



# LA BOTTE DE PAILLE, MATERIAU PORTEUR

Gilles Forêt, Cédric Hamelin, Myriam Olivier

► **To cite this version:**

Gilles Forêt, Cédric Hamelin, Myriam Olivier. LA BOTTE DE PAILLE, MATERIAU PORTEUR. ECOBAT Sciences & Techniques 2012, Mar 2013, Paris, France. pp. -, 2013. <hal-00940081>

**HAL Id: hal-00940081**

**<https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00940081>**

Submitted on 31 Jan 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## LA BOTTE DE PAILLE, MATERIAU PORTEUR

FORET Gilles<sup>a</sup>\* HAMELIN Cédric<sup>b</sup>, OLIVIER Myriam<sup>c</sup>

a : Laboratoire Navier – Université Paris Est, Laboratoire Navier (UMR CNRS 8205)  
Ecole des Ponts ParisTech, F-77455 Marne-la-Vallée cedex 2,

b : Architecte, membre du RFCP, Architecture BOHA,  
63 rue André Bollier, 69307 LYON Cedex 07

c : CETE de Lyon, Maitrise de l'Energie et des Transferts d'Air dans les bâtiments,  
46, rue St Théobald - BP 128 - 38081 L'Isle d'Abeau Cedex

\* : Auteur correspondant : [gilles.foret@enpc.fr](mailto:gilles.foret@enpc.fr)

### Résumé

Depuis la validation en juillet 2011 des Règles Professionnelles (élaborées par le Réseau Français de la Construction Paille, RFCP "les Compailleurs"), l'usage du matériau Paille est reconnu officiellement dans la construction française en tant qu'ISOLANT et SUPPORT d'ENDUITS. Ces règles seront applicables dès Janvier 2012 dans les bâtiments individuels ou collectifs y compris recevant du public. Cette avancée va permettre la diffusion d'un nouvel isolant bio-sourcé et donner l'occasion aux concepteurs et artisans de s'approprier le matériau ainsi que ses technologies de mise en œuvre.

La reconnaissance de la Botte de Paille ne s'arrête pour autant pas là puisqu'il est possible de lui demander plus, notamment en ce qui concerne ses propriétés mécaniques actuellement exclues des règles Pro. En effet, dans le monde de nombreuses constructions ont été réalisées en "Paille Porteuse" et ont largement démontré leur efficacité dans le temps puisque les premières constructions de ce type datent du XIXème siècle. Elles sont aujourd'hui encore en bon état. Le principe de ce mode constructif consiste à "empiler" les bottes de paille, à les pré-comprimer, puis à enduire les parois intérieures et extérieures avec des enduits à base de terre, chaux (...) éventuellement fibrés. Le complexe Paille / Enduit se comporte comme une structure composite de type sandwich capable de reprendre les efforts verticaux et horizontaux.

Cet article fera état des travaux de recherche réalisés depuis 2008 par l'ENTPE et l'ENPC, en collaboration étroite avec le RFCP, Architecture BOHA et le Gabion, pour comprendre et modéliser le comportement de la structure multicouche (ou sandwich) enduit-paille-enduit. Il présentera des résultats obtenus sur la caractérisation d'enduits adaptés aux structures en bottes de paille, sur le comportement expérimental et la modélisation numérique de murs en blocs de paille associés à différents enduits.

**Mots clés : paille porteuse, enduits, terre, plâtre, modélisation numérique, expérimentation**

### Introduction

En France, les règles professionnelles de la construction en paille sont parues en septembre 2011. Elles rendent possible la construction utilisant la botte de paille comme isolant et support d'enduits y compris enduits terre, pour des bâtiments privés ou publics.

La mise au point de ce document technique et réglementaire a été piloté par le RFCP - Réseau Français de la Construction en Paille, "les Compailleurs", Luc Floissac en a été le coordinateur. Une

quarantaine de structures professionnelles y ont travaillé bénévolement pendant 5ans : Architectes, ingénieurs, artisans, formateurs etc. se sont unis pour partager et définir les bonnes pratiques de conception, gestion, et mise en œuvre d'un projet utilisant le matériaux Botte de Paille comme isolant et support d'enduits. Ces règles ont été validées par les autorités après de nombreuses relectures, tests, et mises au point.

Applicable depuis Janvier 2012 ce document, tel un DTU, traite des spécificités conceptuelles, organisationnelles et détaillées de la construction en Paille. L'objectif d'un tel référent technique est de déterminer les valeurs seuils à respecter afin de garantir la pérennité des ouvrages réalisés, tant sur les niveaux mécanique, hygrométrique qu'acoustique. La grande nouveauté est l'apparition transversale à tous les chapitres de la gestion de l'étanchéité à l'air et donc du traitement des interfaces avec les autres corps d'états, point déterminant de la performance thermique du bâtiment et de son efficacité dans le temps. Plutôt qu'une description d'un produit type destiné au bâtiment, la botte de Paille y est approchée comme un matériau tel que le bois par exemple. Les performances minimums sur ses aspects géométriques, sa densité, le type de céréale et son taux d'humidité définissent les critères et le cadre d'usage de tel ou tel type de botte de Paille. L'idée globale étant de maintenir ce qui a toujours été pratiqué, c'est à dire reconnaître et utiliser des bottes de paille issues d'un champ, achetées à un agriculteur tout en laissant la possibilité de développer des filières industrielles le cas échéant.

Ces Règles Professionnelles décrivent cependant la botte de Paille uniquement comme remplissage isolant (et support d'enduit) de structures auto-stables répondant aux DTU pour lesquelles elles font référence\*. Dans ces conditions, ni la paille ni les enduits ne reprennent de charges autres que leurs poids propres.

