

Fluage des murs en bottes de paille : l'état de l'art

Sommaire

Introduction et motivations	2
Questionnements et ébauches de réponses.....	2
Partie 1 : Les essais connus	4
USA, 2003 : Essais de Smith.....	4
Allemagne, 2008 : Essais de la FASBA (les pailleux-ses allemands)	4
France, 2017 : Essais de l'IUT de Nîmes avec précompression	5
Méthodologie : convergence et différences	5
Résultats	6
Partie 2 : Interprétation des résultats	10
L'influence du type de botte (dimension et densité)	10
L'influence de la précompression du mur	10
Le temps de stabilisation de la déformation dans le temps	10
Recherches futures suggérées.....	12
Conclusions.....	12
Bibliographie.....	13
ANNEXE – La mécanique de la botte de paille en compression.....	14



Rédacteurs :
Gil Bustarret et Cédric Hamelin
de l'association Nebraska, Grenoble, 2018.
contactnebraska@gmail.com

Introduction et motivations

Les tassements des murs en bottes de paille porteuses, technique « Nebraska », sont différés dans le temps. Sur chantier, la plupart de murs ne restent pas longtemps en paille nue et chargés car ils sont enduits ou fixés à des éléments en bois rapidement en général (le jour même ou à quelques jours). Les enduits et les bois verticaux de fixation (appelés bloqueurs* par l'association Nebraska) les empêchent de continuer à se tasser sous les charges des niveaux supérieurs ou des sangles et fixent leurs dimensions. En revanche dans les cas où le mur est laissé en charge (niveau supérieur construit ou toiture), non-enduit, et non fixé à des poteaux de bois, on peut observer de nouveaux tassements après une semaine ou même des mois plus tard dans certains cas extrêmes. Il nous intéresse de savoir prévoir les tassements qui peuvent apparaître dans ces cas là pour conserver le contrôle sur l'horizontalité et l'altitude du niveau supérieur.

Le sujet est peu documenté et ce rapport vise à synthétiser ce qui s'est fait sur le sujet avec une approche scientifique. A notre connaissance, 3 grandes démarches scientifiques se sont lancées sur le sujet dans les 20 dernières années : une aux Etats-Unis, une en Allemagne, et une en France. Le but étant de pouvoir prédire la déformation de fluage pour un mur dont nous avons pu caractériser les bottes (en termes de dimension, densité et éventuellement module de Young en essai de compression).

*ces éléments (que l'on retrouve à l'association Nebraska) en tête de mur isolé et aux droits des baies font la largeur du mur paille. Ils servent de précadre aux menuiseries et une fois reliés à la lisse haute bloquent le fluage des bottes.

Une description de la réponse mécanique instantanée des bottes de paille en compression est donnée en Annexe pour distinguer les réponses élastiques, plastiques et différées dans le temps.

Questionnements et ébauches de réponses

Les déformations différées dans le temps d'un mur en charge sont à décrire par un modèle prenant en compte le fluage des murs en bottes de paille. Cependant, il est différent de parler du fluage d'une botte seule que de celui d'un mur précomprimé, qui est un ensemble plus complexe. Avant de généraliser et suggérer un modèle pour le fluage de ces murs, plusieurs questions se posent.

Peut-on extrapoler le comportement d'une botte à celui du mur composé de ces bottes ? (Par exemple, si une botte seule sous une certaine contrainte se déforme instantanément de 1cm puis de 0.5cm en 3 mois, pouvons-nous simplement extrapoler et dire qu'un mur composé de 6 rangées de bottes subissant cette même contrainte se tassera proportionnellement : instantanément de 6cm puis de 3cm en 3 mois ?)

Il a été observé plusieurs fois que pour les déformations instantanées c'est le cas, mais pour le fluage cela reste à vérifier, car peu d'essais ont eu lieu.

Au fur et à mesure que les murs se tassent, les sangles de précompression se détendent. Elles n'appliquent donc plus la même contrainte dans le mur, et dans des cas extrêmes elles peuvent ne plus appliquer aucune contrainte sur le mur après un certain temps. La charge sur la paille n'est donc pas constante, peut-on parler d'essais de « fluage » dans ce cas ?

Définition de « Fluage » : Phénomène physique qui provoque la déformation différée dans le temps d'un matériau soumis à une contrainte (=charge) constante.

D'un point de vue scientifique, dans un mur chargé, la paille n'est pas chargée de manière constante dans le temps car les sangles se détendent avec le temps. Un essai de fluage (avec charge constante) sur une botte est intéressant mais ne serait donc pas parfaitement représentatif de la situation d'un mur où la charge sur les bottes diminue dans le temps. Si l'on considère le mur (dressé, sanglé, précomprimé, non enduit, non fixé) comme un élément à part entière, alors celui-là chargé constamment sera en situation de fluage. C'est pourquoi nous essaierons à l'avenir de produire au maximum des données d'essais de fluage de murs entiers et non pas de bottes seules.

