



CONSTRUCTION EN PAILLE PORTEUSE METHODOLOGIE D'ESSAIS DU COMPORTEMENT MECANIQUE

Myriam Olivier, Fabrice Rojat, Gilles Forêt, Cédric Hamelin

► To cite this version:

Myriam Olivier, Fabrice Rojat, Gilles Forêt, Cédric Hamelin. CONSTRUCTION EN PAILLE PORTEUSE METHODOLOGIE D'ESSAIS DU COMPORTEMENT MECANIQUE. Colloque international NOMAD 2012, Nov 2011, Toulouse, France. pp.__. hal-00940077

HAL Id: hal-00940077

<https://enpc.hal.science/hal-00940077>

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.

Toulouse, France
19-20 Novembre 2012

CONSTRUCTION EN PAILLE PORTEUSE METHODOLOGIE D'ESSAIS DU COMPORTEMENT MECANIQUE

OLIVIER Myriam^A, ROJAT Fabrice^A, FORET Gilles^B, HAMELIN Cédric^C

A Centre d'Études Techniques de Lyon

B Université Paris Est, Laboratoire Navier (UMR CNRS 8205)

C Architecture BOHA

RESUMÉ: À la suite de la publication des règles professionnelles « construction en paille » (RFCP *et al.*, 2012), qui ont permis de faire reconnaître la paille comme matériau isolant et support d'enduit, le projet « paille porteuse » vise à élargir les capacités d'utilisation de la botte de paille pour lui permettre de reprendre directement les charges verticales et de contreventement. Dans le volet mécanique du projet, le premier objectif est de confirmer expérimentalement l'hypothèse couramment admise du comportement en service de la paille enduite comme un sandwich, puis de tester en taille réelle et de modéliser ce comportement sur des murs comportant des singularités (ouvertures, angles, linteaux, ...) en vue d'établir les bases de recommandations pour la conception et le calcul. Le deuxième objectif sera de vérifier et de modéliser un processus émis par les auteurs lors des phases de construction d'une structure en paille porteuse. Il s'agit d'étudier et de caractériser le transfert des charges verticales de charpente / plancher / exploitation / etc., initialement appliquées uniquement sur les bottes de paille, à l'enduit au cours du séchage de ce dernier. La présente communication détaille les programmes d'essais et méthodes proposés par les auteurs.

MOTS CLES : Paille porteuse, enduit, essais, échantillon, structure.

1. CONTEXTE ET INTÉRÊT DE LA RECHERCHE

Le secteur du bâtiment est l'un des plus grands consommateurs d'énergie (42% du total consommé en France) et producteur de GES (23%). Il est de plus à noter que ces valeurs sont en augmentation depuis les 20 dernières années, alors que d'autres secteurs comme celui de l'industrie sont en régression.

Le **RFCP**, Réseau Français de la Construction Paille "les Compailleurs", s'est mobilisé depuis 5ans pour proposer des solutions innovantes pour limiter au maximum les besoins en énergie pour chauffer ou refroidir les bâtiments, mais aussi, pour les bâtir. Il a ainsi permis la reconnaissance de la botte de paille comme matériau de construction, en tant qu'*isolant* et *support d'enduits*, avec la **parution en Novembre 2011 des Règles Professionnelles de construction en paille**. Dans ces « Règles Pro », les spécifications d'usage de la botte de paille dans le bâtiment sont présentes lorsque les bottes de paille ne reprennent aucunes charge.

Le projet *Paille Porteuse* s'inscrit dans le prolongement de ce travail de reconnaissance du matériau "pas à pas", avec l'objectif cette fois de faire valider les performances mécaniques du complexe paille / enduit. Cette étape est déterminante puisqu'elle représente le levier pour faire chuter les coûts de construction, en raison de la simplicité de la conception et de la rapidité de mise en œuvre du mode constructif "Paille Porteuse" : cette technique qui utilise les bottes de paille telles des blocs à maçonner, puis enduites (le plus fréquemment avec de la terre, de la chaux ou du plâtre) permet à la botte de paille d'avoir un **rôle structurel** (reprise des charges de planchers, toitures, d'exploitation et surcharges climatiques) et donc de ne plus avoir recours à des structures (bois ou autre) souvent très coûteuses.