La reconnaissance de la Botte de Paille ne s'arrête pour autant pas là puisqu'il est possible de lui demander plus, notamment en ce qui concerne ses propriétés mécaniques actuellement exclues des règles Pro. En effet, dans le monde de nombreuses constructions ont été réalisées en "Paille Porteuse" et ont largement démontré leur efficacité dans le temps puisque les premières constructions de ce type datent du XIXème siècle. Elles sont aujourd'hui encore en bon état. Le principe de ce mode constructif consiste à "empiler" les bottes de paille, à les pré-comprimer, puis à enduire les parois intérieures et extérieures avec des enduits à base de terre, chaux (...) éventuellement fibrés. Le complexe Paille / Enduit se comporte comme une structure composite de type sandwich capable de reprendre les efforts verticaux et horizontaux des charges de toiture ou d'usage du bâtiment. L'intérêt est multiple :

- Pas de structure porteuse complémentaire (poteaux etc), ce qui simplifie et accélère la construction,
- La Paille est un co-produit de l'agriculture (tiges des céréales couramment cultivées), très largement excédentaire. La paille comme matériau de construction ne fait pas de concurrence aux surfaces cultivables destinées à répondre aux besoins alimentaires,
- Le coût est particulièrement économique (matériaux locaux peu ou non transformés),
- Les caractéristiques des matériaux assurent un confort intérieur élevé, l'efficacité énergétique des bâtiments, et leur qualité sanitaire (paille, terre, chaux, fibres naturelles,...).
- les technologies sont facilement adaptables aux Pays Emergents du fait de l'abondance et de la simplicité des matériaux.

---

\* \* Les charpentes bois poteaux-poutres ou plateforme sont les plus fréquentes, mais rien n'exclue le remplissage de structures utilisant d'autres matériaux.

A l'heure actuelle, la construction en bottes de paille porteuses dispose d'un cadre réglementaire aux USA et au Royaume Uni où elle est validée par les autorités pour des bâtiments autoporteurs avec ou sans étages, ainsi que pour des bâtiments recevant du public. Afin de l'autoriser en France, il manque des outils de calcul adaptés au monde du bâtiment qui seraient en mesure de prédire le comportement de ce type de structure pour ensuite en dimensionner les éléments. C'est l'objet des premiers travaux de recherche lancés en France depuis 2008, objet de cet article.

## La paille porteuse \_ présentation

### Rapide historique de la construction en paille porteuse

La plus ancienne construction en bottes de paille encore existante a plus de 100 ans (elle fut construite en 1903) et est encore fièrement posée dans les Sand Hills, Nebraska (la technique porte encore le nom de méthode Nebraska). Il est à noter que ce n'est pas pour des considérations environnementales que les constructeurs ont choisi ce procédé mais bien par nécessité et car manque de matières premières.

Cette maison fait aujourd'hui encore exception car elle appartient à la petite famille des habitations dont les murs, faits simplement de bottes de paille et d'enduit d'argile prélevé dans le cours d'eau le plus proche, peuvent se vanter de soutenir l'ensemble de la toiture. En France, il faudra attendre 1921 et l'article de (*Lamache*) pour que l'on parle de ce genre de construction. Mais cet attrait va bien vite s'estomper avec l'arrivée de la révolution industrielle et l'intérêt accru pour des matériaux plus rigides et plus résistants.

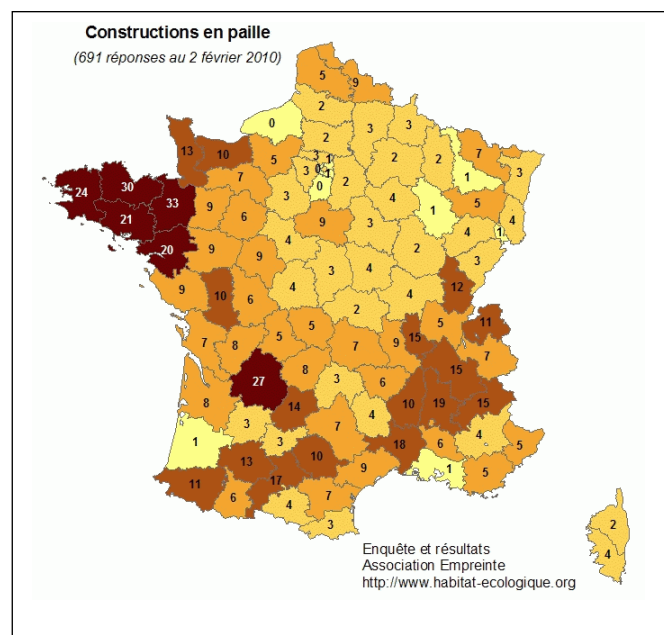


Figure 1 : Répartition des bâtiments en bottes de paille non porteuse (Empreinte)

Il faut ensuite attendre les années 80 pour que la communauté scientifique publie quelques articles sur des essais sur bottes de paille et le premier colloque sur la construction en bottes de paille à Oracle en Arizona en 1989. Cette date marque alors l'expansion massive de la construction en bottes de paille porteuses dans le monde. Dans le Nebraska, on ne comptera pas moins de 70 maisons construites entre 1900 et 2000 ; le concept s'exporte en Mongolie, en Chine, en Arabie Saoudite (là

où la terre est déjà énormément utilisée) et en Australie. En France, une étude menée par sondage sur le site de l'association (*Empreinte*) révèle avoir reçu 691 réponses, soit autant de maisons isolées en bottes de paille. Des bâtiments publics ont été construits tels la Salle de réunion au plan d'eau du Lambon (Deux Sèvres), la Maison des Vergers du Paysage de l'énergie à Montbelliard (la Damassine) et il existe aujourd'hui en Europe des dizaines d'associations (la Maison en Paille, les Compailleurs, Grapaille, Casa calida...) ainsi que de nombreux sites internet dédiés à la construction en paille.

De plus, des codes pour le matériau paille (isolation) sont maintenant disponibles et utilisés dans de nombreux pays (Etats-Unis, Grèce, Irlande, Italie, Japon, Mexique, Mongolie, Nouvelle Zélande, Pays-Bas, Royaume-Uni, Russie, Suisse). Il est à noter que le Colorado, la Californie et le Royaume-Uni ont labellisé la construction en paille porteuse.

En France, la technique « paille porteuse » n'étant pas reconnue, il n'est pas possible d'obtenir de la part des assureurs la garantie décennale indispensable pour construire. C'est pourquoi, depuis quelques années, des études ont été lancées pour donner des bases scientifiques à cette technique, en complément des savoirs et savoir-faire qui existent déjà. La suite de cet article fera état des premiers résultats obtenus.