Toutes les bottes de paille ont-elles le même comportement au fluage ? Nous n'avons pas assez d'échantillons testés et de cas mesurés pour pouvoir établir quelles caractéristiques (dimensions, céréales, densité, ...) des bottes influent sur leur comportement mécanique dans le temps. Il faut beaucoup d'essais répétés avec un maximum de variables inchangées entre les différents essais pour établir une loi de comportement. Pour l'instant chaque essai connu présente trop de variables différentes des autres pour pouvoir comprendre l'influence de chaque paramètre séparément.

Après combien de temps les tassements des murs en bottes de paille (non enduits et non bloqués en tête) se stabilisent-ils ?

Pour tenter de répondre à ces interrogations rigoureusement nous avons besoin d'essais, de mesures, d'observations répétées. Si l'on considère que se stabiliser c'est que la déformation de fluage ne varie pas plus que 10% de sa valeur, cela peut prendre un mois ou plus d'un an selon le peu de données que nous avons pu parcourir. Dans ce document nous allons exposer les quelques réponses que les constructeurs/trices en paille porteuse ont pu rassembler, dans l'ordre chronologique.

Partie 1 : Les essais connus

USA, 2003 : Essais de Smith

L'essai d'un an a été mené sur plusieurs empilements de 6 bottes (colonnes) non précomprimés (pas de sangles), que de la paille de riz sauf un échantillon de bottes de blé (courbe C, vert clair de la figure).

Les bottes de blé ont une densité d'environ **116kg/m³** et mesurent 111x60x40cm (Lxbxh pour l'essai) et sont chargées à **11kPa** (1.1t/m², 660kg/ml, = *équivalent 495kg/ml sur bottes de 45cm de large*). Ce sont donc des bottes un peu plus larges que les petites bottes françaises et plutôt denses, (densité avec eau, non ramenée sur base sèche).

Sur la courbe des résultats, on observe 5,1 cm (=8.5mm/botte) de déformation instantanée auxquels s'ajoutent 2.5cm (=4.1mm/botte) de fluage en 10 mois, dont 1.0cm (=1.7mm/botte) le premier mois.

C'est-à-dire en termes de déformation totale à un mois on a eu 84% de la déformation instantanément au chargement et 16% de déformation de fluage ensuite. **En un mois, on a multiplié la déformation initiale par le facteur 1.2.** Et en dix mois, on a multiplié la déformation initiale par le facteur 1.5.

Allemagne, 2008 : Essais de la FASBA (les pailleux-ses allemands)

Grosse étude sur la construction en bottes de paille très complète, avec toute une partie sur la mécanique des bottes de paille.

Malheureusement pour le fluage, pas de murs, que des essais courts sur bottes seules ont pu être faits. Ce sont des essais sur petites botte et bottes matelas, qui donnent des résultats très différents.

Petites bottes non précomprimées, FASBA, (p106 du rapport) :

Les 3 bottes de blé ont une densité de **87 à 97kg/m³** (on ne sait pas si sur base sèche ou non) et mesurent 80x48x36cm, elles sont chargées à **60kPa** (6t/m², 2.9t/ml, = *équivalent 2.7t/ml sur bottes de 45cm de large*). Ce sont donc des bottes similaires aux petites françaises et de densité relativement faible pour de la paille porteuse, sous très haute charge.

Sur la courbe des résultats, selon les échantillons on observe 1.5 à 4 % de déformation instantanée auxquels s'ajoutent le fluage : 6.5 à 11.5 % de déformation en un mois.

C'est-à-dire en termes de déformation totale observée à un mois on a eu 25 à 35% de la déformation instantanément et 65 à 75% de déformation de fluage selon les bottes. **En un mois, on a multiplié la déformation initiale par un facteur 3 à 4 !**

Grosses bottes non précomprimées, FASBA, (p52 du rapport) :

Les 3 bottes de blé ont une densité de **116 à 133kg/m³** (on ne sait pas si sur base sèche ou non) et mesurent 185x80x48cm, ce sont des bottes « matelas », elles sont chargées à **40kPa** (4t/m², 3.2t/ml, = *équivalent 1.8t/ml sur bottes de 45cm de large*).

Sur la courbe des résultats, on observe 7 à 20% (3.5 à 10cm/botte) de déformation instantanée auxquels s'ajoutent 1 à 1.5% (0.5 à 0.7cm/botte) de fluage en un mois.