Ce point est déterminant puisqu'il apporte des solutions pour réaliser des bâtiments passifs (BEPAS et BEPOS) à un coût beaucoup plus faible que les techniques actuelles y compris celle décrite dans les Règles Professionnelles. **Cette réponse est une réelle alternative aux attentes sociales et environnementales de la construction.**

Ce mode constructif simple a d'ores et déjà prouvé sa durabilité sur le plan expérimental puisque les premiers bâtiments construits en paille (dès l'apparition de la botteleuse mécanique à la fin du XIXème siècle) l'ont été suivant la méthode « paille porteuse ». Il est à noter qu'à ce jour ils sont toujours en bon état et que certains pays ou états l'ont alors autorisée (au Royaume Uni, en Suisse, au Danemark, en Californie, au Colorado, etc.). Cependant pour légaliser la construction en paille porteuse en France (puis dans d'autres pays d'Europe), il est nécessaire de pouvoir **prédire** les comportements mécaniques des projets et ainsi démontrer (y compris en phase amont) la stabilité des ouvrages dans le temps.

Notre projet de recherche se pose donc à cette étape clé, pour maîtriser et décrire par le calcul les comportements mécaniques des parois composites Paille / Enduit, afin d'en décrire les performances structurelles, la durabilité ainsi que les plages d'usages.

Enfin, le projet vise à répondre à une **attente économique de la filière "biosourcés"** qui voit apparaître une demande importante pour une construction à base de ressources renouvelables, et souhaite pouvoir mettre en œuvre cette technique dans des conditions permettant d'obtenir les assurances indispensables au développement de leurs entreprises.

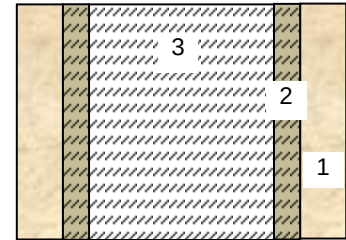
2. FONCTIONNEMENT D'UNE STRUCTURE EN PAILLE PORTEUSE : APPROCHE QUALITATIVE ET BESOIN DE NOUVEAUX ESSAIS

2.1 Le fonctionnement mécanique de la paille porteuse

La **solution technique « paille porteuse »** consiste à réaliser les parois porteuses de bâtiments à partir d'une paroi multicouche (ou « sandwich ») constituée d'une botte de paille avec des enduits épais de

chaque côté, le tout ayant une fonction structurelle. Une telle paroi ne comporte aucune autre structure porteuse (bois ou béton).

Le cœur de la problématique réside dans l'analyse et la modélisation du comportement du sandwich « enduit / botte de paille / enduit ». Classiquement, un mur en paille porteuse apparaît constitué de 3 types de matériaux, disposés symétriquement dans l'épaisseur:



- 1- la couche d'enduit constituée d'une couche de corps et d'une couche de finition. La première (fibrée, stabilisée ou non), dont le rôle usuellement reconnu est d'isoler la botte de paille des agressions extérieures (chocs, rongeurs etc.) et de régler les planéités, a une épaisseur d'environ 4 cm. La seconde, d'une épaisseur d'environ 5 à 10 mm a pour rôle d'assurer l'étanchéité à l'eau et à l'air des parois.

Les enduits intérieurs et extérieurs peuvent avoir des compositions, et donc des caractéristiques mécaniques différentes.

- 2- la zone d'interface entre l'enduit et la botte de paille (pénétration de l'enduit entre les brins de paille sur environ 1 à 2 cm) qui assure la qualité de l'interface,
- 3- la botte de paille d'une épaisseur de 47 cm en général (la pose à plat est la plus fréquente).

En pratique, la botte de paille est mise en œuvre en mur porteur par simple empilement, avec une forte pré-compression par sangles ou crics entre des lisses en bois pour augmenter la compacité et diminuer les évolutions ultérieures par fluage de la paille. La charpente est ensuite déposée sur la lisse supérieure. L'enduit est enfin mis en œuvre en façade, en débordement des charges de toiture.

Au début, juste après l'application de l'enduit, la majeure partie des charges est reprise par les bottes de paille, qui continuent de fluer légèrement (en fonction de l'importance de la pré-compression par sangles). La ductilité de l'enduit frais permet d'accompagner ces déplacements. Puis le séchage amène un accroissement de la résistance et de la rigidité de l'enduit, occasionnant un transfert progressif des charges et un fonctionnement se rapprochant d'un « panneau sandwich ». La structure ainsi obtenue pourra ensuite supporter des charges additionnelles liées à la finalisation de la construction et aux charges variables d'usage.

On distinguera donc deux phases de fonctionnement des structures en paille porteuse :

- le comportement « en service », où les charges sont reprises par le composite paille et enduit sec,
- le comportement « en construction », où les charges de toiture sont progressivement transférées de la paille à l'enduit.

2.2 Les hypothèses de modélisation

L'analyse de la (faible) bibliographie existante montre que :

- la paille a un module pseudo-élastique très faible (de l'ordre de 0,5 à 1,5 MPa)
- les enduits à base de terre ou de chaux ont des résistances et des modules d'élasticité beaucoup plus faibles que ceux à base de ciment,
- les enduits traditionnels à base de ciment ou d'autres liants hydrauliques conduisent à des résistances à la rupture de murs plus faibles qu'avec des enduits à base de terre, de plâtre ou de chaux aérienne.

