



HAL
open science

Murs en paille porteuse : contribution à la qualification en tant que solution constructive

Julie Lossignol

► **To cite this version:**

Julie Lossignol. Murs en paille porteuse : contribution à la qualification en tant que solution constructive. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Montpellier, 2023. Français. NNT : 2023UMONS092 . tel-04806680

HAL Id: tel-04806680

<https://theses.hal.science/tel-04806680v1>

Submitted on 27 Nov 2024

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.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Mécanique, Génie Civil et Architecture

École doctorale I2S – Information, Structure, Système

Unité de Recherche UMR5508 LMGC – Équipe SIGECO

Murs en paille porteuse : contribution à la qualification en tant que solution constructive

Présentée par Julie LOSSIGNOL

Le 17 novembre 2023

Sous la direction de Jérôme QUIRANT

et Julien AVERSENG

Devant le jury composé de

Stéphanie BONNET	Professeure	Université de Nantes	Présidente
Évelyne TOUSSAINT	Professeure	Université Clermont-Auvergne	Rapporteure
Thibaut LECOMPTE	Maître de conférences HDR	Université Bretagne Sud	Rapporteur
Delphine JULLIEN	Professeure	Université de Montpellier	Examinatrice
Cédric HAMELIN	Architecte DPLG	Bureau d'architecture BOHA	Invité
Philippe DEVILLERS	Professeur	École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier	Invité
Julien AVERSENG	Maître de conférences	Université de Montpellier	Encadrant de thèse
Jérôme QUIRANT	Maître de conférences HDR	Université de Montpellier	Directeur de thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

Résumé

La construction en paille porteuse est apparue au Nebraska (Etats-Unis) à la fin du XIX^{ème} siècle avec l'invention de la botteuse. Cette méthode constructive, appelée également paille structurelle ou technique Nebraska intéresse de plus en plus les auto-constructeurs mais aussi les professionnels sensibles aux valeurs associées à l'écoconstruction et l'utilisation de matériaux bio-sourcés.

Bien que la paille soit reconnue comme isolant, rares sont les travaux pour qualifier la paille en tant qu'élément porteur. Les performances thermiques sont mises en avant et bien détaillées mais les qualités spatiales et structurelles sont souvent omises. Les ouvrages techniques sur la construction paille sont rares et ceux portant uniquement sur la technique Nebraska le sont davantage. Concernant les travaux de recherche, beaucoup d'articles proviennent de l'étranger et traitent des essais expérimentaux sur bottes ou murs notamment en compression mais ceux faisant cas de sollicitations telles que le flambement, le fluage, la relaxation, etc. sont quasi-inexistants.

La redécouverte de la paille a une trentaine d'années et il n'existe pas à ce jour de norme officielle en France. En 2012, le Réseau Français de la Construction Paille (RFCP) a publié les Règles Professionnelles de Construction en Paille. Cet ouvrage se focalise essentiellement sur la paille en tant qu'isolant et support d'enduit. Il répertorie des méthodes de mise en œuvre et des détails techniques à la manière d'un DTU et est également utilisé comme garantie auprès des assureurs.

Le secteur de la construction en paille vit ainsi un essor retentissant. En effet, la conscientisation de l'appauvrissement des ressources et de la pollution engendrée par la construction conventionnelle a permis de valoriser l'emploi de matériaux biosourcés. Actuellement, la problématique imprègne et définit l'orientation des choix et des pratiques à la fois des concepteurs mais également des constructeurs.

L'acceptation de l'idée même qu'un coproduit agricole puisse constituer un matériau de base pour la construction passe par le déblocage de verrous qui sont surtout d'ordre psychologique. Ajoutées à cela, les craintes d'incendies ou d'attaques de ravageurs (rongeurs, champignons) sont autant de facteurs qui suscitent la méfiance. La déconstruction de ces idées préconçues passe par une approche méthodique, en l'étayant par des études scientifiques rigoureuses. Leur validation aidera ainsi à la minimisation de tout risque et aléa. Les préjugés ont évolué quant à l'utilisation de la paille en tant qu'isolation thermique puisqu'elle représente aujourd'hui une part croissante du marché. Cependant pour ce qui est de son rôle d'élément structurel, plusieurs interrogations doivent encore être levées.

Mots-clés : Fluage, structure, eco-construction, bottes de paille, DIC

Abstract

Load-bearing straw construction first appeared in Nebraska (USA) at the end of the 19th century with the invention of the bundling machine. This construction method, also known as structural straw or the Nebraska technique, is of growing interest to self-builders and also to professionals sensitive to the values associated with eco-construction and the use of bio-sourced materials.

Although straw is recognised as an insulator, there is very little research into the use of straw as a load-bearing element. Its thermal performance is highlighted and well detailed, but its spatial and structural qualities are often omitted. Technical works on straw construction are rare, and those dealing solely with the Nebraska technique are even rarer. As far as research work is concerned, many articles come from abroad and deal with experimental tests on bundles or walls, particularly in compression, but those dealing with stresses such as buckling, creep, relaxation, etc. are almost non-existent.

Straw was rediscovered some thirty years ago, and to date there is no official standard in France. In 2012, the Réseau Français de la Construction Paille (RFCP) published the Professional Rules for Straw Construction. This publication focuses primarily on straw as an insulator and plaster base. It lists installation methods and technical details in the manner of a DTU, and is also used as a guarantee by insurers.

As a result, the straw construction sector is enjoying a resounding boom. Awareness of the depletion of resources and the pollution caused by conventional construction has helped to promote the use of bio-sourced materials. Today, this issue is influencing and shaping the choices and practices of both designers and builders.

Acceptance of the very idea that an agricultural by-product can be used as a basic building material requires the unlocking of a number of psychological barriers. Added to this, fears of fire or attacks by pests (rodents, fungi) are all factors that give rise to mistrust. Deconstructing these preconceived ideas requires a methodical approach, backed up by rigorous scientific studies. Validating these studies will help to minimise all risks and hazards. Preconceptions about the use of straw as thermal insulation have changed, with straw now accounting for a growing share of the market. However, when it comes to its role as a structural element, there are still a number of questions to be answered.

Keywords : Creep, structure, ecoconstruction, straw bales, DIC

Remerciements

Merci à Jérôme Quirant et Julien Averseng de m'avoir acceptée en thèse, et de m'avoir permis de poursuivre mon intérêt pour le génie civil, l'architecture et l'éco-construction. Merci surtout à Jérôme de m'avoir proposé un sujet aussi original, pourtant assez peu côté il y a quelques années mais qui a pu se réaliser grâce à un financement de l'ENS Paris-Saclay. Cette thèse m'a permis de me réorienter après avoir côtoyé le milieu ferroviaire pendant deux ans.

Merci aussi à eux et surtout Jérôme de m'avoir soutenu pendant les épreuves personnelles que j'ai traversées. Tu m'as bien aidé notamment durant la dernière année. Ta générosité et ta disponibilité m'ont beaucoup touchée. Je remercie Thibault Lecompte et Evelyne Toussaint d'avoir accepté de relire ce manuscrit de thèse. Merci également à Stéphanie Bonnet d'avoir bien voulu présider mon jury de thèse et à Delphine Jullien d'avoir examiné mes travaux. Merci enfin à Philippe Devillers et Cédric Hamelin d'avoir accepté de participer au jury. Concernant Cédric et sa compagne Mathilde, merci pour votre soutien durant mes phases de découragement et votre grande disponibilité. Vous m'avez ouvert les portes du RFCP en acceptant de m'impliquer dans l'élaboration des Règles Professionnelles de la Construction en Paille Porteuse. Je tiens par ailleurs à remercier tout le groupe Paille porteuse du RFCP : Gil, Volker, Edouard, Sami, Isabelle, Marie-Colette, Peter, Jean-Pierre, Thierry et Benoît.

Un grand merci à Yann Monerie, président de l'Ecole doctorale qui a joué un rôle crucial et qui a orienté positivement le cours de ma thèse.

Je voudrais également mentionner des personnes, rencontrées à divers moments de mon parcours un peu hors norme de par les nombreuses difficultés qui l'ont jalonné et qui m'ont obligé à faire des des tours et des détours pour en arriver où j'en suis aujourd'hui. Mes meilleures pensées vont vers Charles et Coralie rencontrés à l'ENS. Merci à mes anciens collègues de la SNCF qui sont devenus rapidement de très bons amis : Hélène, Hugues, Cécile, Alex, Marie et Jeff qui m'ont soutenu dans ma reconversion professionnelle et dans ma vie personnelle. Nos moments de franche rigolade me manquent terriblement.

Merci à Nesrine rencontrée en début de thèse malheureusement le Covid est passé par là. J'aurais bien aimé qu'on se voit plus mais je tiens à dire que le début de la thèse aurait été bien triste sans toi. Mon déménagement à Nîmes hors site ne m'a pas permis de beaucoup côtoyer les nouveaux doctorants mais j'ai quand même une petite pensée pour vous : Jacintha, Vathana, Sirine et tous les autres.

Ma thèse n'aurait jamais pu aboutir sans les techniciens de l'IUT de Nîmes : Mathias, Arnaud et Daniel. Que ce soit pour la construction du local d'essais, la mise en place des essais, votre polyvalence et votre disponibilité ont été sans égales. Et c'est sans mentionner votre bienveillance et votre humour à toute épreuve. De ce côté-là, Fred a rejoint dans mon cœur mon groupe de « grands frères ».

Je remercie l'équipe technique de la halle méca notamment Jonathan et également l'équipe enseignante du département GC de l'IUT de Nîmes. Merci à Rémy et Fred pour leur patience dans la gestion de Guacamole entre autre ainsi qu'à l'équipe de BIATS du LMGC : Caroline, Isabelle et Cyril.

Merci également aux élèves que j'ai encadrés et qui ont apporté leur patte à la thèse : Elian, Paul et Pierre, Marco ainsi qu'Eva et Adrien plus récemment.

Mes meilleures pensées vont vers des personnes devenues chères à mon cœur et rencontrées cette année au sein de notre petite communauté virtuelle, Simon, Flo et Matt notamment. Je n'oublie pas mes amis Nîmois sans qui mon passage dans la ville gardoise n'aurait pas été pareil : Christelle et sa famille, Ludo et Yann.

Cette fin de marathon n'aurait pas été aussi heureuse. Votre soutien et votre bonne humeur y ont été pour beaucoup...

Enfin, toute ma gratitude va vers mes parents et ma sœur qui m'ont soutenue dans mes choix et encouragée tout au long de ce travail.

Introduction

La construction en paille porteuse est apparue au Nebraska (Etats-Unis) à la fin du XIX^{me} siècle avec l'invention de la botteleuse. Dans cette région, l'absence de ressources nécessaires à la réalisation de bâtiments conventionnels en maçonneries a mené à l'exploitation d'un produit nouveau : la botte de paille. Depuis, cette technique a évolué, de plus en plus de bâtiments ont vu le jour et sont toujours en très bon état.

La maison Feuillette, construite en 1921 à Montargis, est par ailleurs un exemple de durabilité en raison de son excellente conservation. Elle abrite actuellement le Centre National de la Construction Paille (CNCP – Émile Feuillette) qui est une association en activité depuis 2006, Elle compte parmi ses membres divers acteurs de la construction paille en France, et œuvre pour la valorisation de l'utilisation de la paille en éco-construction.

La paille porteuse, qui est connue également sous d'autres appellations telles que paille structurelle ou technique Nebraska, intéresse de plus en plus les auto-constructeurs mais aussi les professionnels sensibles aux valeurs associées à l'écoconstruction et l'utilisation de matériaux bio-sourcés.

Bien que la paille soit reconnue, rares sont les travaux pour qualifier la paille en tant qu'élément porteur. Nombre de récits faisant état de l'édification de ce type de bâtiment sont accessibles sur Internet mais très peu explicitent les aspects techniques de manière précise et objective. La paille porteuse est abordée dans des ouvrages sur la construction paille de manière généralement succincte. Les performances thermiques sont mises en avant et bien détaillées mais les qualités spatiales et structurelles sont souvent omises. Les ouvrages techniques sur la construction paille sont rares et ceux portant uniquement sur la technique Nebraska le sont davantage. Concernant les travaux de recherche, beaucoup d'articles traitent des essais expérimentaux sur bottes ou murs notamment en compression, mais ceux faisant cas de sollicitations telles que le flambement, le fluage, la relaxation, etc. sont quasi-inexistants. Que la démarche soit technique ou purement scientifique, les publications abondent surtout dans la littérature étrangère.

