié. Le comportement du bois sous charge fait l'objet de règles et de normes qui permettent d'assurer la pérennité de telles constructions.



Nous allons nous intéresser au comportement possible de l'ossature bois d'un mur CST.

Pour cela, nous utiliserons les règles de l'Eurocode 5. L'Eurocode 5 régit les règles de conception et de calcul des structures en bois.

L'ossature est constituée par :

- Une lisse basse.
- Des montants.
- Une lisse haute.
- 2 liteaux de part et d'autre des montants à chaque rang de bottes.

Tous les assemblages sont réalisés par vis (Torx, 4x60).

Les montants sont des planches de coffrage (27 mm x 150 mm).

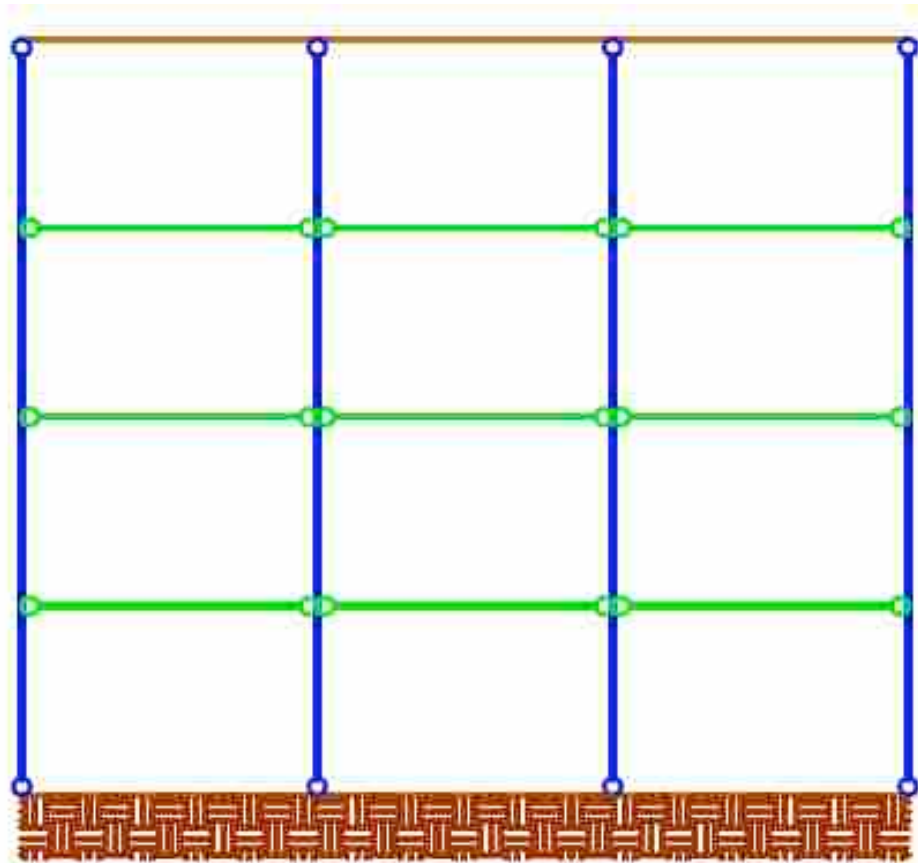
Les liteaux des liteaux de charpentier (27 mm x 38 mm).

Il est à noter que les angles de la construction sont réalisés à l'aide de 2 montants vissés l'un contre l'autre à 90° (pour les murs à angle droit).



Angle entre 2 murs

Les **liaisons des différents éléments** en bois étant réalisées avec des vis, chaque liaison est assimilable à une **rotule** (la rotation dans son plan est libre).



Représentation schématique des liaisons entre les différents éléments de l'ossature

Si l'ossature n'est pas maintenue latéralement, elle est instable. Nous supposons par la suite que les montants d'extrémité de mur sont fixes.

Dimensionnement à l'EC5 :

Le but est de déterminer si la structure bois peut être considérée comme porteuse en utilisant les règles de dimensionnement de l'Eurocode 5 (conception et calcul des structures en bois).

L'ossature bois telle actuelle des murs CST ne permet pas de faire un dimensionnement du contreventement au sens de l'EC5. Nous nous intéresserons uniquement à la reprise de charges verticales.