C'est-à-dire en termes de déformation totale à un mois on a eu 87 à 93% de déformation instantanée et 7 à 13% de déformation de fluage. **En un mois, on a multiplié la déformation initiale par un facteur de 1.1 environ.**

France, 2017 : Essais de l'IUT de Nîmes avec précompression

Essais d'un an sur deux murs (précomprimés avec des sangles à 1,2t/ml, 5% de la hauteur) de six rangs de bottes, un en paille nue et l'autre enduit (terre-chaux-plâtre d'épaisseur 3.5cm en deux passes). Outillage de mesure : Laser et points de mesure sur le mur peuvent induire une erreur de quelques millimètres dans la mesure. Les bottes ont une densité sur base sèche de **100kg/m³** et des dimensions de 110x45x35cm. Concernant le mur non-enduit, lors de la précompression (évaluée par des dynamomètres sur les sangles à 26kPa environ, 2.6t/m², 1.2t/ml), près de 10cm de tassements ont été observés.

Plus tard, lors du chargement de **8.9kPa** (0.9t/m², 400kg/ml), la déformation a été mesurée entre 0 et 0.15% (0 et 0.5mm/botte) selon les endroits du mur (très faible). Ensuite, **en un mois, on a multiplié la déformation initiale par un facteur 2 environ**. Des déformations allant jusqu'à 0.7% de déformations ont été atteintes dans les 5 premiers mois puis se sont stabilisées pour la plupart des points de mesure, (facteur 4 à 6).

Pour le mur enduit par contre, **aucune déformation de fluage mesurable** n'a été observée après le chargement de 6.6kPa (environ 300kg/ml) sur le mur déjà enduit avec un mélange terre-chaux-plâtre.

D'autres essais ont été lancés en France notamment au Lycée Martin Nadaud de Bellac mais les protocoles d'essais n'étant pas respectés ou adaptés à des essais de fluage de murs en bottes de paille porteuse, les résultats ne sont pas recevables ou disponibles pour le moment.

Méthodologie : convergence et différences

Avant la présentation des résultats, nous suggérons de rester attentif lors de la comparaison de ces essais, les dimensions des bottes, leurs densités et leur taux de chargements sont très variables et ne permettent pas de savoir quel paramètre a causé les différences de résultats observés.

Les essais américains et français se sont faits sur 6 rangs de bottes et à ce titre sont plus représentatifs du comportement d'un mur. Les essais allemands se sont faits sur bottes seules.

Cependant, la densité des bottes américaines est similaire à celle des bottes matelas allemandes et pas à celle de petites bottes utilisées en France.

On peut déjà suggérer que pour reproduire un essai de fluage sur bottes de paille il faut garder identiques tous les paramètres, entre autres : la céréale, la masse volumique moyenne sur base sèche, les dimensions de l'échantillon (mur ou botte), la déformation de précompression, la charge, les lisses.

Aussi, si la vitesse de déformation s'accélère ou ne diminue pas après quelques mois, il est probable qu'un mécanisme de ruine du mur et déformation hors-plan soit à l'œuvre et dans ce cas il n'y a plus compression homogène dans le mur et la déformation mesurée n'est plus valable pour l'analyse du comportement au fluage de parois en bottes de paille.