Ces constatations nous ont amenés à l'hypothèse suivante :

L'interface paille-enduit joue un rôle clé dans la réponse structurelle des murs en paille porteuse. Après séchage de l'enduit, la couche extérieure (1) doit rester étroitement liée à la paille. Ainsi, tant que cette liaison reste de bonne qualité, l'enduit ne peut se déplacer latéralement, et donc ne peut pas flamber malgré l'application d'efforts verticaux.

Pendant la période de mise en oeuvre, les enduits à base de terre et de chaux ont plus de facilité à pénétrer entre les brins, et développent une meilleure adhérence. De plus, leur séchage étant plus lent, ces enduits peuvent suivre la déformation de fluage du mur sans fissurer.

Le schéma ci-après représente l'évolution du tassement et de l'humidité relative (HR) des murs en paille porteuse au cours de leur réalisation. Les tassements (phases 1 à 3) résultent de la mise en compression de la paille au moyen des sangles, puis de la compression et du fluage de la paille lors de la mise en place de la charpente (4). Suite à l'application des enduits, dans un premier temps, l'enduit n'étant pas assez sec, on observe un fluage de la paille (5) qui se stabilise après séchage des enduits (6).

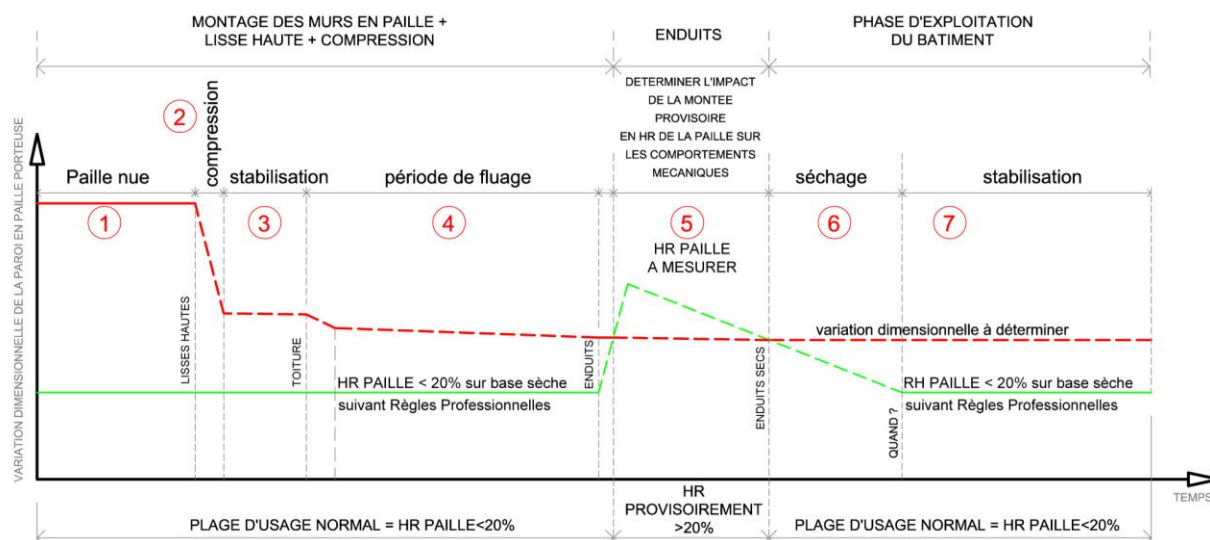


Figure 1 : Évolution des tassements et de l'humidité relative d'un mur en paille porteuse au cours de sa réalisation

Le programme d'étude qui sera mis en œuvre vise à modéliser le comportement mécanique de la structure en y intégrant celui de l'interface paille-enduit. Après calage du modèle sur des structures simples, il sera possible de caractériser les parois comportant des « singularités » telles que les ouvertures, portes, linteaux, angles qui perturbent de manière importante le comportement des matériaux.

L'objectif final est de produire des connaissances scientifiques qui seront la base de documents techniques et d'outils de modélisation à destination des professionnels.

2.3 Le principe des essais et des modélisations

Les études seront conduites à deux échelles :

a) Comportement des matériaux (paille et enduit) et de l'interface paille-enduit :

- pour fournir les données d'entrée des modélisations en « service » des structures ;
- pour expliciter le mécanisme de transfert des efforts de la paille à l'enduit pendant leur séchage.

Pour cette phase, les données concernant la paille et les enduits sont limitées, et sont surtout sujettes à caution en raison de la diversité des procédures d'essais recensées. Un travail particulier sera conduit sur l'établissement de procédures d'essais reproductibles et simulant le mieux possible les matériaux mis en œuvre.