La démarche consiste à évaluer la capacité de reprise de charge des montants en compression simple, de voir si les liteaux sont aptes à créer des points fixes, et enfin de vérifier les lisses basses et haute à la compression transversale.

Dimensionnement des montants :

Planches 27 x 150 mm C18

$K_{mod} = 0,8$ (moyen terme)

Cf. Annexe I : dimensionnement à l'Eurocode 5 des montants, pour les formules de calcul utilisées.

$L_f = 2,5 \text{ m} \rightarrow N = 1\,386 \text{ N}$

$L_f = 0,45 \text{ m} \rightarrow N = 30\,705 \text{ N}$

Les montants sont des planches de coffrage de 27 x 150 mm.

La classe de résistance retenue est : C18

(soit une contrainte de compression axiale admissible : $f_{c,0,k} = 18 \text{ MPa}$)

Les charges de plus courte durée d'application sont de moyen terme (neige).

Les montants sont sollicités en compression simple. Sous cette sollicitation, la résistance est fonction de la longueur de flambement.

Les montants sont d'environ 2,5 m dans un bâtiment normal.

On voit clairement que le montant de 2,5 m n'est pas apte à reprendre une charge tel quel. Par contre, si l'on crée des points fixes le long de ces planches, la longueur de flambement est réduite d'autant.

C'est le rôle dévolu aux liteaux. Ceux-ci sont placés entre chaque rang de bottes de paille, soit tous les 45 cm.

Avec cette hypothèse, le montant peut reprendre 30,7 kN, ce qui permet de lui donner un rôle porteur.

Montants fins :

Le mur enduit testé à l'IUT a été réalisé avec des montants moins épais, afin de déterminer leur rôle dans la résistance mécanique des murs.

Planches 17 x 150 mm C18

$K_{mod} = 0,8$ (moyen terme)

$L_f = 0,45 \text{ m} \rightarrow N = 9\,579 \text{ N}$

Ces montants fins sont susceptibles de reprendre 3 fois moins de charge que les montants habituels.

Vérification des liteaux :

Liteaux de charpentier 27 x 40 C18

$K_{mod} = 0,8$ (moyen terme)

En compression :

$L_f = 0,8 \text{ m} \rightarrow N = 3\,310 \text{ N}$

En traction :

$N = 7\,310 \text{ N}$

L'assemblage liteau / montant est réalisé à l'aide d'une vis de $\Phi 5 \text{ mm}$

Capacité de résistance de l'assemblage par vis :

$N = 600 \text{ N}$

Le point faible de la liaison liteau / montant est l'assemblage par vis. Il y a 2 liteaux à chaque rang, la résistance globale de l'assemblage est : 1 200 N.

Pour créer un point fixe, il faut être capable de supporter 1/100ème de la force de compression. Soit pour 30,7 kN, pouvoir reprendre : 307 N, ce qui est vérifié.

Les liteaux remplissent leur rôle de point fixe sur le montant. Cependant, il faut prévoir un "arrêt" sur la structure pour prévenir un flambement d'ensemble (tous les montants flambent dans la même direction en même temps).

Il serait intéressant de vérifier le rôle de l'enduit dans cette fonction.

Vérification de la lisse basse :

La lisse basse est constituée par une planche identique aux montants (27 x 150 mm, C18)

Contrainte de compression transversale admissible, $f_{c,90,d} = 2,2 \text{ Mpa}$. La vérification à l'EC5 donne un taux de travail de 170%

Il n'est pas possible d'utiliser cette configuration, ou alors, la charge supportée par le montant doit être plus faible.

Une autre possibilité est d'utiliser un panneau de particule type OSB, pour lequel, $f_{c,90,d} = 12,4 \text{ Mpa}$ pour l'OSB3 et $f_{c,90,d} = 13,7 \text{ Mpa}$ pour l'OSB4.

Compte tenu des risques important de pourrissement de la lisse basse, l'usage de l'OSB4 est préconisé. L'OSB4 est apte à reprendre la compression transversale due au montant.

C'est la solution retenue pour des réalisation ultérieures.

Lisse haute :

La solution technique retenue pour la lisse haute pouvant varier selon les techniques retenues, elle ne sera pas dimensionnée ici.

Indicateur des capacité de reprise de charges verticales :

Le dimensionnement à l'EC5 nous permet d'espérer reprendre des charges verticales supérieures à **30,7 kN**.