### Principes constructifs

En général, un bâtiment de bottes paille porteuses est fait de 5 à 7 rangées de bottes de paille empilées en quinconce et dont les dimensions font environ 50cm de largeur pour 40cm de hauteur et 150cm de longueur. Cependant, il peut être intéressant pour des bâtiments importants (comme des hangars) de travailler avec des bottes plus grandes (1,2x1x2,4m). Deux lisses en bois constituent le mur en partie haute et basse et permettent de pré-compresser les bottes de paille à l'aide de sangles qui passent autour des lisses.

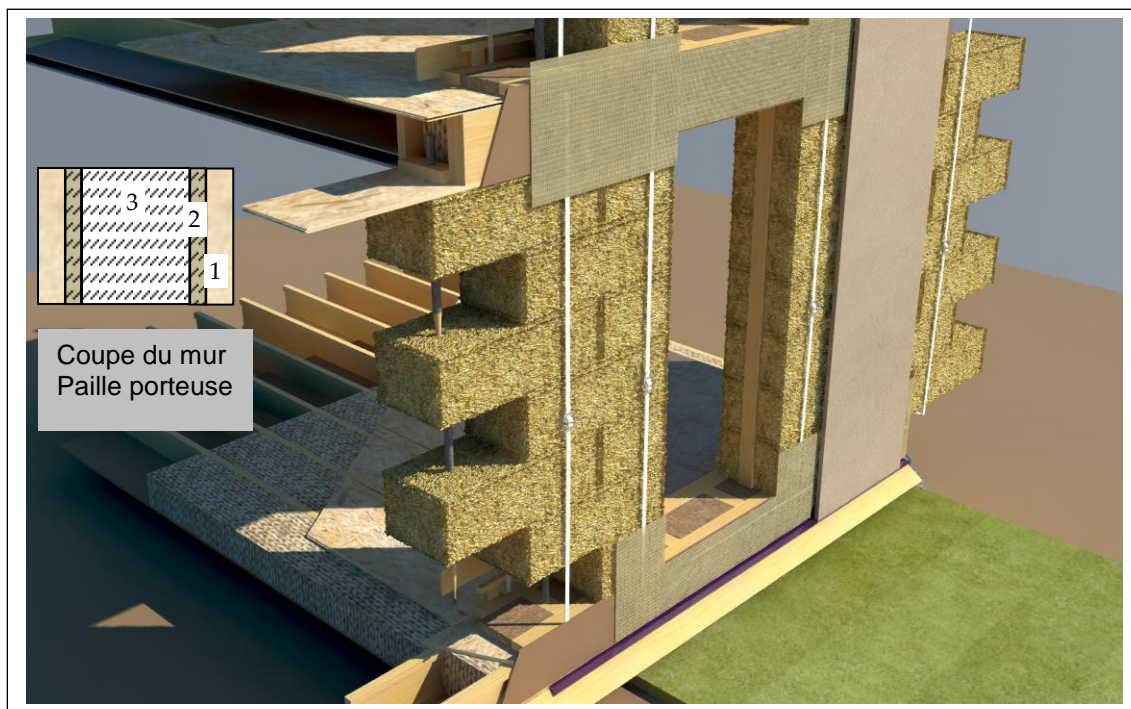


Figure 2 : Constitution d'un mur en paille porteuse

La paroi est ensuite recouverte d'un enduit épais à l'intérieur et à l'extérieur de la construction. L'enduit est appliqué en 2 voire 3 couches successives qui sont : la couche d'accroche d'une

épaisseur de 1cm qui pénètre dans la botte de paille sur une épaisseur d'environ 15mm, le corps d'enduit fibré (généralement par des fibres végétales) d'une épaisseur de 30 à 60mm et enfin la couche de finition (non fibrée) d'une épaisseur de 5 à 10mm. On peut renforcer le mur en plaçant un treillis dans l'enduit ou en insérant des broches (généralement en bois) verticalement dans les bottes.

### **Comportement mécanique de la paille porteuse**

L'originalité de cette technique réside dans la réalisation d'une structure multicouche (ou sandwich) constituée par la paille et l'enduit comme le montre la figure 2 . La couche d'enduit (1) de faibles caractéristiques mécaniques (terre fibrée, chaux aérienne, plâtre ...) est intimement lié à la paille (3) grâce à une forte pénétration dans la botte au moment de la mise en œuvre ce qui donne lieu à la création d'une zone d'interface (2).

Le mur va travailler comme une poutre sandwich dans laquelle l'enduit du fait de sa faible déformabilité (comparée à la paille) participe à la reprise des charges appliquées du fait de l'adhérence parfaite paille-enduit. Ainsi, dans le cas des chargements en compression verticale et de cisaillement dans le plan du mur l'enduit va « travailler » respectivement en compression et en cisaillement. Dans le cas d'un chargement de flexion hors plan les enduits intérieur et extérieur travailleront soit en traction soit en compression. La paille joue alors le rôle d'âme souple et augmente l'inertie de flexion du mur.

Des essais réalisés par la (FASBA) dans différents laboratoires sur de tels murs montrent que :

- sous chargement de longue durée, un mur en paille sans enduit subit un fluage qui se stabilise très lentement. Cependant, les expériences constructives réalisées à l'étranger montrent que ce fluage se stabilise beaucoup plus rapidement lorsqu'un enduit est appliqué sur la paille.
- au travers des résultats d'essais trouvés dans la bibliographie on voit que, malgré leur faible épaisseur et leurs faibles modules pseudo-élastiques (50 à 500MPa), les enduits en terre, plâtre ou chaux aérienne utilisés sur la paille participent de manière très importante, voire primordiale, au comportement mécanique global de la structure. Ce comportement est rendu plus complexe encore du fait du caractère visqueux du comportement de la paille.
- les enduits « traditionnels » à base de ciments ou d'autres liants hydrauliques conduisent à des résistances à la rupture de murs-sandwich plus faibles qu'avec des enduits à base de terre, de plâtre ou de chaux aérienne.