Concernant l'interface enduit-paille, un essai de cisaillement original sera conçu pour étudier les mécanismes d'adhérence, et leur évolution pendant le séchage, puis modéliser cette interface.

b) *Comportement des structures simples et complexes*

- pour proposer des modèles de calculs pour les sandwich constituant les structures en paille porteuse, incluant les singularités ;
- pour comprendre et prédire les mécanismes de rupture, selon les points faibles repérés.

Pour cette phase, des modèles numériques originaux seront mis au point pour intégrer le comportement de l'interface dans le mécanisme complexe des structures sandwich.

Ces modèles seront calés, puis vérifiés, sur la base d'essais en taille réelle sur des murs simples et comportant des singularités, sollicités en compression jusqu'à la rupture, ainsi qu'en contreventement.

Ces deux approches sont décrites plus précisément dans les parties 3. et 4. suivantes.

3. COMPRENDRE LE COMPORTEMENT DU BINÔME ENDUIT-PAILLE À L'ÉCHELLE DE LA BOTTE

3.1 Objectifs et difficultés de la campagne d'essais mécaniques

Afin d'appréhender le comportement mécanique décrit dans la partie précédente, des essais de laboratoire doivent être réalisés pour décrire le comportement des différents constituants du binôme enduit-paille et de leur assemblage.

Plusieurs éléments doivent être pris en compte pour l'analyse de ces matériaux :

- *effets d'échelle* : le volume élémentaire représentatif d'une botte de paille est approximativement... la botte. En pratique, il est couramment admis (King *et al.*, 2009) que les propriétés mécaniques finales de la botte dépendent plus des caractéristiques de l'assemblage (densité, qualité du liage, etc.) et de sa bonne conservation (peu ou pas de réhumidification) que de celles des fibres elles-mêmes (en général relativement proches). Cela nécessite donc de réaliser des échantillons de taille importante (échelle métrique) pour examiner le comportement mécanique ;
- *anisotropie des matériaux* : les bottes sont constituées d'une succession de « galettes » assemblées par la lieuse avec généralement une orientation préférentielle des fibres (RFCP *et al.* 2012). Les comportements ne sont donc pas les mêmes dans toutes les directions. De même, les enduits peuvent inclure des fibres végétales (fragments de quelques centimètres) et leur processus de mise en œuvre peut induire une orientation préférentielle de la structure ;
- *évolution des caractéristiques au cours du séchage* : l'enduit acquiert au cours de son séchage une structure liée soit à une « prise » (en cas de présence d'un liant hydraulique), soit au développement d'une cohésion apparente par les forces électrostatiques et la succion (enduits terre en particulier). Cette évolution impacte le binôme enduit-paille et il est de fait nécessaire de la caractériser.

Le programme expérimental en laboratoire est réparti sur les laboratoires du Centre d'Études Techniques de Lyon (CETE), de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) et le laboratoire Navier (ENPC/IFSTTAR/CNRS) qui collaborent au projet.

3.2 Caractérisation des éléments du binôme enduit-paille

3.2.1 Essais sur les bottes de paille

Les bottes de paille utilisées pour ce travail auront pour dimensions moyenne 37x47x80 à 100 cm, et seront *a priori* constituées de paille de blé. Les bottes sont conservées sous abri à l'air libre et protégées des remontées capillaires, ce qui correspond approximativement à leur mode de séchage naturel avant usage en bâtiment.

Outre la caractérisation physique classique de la botte (teneur en eau, dimensions et masse volumique), le programme d'essais consiste à identifier les propriétés mécaniques significatives suivantes :

- limite d'élasticité et résistance ultime ;
- module élastique ;
- paramètres de fluage.

Ces paramètres sont définis sommairement sur le schéma de la Figure 2 qui représente la réponse expérimentale idéalisée d'une botte de paille soumise à un effort de compression uniaxial. La limite d'élasticité correspond au début d'accumulation de déformations irréversibles, alors que l'effondrement de la botte correspond à la résistance ultime. Lorsque l'effort est maintenu constant à un niveau choisi, il est possible que les déformations se poursuivent dans le temps : cela correspond au fluage, comportement couramment observé pour les bottes de paille. L'issue du fluage (stabilisation ou non) peut être variable suivant la valeur de l'effort retenue par rapport à la résistance ultime.