Compte tenu des coefficients de sécurité sur les matériaux intégrés dans le dimensionnement à l'eurocode, nous pouvons espérer une charge à la rupture **30 à 50 % plus élevée** que la valeur de calcul.

De plus, la paille et l'enduit terre sont susceptibles d'avoir un effet favorable sur ces valeurs.

Indicateur des capacité de reprise de charges horizontales :

N'ayant pas de référence pour estimer la capacité des murs CST à reprendre des charges horizontales, nous nous attacherons à mesurer les déformations engendrées par ces forces.

Dans le bâtiment, une flèche égale à $L/200$ est considérée comme la limite admissible en structure bois (L étant la longueur de l'élément considéré). Nous prendrons cette limite comme déplacement maximum admissible pour la structure.

La charge produisant ce déplacement, affectée d'un coefficient minorateur, destiné à garantir une sécurité compte tenu de l'hétérogénéité des réalisations et des matériaux employés, sera notre charge maximale admissible.

Nous mesurerons donc la charge produisant un **déplacement horizontal de $L/200$** .

Une mesure complémentaire à 4 fois $L/200$ permettra d'évaluer la déformation de la structure au delà de ce seuil.

7 Essais

Les essais de résistance des murs ont été réalisés à l'IUT1 de Saint Martin d'hères du 15 au 16 mars 2010.

Le portique d'application de la force horizontale a une capacité de 1 200 kN, pour une course de vérin de 400 mm, piloté par ordinateur. La charge est répartie sur le mur à l'aide d'un vé de répartition de capacité 200 kN.

La charge verticale est appliquée à l'aide d'un vérin à main de capacité 100 kN. La valeur de la force appliquée est mesurée par un capteur de force électronique à lecture directe. Le déplacement est mesuré à l'aide d'un comparateur au $1/100^{\text{ème}}$ de mm.

Dispositif d'application et de mesure des charges verticales :



Portique et vé de répartition de charges

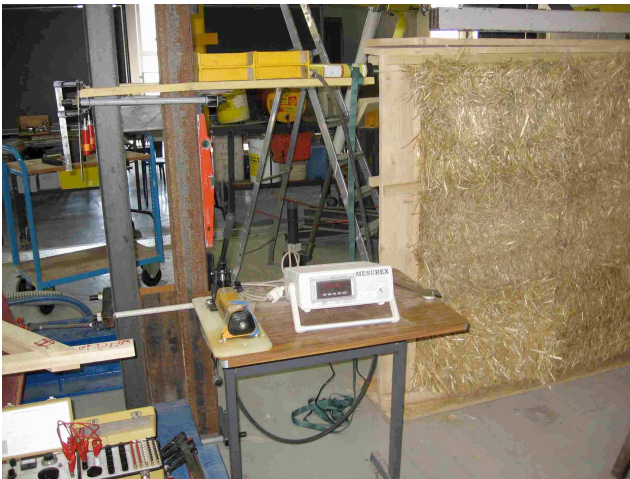
Dispositif d'application et de mesure des charges horizontales :



Elément fixe support du vérin



Vérin et calages de mise en position



Vérin, pompe manuelle et valeur de charge



Comparateur micrométrique



Sangle de maintien du mur

Protocole d'essai :

Les murs sont testés sous un effort horizontal, jusqu'à obtenir une flèche de 4 fois $L/200$.

Puis l'effort est relâché progressivement, le retour vers la position initiale du mur est enregistré.

L'effort horizontal est à nouveau appliqué, jusqu'à atteindre à nouveau une flèche de 4 fois $L/200$.

L'effort horizontal est relâché progressivement.

Le mur est soumis à un effort réparti vertical, jusqu'à la rupture.

Cf annexe D : matériel et protocole d'essai pour plus de détails.

Résumé des essais :

Le tableau ci-dessous présente de façon synthétique les valeurs numériques essentielles des essais. Le détail des mesures est disponible en annexe D.

	Horizontal		Vertical	Appui sur montants	Rupture
	$L/200$	30 mm			
Mur 1: encoches 1	0,29 kN	1,05 kN	41,5 kN	4	Déversement
Mur 1: encoches 2	Idem	Idem	99,3 kN	4	Rupture planches d'appui
Mur 1: encoches 3	Idem	Idem	97,8 kN	2	Déversement des montants
Mur 2 :câble	0,46 kN	1,24 kN	67,1 kN	4	Rupture montants
Mur 3: basique	0,29 kN	0,53 kN	69,7 kN	4	Déversement
Mur 4: enduit	3,3 kN	8,45 kN	94,6 kN	4	Rupture montants
Mur 4: enduit, plaques	Idem	Idem	75,2 kN	4	Rupture enduits
Mur 5: montants			66,0 kN	2	Déversement

Mur 1 : encoches

L'essai de reprise de charge horizontale est réalisé une fois.