### **Comportement des matériaux**

Les études citées dans la bibliographie et réalisées en France depuis 2008 montrent l'importance de l'identification des caractéristiques des matériaux de base.

#### **La paille**

La paille a un module pseudo-élastique très faible (de 0,3 à 0,8MPa), fonction de sa densité, mais aussi d'autres paramètres tels que le type de paille, le mode de fabrication de la botte, la teneur en eau ...

Sur la base d'une analyse bibliographique réalisée par (J.Desille) , il a été possible de tracer une première relation entre module pseudo-élastique et densité de la paille.

Cette courbe montre que pour des valeurs de masses volumiques courantes (entre 115 et 140kg/m<sup>3</sup>), les valeurs des modules d'élasticité forment un nuage de points très dispersés mais compris entre 0,2 et 0,8MPa.

Cette dispersion a pour origine les conditions même de réalisation de l'essai, ainsi que les modalités d'exploitation des données des essais :

- Selon les auteurs, la valeur du module est obtenue :
  - En divisant la contrainte maximale ou une contrainte déclarée comme étant la contrainte de service par la déformation observée correspondante
  - En prenant la pente à la courbe contrainte-déformation à une contrainte donnée et considérée comme la contrainte de service
  - En approchant linéairement la courbe contrainte-déformation dans la partie qui «semble» linéaire
- en cours d'essais, la botte de paille subit un raccourcissement important, modifiant ainsi fortement la densité de la botte en cours d'essai
- la paille ayant un comportement visqueux non négligeable, la vitesse de chargement pendant cet essai a une influence importante sur les résultats.
- Lors d'essais en cycle, les modules de rechargement sont de l'ordre de 1,5 à 2MPa.

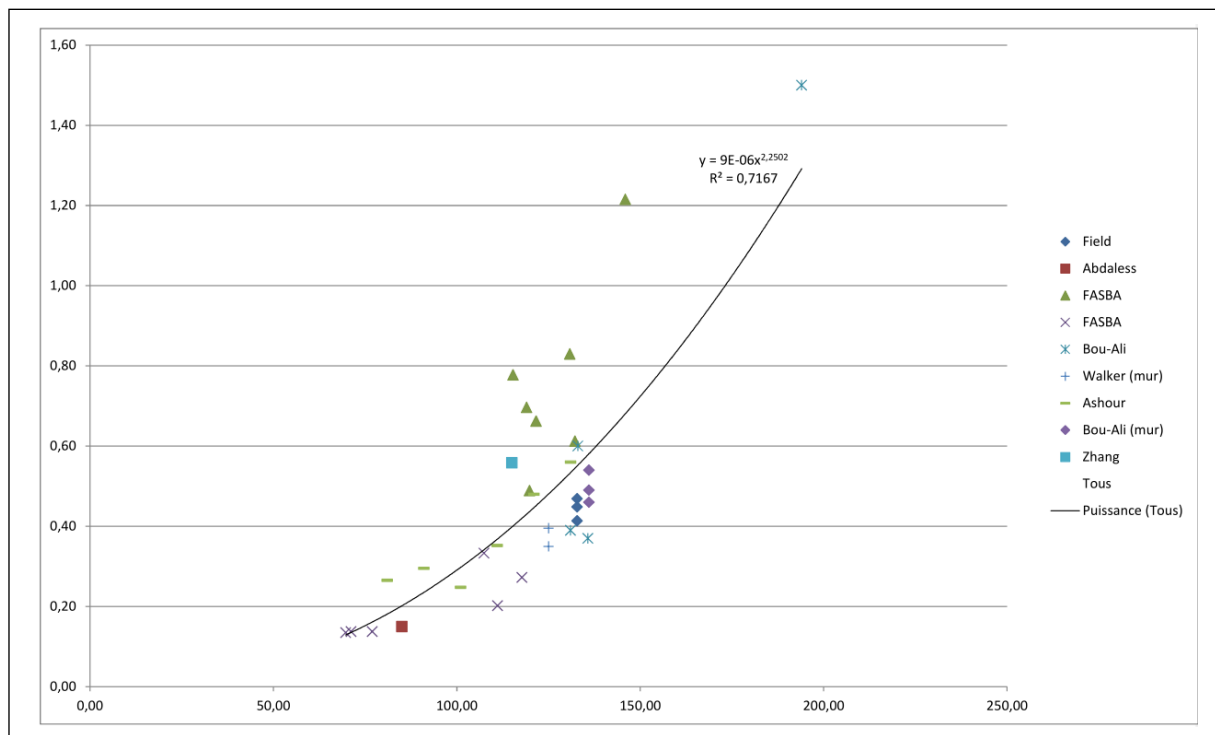


Figure 3 : relation entre densité et module pseudo-élastique de la paille

La détermination plus précise du module de la paille et la mise en place d'un protocole d'essai fiable seront indispensables pour garantir la correspondance entre modélisation et comportement de structures réelles.

Par ailleurs, peu d'auteurs ont mesuré le coefficient de Poisson de la paille. Leurs résultats, assez concordants, donnent une valeur de  $\nu$  de l'ordre de 0,3.

Enfin, le fluage est une caractéristique importante de la paille. Quelques essais de fluage et de relaxation ont été réalisés (FASBA, Smith) sous un chargement élevé (40MPa). Les résultats de ces

essais montrent des pertes importantes en contrainte (-50%) et des augmentations de déformation (+ 100%) en quelques semaines.

### Les enduits

L'expérience des constructeurs montre qu'il est préférable d'utiliser des enduits ayant des caractéristiques plutôt faibles, à base de terre et de fibres, de chaux aérienne ou faiblement hydraulique, ou de plâtre, plutôt que des enduits à base de ciment. En effet, ces derniers entraînent des pathologies dans les parois en raison d'une part, de leur trop faible perméabilité à la vapeur d'eau, et d'autre part, de leur trop grande rigidité qui entraîne leur rupture prématurée.

La bibliographie fournit des données sur les caractéristiques mécaniques de ces enduits couramment utilisés sur la paille ou sur supports en terre.