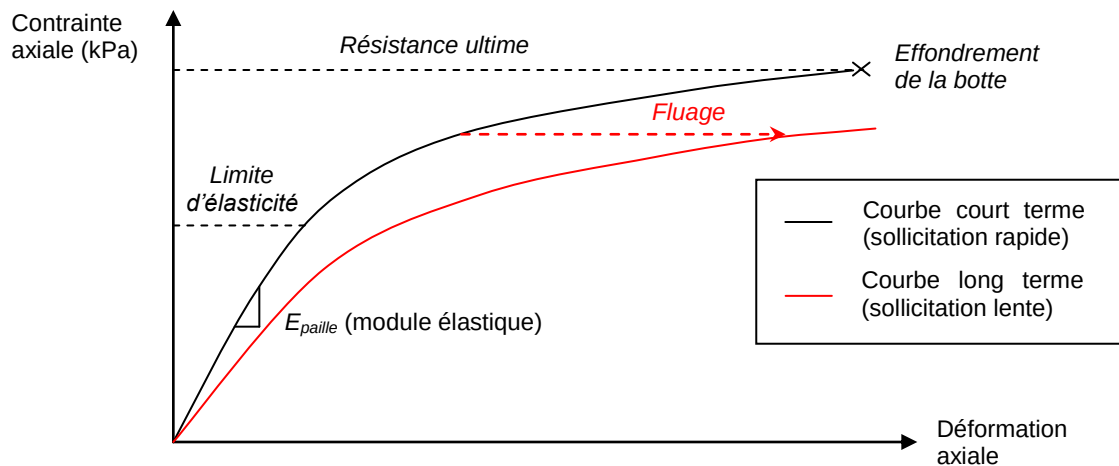


Figure 2 : Réponse idéalisée d'une botte de paille soumise à un chargement uniaxial

La littérature (King *et al.* 2009 e.g.) indique une assez forte variabilité de ces différents paramètres en fonction des caractéristiques de la botte, notamment de sa masse volumique et de la résistance des ficelles. La limite d'élasticité est généralement supérieure à 70 kPa, mais la résistance ultime peut dépasser 500 kPa (Bou-Ali, 1993). De même, les modules sont très variables ; ils dépendent de l'orientation de la botte et de l'orientation des fibres.

Concernant le fluage, celui-ci peut représenter de 20 à 80% de la déformation initiale (King *et al.* 2009). Même si une démarche véritablement représentative nécessite a priori des essais à l'échelle du mur (avec contreventement), une première approche sommaire peut être réalisée à l'échelle de la botte de paille, avec blocage ou non des déformations latérales. En pratique, on prévoira de mesurer les déformations sous charge constante pendant plusieurs semaines (durée à ajuster suivant l'allure des courbes de fluage). Puis la charge sera retirée et le regonflement possible de la botte sera mesuré, permettant d'identifier la part réversible des déformations.

Au final, la diversité des situations envisageables, associée à la variabilité naturelle du matériau végétal, conduira à multiplier les mesures pour chaque paramètre afin de disposer de valeurs représentatives. De même, il apparaît particulièrement important que la paille examinée en laboratoire soit la même que celle qui sera utilisée pour les essais à l'échelle de la structure. Enfin, il conviendra de distinguer, dans l'analyse des essais, le comportement de la paille en général (qui peut être assez complexe, voir Figure 2) de celui observé sur la gamme de contraintes réduite correspondant aux charges de bâtiment (inférieures à 30 kPa pour des habitations R+1 courantes). Sont prévus sur ce projet une douzaine d'essais de compression avec mesures de module et huit essais de fluage.

3.2.2 Essais sur les enduits

Le comportement de l'enduit dépend de sa composition et de sa mise en œuvre. Pour les enduits en terre fibrée ou non, la résistance de l'enduit est liée au développement d'effets de succion au niveau des ménisques de l'eau résiduelle et aux forces de Van-Der-Vaals agissant entre les plus petites particules. Pour les enduits à la chaux ou au plâtre, une prise hydraulique vient s'ajouter, qui garantit une cohésion d'ensemble. L'enduit constitue au final pour le mur en paille porteuse une « coque » plus ou moins souple, en interaction avec la botte de paille, qui est amenée sur le long terme à reprendre une grande partie des efforts de structure.

Au niveau de la mise en œuvre d'autre part, la maniabilité de l'enduit joue un rôle important dans la mesure où elle conditionne l'application régulière du produit (épaisseur, homogénéité, rendu final). Dans le contexte de la paille porteuse, sa consistance doit aussi permettre une bonne pénétration dans la paille pour que l'interface botte / enduit puisse jouer pleinement son rôle.

On comprend donc aisément que la caractérisation de l'enduit ne peut s'envisager qu'en se rapprochant au mieux des conditions réelles de mise en œuvre. L'usage de simples éprouvettes 4 x 4 x 16 cm moulées comme pour les mortiers conventionnels n'est pas nécessairement adapté car ce type de protocole ne permet pas de bien reproduire le talochage réel.