Un premier essai sous chargement vertical ayant conduit au déversement du mur, un deuxième est réalisé après avoir sanglé le mur, évitant ainsi le déversement du mur.

Lors de ce 2ème essai, la planche d'appui transmettant l'effort aux montants s'est rompue au niveau des montants d'extrémité. Un 3ème essai est réalisé sans pièce d'appui, les montants intermédiaire sont déversés.

Mur 2 : câble

La capacité de reprise de charges horizontale est mesurée.

L'essai de sollicitation verticale a conduit à la rupture des montants.

Mur 3 : basique

La capacité de reprise de charges horizontale est mesurée.

L'essai de sollicitation verticale a conduit au déversement du mur (le déversement ayant conduit à la rupture d'une pièce de liaison du vè de répartition de charge, les essais sont arrêtés temporairement).

Mur 4 : enduit

Sollicité horizontalement, le mur, assez rigide, se lève et vient se plaquer contre le vè de répartition de charge, ce qui fausse les mesures. Après réflexion, il est décidé d'intercaler entre la planche de répartition de charge et le vè, des rouleaux métalliques afin de permettre le déplacement horizontal.

Les mesures indiquées dans le tableau correspondent à cet essai.

L'essai de sollicitation verticale a conduit à la rupture des montants, sans rupture des enduits. Leur apport en résistance n'étant pas évalué, un deuxième essai est réalisé en intercalant des plaques de métal pour "élargir" la surface de répartition des charges.

Lors du deuxième essai la valeur reprise est plus faible, mais les montants déjà endommagés ne participent que partiellement à la reprise de charge.

Il est à noter que les montants font 17 mm d'épaisseur et non 27 mm comme pour l'ensemble des autres murs.

Mur 5 : montants

Ce mur n'est pas sollicité horizontalement. Il a été réalisé dans le seul but de vérifier la reprise de charges verticale par les montants.

L'essai de reprise de charges verticales s'est soldé par le déversement des montants, ceux ci n'étant pas suffisamment maintenus par les lisses haute de 40 mm x 40 mm.

8 Interprétations

Interprétation des mesures de reprise de charges horizontales :

	Horizontal	
	L/200	30 mm
Mur 1: encoches 1	0,29 kN	1,05 kN
Mur 2 :câble	0,46 kN	1,24 kN
Mur 3: basique	0,29 kN	0,53 kN
Mur 4: enduit	3,3 kN	8,45 kN

(L/200 = 7,5 mm)

Tous les murs testés ont subis une plastification des assemblages lors des essais. Ils ne reviennent pas complètement en position initiale après sollicitation. Lors de la deuxième sollicitation, la force produisant le même déplacement que le premier est moins importante.

Murs non enduits :

La capacité de reprise de charge des murs non enduits est faible. A l'échelle d'un bâtiment, on peut considérer que celle-ci ne peut pas être prise en considération.

Le mur équipé d'un câble dont le but était justement de reprendre ce type d'effort n'a pas présenté de meilleures capacités. Le mur se déformant "autour" du câble, dans un mouvement de rotation.

On peut envisager qu'avec 2 câbles répartis de part et d'autre de l'ossature bois, ces éléments métalliques puissent jouer leur rôle de reprise de charges horizontale. Il est à noter que la mise en oeuvre sur chantier, en autoconstruction, de 2 câbles de longueur identique risque d'être délicate.

Mur enduit :

Le mur enduit quant à lui présente des capacités de reprises de charges horizontales nettement supérieures.

Il est à noter que l'effort a été transmis à l'ensemble montant + enduit, en partie haute. Selon la technique de construction utilisée pour les planchers la transmission des forces peut n'être faite qu'aux montants. Dans ce cas, le charge reprise peut être différente.

Le mur enduit reprend entre 7 & 11 fois plus de charge qu'un mur non enduit. L'apport de l'enduit sur la paille est donc capital pour assurer le contreventement de la structure.