La redécouverte de la paille est récente, au milieu des années 90, et il n'existe pas à ce jour de norme officielle en Europe. En 2012, le Réseau Français de la Construction Paille (RFCP) a publié les règles professionnelles de construction en paille [RFCP2012]. Cet ouvrage se focalise essentiellement sur la paille en tant qu'isolant et support d'enduit. Il répertorie des méthodes de mise en œuvre et des détails techniques à la manière d'un DTU et est également utilisé comme garantie auprès des assureurs. Concernant la paille porteuse, des Règles Professionnelles de la Construction en Paille Porteuse sont en cours d'examen [RFCP2023].

Le secteur de la construction en paille vit ainsi un essor retentissant. Dans son dernier recensement en 2018, le RFCP estimait à 5000 le nombre de bâtiments en paille [RFCP2018]. Ils sont de plus en plus divers : logements individuels et collectifs, écoles, bureaux, etc. ce qui démontre un intérêt croissant des particuliers mais également des institutions publiques pour ce secteur.

En effet, la conscientisation de l'appauvrissement des ressources (le sable par exemple) et de la pollution engendrée par la construction conventionnelle a permis de valoriser l'emploi de matériaux biosourcés. Afin de freiner les déséquilibres environnementaux engendrés par l'activité humaine, ceux-ci sont devenus plus que jamais des solutions d'avenir. Si la construction d'une maison a toujours été motivée par le besoin fonctionnel de s'abriter, elle doit s'accompagner de notre devoir de protection vis-à-vis de notre environnement.

Actuellement, la problématique imprègne et définit l'orientation des choix et des pratiques à la fois des concepteurs mais également des constructeurs.

L'acceptation de l'idée même qu'un coproduit agricole puisse constituer un matériau de base pour la construction passe par le déblocage de verrous qui sont surtout d'ordre psychologique.

Le conte de Joseph Jacobs « Les trois petits cochons », adapté par Walt Disney en 1933, a laissé sa marque dans l'imaginaire collectif. Près d'un siècle plus tard, en ridiculisant ainsi la paille, celle-ci reste pour le grand public un matériau qui ne peut pas être suffisamment solide pour constituer la structure d'une maison. Ajoutées à cela, les craintes d'incendies ou d'attaques de ravageurs (rongeurs, champignons) sont autant d'épouvantails qui

suscitent la méfiance. Pourtant, lors de la qualification de la paille comme isolant, de nombreux essais ont montré qu'en étant suffisamment comprimée, les brins de paille ne contiennent plus assez d'air, et donc d'oxygène, pour permettre un embrasement du matériau. De plus, si la mise hors d'eau a été bien réalisée, la moisissure ne prolifère pas.

La déconstruction de ces idées préconçues passe par une approche méthodique, en l'étayant par des études scientifiques rigoureuses. Leur validation aidera ainsi à la minimisation de tout risque et aléa. Les préjugés ont évolué quant à l'utilisation de la paille en tant qu'isolation thermique puisqu'elle représente aujourd'hui une part croissante du marché. Cependant pour ce qui est de son rôle d'élément structurel, plusieurs interrogations doivent encore être levées.

Afin d'y répondre, quatre grandes thématiques sont développées dans ce mémoire.

Dans la première partie, je présenterai la paille porteuse dans sa globalité. Une mise en perspective historique et une analyse des enjeux écologiques me permettront d'introduire le matériau paille dans son contexte. Je traiterai de l'utilisation de la paille en France et des ressources disponibles pour la construction.

Ensuite, j'aborderai plus en détails la composition de la paille ainsi que les différentes techniques de mises en œuvre en paille porteuse.

Les freins possibles au développement de la paille porteuse étant nombreux, j'analyserai ceux qui paraissent les plus bloquants : les origines des préjugés suscités par le matériau en lui-même, l'aspect financier et enfin une comparaison entre le cadre législatif et réglementaire instaurés à l'étranger et en France.

Dans la même idée, je présenterai les tests au feu effectués récemment et les classements obtenus. Je résumerai aussi la raison pour laquelle la paille n'est pas plus exposée à l'installation des ravageurs qu'un autre matériau isolant.

Enfin, comme pour tout mode constructif, le principal facteur d'altération potentiel est l'eau. Des mesures sont à déployer pour s'en prémunir.

Dans la seconde partie, je m'intéresserai aux performances structurelles de la paille porteuse en balayant tous les essais qui ont été effectués sur des bottes et des murs nus ou enduits durant les trente dernières années. Il est surtout question d'essais expérimentaux notamment en compression et en cisaillement. Cependant il existe très peu d'essais de fluage, de flambement et de relaxation. Les retours d'expérience des constructeurs m'ont permis de prêter attention au phénomène de fluage.

En effet, entre le moment où les murs sont édifiés et la pose du niveau suivant (étage supérieur, toiture), il peut se passer plusieurs semaines voire plusieurs mois avant que les tassements se stabilisent. La pénurie de données empêche une prédiction précise de la durée de fluage et de la valeur de tassement final durant la phase chantier. Cela ne permet pas d'anticiper l'organisation des travaux de manière précise et cela peut avoir un impact financier qui n'est pas forcément négligeable.

La qualification et la quantification du fluage dépend de nombreux facteurs. C'est ce que j'exposerai dans cette troisième partie. Dans un premier temps, je présenterai mes choix expérimentaux qui ont mené au dimensionnement et à la construction d'un local d'essais. Des essais de compression sur bottes étaient nécessaires afin d'évaluer le module d'Young du matériau paille.

Je détaillerai les différents protocoles expérimentaux des essais de fluage dans lesquels plusieurs paramètres seront étudiés de même que leur impact sur le comportement de murs en paille porteuse. J'y exposerai également les différents résultats obtenus et les analyses qui ont pu en découler.

Sommaire

Résumé	1
Abstract	2
Remerciements	3
Introduction	4
1 Qu'est-ce que la paille porteuse ?	13
1 Introduction	13
2 La paille	14
2.1 Agriculture	14
2.2 Energie	14
2.3 Phytotechnologie	15
2.4 Construction	15
2.5 Concurrence vis-à-vis des autres domaines d'emploi	16
3 La botte de paille	17
3.1 Description	17
3.2 Récolte et conditionnement	18
3.3 Conditions d'utilisation	19
4 Description des méthodes constructives en bottes de paille	19
4.1 Ossature bois – paille non porteuse	20
4.2 Technique mixte - ossature bois/paille de type cellule sous tension	21
4.3 Paille porteuse (technique Nebraska)	21
5 Répartition des modes constructifs	31
6 Potentialités de la construction en paille	31
6.1 Avantages de la construction paille	32
6.2 Freins au développement	38
7 Développement des pratiques en paille porteuse	49
7.1 Recensement des pratiques en paille porteuse de type Nebraska	49
7.2 Acculturation et formation	52
8 Conclusion	56
2 Etat de l'art	57
1 Introduction	57
2 Compression	58
2.1 Essais sur bottes en paille nue	59
2.2 Essais sur bottes enduites	65
2.3 Essais sur murs en paille nue	66
2.4 Caractérisation des enduits	68
2.5 Essais sur murs enduits	76
2.6 Analyse et conclusion	79
3 Fluage	80
3.1 Essais sur bottes	80
3.2 Essais sur murs	80
4 Relaxation	82
4.1 Essais de relaxation standards sur bottes	82
4.2 Essais de relaxation combinés à des situations accidentelles sur bottes	84
4.3 Essais sur murs	84

4.4	Conclusion	86
5	Cisaillement	86
5.1	Essais sur bottes	87
5.2	Essais sur murs	89
6	Essais cycliques ou essais sismiques sur murs	91
7	Flexion – Chargement hors-plan	94
8	Essais d'impact	95
9	Conclusion	98
3	De la botte à la structure :	
	études expérimentales	99
1	Introduction	99
2	Protocoles expérimentaux	99
2.1	Essai de compression sur bottes et enduit	100
2.2	Fluage	105
2.3	Cisaillement	115
3	Résultats et analyse	119
3.1	Compression	119
3.2	Fluage	125
3.3	Cisaillement	135
4	Conclusion	140
	Conclusion	141
	Annexes	143
1	Annexe A : Préparation des murs pour les essais de cisaillement	143
2	Annexe B : Modèles rhéologiques	146
	Références	156
1	Ouvrages	156
2	Articles scientifiques	156
3	Articles et rapports de presse	160
4	Rapports de tests et de recherche	160
5	Normes et réglementations	161
6	Textes législatifs	161
7	Films et vidéos	161
8	Sites web	162

Liste des tableaux

1.1	Exemples de dimensions de bottes de paille	18
1.2	Teneur en eau sur poids sec de la paille	19
1.3	Caractéristiques des ficelles de liage – (Source : Extrait de catalogue Tama)	23
1.4	Captage et émission de carbone de la paille dans le temps	33
1.5	Comparaison des émissions de CO ₂ en fonction du mode constructif - Source : Base INIES	33
1.6	Performances thermiques en fonction de l'orientation des brins pour les petites bottes ($\rho < 120$ kg/m ³) – (Source : RFCP (2023))	37
1.7	Résumé des avantages selon l'orientation des brins pour les petites bottes – (Source : RFCP (2023))	37
1.8	Résultats des essais d'isolation acoustique – (Source : FASB2008)	38
1.9	Réflexion autour des facteurs de dégradation de murs en paille	41
1.10	Critères de perméabilité - (Source : RFCP (2018))	42
1.11	Résultats des essais au feu de Intertek – (Source : Intertek (2006))	46
2.1	Essais cycliques de compression sur bottes en paille nue – (d'après Quirant et al. (2018))	61
2.2	Synthèse des coefficients de Poisson	64
2.3	Résultats des essais de compression sur grosses bottes à plat du FASBA	64
2.4	Tableau récapitulatif des essais de compression sur bottes enduites	66
2.5	Résultats des essais sur murs en paille nue - (d'après Blum (2002))	67
2.6	Tableau récapitulatif des essais sur murs en paille nue	68
2.7	Résultats des essais de compression sur briques de terre crue (d'après El-Gharbi, 1993)	68
2.8	Résultats des essais de compression sur enduit chaux et terre – (d'après Abdaless (2009))	68
2.9	Caractéristiques et résultats des essais – (d'après Taylor et al. (2006))	69
2.10	Caractéristiques des enduits ciment - (d'après Lerner, Donahue (2003))	70
2.11	Influence du taux sable/paille sur la contrainte maximale et sur le module d'élasticité des enduits terre – (d'après Lerner, Donahue (2003))	70
2.12	Influence de la nature de l'enduit et du taux de fumier dans les enduits terre-fumier sur la contrainte maximale – (d'après Jafferji (2011))	73
2.13	Influence de la nature de l'enduit et du taux de fibres dans les enduits terre-fibres sur la densité sèche – (d'après Ashour et al. (2010))	74
2.14	Influence de la nature de l'enduit et du taux de fibres dans les enduits terre-fibres sur la teneur en eau – (d'après Ashour et al. (2010))	75
2.15	Influence de la nature de l'enduit et du taux de fibres dans les enduits terre-fibres sur le taux d'érosion – (d'après Ashour et al. (2010))	75
2.16	Influence de divers paramètres sur le module d'élasticité et la résistance en compression du mur (d'après MacDougall (2008))	77
2.17	Résultats des essais sur bottes – (d'après MacDougall 2005)	78
2.18	Synthèse des résultats des essais – (Source : Danielewicz et al. (2008))	83
2.19	Synthèse des résultats des essais de cisaillement sur bottes	89
2.20	Caractéristiques des murs enduits – (Source : Vieux-Champagne et Sieffert (2022))	90
2.21	Résultats des essais de cisaillement sur murs	90
2.22	Valeurs recommandées de R en fonction du mode constructif	92
2.23	Synthèse du type de liaison en tête et en pied de mur	94
2.24	Résultats des essais d'impact – (d'après Bilello (1999))	95
2.25	Résultats des essais d'impact sur un mur – (d'après Quirant et al. (2018))	97
3.1	Caractéristiques des ficelles - (Source : Extrait des données catalogue TAMA)	101
3.2	Composition des enduits	103
3.3	Mesures de tassement à l'état initial avec précompression – Première série	109
3.4	Mesures de tassement à l'état initial avec précompression – Deuxième série	110

3.5	Chargement à l'état initial pour la première série d'essais	110
3.6	Formulation des enduits de corps pour chaque mur	116
3.7	Synthèse des déformations verticales des murs et des charges de précompression correspondantes	117
3.8	Module d'élasticité (E) des bottes des lots 1 et 2 sous essais cycliques	120
3.9	Résultats des essais de compression sur éprouvette 4x4x16 jusqu'à la rupture	124
3.10	Evolution de la déformation verticale en fonction du temps (heures) de la pile 5	130
3.11	Mesures de fluage à l'état initial avec précompression	131
3.12	Mesures de fluage après retrait des sangles	132
3.13	Mesures de chargement à l'état initial après chargement et à l'état final après 8 mois	132
3.14	Perte ou gain de charge	132
3.15	Tableau - Calcul du module d'Young apparent après précompression et chargement	133
3.16	Tableau - Calcul de la masse volumique d'une botte après chargement	134
3.17	Compositions d'enduit pour chaque mur	136
3.18	Comparaison des courbes de contraintes en cisaillement en tête de mur	139