Résultats

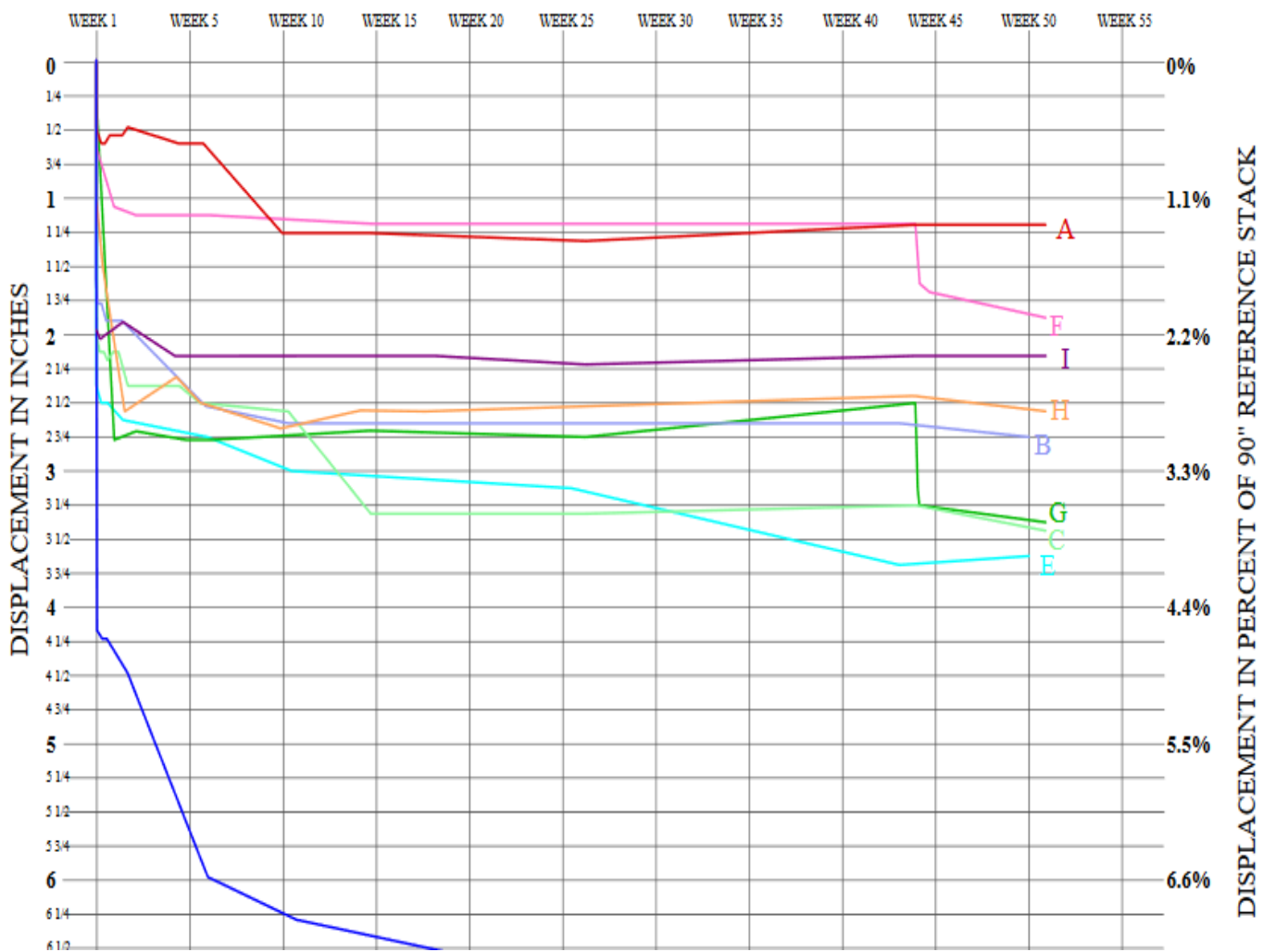
Les données à disposition sont présentées dans des graphes puis dans un tableau commun. Sources : voir bibliographie.

Essais de Smith (paille de blé = courbe C, vert clair)