Ainsi, afin de se rapprocher des conditions réelles d'utilisation, les enduits de terre seront mis en œuvre à leur teneur en eau de maniabilité optimale, en 4 cm d'épaisseur, sur des plaques de 50 x 50 cm. Les plaques seront ensuite séchées (complètement ou partiellement) puis découpées pour obtenir des éprouvettes d'essai représentatives, de tailles diverses. On privilégiera le séchage à l'air dans une salle thermo-régulée ou dans une enceinte à ambiance contrôlée. L'évolution de la teneur en eau pourra être suivie par pesée.

Les enduits seront au final caractérisés principalement par :

- la « recette » du mélange utilisé ;
- le phasage de la réalisation du mélange
- les propriétés physiques et mécaniques de la terre crue (hors fibres et stabilisants éventuels) :
 - o analyse granulométrique (avec sédimentométrie pour la fraction fine) ;
 - o argilosité : limites d'Atterberg (→ IP), valeur au bleu (VBS) ;
 - o minéralogie si nécessaire ;
- la courbe de séchage de l'enduit à 50 et 90 % HR ;
- les propriétés de l'enduit à différents stades de séchage :
 - o masse volumique sèche ;
 - o résistance à la compression, à la flexion, à la traction, voire à l'usure.

3.2 Caractérisation du composite botte de paille – enduit

Le binôme paille porteuse – enduit (terre ou autre) constitue un composite, c'est-à-dire un assemblage plus performant que ses constituants pris indépendamment. L'enduit épais permet la reprise de charges qui entraîneraient dans le cas contraire une déformation de la paille à long terme. Les bottes de paille quant à elles assurent un contreventement des parois minces constituées par l'enduit qui, sinon, rompraient rapidement par flambement. Dans une telle configuration, la qualité de l'interface, constituée de brins de paille mélangés à l'enduit, joue un rôle primordial.

On recense dans la littérature (King *et al.*, 2009) cinq modes principaux de dégradation d'un mur en paille porteuse, présentés sur la Figure 3 ci-après : voilement général (1), voilement local avec arrachement de l'enduit (2), écrasement en tête ou pied de mur (3), glissement de l'enduit (4), écrasement de l'âme (5). Ces différents modes de rupture permettent de bien appréhender l'interaction entre les constituants du composite. L'interface joue un rôle prépondérant dans la tenue du mur : les essais viseront donc à une compréhension précise des mécanismes en jeu, en état de fonctionnement normal du mur ou en état dégradé (paille en cours de décomposition par excès d'humidité par exemple).

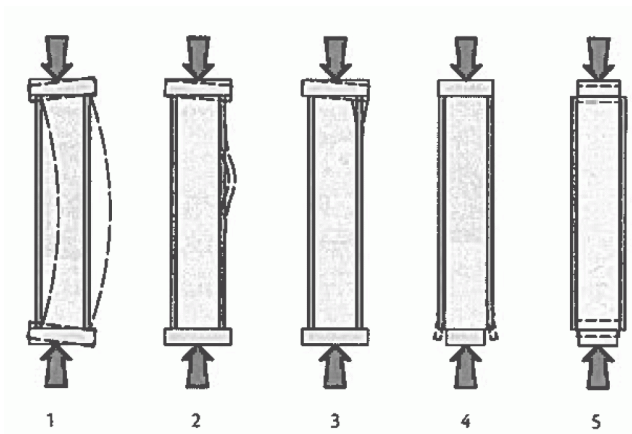


Figure 3 : Les cinq principaux modes de dégradation mécanique d'un mur en paille porteuse (d'après King et al., 2009)

Les essais réalisés consisteront à solliciter l'interface paille-enduit de sorte à qualifier son comportement sous sollicitation de cisaillement. Les essais seront réalisés à l'échelle de la botte de paille, à l'aide de machines de cisaillement de grandes dimensions (0.6 à 1.5 m) disponibles au CETE de Lyon. Seront recherchées les conditions de rupture, mais aussi dans la mesure du possible la répartition des déformations au sein de l'échantillon en cours de sollicitation. Le comportement attendu devrait être du type indiqué sur la Figure 4.