Les caractéristiques des enduits à base de terre sont très variables, et fonction de la composition et de la granulométrie de la terre, des éventuels liants, de la teneur en eau et du malaxage à la mise en œuvre et des modalités de séchage :

- En l'absence de ciment ou de chaux, les enduits terre ont des résistances en compression allant de 0,1 à 1MPa.
- Sans fibres, les résistances en traction sont de l'ordre de 10% de la résistance en compression. L'adjonction de fibres permet d'augmenter les résistances en traction.
- L'ajout de liant (ciment ou chaux aérienne ou hydraulique), s'il est adapté à la composition minéralogique de la terre, permet d'augmenter les résistances en compression, jusqu'à des valeurs égales à 2,5MPa pour des dosages importants en ciment.
- Les modules de « pseudo-élasticité » de la terre sans ou avec liant varient de 100 à 1000MPa. L'adjonction de fibre entraîne une forte diminution du module (de 20 à 50MPa).
- La résistance au cisaillement de ces enduits est très sensible à la présence ou non de fibres. Elle peut varier de 0,05 MPa pour un enduit sans fibre ni liant, à 0,5MPa avec des fibres ou du ciment.
- Des enduits terre-plâtre sont actuellement étudiés (*METZGER*) pour une application à la construction paille. Le plâtre permet entre autres d'augmenter la résistance en compression des enduits, de réduire (éliminer) le retrait des enduits terre et présente une grande facilité de mise en œuvre. Ces enduits sont pour l'instant étudiés à titre expérimental, et les études concernent en particulier les problèmes de séchage de la paille (eau de gâchage du plâtre) et l'étude des propriétés physico-mécaniques de ces enduits (perméabilité, conductivité thermique, retrait, résistance à la compression, ...)

Dans tous les cas, les caractéristiques mécaniques de ces enduits sont beaucoup plus faibles que celles des enduits au ciment, qui varient de 10 à 30 MPa. L'analyse bibliographique réalisée par (*J.Desille*) a permis de comparer le comportement mécanique de murs enduits avec ces 2 sortes d'enduits. Il apparaît que :

- dans le cas d'un enduit terre, la ruine du mur paille-enduit se produit lorsque la résistance en compression de l'enduit est atteinte.
- En revanche, lorsque l'on remplace l'enduit terre par un enduit au ciment il en va autrement. Dans ce cas, la résistance ultime du mur est au maximum égale de à 10% de la résistance en compression de l'enduit. Le mode de ruine du mur paille-enduit ciment s'apparente alors à un flambement local de l'enduit qui se « décolle » de la paille.

Cette constatation a amené l'hypothèse suivante : les murs enduits avec un matériau peu résistant mais très adhérent au support paille peuvent se déformer facilement, mais ces enduits ne se détachent pas du support par flambement, comme on peut l'observer avec les enduits rigides. En d'autres termes, le mur se comporte comme une poutre en H, en matériau homogène (enduit), dont l'âme a une épaisseur très faible, la paille étant ramenée à une fine épaisseur d'équivalent enduit. C'est ce mécanisme qui a été étudié depuis 2008, en collaboration entre l'ENTPE, l'ENPC, l'agence BOHA, et le RFCP.

## Expérimentations et modélisations sur la paille porteuse

### modélisation numérique du comportement en compression d'un mur

La modélisation numérique d'un essai réel effectué par (Macdougall et Grandsaert) a été réalisée lors de travaux menés par l'ENTPE, le RFCP et Architecture BOHA entre 2008 et 2012. Ces travaux avaient pour objectif de confronter les résultats des calculs aux éléments finis (CESAR) aux résultats expérimentaux obtenus sur des essais sur mur en paille porteuse.

La modélisation numérique d'un mur en paille porteuse a été réalisée à partir d'un logiciel aux éléments finis, CESAR. Elle a eu pour objectif de comparer les déformations en phase élastique d'un mur soumis à un effort vertical, et de comparer les résultats à ceux obtenus dans la bibliographie (Macdougall). Les hypothèses prises pour le calcul aux éléments finis sont les suivantes :

- le comportement des matériaux paille et enduits est élastique linéaire.
- l'adhérence entre la paille et l'enduit est supposée parfaite.
- le modèle numérique reprend les dimensions de l'essai réalisé.
- Le modèle intègre des caractéristiques mécaniques compatibles avec les informations données par (Macdougall et Grandsaert), à savoir :

		①	②	③
<b>Paille</b>	Densité	84 kg/m <sup>3</sup>	123 kg/m <sup>3</sup>	148 kg/m <sup>3</sup>
	E estimé	0,15Mpa	0,2 à 0,8 Mpa	1,2 à 1,45 Mpa
<b>Enduit</b>	④ terre et paille	Rc	1 Mpa	
		Rt	0,7 MPa	
		E estimé	environ 20MPa	
	⑤ sable-chaux-ciment	Rc	10 MPa	
		E estimé	6300 à 9400 Mpa	

Tableau 1 : gamme de caractéristiques des matériaux

Pour un mur ⑤ testé à une contrainte de 0,183MPa, limite élastique, la déformation, le tassement mesurée est de 1,01cm.  
 Pour un couple ②=0,2MPa-⑤ = 6300MPa, le tassement calculé du mur est égale à 1,07cm.  
 Pour un couple ②=0,8MPa-⑤ = 9400MPa, le tassement calculé du mur est égal à 0,7cm.

Dans un autre cas①④, le tassement mesuré pour une contrainte de 0,04MPa est de 4mm. Le modèle conduit à un tassement de 1,75mm pour ①=0,2MPa, et ④=800MPa.

On note donc que même en prenant des valeurs extrêmes, les déformations tassements calculées restent de l'ordre de grandeur des valeurs tassements mesurées.

### Comportement en cisaillement de l'interface paille-enduit

Un dispositif spécial a été conçu pour étudier le comportement de l'interface paille-enduit. En effet, selon la théorie proposée, la capacité de l'interface paille-enduit à résister au cisaillement et à la traction est la clef du comportement du sandwich constituant la paille porteuse.

#### Identification des matériaux

##### 1. La paille

Les essais (*Desille*) ont été conduits sur des petites bottes de paille de blé, (0,45x0,36x0,50m), fabriquées spécialement pour les besoins des essais, de densité 85kg/m<sup>3</sup>. Les essais sont conduits sur des bottes posées à plat uniquement. Leur module pseudo-élastique a été évalué à 0,2MPa (*ABDALESS*).