Densité : 116 kg/m³ Pression : 11 kPa

FIGURE 2: OVERALL CREEP TEST DATA

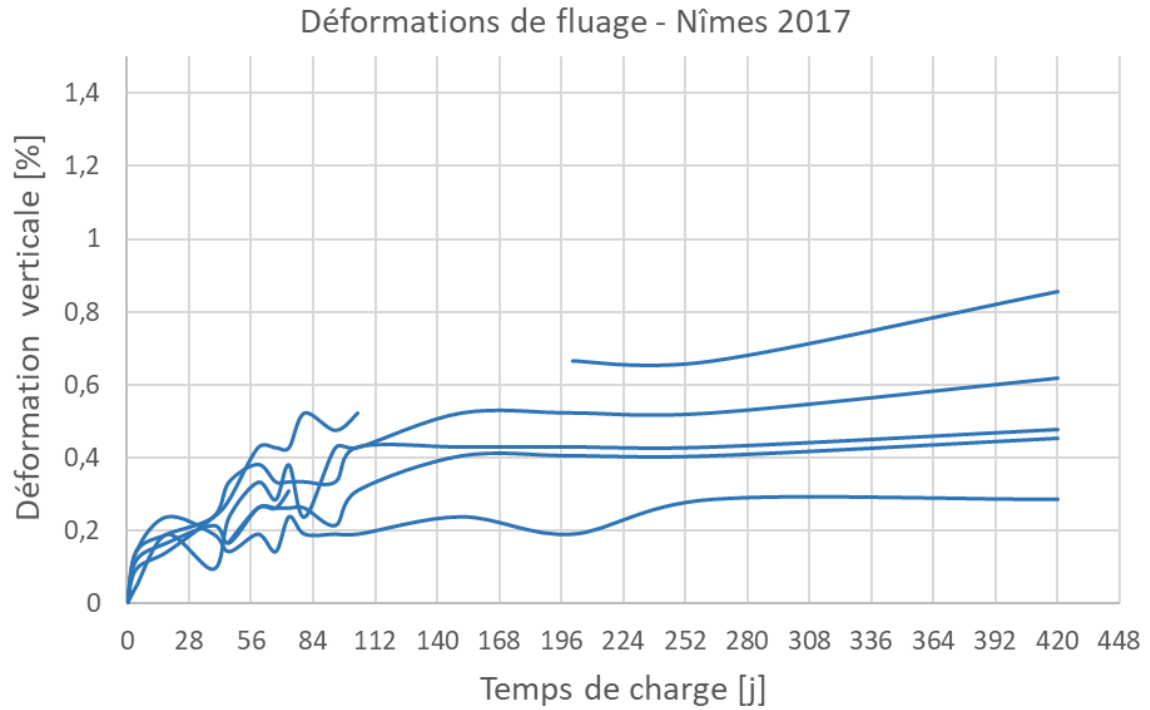
TIME OVER 55 WEEKS



Essais de Nîmes

Densité : 100kg/m³ Pression : 9 kPa

Les différentes courbes correspondent à plusieurs capteurs de mesure.



Essais FASBA : Petites bottes

Densité : 87 à 97 kg/m³

Pression : 60 kPa

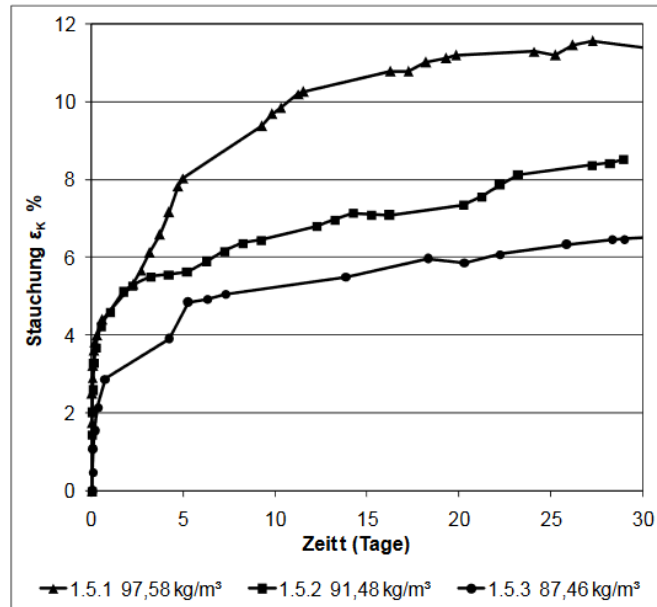


Abbildung 4-7: Kriechverhalten seitlich eingespannter flach liegender HD-Weizenballen bei einer Spannung von 60 kN/m²