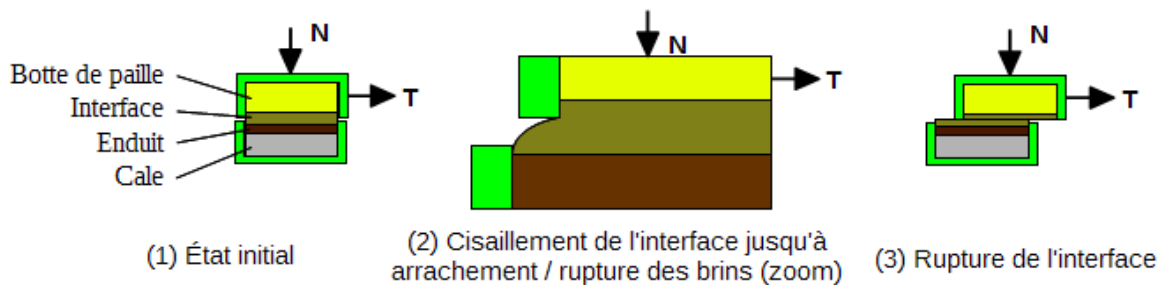


Figure 4 : Étapes principales de l'essai de cisaillement

Les essais permettront d'obtenir une courbe effort-déplacement au niveau de l'interface, avec identification de la rupture. Il est prévu de cisainer ainsi au moins deux échantillons par triplet botte de paille – enduit – humidité :

- deux densités de paille ;
- deux types de céréale (blé et orge par exemple)
- deux enduits différents ;
- différentes configurations d'humidité paille-enduit (paille « intacte » ou altérée par décomposition partielle en atmosphère humide notamment).

Au total, une trentaine d'essais de cisaillement sont ainsi planifiés, qui permettront d'identifier le fonctionnement mécanique de l'interface dans différentes conditions d'humidité. Ils constitueront des données d'entrée intéressantes pour la compréhension des résultats des programmes expérimentaux à l'échelle du mur (voir partie suivante).

4. COMPRENDRE LE COMPORTEMENT DU BINÔME ENDUIT-PAILLE À L'ÉCHELLE DE LA STRUCTURE

4.1 Modélisation mécanique des structures porteuses en bottes de paille-enduits

Il n'existe actuellement aucun modèle mécanique, simple ou complexe, capable de rendre compte pertinemment du fonctionnement d'une telle structure et de répondre aux questions clefs portant sur le comportement du sandwich en phase de séchage et sur le comportement des parois en présence de singularités et détails architecturaux (linteaux, ouvertures, pénétrations, angles, etc.).

Un des objectifs du projet est donc de réaliser des modèles mécaniques (analytique et/ou de type éléments finis) pouvant prendre en compte les singularités et détails architecturaux et, d'autre part, un certain nombre d'événements pouvant impacter les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs du mur et des interfaces (séchage des enduits, problèmes d'humidité, ...). Ces modèles seront calés et testés par rapport à des résultats d'essais disponibles dans la littérature et des résultats d'essais menés dans le cadre de ce projet à des échelles allant de celle du matériau à celle d'une construction réelle. Ces modèles devront par ailleurs pouvoir décrire, quantifier et prédire les impacts du taux d'humidité du complexe Paille/Enduit sur les résistances mécaniques, le comportement hygrothermique et acoustique, et la pérennité des matériaux lors de la pose des enduits en phase de séchage, puis sous sollicitations hygrothermiques durant la vie de l'ouvrage.

Des tests sur structures à l'échelle d'un mur sont donc prévus dans le cadre du projet présenté ici. Ils permettront d'acquérir en amont une bonne compréhension des phénomènes observés et spécifiques à la rupture des murs en bottes de paille porteuse et de fournir le maximum de données sur les phénomènes observés pour alimenter la phase de modélisation. Ces observations, en addition des résultats de la littérature et des campagnes d'essai en laboratoire décrites dans les parties précédentes, nous laissent envisager la prise en compte exhaustive des scénarios (ou modes) de ruine des structures en botte de paille porteuse.

En complément, ces modèles pourront aussi être testés et vérifiés sur des résultats d'essais trouvés dans la bibliographie, dans la mesure où il sera possible de retrouver les hypothèses manquantes ou de les approcher par déduction.

4.2 Approches de dimensionnement

Nous nous inspirerons du principe de dimensionnement aux états limites pour proposer des modèles propres aux structures en botte de paille porteuse.

L'approche de type ELS permettra de définir les charges de service maximales tout en garantissant la pérennité de la structure. Elle sera réalisée à l'aide de modèles par éléments-finis.

Dans le cadre de *l'approche ELU*, approche servant à déterminer la charge de rupture d'une structure, il y a plusieurs démarches possibles de modélisation selon les aspects globaux ou locaux (des modes de ruine) qui auront retenu l'attention lors de la phase d'essais.

Les modes de ruine globaux observables à l'échelle de la structure tels que le flambement, la rupture en compression, la rupture par cisaillement ou le déversement de pans de murs donneront lieu à une approche de type calcul à la rupture, pour laquelle la phase expérimentale prend tout son sens car permettant de nous conforter dans le choix des mécanismes de ruine retenus.

Cette démarche proche de la pratique de l'ingénieur est une méthode de calcul aux états limites ultimes qui pourra permettre d'obtenir des équations simples de dimensionnement des structures en botte de paille porteuse.