##### 2. les enduits

Deux types d'enduits ont été testés (*ABDALESS*) :

1. enduits à base de terre : pour s'approcher le plus possible des conditions de réalisation et de cure des enduits, les éprouvettes ont été réalisées à partir d'un empilement de 6 échantillons de 5cm de côté et 2,5cm d'épaisseur. Ce mode opératoire a été mis au point pour limiter les risques de tensions dues au gradient de séchage à l'intérieur d'éprouvettes de diamètre 10cm et de hauteur 20cm telles que demandées pour les enduits ciment. Le module d'Young E = est de 140MPa, la résistance en compression de 1MPa.
2. Enduit à la chaux 7 : il s'agit de l'enduit « PARLUMIERE » de ParexLanco. Le module d'Young E = est de 300 MPa, la résistance en compression de 1,9 MPa.

##### 3. échantillons de paille+enduit

Des essais de compression ont été réalisés sur les bottes de dimensions 0,45x0,36x0,50m, enduites des 2 deux cotés.

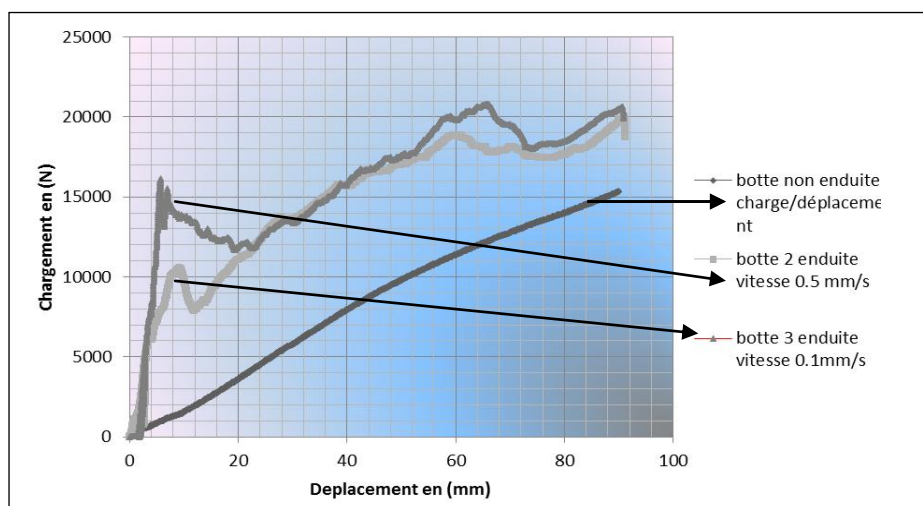


Figure 4 : courbe effort-déplacement d'une botte de paille enduite ou non

La résistance en compression est déterminée à partir de la courbe effort-déplacement obtenue lors de l'essai. Elle correspond à la force qui conduit à la rupture de l'enduit, force qui est facilement identifiable par le changement brutal de l'allure de la courbe effort-déplacement, correspondant à la rupture de l'enduit :

- avec un enduit terre : la contrainte à la rupture vaut 0,04MPa
- avec enduit chaux : la contrainte à la rupture vaut 0,06MPa

### essais de cisaillement à l'interface paille-enduit

L'évaluation de la contrainte maximale de cisaillement dans l'enduit même a été peu étudiée dans la bibliographie. Quelques valeurs ont été relevées par (*Desille*) sur des mortiers de terre stabilisés ou non, fibrés ou non ; elles varient de 50 à 500kPa selon les matériaux et liants. De même, il n'existe que très peu d'essais de cisaillement concernant l'interface paille-enduit dans la bibliographie et les quelques résultats ne sont généralement pas utilisables en l'état.

Pour tenter d'obtenir des premiers ordres de grandeur concernant la contrainte de cisaillement critique de l'interface paille-enduit et appréhender le comportement de celle-ci (montrer notamment que la rupture de l'interface n'est pas de type fragile), un essai exploratoire a été réalisé. La nature de cet essai a été guidée par des contraintes pratiques (taille du bâti d'essai) et l'essai reste donc très perfectible. Nous reviendrons sur ce point à la fin de ce paragraphe.

Dans le cadre de notre essai, un ensemble de 2 petites bottes (45x37x50cm), collées par un enduit, a été soumis à un test de cisaillement selon comme le montre la photo ci-dessous. Le mode opératoire de l'essai est le suivant :

- Une botte est placée sous le vérin de la presse ( $\sigma_c$ ). La cale permettant de positionner l'éprouvette est retirée au début de l'essai.
- L'autre botte est posée sur un appui fixe.
- Une pré-compression ( $\sigma_p$ ) de l'enduit (interface) est obtenue au moyen de barres DIWIDAG. Celle-ci étant très faible, elle disparaît très vite du fait que la contrainte est perpendiculaire aux fibres.

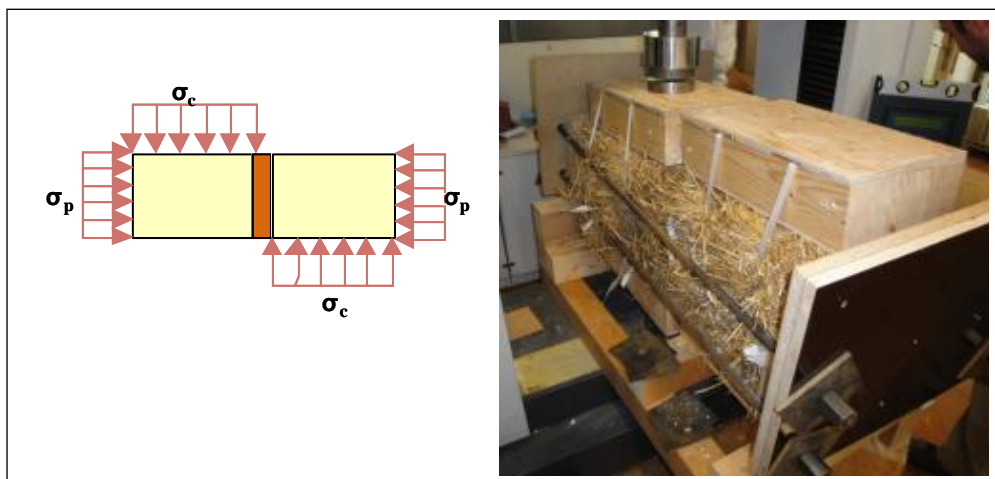


Figure 5 : dispositif de l'essai de cisaillement

Trois essais ont été réalisés par application de charges ayant pour objet de provoquer une déformation continue dans le temps, plutôt que l'application d'une charge continue et croissante, l'objectif étant de déterminer certains phénomènes de réaction d'interfaces propres à ce complexe paille- enduit.