Comparaison avec les murs Greb testés à l'ENTPE :

Il est intéressant de comparer la valeur obtenue avec celle mesurée par Céline La Rosa lors des essais réalisés à l'ENTPE (cf référence dans la bibliographie).

Les murs testés à l'ENTPE sont réalisés avec la technique du Greb et mesurent 1,6 x 2,4 m. La valeur mesurée pour L/200 est de 0,8 kN (lecture graphique de l'enregistrement d'essai, rapport p132).

La valeur mesurée avec la technique de la CST est 4 fois plus grande. Cependant, cette comparaison ne repose que sur une mesure et l'impact des montants d'angle sur la mesure n'a pas été évaluée. D'autres mesures devraient permettre de confirmer cette différence de capacité.

L'objectif des mesures effectuées à l'ENTPE était d'évaluer, entre autre, la capacité de reprise de charges du mur test dans une construction de type R+1, la charge à reprendre étant évaluée à 4,8 kN à l'ELU (p45 du rapport).

Cet objectif n'est pas atteint non plus dans le cas de la CST. De plus cette valeur objectif devrait prendre en compte des coefficients de sécurité afférents aux matériaux, ce qui repousse d'autant l'objectif.

Comparaison avec les tests de Louvain la Neuve :

Pour le murs enduit, les tests Belges donnent :

- Déplacement de 4 mm pour une force de 2,5 kN.
- Déplacement de 200 mm pour une force de 27,5 kN.
- Mur 3,65 m x 2,59 m, L/200 = 12,5 mm

Pour notre mur enduit, les tests donnent :

- Déplacement de 4 mm pour une force de 2,08 kN.
- Mur 2,48 m x 1,50 m, L/200 = 12,5 mm

Notre mur est 0,68 fois moins long, en admettant que la charge reprise soit proportionnelle à la longueur, ce dernier doit reprendre 32 % de charge en moins pour un déplacement identique. Une autre hypothèse est que la charge reprise est proportionnelle au moment quadratique ($b \times h^3 / 12$ pour une section rectangulaire).

En l'absence de mesures concernant l'influence de la longueur sur la reprise de charges horizontales, nous nous bornerons à évaluer la première hypothèse qui semble plus défavorable au mur de Grenoble.

Le mur de Louvain est plus haut de 1,09 m. La force appliquée produit un moment $M = F \times L$, plus important.

Notre mur devrait reprendre : $(2,5 \text{ kN} \times 2,59 \text{ m} / 1,50 \text{ m}) \times 0,68 = 2,9 \text{ kN}$

Pour un déplacement de 4 mm, notre mur ne reprend que 2,08 kN, soit 30 % de charge en moins.

La différence des valeurs peut provenir d'une différence liée à la réalisation (position des montants d'angle, liaison à la lisse basse, composition et épaisseur de l'enduit...), mais aussi de l'évaluation de l'influence de la longueur, comme expliqué plus haut.

Cependant, pour cette hypothèse, l'ordre de grandeur reste similaire, ce qui tendrait à confirmer une proportionnalité à la longueur (et non à la longueur au cube).

Interprétation des mesures de reprise de charges verticales :

	Vertical	Appui sur montants	Rupture
Mur 1: encoches 1	41,5 kN	4	Déversement
Mur 1: encoches 2	99,3 kN	4	Rupture planches d'appui
Mur 1: encoches 3	97,8 kN	2	Déversement des montants
Mur 2 :câble	67,1 kN	4	Rupture montants
Mur 3: basique	69,7 kN	4	Déversement
Mur 4: enduit	94,6 kN	4	Rupture montants
Mur 4: enduit, plaques	75,2 kN	4	Rupture enduits
Mur 5: montants	66,0 kN	2	Déversement

Déversement des murs ou des montants :

La rupture des différents murs est souvent liée à un problème d'instabilité transversale. La plupart des essais se soldent par un déversement du mur complet ou simplement des montants. La liaison entre les montants et la lisse haute ne permet pas d'empêcher ce mouvement, qui, sous l'effet de la charge est amplifié par le dispositif d'essai.

Le vé de répartition de charge étant rotulé au niveau de sa liaison avec le vérin, une faible déviation de la charge au niveau de la surface d'application se retrouve amplifiée et les montants sont déversés, arrêtant de fait l'essai.