Essais FASBA : Bottes matelas

Densité : 116 à 133 kg/m³

Pression : 40 kPa

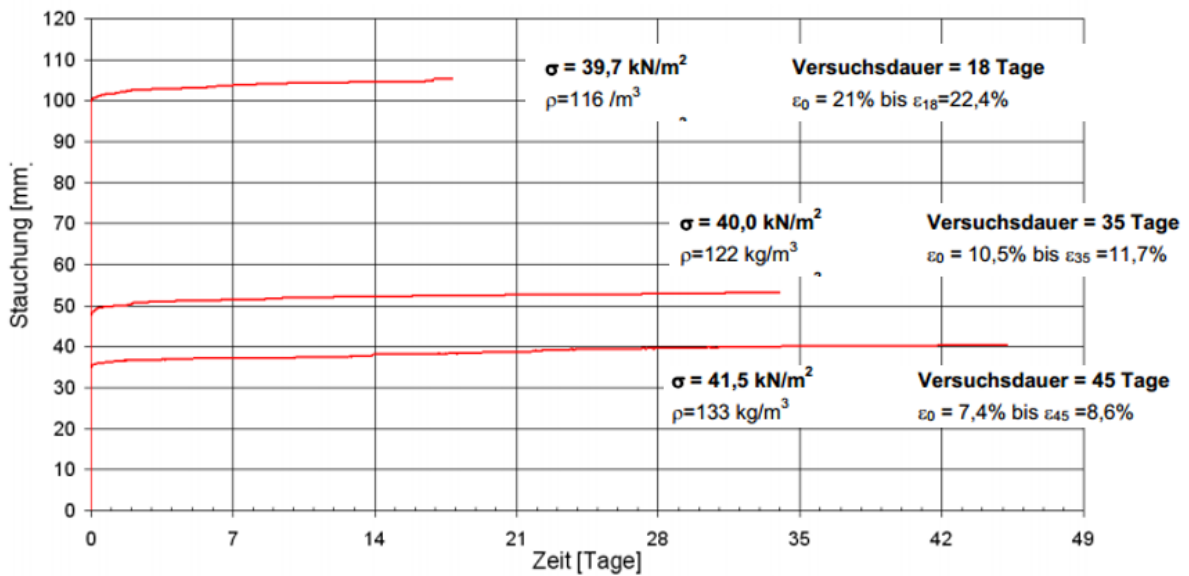


Abbildung 3-6 Ergebnisse der Kriechversuche

Essais de fluage – synthèse des résultats

Essai	Dimensions échantillon Lxbxh	Masse vol. (kg/m ³)	Précompression ? % de la hauteur	Charge		Déf. Instantanée %	Déf. 1 mois %	Déf. 3 mois %	Ratios déformations		Remarques
				kPa (=kN/m ²)	kg/0,45m ²				1 mois/inst	3 mois/inst	
Smith, 2003	110x60x240 (6 bottes empilées)	116	0	11 kPa	495	2,1	2,5	3,6	1,20	1,69	tenu latéralement par des grillages
FASBA, 2008	80x48x36 (botte seule)	87	0	60 kPa	2700	1,5	6,5	-	4,33	-	
		91	0	60 kPa	2700	3,6	8,5	-	2,36	-	
		97	0	60 kPa	2700	3,6	11,5	-	3,19	-	
		116	0	39,7 kPa	1787	21,0	22,4 (18jours)	-	1,07	-	
Nîmes, 2017	220x45x210 (mur, 6 rangs x2 bottes)	122	0	40 kPa	1800	10,5	11,7	-	1,11	-	
		133	0	41,5 kPa	1868	7,4	8,6	-	1,16	-	
		100 (sur base sèche)	5%	8,9 kPa	400	0,1	0,2	0,5	2,00	5	fluage négligeable après 4 mois

Partie 2 : Interprétation des résultats

Tentons d'aller de l'échelle de la botte à celle du mur, en proposant des pistes de réflexions à suivre.

L'influence du type de botte (dimension et densité)

En regardant les essais allemands (sans précompression, avec un protocole constant), on s'aperçoit que les bottes matelas présentent beaucoup moins d'évolution de la déformation dans le temps que les petites bottes (+10% et +300% de la déformation instantanée respectivement). Il semble que la réponse d'une petite botte à une haute charge instantanée soit très raide (avec un module de Young 3 à 10 fois plus haut que sous chargement progressif) et qu'ensuite la majeure partie de la déformation se fasse dans les semaines suivantes. Au contraire, les bottes matelas plus denses se déforment instantanément puis ne bougent pas beaucoup. Ainsi :

- La petite botte de paille nue (non précomprimée) flue rapidement et de façon conséquente
- La botte matelas nue contient mieux son fluage mais celui-ci n'est pas nul

Nous ne savons pas si cette différence est due à la dimension des bottes ou à leur densité.

Piste 1 : La densité. Les bottes plus denses (+20-40kg/m³) semblent moins fluer. Objectif : obtenir un pourcentage de déformation de fluage pour chaque plage de densité de bottes.

Piste 2 : Le format de botte. Plus la botte sera haute (quand posée à plat) plus l'écrasement des millimètres superficiels représentera un petit pourcentage de déformation. Ainsi une petite botte aura une déformation plus forte en % de hauteur. Dans une botte le réarrangement des fibres crée une déformation irréversible. Est-ce que cette déformation irréversible estimée et connue pour des chargements courts est différée dans le temps ? Si oui elle pourrait expliquer une différence entre les petites bottes et les grandes de densité égales dans leur réponse au fluage.

L'influence de la précompression du mur

La comparaison des résultats d'essais sur petites bottes suggère que la précompression des petites bottes effectuée aux essais de Nîmes a considérablement limité le fluage de la paille nue sans l'annuler pour autant.

Si la réponse de la part de fluage est très sensible à la densité, alors la précompression pourrait être envisagée comme outil pour diminuer le fluage en augmentant de 5 ou 6kg/m³ la densité.

Si la réponse en fluage n'est sensible qu'à de grandes variations de densité (+20kg/m³) alors la précompression ne saurait influencer le fluage par le faible changement de densité qu'elle implique.

Même dans ce cas, il n'est pas exclu que la précompression ait un effet notable sur le fluage, par un autre mécanisme que le changement de densité. Par exemple par l'élimination de la phase d'écrasement initiale irréversible du mur, qui est potentiellement moins différée dans le temps s'il y a précompression.

Piste 3 : La précompression influe-t-elle sur le fluage ? En termes pratiques, est-il possible d'annuler le fluage grâce à de la précompression ? Pour l'instant seul le mur de l'essai de Nîmes est précomprimé.