Liste des figures

1.1	Simonton House à Purdum, Nebraska, 1908	13
1.2	CRER, Centre Régional des Energies Renouvelables, La Crèche (79) – (Source : CAUE 17)	13
1.4	Etapes de production de biocarburants - (Source : IFPEN(2010))	14
1.3	Schéma du processus de production de bioéthanol – (Source : Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022))	15
1.5	Volumes théoriques disponibles (VTD) régionaux de paille de céréales 2019 en milliers de tonnes de matière sèche/an – (Source : ONRB (2020))	16
1.6	Description des dimensions et appellations.	17
1.7	Botteleuses à canal latéral à gauche et à canal central à droite – (Source : Catalogue Série 1800 - Massey Ferguson)	18
1.8	Humidimètre	19
1.9	Techniques de construction en paille non-porteuse.	20
1.10	Technique CST - (Source : Rijven (2007))	21
1.11	Schéma d'un mur en paille porteuse enduit - (Source : RFCP (2018))	22
1.12	Orientation des brins de paille en fonction du type de botteleuse	23
1.13	Refaçonnage des têtes de botte	24
1.14	Redimensionnement des bottes	24
1.15	Montage d'un mur selon la technique Nebraska	25
1.16	Entretoises percées à la scie cloche avec sangles blanches définitives enroulées ("escargots") en attente – (Source : RFCP (2023))	25
1.17	Chênevotte - (Source : Extrait catalogue Socli)	26
1.18	Eléments en bois	26
1.19	Coupe d'un mur de bottes issues d'une botteleuse à canal latéral : l'asymétrie des bottes accentue le risque de flambement - (Source : RFCP (2023))	27
1.20	Vue en plan d'une botte - Distance limite entre l'emplacement de la broche et le bout de la botte – (Source : RFCP (2023))	27
1.21	Précompression via les sangles à cliquets	29
1.22	Utilisation d'un tirefort - (Source : IUT Nîmes (2017))	29
1.23	Maintien des sangles définitives	30
1.24	Echantillons d'enduit terre – (Source : Pedernagna (2015))	30
1.25	Répartition des systèmes constructifs les plus courants en construction paille – (Source : RFCP web (2023))	31
1.26	Etapes du cycle de vie d'un produit organique, émissions de CO ₂ fossile et cycle du carbone issu de la biomasse	32
1.27	Tableau comparatif des matériaux isolants thermiques pour isoler un bâtiment neuf ou en rénovation - (Source : PicBleu (2023))	34
1.28	Distance d'approvisionnement des chantiers d - (Source : LRA (2014))	36
1.29	Comparaison des performances thermiques	38
1.30	Désordres à l'origine d'altérations structurelles et hygrothermiques au sein d'un ouvrage en paille porteuse - (Source : RFCP (2018))	40
1.31	Pose d'un témoin au mortier de plâtre - (Source : RFCP (2023))	44
1.32	Classement de réaction au feu - (Source : extrait de la norme EN 1350-1)	47
1.33	Règles professionnelles de construction en paille [RFCP2018]	48
1.34	Evolution du nombre de publications avec les mots-clés «Straw+bales+construction » dans Elsevier	49
1.35	Modèle en treillis - (Source : Braun(2020))	51
1.36	Maison en paille porteuse à Grenoble : (a) Des brise-soleil orientables (BSO) protègent la paroi vitrée à l'est. Des canisses sont ajoutées l'été sur le vitrage sud ; (b) Salon et cuisine : murs enduits à la chaux - (Source : C. Hamelin et M.Lapierre (2017))	53

1.37	Formation à Villefontaine : (a) Montage d'un mur avant sanglage, (b) Détermination de la longueur moyenne d'une botte, (c) Cours théorique sur les matériaux, (d) Assemblage des lisses - (Source : Association Nebraska et Amàco (2020))	54
1.38	Chambre froide à Grenoble - (Source : Association Nebraska (2021))	55
1.39	Salle polyvalente à Villeurbanne - (Source : photothèque personnelle (2021))	55
2.1	Étapes d'une construction en paille porteuse suivant la technique Nebraska et phénomènes mécaniques associés	58
2.2	Mode de dégradation des murs en paille porteuse enduits - (Source : De Bouter (2006))	58
2.3	Schémas des désordres locaux - (Source : De Bouter (2006))	59
2.4	Dispositif d'essai de compression pour deux configurations différentes - (Source : Lecompte, Le Duigou (2017))	60
2.5	Essais de compression sur bottes à plat et sur chant - (Source : Zhang (2002))	61
2.6	Synthèse des résultats des essais de compression sur petites bottes en paille nue disposées à plat	62
2.7	Synthèse des résultats des essais de compression sur petites bottes en paille nue disposées sur chant	63
2.8	Essais de compression sur murs en paille nue - (d'après Bou-Ali (1993))	67
2.9	Comparaison de la valeur de la résistance en compression des différents enduits - (M3) enduit dont la terre était composée de 69% de silt, 27% d'argile et de 4% de sable; (S1) mélange composé d'argile provenant du commerce ainsi qu'à des enduits ciment/chaux; (P1) enduit ciment avec un rapport E/C = 1,08; (P2) enduit ciment avec un rapport E/C = 1,18; (P3) enduit ciment avec un rapport E/C = 1,28 - (Source : Taylor et al. (2006))	70
2.10	Influence du rapport de volume de liant sur celui de sable sur la contrainte ultime - (Source : Vardy (2006))	71
2.11	Influence du rapport de volume de ciment sur celui de chaux sur la contrainte ultime - (Source : Vardy (2006))	71
2.12	Eprouvettes cylindriques d'enduits de différentes natures - (Source : Jafferji (2011))	72
2.13	Influence de la nature de l'enduit et du taux de fumier dans les enduits terrefumier sur la charge maximale [livre-force] - (Source : Jafferji (2011))	73
2.14	Essais de compression sur murs	76
2.15	Schéma de principe - (Source : Desille (2010))	78
2.16	Evolution du tassement en fonction de la mise en place du chargement - (Source : Walker (2004))	81
2.17	Evolution de la déformation verticale sur 14 mois de murs précomprimés, prise en différents points du mur - (Source : Bustarret et al. (2018))	82
2.18	Essais de relaxation : (a) Courbes des contraintes en fonction de la déformation imposée et de l'orientation de la botte -(b) Différence de contraintes et (c) contrainte asymptotique fonctions de la déformation imposée - (Source : Maraldi et al. (2018))	83
2.19	Essai de relaxation sur les bottes 6, 7, 9, 10, 13 Diminution de l'effort à déformation constante - (Source : Danielewicz (2008))	84
2.20	Courbe représentant la perte d'effort dans le mur 1 maintenu sous une déformation constante $\epsilon_h = 23, 5\%$ -Mesures du 13/09/2006 au 22/12/2006 (99 jours) - (Source : Danielewicz et al. (2008))	85
2.21	Courbe représentant la perte d'effort dans le mur 2 maintenu sous une déformation constante $h = 16\%$ -Mesures du 15/01/2007 au 26/04/2007 (101 jours) - (Source : Danielewicz et al.(2008))	85
2.22	Principe de fonctionnement du système paille-enduit en tant que poutre en I - (Sources : Principe établi par King et De Bouter (2009)- Schéma de Desille (2010))	86
2.23	Principe de fonctionnement du système paille-enduit en tant que poutre en I - (Sources : Principe établi par King et De Bouter (2009) -schéma de Desille (2010))	86
2.24	Schéma de principe de l'essai - (Source : Desille (2010))	87
2.25	Rupture au cisaillement de l'interface paille-enduit - (Source : Desille (2010))	88
2.26	Schéma du principe de l'essai de cisaillement sur bottes (a) - Botte enduite cisailée (b) - (Source : Rapport de PFE des étudiants de l'IUT de Nîmes (2019))	88
2.27	Essais de cisaillement sur murs en paille nue (d'après Bou-Ali (1993))	89
2.28	Cisaillement cyclique sur les murs 1 (a) et 2 (b) - (Source : Ramirez (1999))	91
2.29	Contrainte τ en fonction de la déformation pour les trois essais	93
2.30	Essais de flexion sur murs enduits - (d'après Donahue et al. (2003))	94
2.31	Essais d'impact sur un mur enduit - (Source : Quirant et al. (2018))	96
3.1	Planning des essais	100
3.2	Presse hydraulique	101
3.3	Dispositif d'essai de compression sur bottes	102
3.4	Vérin et capteurs de déplacement	102
3.5	Paille en vrac	103

3.6	Moule de fabrication des éprouvettes	104
3.7	Détails sur l'arasement des éprouvettes	104
3.8	Dispositif d'essais de compression sur enduit	105
3.9	Photos de l'abri avant travaux	107
3.10	Plans du local (Source : Conception par C.Hamelin et modifications par J.Lossignol	107
3.11	Photos du local après travaux	108
3.12	Montage d'une pile de bottes et précompression	108
3.13	Chargement des murs avec une cuve remplie de granulats	109
3.14	Prototypes de la série 2	110
3.15	Préchargement des murs avec des sangles à cliquet	111
3.16	Sélection des cibles	112
3.17	Principe de la corrélation d'images	112
3.18	Diagramme du processus d'acquisition	113
3.19	Système d'acquisition de données	114
3.20	Banc d'essai	115
3.21	Précompression des murs	116
3.22	Précompression des murs avec sangles définitives	117
3.23	Application de l'enduit sur les murs à l'échelle 1	118
3.24	Mesure de l'effort par dynamomètres	118
3.25	Localisation des points de mesure de déformation du mur	119
3.26	Comparaison des diagrammes contrainte-déformation	120
3.27	Evolution du module d'Young actualisé en fonction de la masse volumique pendant les cycles de compression	121
3.28	Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat lors du cycle 2	121
3.29	Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat	122
3.30	Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat	122
3.31	Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat	123
3.32	Résultats des essais de compression sur éprouvette 4x4x16 jusqu'à la rupture	124
3.33	Evolution du fluage sur les 6 piles et de la température moyenne dans le local	126
3.34	Evolution du fluage sur les 6 piles et du taux d'humidité moyen dans le local	126
3.35	Basculement de la lisse haute (rotation autour de l'axe y)	127
3.36	Basculement de la lisse haute pour les piles de 1 à 6	127
3.37	Relâchement de la sangle côté droit pour les piles 1 à 5	128
3.38	Relâchement de la sangle côté gauche pour les piles 1 à 5	128
3.39	Evolution du fluage et de la déformation en fonction du temps de la pile 5 - Chargement de 447 kg et taux de précompression de 5.07%	129
3.40	Evolution des tassements en fonction des phases de l'essai	131
3.41	Abaque : évolution du fluage en fonction du rapport $\frac{d_{prec}}{d_{tot}}$ à partir des résultats des piles 1 à 4	134
3.42	Evolution du fluage des piles en cours du temps (en semaines)	135
3.43	Schéma de principe de l'essai	136
3.44	Essai de cisaillement sur le mur 1	136
3.45	Essai de cisaillement sur le mur 2	137
3.46	Essai de cisaillement sur le mur 3	137
3.47	Essai de cisaillement sur le mur 4	138
3.48	Fissuration dans la bielle de compression	138
3.49	Courbes de contrainte- déformation en tête de mur (point A)	139

Chapitre 1

Qu'est-ce que la paille porteuse ?

1. Introduction

Dans ce chapitre, il est question de donner une vision d'ensemble sur la construction paille et notamment sur la paille porteuse. Cette partie présentera des généralités afin d'avoir une vision globale de cette technique et du contexte dans lequel elle s'est inscrite. Les différentes techniques de construction en paille seront présentées et une comparaison des avantages et inconvénients dans chaque cas permettra d'expliquer ce qui a motivé le choix de se focaliser sur la paille porteuse.