Le premier essai, à vitesse très lente (1mm/mn), s'est traduit par un basculement d'une des bottes lorsque le déplacement est devenu très élevé, et par un frottement des lisses d'appui entre elles qui a augmenté provoqué artificiellement une augmentation de l'effort appliqué.

Les deux autres essais ont été réalisés à vitesse plus rapide (5mm/mn) et ont donné des résultats assez proches l'un de l'autre. Toutefois, dans les 2 deux cas, le système de pré-compression a perturbé l'essai, malgré le dispositif en téflon sensé limiter les efforts de frottement aux extrémités de l'échantillon.

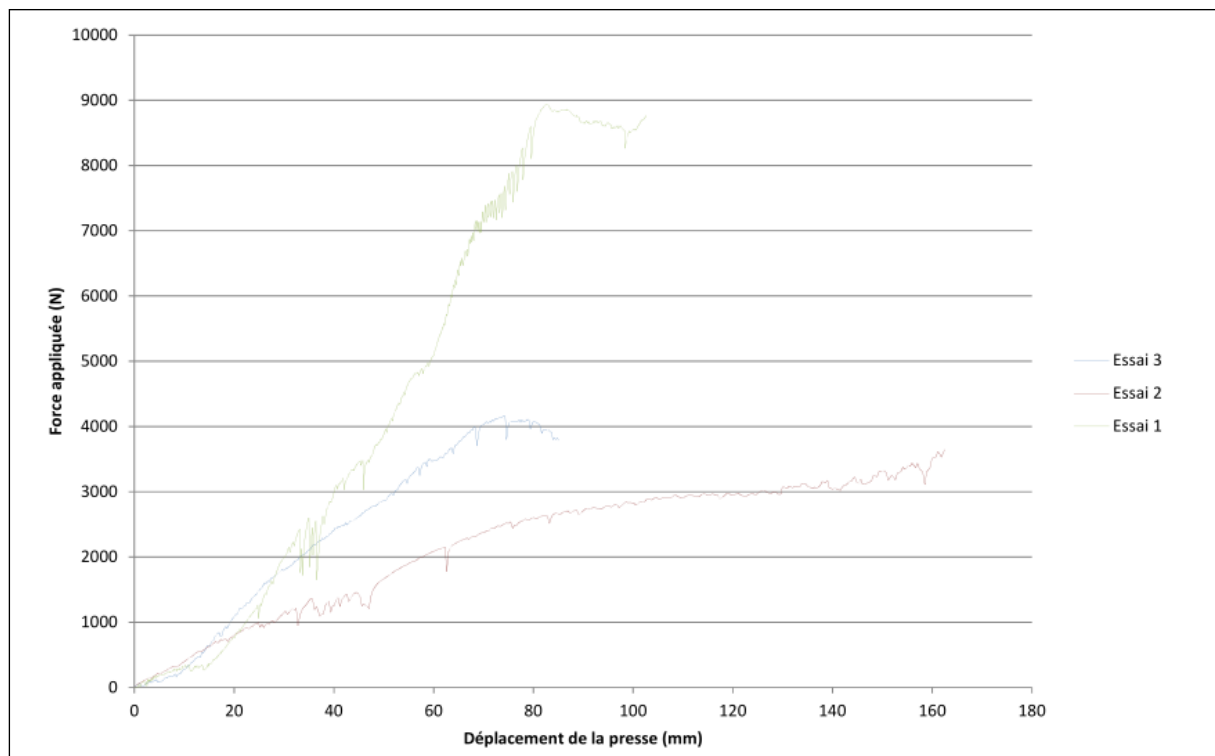


Figure 6 : courbes effort de cisaillement (en N) – déplacement (en mm)

Nous pouvons cependant conclure que l'interface paille-enduit testée subit un endommagement, accompagné de la rupture des brins de paille, mais aucune rupture brutale ne s'est produite. Ce résultat était cependant attendu étant donnée la structure fibreuse de l'interface.

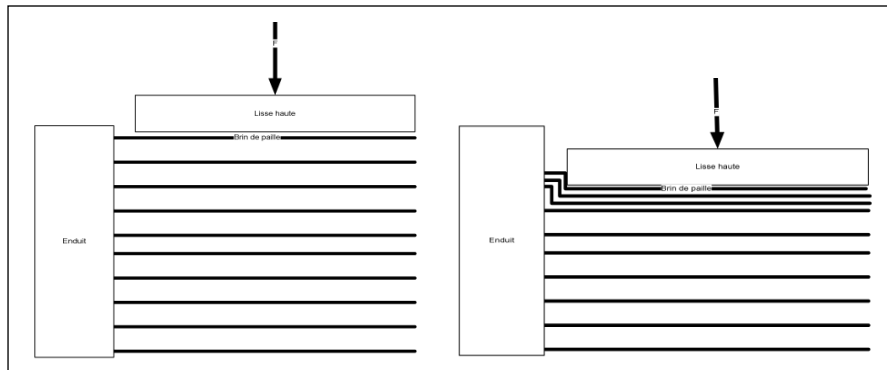


Figure 7 : Fonctionnement en cisaillement de l'interface

À la rupture, c'est à dire au pic de l'effort vertical, on peut considérer que la surface restante non cisailée reprend tout l'effort. Toute nouvelle augmentation d'effort est donc impossible, et on remarque une baisse de l'effort pour abaisser la lisse haute. La surface non cisailée a été mesurée à la fin de l'essai sur les 3 éprouvettes (voir photo en illustration 9). La hauteur d'interface non cisailée à la rupture ( $H_{\text{finale}}$ ) = (35 cm - somme des deux décollements)

essai	Décollement enduit-paille de la botte sous presse (cm)	Décollement de l'autre botte (cm)	Somme des deux décollements (cm)	H finale (cm)
1	13	5	20	15
2	12	8	20	15
3	18	2	18	15