Le temps de stabilisation de la déformation dans le temps

En regardant les essais américains (non précomprimés), il semble qu'après 3 mois la déformation n'évolue presque plus, ces bottes sont tenues latéralement sur les grands côtés, ce qui a sûrement un effet stabilisant.

En regardant l'essai français, on constate que le temps de stabilisation (4 mois) n'est pas le même pour un mur de même hauteur, légèrement moins dense et moins chargé.

Piste 4 : La charge. Le temps de stabilisation de la déformation diminue-t-il avec des hautes charges ?

Piste 5 : La stabilisation latérale. Des appuis latéraux horizontaux tels que les grillages mis en place dans l'essai américain permettent-ils à toute la botte de travailler et de mieux répartir les efforts ce qui diminuerait les déformations instantanées et de fluage ? Il semble que dans une botte non tenue latéralement, les fibres en extrême périphérie de la botte ne reprennent presque aucune pression.

Interrogation : pour une contrainte similaire (11 et 9 kPa) est-ce que seule la densité des bottes américaines leur a permis de stopper leurs déformations plus tôt que le mur de Nîmes ? Est-ce que le confinement entre des grilles métalliques latéraux a joué un rôle ? En tout cas la disposition des bottes en quinconce et la précompression de Nîmes sont moins efficaces pour diminuer le fluage que la haute densité et les grillages autour de la colonne de bottes américaine.

Recherches futures suggérées

Pour donner suite aux questionnements précédents, voici une suggestion d'essais futurs de fluage sur murs en paille nue :

Rappel : Tous les essais doivent être identiques (dimension, densité, précompression, charge, ...) à l'exception d'un seul paramètre variable d'un essai à l'autre, pour être exploitables scientifiquement.

- Faire varier **le niveau de charge** : 400, 600 et 900 kg/mètre linéaire sur 3 murs en petites bottes, (ce qui équivaut à des contraintes dans le mur de 8.9, 13.3 et 20 kPa)
- Faire varier **la précompression** : 3 à 6% de la hauteur du mur sur 3 autres murs (1cm/botte, 1.5cm/botte, 2cm/botte)
- Faire varier **la densité des bottes** : 100, 110, 120 kg/m³ sur 3 murs

Avec 9 murs test on aurait un panel raisonnable de résultats avec notamment un mur standard qui aura été fait trois fois (charge 400kg/ml, précompression 5%, densité 100kg/m³) et dont on connaîtra enfin bien le comportement. L'essai de Nîmes 2017 peut servir de référence car nous disposons de toutes les données de cet essai.

La déformation à la précompression, au chargement, à une semaine, à un mois, et la stabilisation des déformations sont les résultats importants à mesurer.

Conclusions

La rigueur scientifique nous empêche de tirer des conclusions générales avec si peu de données.

Bien que la poursuite de la recherche sur le sujet soit essentielle, on peut tirer quelques premières préconisations pour les constructeurs sur le sujet : La présence du fluage dans les murs porteur en bottes de paille nue est indiscutable, à l'échelle d'une semaine son effet se mesure en millimètres, à l'échelle d'un mois en centimètres. L'ampleur du phénomène dépend du type de bottes, de la densité des bottes et de la charge posée sur le mur.

Pour gérer ces tassements, les systèmes de calages actuellement pratiqués par beaucoup, la fixation de la lisse aux poteaux bois adjacent ou le durcissement des « enduits » sont fréquemment utilisés. Ces « enduits » devraient s'appeler logiquement voiles minces travaillant puisqu'ils sont épais d'environ 4cm, ils peuvent être en terre, chaux, plâtre etc.

De plus, il semble conseillé de ne pas charger de manière hétérogène les murs en paille nue avant de les enduire ou fixer, car différentes vitesses de fluage ont été observées pour des cas de charges différents, ce qui peut induire des tassements différentiels.

Une approche pour gérer le fluage et les tassements différentiels peut être imaginée pour les situations de chantier :

- *Identifier les murs qui seront chargés plusieurs semaines avant d'être enduits ou avant d'être fixés à une ossature bois. Fixer les lisses hautes à des étais/poteaux bois temporaires en tête de mur pour stopper les tassements de fluage. Démontez ces poteaux quand l'enduit a pris ou que d'autres points de liaisons à l'ossature rigide (précadres de menuiseries) ont été trouvés.*

Bibliographie

Jérôme Quirant, Julien Averseng, Cédric Hamelin. *Murs en paille porteuse: mise en œuvre et comportement*. 36ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Jun 2018, Saint-Etienne, France. Actes des 36ème Rencontres Universitaires de Génie Civil. <<https://rugc2018.sciencesconf.org/>>. <hal-01863407>