Pour traiter des phénomènes plus locaux tels que les désordres au niveau des interfaces ou des points singuliers (par exemple ouvertures dans les murs), l'arrachement des enduits par flambement en zones comprimées ou cisaillement, ... une approche plus locale et des méthodes plus sophistiquées peuvent être mises en œuvre. On pense classiquement à une modélisation par la méthode des éléments finis

mais aussi à des méthodes analytiques en utilisant par exemple une approche de type layer-wise (Nguyen *et al.*, 2011) car le mur peut être assimilé à une structure multicouche (ou sandwich).

5. CONCLUSIONS

Bien qu'employé de longue date en construction, le matériau paille, souvent considéré comme un "déchet" de l'agriculture, n'a émergé que récemment dans la réglementation et les pratiques professionnelles françaises. La botte de paille est actuellement reconnue comme matériau d'isolation et support d'enduit et un corpus méthodologique a pu être constitué autour de sa caractérisation et sa mise en œuvre pour ces usages.

Toutefois, de multiples expériences à l'international montrent qu'il est possible d'aller encore plus loin en utilisant directement la botte de paille comme matériau porteur pour la réalisation de structures de type « maisons individuelles ». Cette approche permet de réduire notablement les coûts et constitue une réelle alternative aux attentes sociales et environnementales actuelles de la construction.

Pour permettre à ce mode constructif « nouveau en France » de se développer davantage, il est toutefois nécessaire, dans un contexte sociétal marqué par la contractualisation accrue des projets et les difficultés d'assurabilité, de pouvoir présenter des données quantifiées sur le comportement des structures : la compréhension scientifique du fonctionnement du binôme paille – enduit constitue donc un axe de travail majeur. Dans cette optique, nous avons présenté ici un programme ambitieux qui permet d'aborder le fonctionnement du composite sous ses différents aspects, depuis la qualification des « matières premières », jusqu'à la modélisation de pans de mur ou de bâtiments. La démarche proposée aborde aussi bien la partie expérimentale qui constitue la base observationnelle des modèles, que les méthodes de dimensionnement qui permettront de justifier ces ouvrages. Partant de l'hypothèse d'un fonctionnement de paroi « sandwich » dans lequel l'interface « paille / enduit » joue un rôle prépondérant, les difficultés expérimentales et théoriques ont été soulignées et les pistes de recherche permettant de les surmonter ont été présentées.

Ce travail, à terme, devrait constituer un apport significatif dans la structuration des connaissances sur le fonctionnement des binômes paille – enduit et permettre d'avancer vers la reconnaissance officielle du mode constructif « paille porteuse » en France. Les travaux s'étaleront et se poursuivront vraisemblablement sur plusieurs années au sein des organisations partenaires du projet et de la communauté d'acteurs de la construction en paille, porteuse ou non.

6. RÉFÉRENCES

Blum B. & Dick K. (2002), Load Carrying of On Edge Straw Bale Walls, Université de Manitoba, Manitoba, ETATS-UNIS.

Bou-Ali G. (1993), Straw Bales and Straw Bale Wall System. University of Arizona, Tucson.

Dallot J. & Sab K. (2008), Limit analysis of multi-layered plates. Part II; shear effects, Journal of Mechanics and Physics of Solids. 56, 581-612.

Desille J. (2010), Comportement Mécanique des Murs en Bottes de Paille Enduits, Mémoire de Master, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, FRANCE, 66p.

Donahue K. (2009), Testing of Straw Bale Walls with Out of Plane Loads, , Ecological Building Network, Sausalito, ETATS-UNIS.

Faine M. & Zhang J. (2002), A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall, University of Western Sydney, Australia.

Fugler D. (2007), Construction en ballots de paille dans le Canada atlantique, SCHL.

Grandsaert M. F. (1999), A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls, University of Colorado, Boulder, ETATS-UNIS.

King B. & De Bouter A. (2009), Concevoir des bâtiments en bottes de paille. *Adapté de l'ouvrage "Design of Straw Bale Buildings"*. La Maison en paille / Eyrolles. 319 p.

Nguyen D.T., Caron J.F., D'Ottavio M. (2011), Benchmark d'un modele pour sandwichs et multicouches, de type layer-wise en contrainte. Comptes Rendus des JNC 17, Poitiers

RFCP, MEDDTL (2012), Règles professionnelles de construction en paille – Remplissage isolant et support d'enduit. Ouvrage collectif. Editions Le Moniteur. <http://www.compailleurs.eu>. 180 p.

Taylor B., Compressive strength testing of earthen plasters for straw bale wall application, Department of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

Walker P. (2004), Compression load testing straw bale walls, University of Bath.

Zhang J.Q. (2002), Load Carrying Characteristics of a Single Straw Bale Under Compression, University of Western Sydney, AUSTRALIE.