Tableau 2 : évaluation de la hauteur non cisailée de l'interface en fin d'essai

Connaissant l'effort maximum, on peut estimer les valeurs de cisaillement critique moyen : 55, 91 et 200 kPa. En raison des efforts de frottement parasites notés pendant les essais, la valeur de 200kPa est à rejeter. On remarque que l'ordre de grandeur de la valeur limite de la contrainte de cisaillement critique paille paille-enduit trouvé (50 à 100kPa) est cohérent avec les quelques valeurs relevées par (Desille).

L'essai présenté est cependant très perfectible, car le système de pré-compression peut provoquer une mise en flexion parasite du corps d'épreuve testé : l'interface n'est plus alors soumise au seul cisaillement. Des études (modélisation numérique) et essais complémentaires tels que des essais de type push-out classiquement utilisés pour l'étude des interfaces sont donc nécessaires pour caractériser les propriétés de l'interface paille-enduit.

D'autres essais préliminaires et des modélisations sont actuellement menés. Ces travaux visent à fournir les bases des études qui pourront être menées dans le projet Paille\_Porteuse. Ils concernent plus particulièrement certains points singuliers des murs paille-enduit qui sont les zones d'application des efforts telles que les zones de mise en compression des enduits par les lisses au niveau desquelles il y a un risque de rupture par excès de compression. Ces phénomènes devront être quantifiés expérimentalement et modélisés pour permettre de justifier les dispositions constructives dans les points singuliers.

## Conclusions

La bibliographie réalisée d'une part, par le RFCP à l'occasion de la rédaction des règles professionnelles paille, et d'autre part lors des études réalisées à l'ENTPE et à l'ENPC depuis 2008, montrent que la paille porteuse représente un enjeu important pour de nombreux chercheurs. Elle montre aussi que si cette technique semble simple au premier abord, elle est rendue très complexe pour plusieurs raisons :

- les matériaux constitutifs peuvent être extrêmement très variés, et donc avoir une gamme très large de caractéristiques mécaniques,
- le système de la structure sandwich, composée en fait de 3 matériaux différents (enduit / interface / paille), est délicate à modéliser et demande nécessairement une caractérisation mécanique des 3 matériaux,
- les singularités telles que les portes et fenêtres introduisent des points « durs » dont il est faut nécessairement de comprendre tenir compte pour prédire le comportement des murs présentant des singularités...

Le projet Paille\_Porteuse, qui regroupe plusieurs laboratoires et de nombreux professionnels est actuellement en cours de montage. Il a pour objectif d'apporter un certain nombre de réponses aux questions posées ci-dessus afin d'aider les professionnels à poser les principes mécaniques, mais aussi hygrothermiques, de conception et construction de bâtiments en paille porteuse. Il a notamment pour objet de :

- mieux caractériser les comportements des matériaux constitutifs, ainsi que l'interface enduit-paille, notamment dans le cas de l'utilisation d'enduits terre dont les caractéristiques risquent de se rapprocher de celles de la zone de contact enduit-paille,
- confirmer le faible intérêt des liants hydrauliques trop rigides,
- étudier le comportement mécanique des points singuliers dans une construction,
- modéliser le comportement mécanique des murs porteurs,
- réaliser un travail complémentaire sur le comportement hygrothermique et acoustique du sandwich pour garantir la viabilité et le confort des bâtiments ainsi que des bâtiments et la faisabilité des dispositifs constructifs,
- travailler sur l'impact environnemental du système constructif, tant du point de vue du Développement Durable, que de sa pérennité,
- valider les modèles numériques élaborés en les confrontant à des constructions réelles, instrumentées et suivies pendant plusieurs années,
- créer des outils de calculs simplifiés ainsi qu'un cahier des charges et principes constructifs fondamentaux à l'usage des professionnels,
- et enfin, sur ces bases, créer les piliers scientifiques, techniques et pratiques pour l'élaboration ultérieure de "règles professionnelles construction paille porteuse ou participant à la structure des ouvrages".

## Remerciements

Les auteurs de cet article remercient le Ministère du Développement Durable qui a financé une partie des essais et la région Rhône Alpes qui a permis la mise en place de la formation correspondante à destination des professionnels.

Leurs remerciements vont aussi à Ali MESBAH de l'ENTPE, qui a encadré une partie des études présentées.

## Références bibliographiques

ABDALESS Bilal ; « *Mise au point d'enduits à base de terre sur des supports en paille* », Travail de fin d'études ENTPE, 71p, 2009

Empreinte ; association loi 1901, <http://www.habitat-ecologique.org/objet.php>

DESILLE Julien ; « *comportement mécanique des murs en bottes de paille enduits* », travail de Master de l'ENTPE, 65p, 2009

FASBA ; « *FACHVERBAND STROHBALLEN DEUTSCHLAND, Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohballebauweise- Weiterentwicklung der lastragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen performance* », Rapport pour la Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Kassel, ALLEMAGNE, 489 p, 2008.

GRANDSAERT M. F. ; « *A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls* », University of Colorado, Boulder, ETATS-UNIS, 1999.

LAMACHE G. ; « *Fraiches en Té, Chaudes en Hiver, les Maisons de Paille sont avant tout économiques* », La Science et la Vie, n°56, Mai 1921.

MACDOUGALL C. ; « *Effect of Mesh and Bale Orientation on the Strength Straw Bale Walls* », Queen's University, Kingston, CANADA, 2008.

METZGER Herminie, « *Une étude de l'enduit terre/plâtre appliquée à la construction paille* », Stage scientifique de l'ENPC, juillet 2010..

SMITH D. ; « *Creep in Bale Walls* », Rapport pour l'Ecological Building Network, San Rafael, CANADA, 9p, 2003.