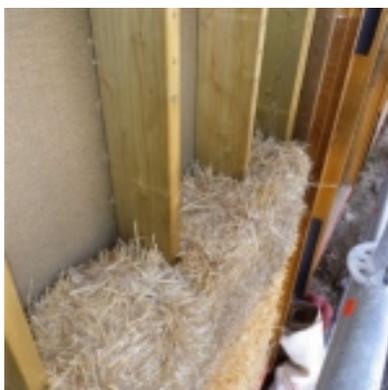
Mais tout d'abord, une courte mise en perspective historique permet de rappeler les origines de la construction paille. Ainsi, c'est en 1886 que la technique Nebraska apparaît avec l'invention de la botteuse aux États-Unis (Figure 1.1). Les grandes plaines sableuses du Nebraska, sur lesquelles aucun arbre ne pousse, amènent les pionniers à utiliser de la paille pour construire leurs maisons et les édifices publics. Certains bâtiments sont toujours occupés et sont bien conservés.



FIGURE 1.1. Simonton House à Purdum, Nebraska, 1908

En Europe, la maison Feuillette construite en 1920 dans l'entre-deux-guerres a mis en avant la construction paille. Là aussi, le manque de ressources a amené le concepteur, Emile Feuillette, à improviser en utilisant la botte de paille intégrée à une ossature en bois. Cette maison de 100 m² en R+1 est en excellent état. Elle est toujours utilisée puisqu'elle accueille à présent, le Centre National de la Construction Paille (CNCP) dont le but premier est la préservation du bâtiment et la création d'un espace consacré à la valorisation de la construction paille.

Dans les années 80, la construction paille connaît un regain d'intérêt en Europe. Depuis 20 ans, elle s'est développée et n'est plus seulement employée pour du logement individuel. En effet, la botte se déploie sur des bâtiments de toutes tailles : immeuble à plusieurs niveaux, hangars industriels et ERP (Figure 1.2).



(a) Isolation en paille



(b) Vue oblique

FIGURE 1.2. CRER, Centre Régional des Energies Renouvelables, La Crèche (79) – (Source : CAUE 17)

Plusieurs techniques de construction en paille ont vu le jour au cours du XX^{ème} siècle dans un premier temps par manque de ressources ce qui a permis de revaloriser un matériau qui a été longtemps sous-estimé car attribuer à une certaine pauvreté. Des préoccupations écologiques ont émergé vers la fin des années 90 et se sont accentuées ces 10 dernières années permettant ainsi le développement de ces techniques. Dans un premier temps, une description des différents usages de la paille permettra de vérifier si son emploi dans la construction fait de l'ombre à d'autres secteurs. Certaines méthodes constructives utilisent la paille comme élément de remplissage, d'autres l'utilisent comme éléments de structure porteurs. Quelles sont les méthodes constructives les plus connues et les plus utilisées ? Quels sont leurs avantages et leurs points faibles ?

C'est ce qui sera détaillé dans les paragraphes suivants afin d'expliquer la raison pour laquelle il a été décidé de s'intéresser aux potentialités de la paille porteuse.

2. La paille

La paille est un coproduit agricole issu directement de la production céréalière. C'est la tige de certaines graminées dites «céréales à paille» et est constituée d'une succession de nœuds et d'entre-nœuds. Elle est dépourvue d'épis et est principalement composée de cellulose, de lignine et de silice. Une couche de cire très fine et légèrement hydrofuge recouvre la paille. Ses dimensions, stables dans le temps, sont très peu affectées par les variations de température et d'humidité. Elle peut, en fonction des variétés, voir sa moelle se résorber une fois arrivée à maturité. Les différents types de paille sont classés en fonction de la taille de la moelle : creuse (orge et avoine), plus ou moins creuse (blé d'hiver) et pleine (blé dur, maïs et sorgho).

La paille constitue ainsi une ressource employée dans de nombreux domaines. Quels sont-ils ? L'utilisation de la paille dans le secteur de la construction pourrait-elle faire de l'ombre aux autres domaines d'emploi ?

2.1 Agriculture

La paille est pauvre en nutriments et son importante richesse en cellulose la rend difficilement digérable par les animaux, mis à part les ruminants. Elle est employée pour de nombreux autres usages : comme litière pour les animaux d'élevage, comme matériau de protection de sol ou encore comme fertilisant une fois dégradée dans le sol. En cas de pénurie de foin, elle peut être utilisée comme substitut.

Il ne faut pas confondre la paille avec le foin qui est un mélange de graminées issues des prairies comme la luzerne ou la fléole des prés. Ces herbes sont fauchées avant l'épiaison afin de conserver une certaine qualité nutritionnelle. La forte teneur en azote des feuilles assure une bonne digestibilité et elle est donc employée pour nourrir les animaux d'élevage.

2.2 Energie

La crise énergétique actuelle a contribué au développement des biocarburants dits avancés dans le but de s'affranchir de la dépendance vis-à-vis des matières fossiles et de ne pas perturber les productions à des fins alimentaires. Ainsi, des projets sont axés sur la valorisation des coproduits de la plante et des déchets. Pour l'élaboration de bioéthanol, l'utilisation de biomasse lignocellulosique (bois ou paille) présente un intérêt certain. Les différentes étapes du processus sont données ci-dessous (Figure 1.3).

Sur le schéma de la Figure 1.4 sont explicitées les étapes permettant la production de substituts au gazole et à l'essence à partir de bois et de paille.

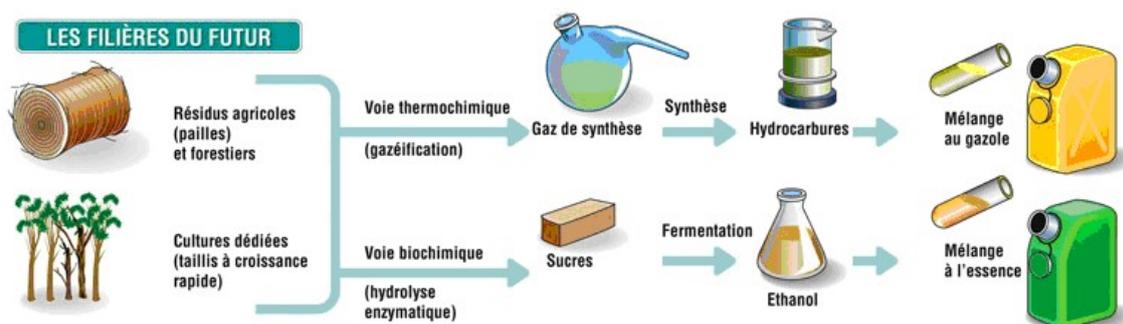


FIGURE 1.4. Etapes de production de biocarburants - (Source : IFPEN(2010))

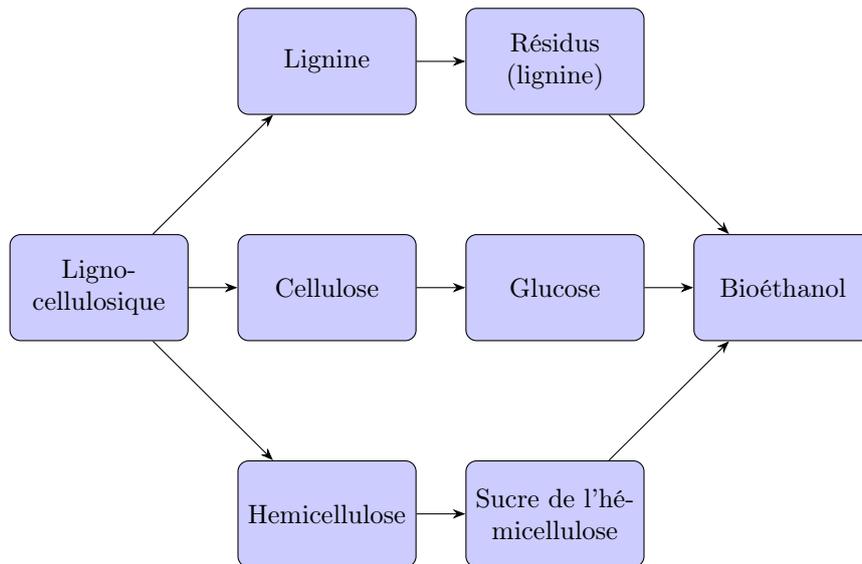


FIGURE 1.3. Schéma du processus de production de bioéthanol –
(Source : Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2022))

En 2015, la directive 2015/1513 appelée « CASI » (Changement d’Affectation des Sols Indirect) et initiée par le Parlement Européen confirme l’objectif d’incorporation de biocarburants de 10 % dans les transports en 2020 [PARL2015]. En 2018, cette directive a été révisée et cet objectif a été fixé à 14% pour 2030 [PARL2018]. D’ici là, les plafonds sont progressivement relevés afin d’atteindre ce but.

Ainsi en 2022, le plafond a été fixé à 8,6% pour les biocarburants en concurrence alimentaire. Un objectif indicatif de 0,5 % pour les biocarburants est avancé et il a été estimé que 2,2 Mt de paille ont été utilisés pour en fabriquer, soit 3,3% de la production française [ECOL2022].

L’Engagement pour la croissance verte (ECV) de 2017 sur les biocarburants aéronautiques a permis de lancer une initiative concernant les biocarburants aéronautiques durables dès 2025 [LESU2019].

L’objectif à court-terme est de remplacer 2% en 2025 et 5% en 2030 du kérosène fossile par du biocarburant avec un objectif de long terme de 50% en 2050,

2.3 Phytotechnologie

Le blé qui est la principale céréale exploitée en France est employé en phytotechnologie. D’après Bert et Hadj-Sahraoui (2012), certains types de blé notamment le blé tendre et l’épeautre sont intéressants dans le traitement de polluants organiques tels que le PCB, PCDD et PCDF pour les sols, ou encore les explosifs (TNT, RDX, etc) [BERT2012].

2.4 Construction

La paille est essentiellement constituée de cellulose avec des taux variant entre 40% et 48% suivant les espèces [DEBO2009]. Ce composant lui apporte une grande raideur avec un module d’élasticité d’environ 140 GPa [NISH1995] et lui confère également une résistance à la traction supérieure à bien des bois de résineux [DEBO2009].

Une dizaine d’espèces de céréales est cultivée en France mais la majorité de la production concerne 4 espèces : le blé tendre, le maïs grain, l’orge et le blé dur. 9,3 millions d’hectares de céréales (blé, maïs, sorgho, avoine, etc.) ont été cultivés pour la campagne 2021/2022 pour une production de totale de 15,9 millions de tonnes de paille (Figure 1.5). L’utilisation de la paille en construction revaloriserait cette ressource, les activités concomitantes et ainsi les régions qui y sont liées [AGRE2022].

Actuellement, 40% de la paille retourne directement au sol en fin de moisson. Il a été grossièrement estimé que 5% de la paille de blé, produite annuellement en France, pourrait permettre de construire 400 à 500 000 logements neufs individuels et collectifs et 10% pour isoler les logements construits chaque année [RFCP2020]. Cela représente un peu moins de 500 000 logements par an et plus concrètement 2 millions de tonnes sur les 20 millions de tonnes de paille de blé produites chaque année en France [FLOI2012]. L’AGPB a estimé que 5000 tonnes de paille étaient utilisées en éco-construction [AGPB2020]. Dans certaines régions, la paille est plus valorisée que dans d’autres. Cela s’explique par la nature des activités économiques de la région mais également

par son emplacement géographique [ONRB2020].

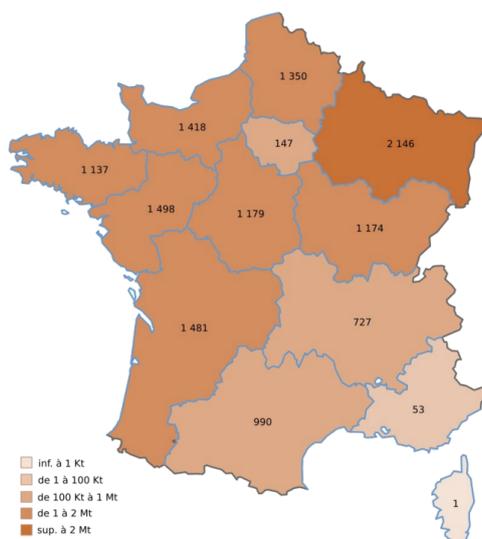


FIGURE 1.5. Volumes théoriques disponibles (VTD) régionaux de paille de céréales 2019 en milliers de tonnes de matière sèche/an – (Source : ONRB (2020))

Dans, les régions peu portées sur l'élevage, la paille est remélangée au sol afin d'éviter aux agriculteurs des coûts de transport trop importants. Elle améliore sa structure et sa porosité. Afin d'accélérer sa décomposition, la paille doit être au préalable éraflée par la moissonneuse-batteuse. Un mélange régulier de la paille avec la terre entraîne une meilleure stabilité des agrégats, permet un développement de la population de vers de terre plus important, et rend le sol plus poreux avec une conductivité hydraulique plus élevée. De plus en plus d'agriculteurs européens ont constaté cette amélioration et délaisse progressivement le brûlage.