Cette déviation peut s'expliquer par la faible précision de la découpe des montants en partie haute et basse cumulé à une longueur d'appui faible au regard de la hauteur.

A noter que la technique actuelle de la CST consiste à utiliser 2 tasseaux de 40 x 40 mm

vissés sur les bords des montants, en guise de lisse haute, ce qui ne permet pas d'assurer le non déversement sur des murs non enduit.

Cependant, le mur enduit, n'est pas sensible à ce phénomène.

On voit bien que le fait d'empêcher le déversement dans le cas du mur 1 permet d'appliquer des charges 2 fois plus élevées.

Surface de transmission de l'effort :

Un point sensible pour l'ensemble des essais de reprise de charge verticale est la détermination exacte de la surface sur laquelle la force est appliquée.

La force générée par le vérin est transmise au vé de répartition, dont la surface d'appui (profilé carré en acier) est plane et mesure 10 x 200 cm. Cette surface est plus petite que celle du mur, aussi, certaines parties du mur ne sont pas sollicitées et la contrainte réelle appliquée aux surfaces réellement sollicitées est plus importante que prévu.

Afin de mieux répartir la charge, des planches (montants, puis un panneau OSB rigidifié par des lambourdes) ont été utilisées, mais leur capacité à transmettre des forces ont été en dessous des besoins. Cela c'est traduit par des déformations importantes, voir la rupture de ces éléments.

Pour fiabiliser les mesures, il serait nécessaire de construire un élément métallique capable de transférer les charges sans se déformer. L'adjonction d'un système permettant une sollicitation horizontale simultanée serait un plus.

On constate sur les essais du mur 1 que la sollicitation de 2 montants (sans planche de répartition) ou 4 montants (avec planche de répartition) donne les mêmes valeurs de résistance. On peut estimer que la planche ne permet pas de mieux répartir les charges. Mais la sollicitation de deux montants seuls appui en partie sur les lambourdes de la lisse haute (à cause du déversement progressif des montants), cette mesure ne peut donc pas être validée en l'état.

Cela tend à confirmer le faible apport de la paille dans la résistance aux charges verticales.

Charges reprises :

Les mesures effectuées n'ont pas permis de vérifier la capacité des montants à reprendre 30,7 kN comme le dimensionnement théorique l'avait laissé supposer.

Les mesures ont souvent été stoppées par le déversement des montants. Nous avons vu que le mur enduit n'était pas sensible à ce phénomène. Il reste donc envisageable de vérifier cette hypothèse.

Tests de Louvain :

Compte tenu des différences importantes de mesures sous chargement verticale lors des tests de Louvin, il n'est pas fait de comparaison.

Les deux murs enduits ont eu des charges à la rupture de 135 kN et 250 kN, soit le double d'un mur à l'autre. Il n'est pas possible de comparer ces résultats aux notres.

Cas du mur enduit avec montants fins :

Charge reprise par le mur : 75,2 kN

Charge théorique par montant : 9,6 kN

Soit pour 5 montants : 47,9 kN

(un montant d'angle ayant du être coupé en partie supérieure pour permettre l'application de la charge horizontale)

Lors de l'expérience, les 5 montants n'ont pas pu être sollicités correctement (fléchissement de la planche d'appui). Malgré cela, la charge supportée est 50 % plus importante que la charge calculée.

L'enduit participe aussi à cette reprise de charges. Ne connaissant pas ses capacités sous sollicitation verticale, il n'est pas possible de valider la reprise de charge théorique des montants.

Synthèse des interprétations :

Les murs non enduit sont sensible au déversement.

Les valeurs théoriques de reprise de charges verticales, calculées à l'Eurocode 5 n'ont pas pu être confirmées, mais de nouveaux essais pourraient atteindre ces valeurs.

La capacité de reprise de charges verticales de l'enduit reste à évaluer.

Les essais de contreventement réalisés à Grenoble et à Louvain montrent une certaine cohérence de résultats.

Les valeurs de reprises de charges horizontales restent faibles par rapport aux sollicitations envisageables dans un bâtiment.

Préconisations en vue d'essais futurs :

Reprise de charges verticales :

Réaliser un assemblage de profilés métalliques permettant d'appliquer des charges réparties sur toute la surface du mur.

Revoir la liaison de l'enduit avec la lisse basse en fonction des techniques de construction envisagées.

Faire des essais verticaux en appuyant sur l'enduit uniquement et d'autre sur les montants uniquement.