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

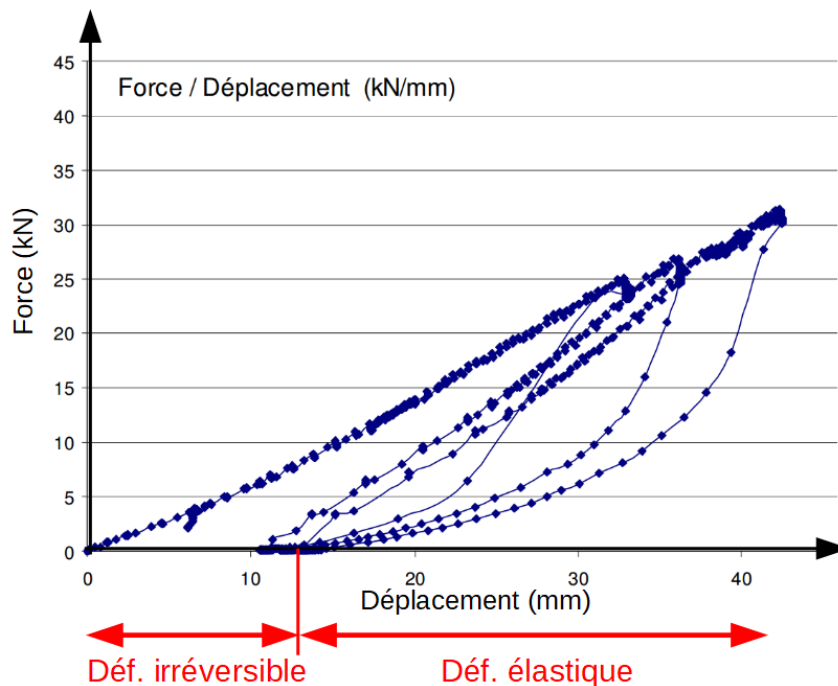
SMITH D. ; « *Creep in Bale Walls* », Rapport pour l'Ecological Building Network, San Rafael, CANADA, 9p, 2003.

ANNEXE – La mécanique de la botte de paille en compression

On distingue trois composantes dans la réponse d'une botte de paille chargée en compression :

- La réponse plastique, appelé écrasement.
- La réponse élastique, instantanée.
- La réponse différée (dans le temps), fluage.

Le graphique suivant de l'essai de compression avec cycles chargement/déchargement, fruit des études menées avec l'IUT de Nîmes, illustre les réponses plastiques et élastiques :



L'écrasement, déformation irréversible = plastique.

Lors du chargement, instantanément, des déformations élastiques et plastiques se produisent. C'est-à-dire qu'au déchargement, il reste une part de déformation irréversible et la botte ou le mur de paille ne revient pas à son état initial. Différentes études ont tenté de quantifier la déformation irréversible maximum que l'on peut obtenir, on en tire un chiffre approximatif. Passé un certain seuil de chargement en compression (15% de déformation verticale), la botte de paille a une réponse uniquement élastique et une déformation plastique de 4 à 6% environ après déchargement.

Une explication de cette phase plastique dans la réponse initiale de la botte de paille pourrait être le tassement d'une zone peu dense de la botte, sa périphérie. Ainsi, les centimètres supérieurs et inférieurs de la botte posée à plat se videraient de leur air et réarrangeraient leurs fibres puis maintiendraient cette disposition moins volumineuse après déchargement. En chiffres : 6% de la hauteur d'une petite botte correspond à 2cm de déformation plastique, soit 1cm sur la face inférieure et 1cm sur la face supérieure de réarrangement des fibres périphériques. 4% de la hauteur d'une botte « matelas » de 50cm de haut correspond aussi à 2cm de déformation plastique.

La réponse élastique

La réponse élastique est souvent modélisée par une loi élastique de comportement avec pour module élastique des valeurs entre 0.2 et 0.8 MPa.

La réponse différée dans le temps

Il est difficile de dire si elle est plastique ou plutôt réversible après déchargement. Cette question n'ayant pas d'importance particulière pour l'application sur chantier, où il n'y a pas de déchargement, elle n'est pas l'objet des recherches en cours.

Dans un essai de fluage on voit donc apparaître en premier les déformation plastiques et élastiques, puis la déformation de fluage. Les déformations dites instantanées ont lieu avec les bottes de paille en quelques secondes ou quelques heures selon les études. L'illustration suivante des essais sur bottes matelas de la FASBA rappelle donc la chronologie des déformations après un chargement instantané maintenu constant :