2.5 Concurrence vis-à-vis des autres domaines d'emploi

Le programme de recherche Terracrea piloté par l'architecte Luc Floissac, lancé à Toulouse en 2014 au Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse (LRA), estime un quota de 50 millions de tonnes (poids sur matière sèche) de paille de céréales d'hiver disponibles en moyenne par an. Deux tiers de ces résidus sont issus de céréales (blé, orge, triticale) adaptées à une utilisation en construction. En retirant la paille non récoltable estimée, cela revient à un quota de 16 à 25 millions de tonnes de paille provenant des céréales d'hiver disponibles. Les résidus d'oléagineux, de tournesol, de colza fourniraient quant à eux 5 à 6 millions de tonnes par an [LRA2014].

L'emploi des résidus de récoltes de céréales n'a aucune incidence sur l'alimentation humaine. Pour rappel, la paille n'est généralement pas utilisée comme fourrage, sauf en cas de pénurie de foin, en raison de sa faible digestivité et de sa pauvre teneur en nutriments.

A l'heure actuelle, cette ressource est surtout utilisée dans l'élevage en tant que litière. En France, elle a été estimée à 11 millions de t/an correspondant à la production de 92 millions de t/an de fumier à revaloriser en procédé de méthanisation. Ces 11 millions de tonnes de paille, représenteraient un cinquième de la production actuelle.

Le milieu de l'élevage porcin semble moins sûr des ressources en paille que d'autres. Le projet CASDAR fait état d'une différence entre offre et demande en paille très contrastée entre les régions [ROUS2014]. Cependant, le projet serait de modifier leurs techniques afin d'utiliser de façon optimale différents matériaux comme litière. Ils constatent en effet à travers leur étude, que des réductions de quantité de paille employée (dans une certaine mesure) ne dégradent pas nécessairement les qualités zootechniques. Les 7,8 millions de porcs que compte la France nécessiteraient près de 4 millions de tonnes de paille par an (500 kg/porc/an).

En horticulture, pour le paillage, la paille est concurrencée par l'écorce de pin ainsi que les films et tissus. De plus, le paillage crée des interactions biochimiques qui sont parfois positives mais parfois négatives. La paille d'Avoine, par exemple, empêche la croissance de certains adventices ainsi que celle des tomates et du riz. Elle favorise par contre celle du maïs.

En agriculture, il ne faut en rien négliger l'importance du retour au sol de la paille. Un programme de recherche a été lancé à l'initiative des Chambres d'agriculture de Picardie afin de quantifier le taux d'exportation possible de paille. La méthode Cartopaille prend en compte de nombreux critères et obtient des écarts très grands. Parfois aucune exportation n'est possible, parfois l'exportation peut aller jusqu'à 2/3 de la paille. En cas d'apport de compost ou de fumier sur le champ, l'emploi de la paille dans d'autres domaines peut aller jusqu'à la totalité de la matière exploitable.

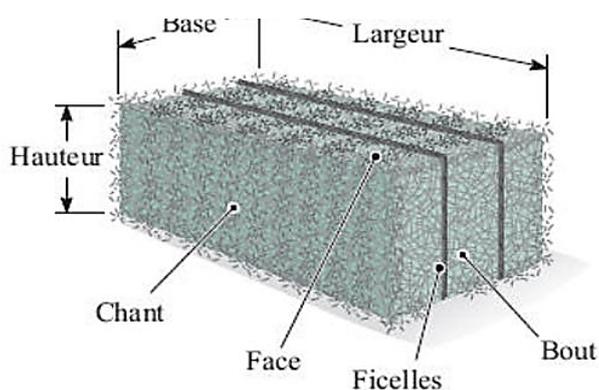
Ainsi, l'utilisation de la paille en construction ne rentre pas en concurrence avec les emplois actuels de cette ressource. La disponibilité de la paille dépendra dans le futur du type d'agriculture mis en place. Mais la production céréalière étant primordiale, la paille ne devrait pas, à priori, manquer dans les siècles à venir.

3. La botte de paille

3.1 Description

En France, la paille utilisée dans la construction provient exclusivement du blé d'après le RFCP [RFCP2018]. Dans une logique de développement durable dans laquelle s'inscrit la construction en paille, il est suggéré de mettre en œuvre préférentiellement de la paille produite localement.

La «botte de paille» est le produit fabriqué par une botteleuse agricole (ou autre machine similaire) à partir de paille en vrac. Elle présente la forme géométrique d'un parallélépipède droit. Afin de caractériser la botte, des termes spécifiques sont employés et seront utilisés dans la suite de ce document (Figure 1.6).



Dimensions	Appellations
b : la base ou largeur	Face ou plat
h : la hauteur	Chant
L : la longueur	Bout ou tête
	Ficelles

FIGURE 1.6. Description des dimensions et appellations.

La largeur b et la hauteur h d'une botte de paille sont fixes pour une presse agricole donnée tandis que la longueur L est variable et réglable.

Les petites bottes sont les plus répandues en France. Lors d'un projet de construction, il est du ressort de l'équipe de maîtrise d'œuvre de choisir le format des bottes (Tableau 1.1) en fonction de l'ouvrage.

Type de bottes	Hauteur (cm)	Largeur (cm)	Longueur (cm)
Petites	35	50	80 à 120
	37	50	80 à 120
	37	47	80 à 120
	35	45	80 à 120
Bottes matelassées/grosses	47	80	190
	50	80	190
	120	70	240
	120	90	240
	130	120	260

TABLE 1.1 – Exemples de dimensions de bottes de paille

NOTA : Si les bottes ont des dimensions inférieures à celles d’une petite botte, elles ne pourront être considérées comme porteuses sauf étude spécifique.

3.2 Récolte et conditionnement

Les caractéristiques essentielles de la botte de paille pour l’utilisation paille porteuse sont :

- la masse volumique,
- le degré d’humidité,
- l’orientation des brins,
- la longueur des brins.

La qualité de la botte est liée aux conditions météorologiques lors de la récolte mais également à la ramasseuse-presse ou botteleuse qui la façonne. Il existe deux types de botteleuses (Figure ??) :

- à canal central : elle ramasse la paille par le dessous et l’insère dans la chambre de compression dans laquelle elle sera comprimée sous forme de galettes (ou tampons) de 10 cm environ par le piston, à une certaine cadence. Les brins sont orientés dans le sens de la hauteur de la botte.
- à canal latéral : une vis latérale à débit continu entraîne la paille à l’intérieur d’un carter où elle subit une première compression avant de rentrer dans la chambre à balles. Ensuite, les fourches d’alimentation poussent la paille, en la pliant, dans la chambre à compression afin d’obtenir une galette à chaque coup de piston (brins dans le sens de la largeur de la botte).

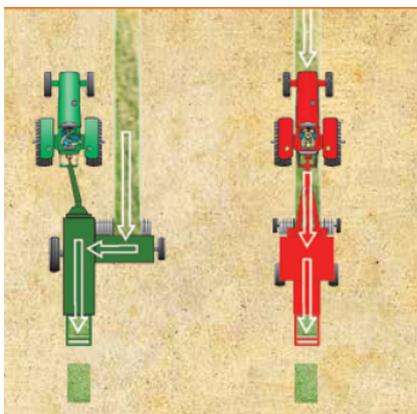


FIGURE 1.7. Botteleuses à canal latéral à gauche et à canal central à droite – (Source : Catalogue Série 1800 - Massey Ferguson)

Dans les deux cas, les galettes sont poussées les unes contre les autres jusqu’à obtenir la longueur désirée. Ensuite, la machine agricole ficelle l’ensemble et la tension des ficelles est réglée. La botte sort de l’engin à plat.

Lors d’un état des lieux initié par le RFCP en 2014, Deragne a constaté que certaines pratiques conduisaient à la production de bottes qui ne répondaient pas aux critères requis pour une utilisation en construction [DERA2014]. Le céréaliculteur se concentre sur la culture et non sur la récolte ce qui fait que le parc machine est réparti comme ceci :

- 40% sont la propriété du céréaliculteur,
- 40% celles de l’Entrepreneur de Travaux Agricoles (ETA),
- 8% en Coopérative d’Utilisation de Matériels Agricoles (CUMA).

L’ETA moissonnant jusqu’à 20h par jour est amené par solution de facilité à actionner l’option broyage.

De plus, l’agriculteur travaillant seul doit tout mécaniser pour maintenir une certaine rentabilité. Ainsi, les machines modernes

qui sont à la fois rapides en termes d'avancement et de coupe possèdent également des secoueurs-séparateurs de grains qui accroissent la productivité mais qui fragilisent et fractionnent les brins de paille.

Ainsi, les brins sont recoupés en sous-brins de plus en plus courts et peu enchevêtrés dans les andains (bandes continues de paille dans les champs). Cette ressource primaire n'est pas adaptée aux presses à canal latéral, de basse à moyenne densité. Selon Deragne, il est donc préférable de se tourner vers des presses modernes à haute densité et à canal central.

3.3 Conditions d'utilisation

Afin de garantir sa durabilité, la paille est utilisée dans des conditions précises. Il est nécessaire de n'utiliser que des bottes de paille saines et qui, par conséquent, ne présentent aucun signe de pourrissement [RFCP2018] :

- odeur âcre de décomposition ou d'humidité,
- taches sombres étendues,
- duvet de filaments blancs.



FIGURE 1.8. Humidimètre
- (Source : Catalogue de Kerbl)

Par contre, la présence de taches brunes, éparses et peu étalés sur des brins de paille n'interdit pas son utilisation en construction. En effet, même si cela indique quasi systématiquement la présence de mousses sur la tige, elles finissent par mourir.

Selon la phase de vie de la botte, la teneur en eau des bottes ne doit pas dépasser les valeurs limites indiquées dans le Tableau 1.2. Cette grandeur est mesurée à l'aide d'un humidimètre (Figure 1.8) dont la sonde est suffisamment longue pour atteindre le cœur de la botte de paille ou de foin. Cette opération est réalisée selon la procédure décrite dans les Règles Professionnelles de la Construction Paille 2018 [RFCP2018].

Teneur en eau sur poids sec de la paille	Bottelage	Stockage	Mise en œuvre
Inférieure à 20%	Oui	Oui	Oui
Entre 20 à 30%	Oui	Déconseillé*	Non
Supérieur à 30 %	Non	Non	Non

* Les bottes sont laissées dans le champ jusqu'à diminution satisfaisante de la teneur en eau.

TABLE 1.2 – Teneur en eau sur poids sec de la paille

4. Description des méthodes constructives en bottes de paille

Les différentes techniques présentées ci-dessous suivent un processus qui dans certains cas ont fait l'objet de règles ou de recommandations professionnelles qui sont le fruit d'un consensus entre les divers acteurs de la construction paille : artisans, architectes, ingénieurs, bureau de contrôle, etc.

En construction paille, le bois utilisé doit respecter les réglementations en vigueur pour le bois d'œuvre à savoir l'Eurocode 5 et les DTU associés à la construction bois. C'est également le cas dans les constructions

hybrides. Concernant la paille porteuse, pour diverses raisons (choix architectural, surcharges, espace restreint notamment), la paille porteuse peut également être associée à une charpente bois.

Tout type de revêtement (bardage bois ou autres) peut être mis en œuvre sur des murs en paille porteuse ou non s'il respecte les critères des RPCP 2012 de :

- résistance au feu,
- performance thermique,
- étanchéité à l'eau et l'air,
- hygrométrie de la paroi,
- résistance mécanique de l'œuvre.

4.1 Ossature bois – paille non porteuse

Les différentes techniques de construction en paille non porteuse sont répertoriées dans la Figure 1.9 et ne font pas partie des solutions utilisant la paille comme élément porteur. Mais elles sont déjà, par leur retour d'expérience, un élément contribuant à la validation de la paille comme solution constructive dans le bâtiment.



(a) Remplissage d'ossatures porteuses contreventées

Les bottes de paille sont insérées en remplissage comme isolant dans une ossature porteuse. La paille peut également être mise en œuvre au préalable comme remplissage isolant de caissons préfabriqués rapportés contre la structure.



(b) Caissons porteurs remplis en paille
La paille est utilisée en remplissage comme isolant de caissons qui assurent la fonction porteuse de l'ouvrage.



(c) GREB

Le GREB (Groupe Écologique de la Baie) est la technique la plus répandue d'ossature bois avec paille en remplissage, mais celle-ci sert de support et arme les enduits, qui contribuent au contreventement de l'ouvrage en complément de l'ossature qui porte les charges. Le nom provient du lieu où a été inventée cette technique, un éco-hameau fondé en 1990, au Québec.

FIGURE 1.9. Techniques de construction en paille non-porteuse.