Faire des essais avec et sans angles de renfort pour mesurer leur effet sur le flambement des montants.

Reprise de charges horizontales :

Repenser la technique de reprise des charges horizontales.

Faire des essais horizontaux en appuyant sur l'enduit uniquement et d'autre sur les montants uniquement.

Faire des essais avec et sans angles de renfort afin d'évaluer leur participation ou non au contreventement.

9 Conclusion

Les mesures effectuées sur les échantillons de murs CST n'ont pas permis de valider les hypothèses de reprise de charges verticales. Cependant, ces mesures ont permis de donner des ordres de grandeur et de mettre en exergue les difficultés à résoudre en vue d'une prochaine campagne d'essais.

Les valeurs obtenues en sollicitation verticales permettent de rester optimiste quant aux capacités ultimes de ces murs.

En ce qui concerne le conteventement, les valeurs mesurées confirme la faiblesse de cette technique sur ce point, sans être moins bonne que des techniques similaires (Greb).

Une réflexion complémentaire est à mener, sur les possibilités de reprendre les efforts horizontaux avec cette technique.

Une nouvelle campagne d'essais devrait permettre de confirmer les hypothèses de reprises de charges verticales.

La construction paille reste prometteuse même si les mesures effectuées ne sont pas à la hauteur des espérances.



La paille c'est l'avenir



La paille c'est l'avenir

Alain Pétrone & Tom Rijven

10 Bibliographie

Construction paille :

Entre terre et paille Tom Rijken
Editions : Goutte de Sable ISBN : 978-2-9523714-3-8

La référence sur la CST écrit par son créateur : Tom Rijken. De nombreuses photos illustrent la technique, beaucoup de détails, entre autre sur l'utilisation de la terre.

Concevoir des bâtiments en bottes de paille André de Bouter / Bruce King
Editions : Eyrolles ISBN : 978-2-952-26533-1

La référence technique. Résumé des connaissances actuelles et des essais effectués de part le monde, en Français. Axé sur la paille porteuse type Nebraska. Parfois ardu de par l'importante quantité de données présentées.

Bâtir en paille André de Bouter
Editions : André de Bouter, La maison en paille ISBN : 2-9522653-1-3

De nombreux conseil pour qui souhaite construire en paille. Technique Nebraska. De nombreux dessins explicatifs. Chapitre sur les enduits terre très fourni.

Manuel de construction écologique Clarke Snell & Tim Callahan
Editions : La Plage ISBN : 978-2-84221-160-8

Présentation de techniques d'autoconstruction écologique. Paille, torchis, bois cordé, toiture végétalisée. De nombreuses photos. Très détaillé.

Construire en paille aujourd'hui Astrid et Herbert Gruber
Editions : Terre vivante ISBN : 2-914717-01-6

Présentation des techniques de construction de différentes réalisations à travers le monde.

Manuel de l'autoconstruction, la maison en ballots de paille

Jocelyn Rochefort Simard

Editions : Editions de Mortagne ISBN : 2-89074-658-5

Présentation de techniques d'autoconstruction en paille. Comporte de nombreux dessins explicatifs.
Techniques Nebraska et maçonnerie.

Construction terre :

Traité de construction en terre CRATerre

Editions : Parenthèses ISBN : 2-86364-041-0

Synthèse des connaissances sur la construction en terre. Très accessible et très complet.

Comptes rendus d'études :

Contribution aux mesures mécaniques sur la construction paille

Selon la technique du G.R.E.B. Céline La Rosa

ENTPE, travail de fin d'études, juillet 2008

Téléchargeable sur le site du Gabion.

Etude des caractéristiques mécaniques d'échantillons de murs selon la technique du GREB.

Résultats des essais en compression sur des bottes de paille

Marce Antoine, Servage Jérémy, Piantoni Laurent, Guignier Guillaume

Responsable de l'UE : M. Geindreau

Master Génie Civil, UFR Mécanique, Grenoble, mars 2010.

Mesure du module d'Young de petites bottes de paille, à plat et sur champ, en petite et en grande déformation.

Sur la toile :

www.habitatvegetal.com

Le site de Tom Rijven, tout sur la CST, des photos de réalisations...

<http://mammoth.blog4ever.com>

Blog sur le mammoth.

www.compallons.fr

Le site du Réseau Français de la Construction Paille