4.2 Technique mixte - ossature bois/paille de type cellule sous tension

A mi-chemin entre la paille porteuse et l'ossature bois, la Cellule Sous Tension (CST) est une botte de paille comprimée horizontalement entre deux montants en bois et verticalement par des tasseaux fixés de part et d'autre de l'ossature.

Le principe de CST développé par Tom Rijven [RIJV2007], repose sur les performances structurelles de la paille. La botte est placée de force à plat entre 2 montants verticaux, ceux-ci étant espacés de 5 cm de moins par rapport à la longueur initiale de la botte. Une fois la rangée de botte mise en place, des liteaux horizontaux sont fixés aux montants et la maintiennent en compression. Les ficelles des bottes sont ensuite coupées afin de faire interagir directement la botte de paille avec la structure bois. La tension lâchée est directement exercée de manière équivalente sur la totalité de la structure bois et permet le contreventement de la paroi (Figure 1.10).

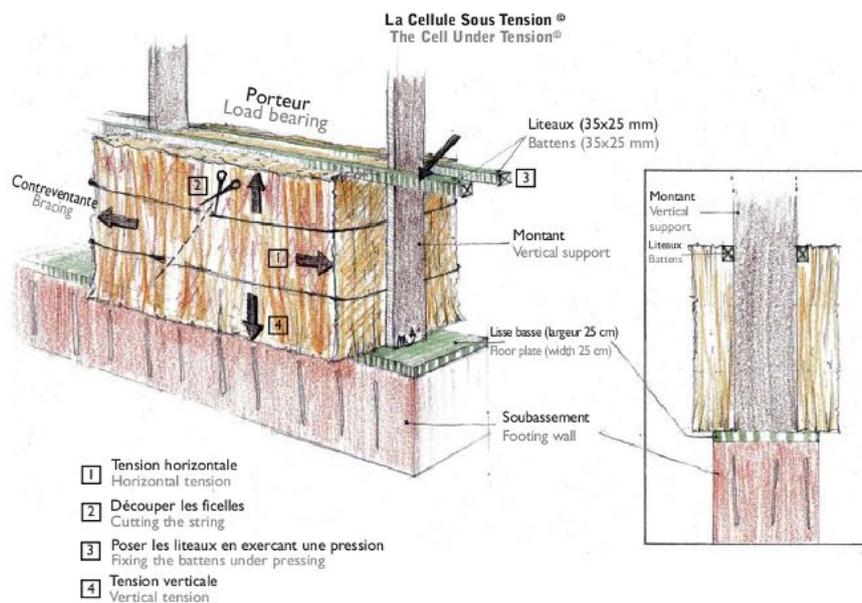


FIGURE 1.10. Technique CST - (Source : Rijven (2007))

4.3 Paille porteuse (technique Nebraska)

Dans ce système constructif, la paille assure à la fois un rôle structurel et un rôle d'isolant thermique. Avant la mise en place des bottes, une lisse basse (caisson en bois) est ancrée sur une dalle béton. Pour assurer l'isolation des bottes qui seront installées dessus, de la chènevotte est utilisée comme matériau de remplissage dans le caisson. Les montants des précadres qui serviront de gabarit pour les menuiseries sont fixés sur la lisse basse.

Ensuite, des bottes de paille sont empilées en quinconce sur 6 à 7 rangées. En parallèle sont également insérés les gabarits des ouvertures (fenêtres notamment). L'ensemble lisses et bottes sera comprimé via des sangles munies de mandrins à cliquets jusqu'au niveau souhaité, c'est-à-dire jusqu'à une mise à niveau des bottes sur les montants des précadres. Des sangles définitives en polyester sont tendues via une cerceuse et reprennent la précompression sur le long terme, la tension étant maintenue par des boucles en acier. Les sangles à cliquets sont ensuite retirées.

Enfin, le mur est généralement enduit sur ses deux faces. Dans un premier temps, une barbotine est appliquée à même la paille. Ensuite vient un enduit de corps de 40 mm environ qui sera recouvert d'un enduit de finition assez fin.

La Figure 1.11 donne une vue en coupe d'un mur type avec les différents éléments mis en œuvre.



FIGURE 1.11. Schéma d'un mur en paille porteuse enduit - (Source : RFCP (2018))

4.3.1 Bottes de paille

4.3.1.1 Choix des bottes

Les Règles Professionnelles de la construction en paille [RFCP2012] ont établi des critères pour garantir la qualité des bottes de paille utilisées dans la construction. Ils visent à assurer la solidité et la durabilité des structures en paille. Dans cette introduction, nous présenterons les différents critères définis par les règles professionnelles :

- **Densité et résistance** : les petites bottes doivent avoir une masse volumique sur base sèche d'au moins :
 - ◇ 90 kg/m³ pour les bottes à brins enchevêtrées
 - ◇ 100 kg/m³ pour les bottes "traditionnelles" beaucoup plus molles.

Il a été décidé de fixer cette valeur à 95 kg/m³ sur base sèche. Si nécessaire, il est possible de densifier les bottes de paille pour qu'elles atteignent la masse volumique souhaitée tout en veillant à conserver leur géométrie initiale. Ceci nécessite une préparation plus rigoureuse par rapport à l'utilisation conventionnelle de la paille.

- **Gestion de l'humidité** : la teneur en humidité des bottes, par rapport à leur poids sec, doit rester en dessous de 20 %. L'utilisation dans des conditions d'humidité relative entre 20 % et 30 % est fortement déconseillée.
- **Ficelles** : elles doivent répondre à des exigences minimales de résistance à la traction et être tendues de manière à empêcher le passage des doigts en dessous. Elles doivent être positionnées à une distance d'au moins 10 cm des bords et ne jamais glisser des coins de la botte. Les ficelles en chanvre ou en sisal sont recommandées pour leur faible impact carbone, tandis que les matériaux métalliques doivent être évités car sensibles à la condensation. Généralement, les ficelles de liage de ces bottes sont en polypropylène et de type 350 pour les petites bottes et de type 100 pour les grosses bottes et les bottes matelas (Tableau 1.3). Afin de permettre leur manutention et leur utilisation, les bottes présentant des ficelles cassées ou desserrées peuvent être reficelées à condition de retrouver une masse volumique suffisante et en adéquation avec celles des autres bottes constituant le mur.

Marque	Masse d'une bobine [kg]	Diamètre [mm]	Hauteur [mm]	Résistance linéaire [kN]	Résistance au nœud [kN]
T 250	5	240	255	2,236	1,363
T 350	5	240	255	1,402	0,883
T 400	5	240	255	1,226	0,775
T 500	5	240	255	1,030	0,647

TABLE 1.3 – Caractéristiques des ficelles de liage – (Source : Extrait de catalogue Tama)

- **Forme et dimensions** : les bottes doivent être régulières et les angles soigneusement formés. Elles doivent être au moins deux fois plus longues que larges, à moins qu'une coupe soit nécessaire pour compléter une rangée. En France, ce sont essentiellement des petites bottes qui sont utilisées en construction donc on ne s'intéressera pour la suite qu'à celles-ci.
- **Stockage et contrôle qualité** : après la collecte, les bottes doivent être rapidement surélevées et protégées de l'eau pour éviter la condensation et l'augmentation de l'humidité. Un contrôle qualité régulier, portant sur l'humidité, la densité et les dimensions, est impératif. Au moins dix bottes doivent être testées toutes les vingt bottes.
- **Historique et conditions passées** : examiner attentivement l'historique des bottes est essentiel pour éviter celles ayant subi des variations fréquentes d'humidité et de température. Même si elles semblent sèches, des signes de stockage inapproprié peuvent être présents.
- **Longueur des brins** : les brins de paille doivent mesurer au moins 25 cm, mais une longueur optimale entre 30 et 45 cm est recommandée pour une utilisation idéale.
- **Orientation des brins** : Celle-ci dépend directement du type de presse utilisé et du format de la botte (Figure 1.12).

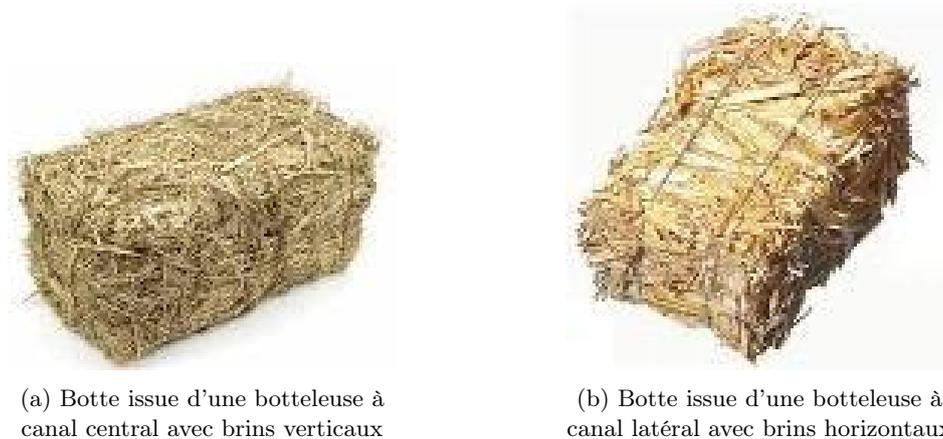


FIGURE 1.12. Orientation des brins de paille en fonction du type de botteuse

4.3.1.2 Préparation des bottes

Pour obtenir un mur en paille porteuse de qualité et éviter les espaces vides entre les bottes, il est essentiel de remodeler toutes les extrémités des bottes conformément aux directives des Recommandations Professionnelles en Construction Paille 2012 [RFCP2012]. Cette étape est cruciale pour assurer une stabilité mécanique et une performance thermique satisfaisantes, ainsi que pour garantir une surface optimale pour l'application de l'enduit. L'objectif principal est de rendre la tête de la botte parfaitement plane (Figure 1.13a et Figure 1.13b).

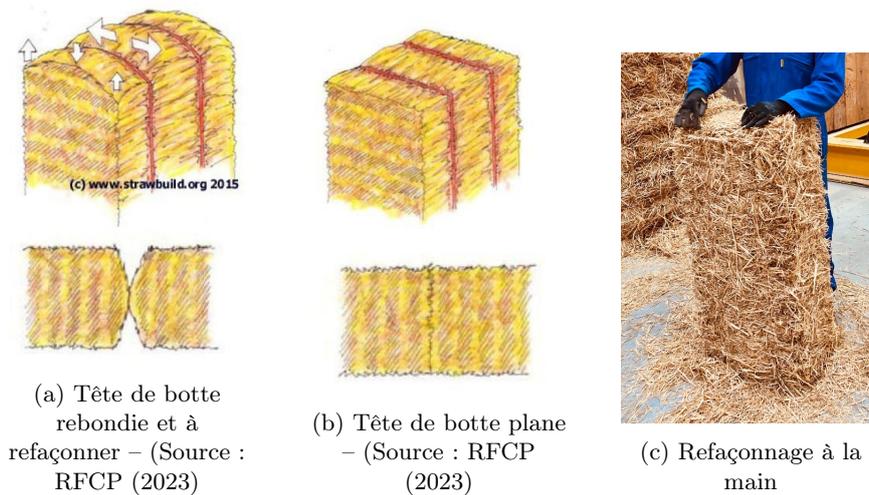


FIGURE 1.13. Refaçonnage des têtes de botte

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour réaliser cette tâche. La première consiste à remodeler la botte en ramenant la matière du centre vers les arêtes à l'aide des doigts, sans les enfoncer profondément dans la botte (Figure 1.13c). Une autre approche consiste à couper l'excès de matière à l'aide d'une scie égoïne, en prenant soin de ne pas endommager les ficelles.

Pour obtenir une tête plate, il faut retirer le moins de matière possible tout en évitant de relâcher les ficelles, ce qui pourrait entraîner une diminution de la densité de la botte. Une fois que les grandes ficelles de la botte ont été coupées, la botte est séparée en deux parties (Figure 1.14c).

4.3.1.3 Redimensionnement des bottes

Des tiges de redimensionnement ont été créées pour permettre de reficeler les bottes à la longueur voulue (Figure 1.14a et Figure 1.14b).



(a) Enfoncement des tiges de redimensionnement dans la botte



(b) Mise en tension de la ficelle jusqu'à obtenir la tension présente dans la ficelle d'origine



(c) Séparation des demi-bottes

FIGURE 1.14. Redimensionnement des bottes

4.3.2 Montage du mur

La construction des murs en bottes de paille comprend plusieurs étapes importantes, notamment la pose de la lisse basse et le passage des sangles provisoires et définitives, la pose des bottes et le brochage, la pose de la lisse haute et la précompression des bottes de paille (Figure 1.15).

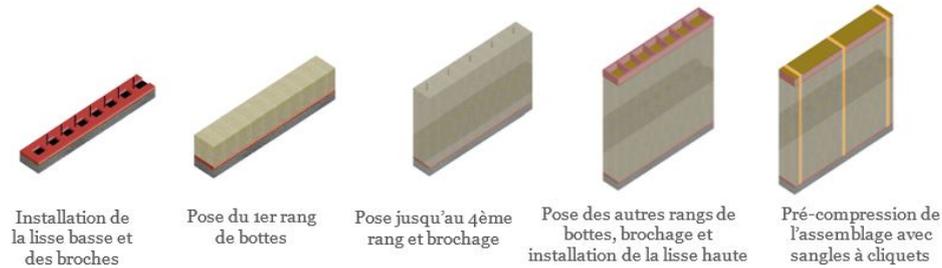


FIGURE 1.15. Montage d'un mur selon la technique Nebraska

4.3.2.1 Pose de la lisse basse et installation des sangles provisoires et définitives

La lisse basse est composée de deux chevrons en bois placés à plat et reliés par des entretoises qui sont percées afin de recevoir des broches (Figure 1.16).

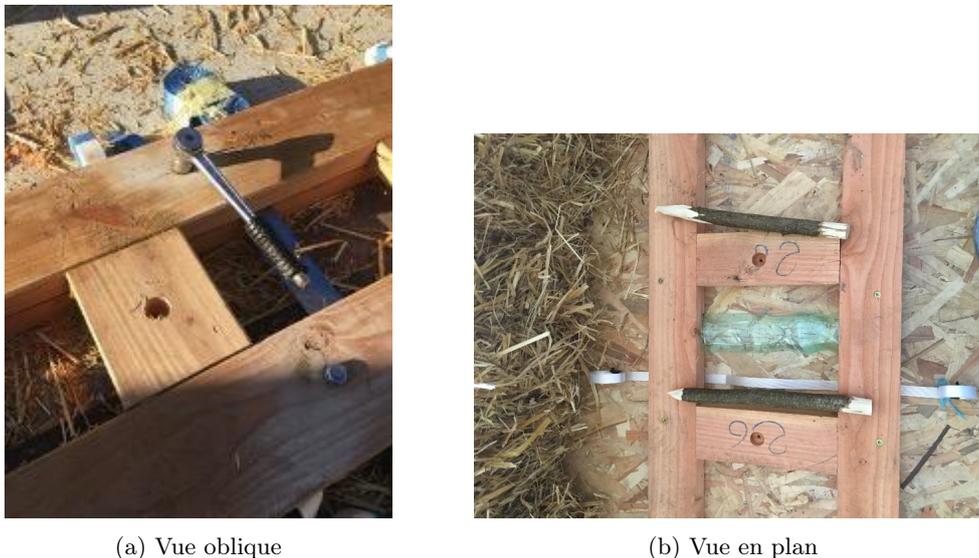


FIGURE 1.16. Entretoises percées à la scie cloche avec sangles blanches définitives enroulées ("escargots") en attente – (Source : RFCP (2023))

Normalement, elle est remplie de sable ou de chènevotte¹ (Figure 1.17) pour stabiliser le mur. Les dimensions des chevrons de la lisse basse sont : la hauteur h est comprise entre 55 et 65 mm, la largeur b entre 155 et 185 mm, et la longueur variable. La lisse basse sert de base pour fixer les montants verticaux non structurels qui supportent les pré-cadres et les cadres des menuiseries (Figure 1.18a).

Les dimensions et sections des ouvrages doivent être définies par l'étude structurelle, en prenant en compte les efforts induits par la précompression, le système de fondation et les charges appliquées. La lisse basse doit offrir un appui suffisant pour éviter l'enfoncement des bottes. Si nécessaire, un panneau ou un isolant incompressible peut être ajouté à la lisse pour garantir une assise uniforme. La largeur de la lisse doit être adaptée au type de parement souhaité et aux détails techniques correspondants.

À titre d'exemple, pour un mur en bottes, la lisse basse peut être constituée de deux chevrons de 45 x 145 mm posés à plat, reliés par des entretoises. Des sangles à cliquets peuvent être installées tous les 2 m sous la lisse, et des "escargots" de sangles (Figure 1.16b) sont réalisés de chaque côté du mur pour ne pas gêner le déplacement des ouvriers.

1. La chènevotte est un sous-produit de la tige du chanvre, souvent utilisé comme isolant thermique et acoustique.

Les chevrons sont généralement posés à plat car les artisans et constructeurs en paille porteuse pensent qu'ainsi les lisses résisteront mieux à la précompression et sauront mieux supporter les bottes à long-terme. Il a été décidé de notre côté de les poser à chant, comme pour la lisse haute, car en position verticale l'inertie statique étant plus élevée, la résistance lors de la mise en compression sera également plus importante.



FIGURE 1.17. Chènevotte -
(Source : Extrait catalogue
Socli)

Il existe différentes méthodes pour précompresser un mur. En France, les sangles sont couramment utilisées. Deux types sont passés sous la lisse basse. D'abord, de grosses sangles à cliquets sont mises en place pour appliquer une première compression et permettre le passage, en parallèle, des sangles définitives le plus souvent en polyester. Les grosses sangles sont ensuite retirées, tandis que les sangles définitives restent en place pour maintenir la compression.

Il est possible de créer une feuillure dans la lisse basse au niveau des emplacements des sangles temporaires (Figure 1.18b). Cette feuillure doit avoir une profondeur supérieure de 2 mm à celle des sangles, afin de permettre leur retrait après la précompression.

Il est possible de créer une feuillure dans la lisse basse au niveau des emplacements des sangles temporaires. Cette feuillure doit avoir une profondeur supérieure de 2 mm à celle des sangles, afin de permettre leur retrait après la précompression.



(a) Pré-cadres de menuiseries –
Grenoble (2021)



(b) Réalisation d'une feuillure dans lisse basse –
(Source : RFCP (2023))

FIGURE 1.18. Eléments en bois

4.3.2.2 Pose des bottes

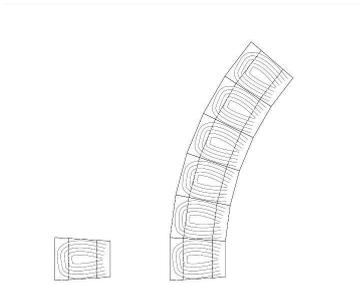


FIGURE 1.19. Coupe d'un mur de bottes issues d'une botteuse à canal latéral : l'asymétrie des bottes accentue le risque de flambement - (Source : RFCP (2023))

La disposition en quinconce des bottes dans la construction des murs en bottes permet une répartition optimale des efforts. Initialement, la première rangée de bottes est fixée à mi-hauteur à l'aide de pieux ou de broches en bois ancrés dans les entretoises de la lisse. Ensuite, trois autres rangées de bottes sont posées avant de fixer les bottes avec de longs pieux en bois jusqu'à atteindre la mi-hauteur supérieure de la première rangée.

Il est important de noter que l'utilisation d'aciers d'armature est désormais interdite en raison de la condensation qu'ils peuvent provoquer dans les bottes, entraînant ainsi leur détérioration. Dans notre cas, nous avons néanmoins utilisé ces tiges car la durée des essais ne remettait pas en cause la durabilité. Les bottes sont placées à plat, alignant les brins des bottes parallèlement à l'effort de compression, ce qui renforce leur résistance. Il faut placer des « poupées » de paille entre chaque botte pour combler les espaces.

Lors de la construction du mur, il est essentiel de prendre en compte l'asymétrie des bottes, où les brins sont pliés d'un côté et coupés de l'autre, ce qui fait que les bottes ne sont pas complètement planes (Figure 1.19). Pour éviter tout flambement et assurer la planéité du mur, il est nécessaire

d'alterner le sens des bottes à chaque rangée.

Pour une hauteur conventionnelle de 2,20 à 2,50 m, il est généralement recommandé de prévoir six à sept rangées de bottes ou deux rangées de grosses bottes (120 cm x 90 cm). Dans le but de garantir une bonne réalisation du chaînage des murs, les bottes situées aux angles sont reliées entre elles par leurs ficelles.

4.3.2.3 Brochage

Le brochage joue un rôle crucial dans la construction des murs en bottes. Il permet le maintien des murs pendant la phase chantier, le réglage et le maintien des aplombs, ainsi que la rigidification des murs tout au long de la durée de vie du bâtiment.

C'est pourquoi l'utilisation de broches est indispensable dans ce type de construction. Les broches sont des tiges en bois d'environ 2 cm de diamètre (ou d'autres matériaux qui n'entraînent pas de point de rosée potentiel à l'intérieur de la paroi). Elles sont taillées en pointe à une extrémité pour être insérées verticalement dans les bottes. Les broches de rang 1 sont plus courtes que celles des rangs 4 et 7. Dans tous les cas, les broches doivent respecter une distance minimale de 12 cm par rapport au bord de la botte (Figure 1.20).

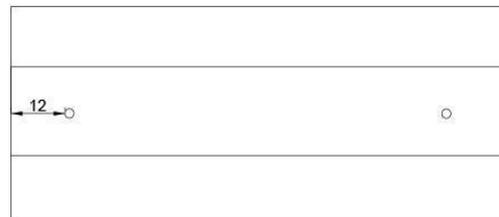


FIGURE 1.20. Vue en plan d'une botte - Distance limite entre l'emplacement de la broche et le bout de la botte - (Source : RFCP (2023))

Il est recommandé de prévoir deux broches par botte, à moins que la longueur de la botte ne soit inférieure à 50 cm, auquel cas une seule broche suffit. Les broches du premier rang ont une hauteur équivalente à celle d'une botte. Elles sont taillées de manière à réduire leur diamètre de 2 à 4 mm, ce qui leur permet de s'ajuster dans la rainure des entretoises. Pour bien caler la broche, il est conseillé d'utiliser de gros copeaux de bois comme une clé, puis de l'enfoncer à l'aide d'une cale trouée afin de ne pas endommager la pointe. Ensuite, la botte est placée sur les broches, qui peuvent également être fixées aux entretoises au fur et à mesure de l'assemblage.

4.3.2.4 Pose de la lisse haute

La lisse haute, également appelée sablière, est installée sur l'assemblage de bottes pour assurer les fonctions suivantes :

- supporter la précompression et la compression due aux descentes de charges verticales,
- assurer le chaînage longitudinal et l'équerrage des murs,
- contreventer horizontalement le mur,
- permettre une répartition uniforme des charges.

La lisse haute doit donc être dimensionnée pour résister aux efforts qui lui sont transmis tout au long de la durée de vie du bâtiment, y compris lors de la précompression initiale du mur.

À chaque niveau du bâtiment (plancher d'étage et charpente de toiture), une lisse est positionnée. Les jonctions aux angles doivent être soignées. Les chevrons constituant la lisse haute sont placés sur chant pour maximiser leur résistance, et des entretoises relient les deux pièces de bois. Cette configuration consomme une quantité significative de bois.

La lisse haute est fermée par une membrure en OSB, formant ainsi un caisson. Sa largeur doit être légèrement inférieure à celle des bottes afin de faciliter la fixation de l'enduit. Des réservations sont prévues dans la lisse pour permettre son déplacement le long des montants verticaux servant de cadres aux menuiseries, jusqu'au tassement final du mur.

Il est également important de prévoir un plan de calepinage précis pour éviter que les entretoises ne se trouvent à des emplacements où les montants de menuiseries seront fixés. La lisse basse et la lisse haute ne sont donc pas directement reliées, mais elles sont connectées par le complexe stable formé par la paille, les enduits, les sangles et les broches. Le contreventement est assuré par l'ensemble Enduit-Paille-Enduit.

4.3.2.5 Précompression

4.3.2.5.1 Systèmes de précompression temporaire

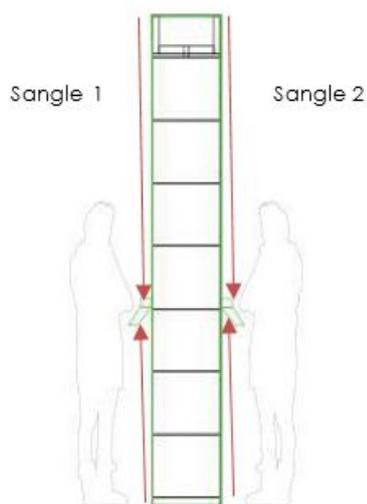
Selon la technique Nebraska, le mur est précomprimé avant l'installation du niveau suivant (étage supplémentaire ou toiture), accélérant ainsi le tassement final des bottes de paille et rigidifiant la structure. Cette précompression peut être introduite artificiellement à l'aide d'outils tels que des sangles à cliquets, des crics ou des tireforts. La densité des bottes influence le tassement final, et il est essentiel de maintenir une répartition uniforme des charges en précomprimant les murs de manière homogène.

Les systèmes de précompression utilisés que ce soit des sangles à cliquets, des tireforts, ou des crics, peuvent être différents mais doivent garantir un non-basculement de la lisse haute lors du processus et une géométrie conforme aux attentes (dimensions, altimétrie, verticalité). Ils assurent la stabilité de la structure en contrôlant l'horizontalité de la lisse haute et en atteignant le niveau souhaité sans déformations de manière contrôlée et sécurisée. La précompression peut aussi être réalisée naturellement, grâce au poids propre de la structure, mais cela prendra plus de temps. Des sangles à cliquets sont donc généralement utilisées.

Plus les bottes utilisées sont denses, moins leur tassement final est important. Sur une hauteur de mur avec des bottes déjà très denses, on peut observer une déformation de 3 à 6% correspondant à un tassement de 1,5 à 3 cm par botte, ce qui équivaut à 9 à 21 cm sur des murs de 6 à 7 rangées de bottes. Si les bottes sont initialement moins denses, cette valeur peut être plus élevée (voir Chapitre Etat de l'art - Essais structurels). Les murs doivent être précomprimés ensemble sur un bâtiment, à la même cadence et de manière homogène avec des pas de 2 cm, afin d'atteindre le niveau souhaité et de conserver une répartition uniforme des charges.

- **Sangles à cliquets** : Dans le cas d'une précompression par sangles, il est recommandé de disposer d'un mandrin à cliquets de chaque côté de la paroi pour chaque point de compression. Deux sangles sont raccordées en série de chaque côté du mur. Ainsi l'ensemble forme une boucle autour de la lisse basse, le mur paille et la lisse haute (Figure 1.21a). Cela permet d'ajuster la descente de façon symétrique pour que la lisse haute atteigne le niveau horizontal attendu. La Figure 1.21b présente un exemple où la précompression est assurée par des sangles à cliquets (bleues) disposées tous les 2 m, avec les sangles définitives (blanches) en attente de mis en tension. Lors de l'utilisation de sangles à cliquets, les mandrins à cliquets peuvent être placés à environ 40 cm de chaque côté d'une ouverture et à 80 cm du sol pour faciliter le travail de l'ouvrier.
- **Tireforts** : Pour la mise en précompression du mur, les sangles à cliquets peuvent être remplacées par des tireforts en suivant le même mode opératoire que pour les sangles (Figure 1.22). Une attention particulière est à porter à la dimension des feuillures à réaliser s'il est prévu de faire passer des câbles épais sous la lisse basse. Un système de poulies aussi peut être utilisé pour éliminer les frottements et mieux répartir les efforts mais peut aussi amener des instabilités. Cela nécessite aussi un espace important sous la lisse basse pour mettre en position les rails portant les poulies. Il est également possible d'utiliser des tireforts en suivant le même procédé que pour les sangles à cliquets. Une attention particulière doit être accordée à la dimension des rainures à réaliser si des câbles épais doivent passer sous la lisse basse.

- **Cric** : Pour la mise en compression, il est aussi possible d'utiliser des crics couplés à des sangles. Cette méthode est intéressante lorsque l'un des côtés du mur n'est pas accessible. En rénovation, Il est également envisageable de prendre appui sur la charpente du bâtiment avec un cric pour comprimer le mur, en vérifiant bien sûr au préalable que la charpente puisse supporter la pression de l'appareil.



(a) Sangles à cliquets en série
- (Source : C. Hamelin et M. Lapierre (2022))



(b) Sangles en attente
- (Source : C. Hamelin et M. Lapierre (2018))

FIGURE 1.21. Précompression via les sangles à cliquets



FIGURE 1.22. Utilisation d'un tirefort - (Source : IUT Nîmes (2017))

4.3.2.5.2 Maintien de la précompression avec les sangles définitives

Une fois le tassement final atteint, des sangles plus fines en polyester résistant aux charges lourdes sont utilisées et mises en tension à l'aide d'une cerceuse ou d'un tendeur (Figure 1.23a). Des boucles autobloquantes en acier permettent de les maintenir en place (Figure 1.23b). Ainsi, les sangles définitives sont tendues jusqu'à ce qu'elles reprennent complètement les charges précédemment supportées par les sangles provisoires qui sont, elles, retirées. Les sangles définitives remplacent le système de précompression tout en maintenant le niveau de sollicitation (Figure 1.23c). Elles sont disposées tous les mètres environ et à un maximum de 40 cm des angles et des ouvertures. L'objectif est d'obtenir la même tension entre les sangles définitives et les sangles à cliquets, il ne faut donc pas tendre les sangles définitives plus que les sangles provisoires, sinon la géométrie peut être modifiée. Si un rebond de la paille est constaté après le relâchement des sangles provisoires, il peut être nécessaire de répéter l'opération.

L'objectif étant d'obtenir la même tension dans les sangles définitives que dans les sangles à cliquets. Les sangles définitives choisies auront une résistance linéaire à la traction d'au moins 2000 daN soit l'équivalent de 2 tonnes, mais celles rencontrées habituellement sur chantier présentent une résistance à la traction de 4000 daN pour assurer une plus grande marge de sécurité.



(a) Cercleuse - (Source : Extrait catalogue Toutemba)



(b) Boucle en acier - (Source : Leroy Merlin)



(c) Sangle à cliquets et sangle définitive en polypropylène

FIGURE 1.23. Maintien des sangles définitives

4.3.2.6 Application de l'enduit

Dans la technique de la construction en paille porteuse, l'enduit joue un rôle essentiel en tant que composant structurel. Il peut être appliqué de différentes manières en utilisant des matériaux tels que la terre, la terre fibrée, la chaux, le plâtre, le béton projeté, le ciment, le ciment-chaux, avec ou sans renfort. Le choix de l'enduit doit être adapté à chaque cas, en respectant les directives des Règles Professionnelles de la paille en ce qui concerne la diffusion de la vapeur d'eau.

L'ensemble formé par les trois couches enduit/paille/enduit ressemble à un panneau sandwich. En cas de contraintes soudaines et importantes, telles que des tornades ou des séismes, la rigidité de l'enduit est complétée par la ductilité de la paille, qui lui permet d'absorber l'énergie. En pénétrant dans la paille sur une épaisseur d'environ 1 à 1,5 cm, une interface se crée qui solidarise les deux matériaux renforçant l'enduit et le rendant plus ductile.

- **Composants** : Les enduits sont composés d'un mélange de liant (chaux, plâtre, ciment Portland ou argile) et de charges minérales (sable). Généralement, le rapport entre le liant et les charges minérales est d'environ 1/3 de liant pour 2/3 de charges minérales. Les enduits à base de terre sont recommandés pour la construction en paille porteuse, bien qu'ils aient une résistance relativement plus faible.
- **Type** : Les enduits sont répartis en 3 familles : tendre (terre) (Figure 1.24), semi-dur (chaux) et dur (ciment).
- **Mise en œuvre** : Les enduits traditionnels, tels que définis dans l'ancien DTU 26.1, sont composés de ciment, de chaux et de sable (?). Ils sont appliqués en trois couches manuellement ou en deux couches à l'aide d'une machine à projeter :
 - ◇ La première couche, appelée "gobetis", a pour rôle d'accrocher l'enduit sur le mur et est appliquée en couche mince pour régulariser la porosité du support.
 - ◇ La deuxième couche, le corps d'enduit, est plus épaisse et assure l'imperméabilisation principale.
 - ◇ Enfin, la troisième couche, la finition, est plus mince et contient moins de liant pour éviter les fissures. Elle protège le mur de l'érosion et lui donne une texture et une couleur décoratives.

Le tout fait environ 40 mm d'épaisseur minimum.



FIGURE 1.24. Echantillons d'enduit terre – (Source : Pedernagna (2015))

5. Répartition des modes constructifs

Un outil numérique de recensement des constructions en paille a été développé par le RFCP. Cependant, bien que la demande soit croissante, le nombre de constructions demeure difficilement quantifiable. Entre 2008 et 2023, le nombre de bâtiments en paille construits et recensés est passé de 20 à 238 d'après l'outil. Or en France, le nombre de bâtiments en bottes de paille est estimé par le RFCP à plus de 5000. Cela inclut les logements individuels et collectifs ainsi que les ERP avec une production annuelle équivalente à 500 bâtiments. Les chiffres ne prennent pas en compte les projets de construction en auto-construction non déclarés auprès du réseau de la construction en paille.

D'après les données recueillies, actuellement, près de 85% des constructions en paille sont des constructions entièrement neuves, 8% sont des extensions ou surélévations de bâtiments et moins de 7% sont des rénovations ou restaurations (Figure 1.25).

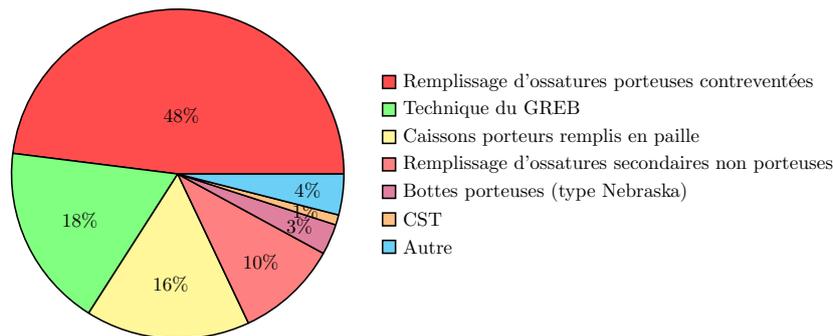


FIGURE 1.25. Répartition des systèmes constructifs les plus courants en construction paille – (Source : RFCP web (2023))

Sur l'ensemble du territoire, il a été estimé qu'actuellement, 92% des constructions en paille sont en ossature bois avec remplissage paille. Les débutants privilégient cette technique car l'aspect structurel nécessite un savoir-faire et des connaissances spécifiques que seuls possèdent les charpentiers et les constructeurs professionnels.

Le remplissage paille peut être réalisé en auto-construction via des chantiers participatifs, avec des connaissances acquises sur d'autres chantiers, lors de formations techniques ou avec l'aide d'un professionnel. Il existe également des entreprises qui peuvent mettre en œuvre la paille si les maîtres d'ouvrage ne souhaitent pas s'engager dans l'auto-construction. Une autre option consiste à utiliser des caissons porteurs en bois remplis de bottes de paille mais peu d'entreprises en fabriquent sur chantier et cela nécessiterait un espace dédié à leur fabrication qui n'est pas toujours facile à trouver. De plus, cette technique impose des moyens plus importants pour le transport et la mise en place. L'attrait pour cette technique est cependant en augmentation car elle se prête plutôt bien à la préfabrication et l'industrialisation. Plus de 17% des constructions en paille seraient en caissons porteurs.

La technique GREB est similaire au système Paille Porteuse, où la botte et l'ossature en bois supportent les charges ensemble. Actuellement, environ 18% des bâtiments répertoriés par le réseau de construction en paille de Rhône-Alpes utilisent cette technique, et 10% des bâtiments isolés en paille sont construits en utilisant un remplissage d'une ossature secondaire. Les autres systèmes structurels, tels que CST et paille porteuse, comptent pour 10 % des constructions.

En France, près de 50 constructions en paille porteuse en petites et grosses bottes qui ont été recensées en 2023,

Au Royaume-Uni, le groupe Straw Works a été fondé par Eileen Sutherland et Barbara Jones, pionnière de la construction en paille porteuse. Cette dernière a participé à plus de 300 projets de construction en paille, dont la plupart en paille porteuse.

6. Potentialités de la construction en paille

La paille, souvent négligée, se révèle aujourd'hui comme une ressource prometteuse dans le domaine de la construction durable. Cette section explore les multiples facettes de son potentiel, en examinant ses avantages écologiques, ses performances diverses et son rôle croissant dans les pratiques constructives contemporaines. À

travers une approche scientifique, nous identifierons les défis à relever car l'utilisation de la paille comme élément porteur se heurte à des freins importants qu'ils soient d'ordre techniques ou psychologiques. Une fois levés, la solution pourra pleinement se développer.

6.1 Avantages de la construction paille

L'utilisation de la botte de paille en général dans la construction présente divers avantages que nous allons recenser. Ces propriétés multiples en termes d'impact écologique, de performances thermiques et acoustiques mais également structurels, en font un matériau intéressant en construction.

6.1.1 Un matériau écologique

La paille est un matériau annuellement renouvelable et disponible en toute saison permettant d'avoir un chantier bas carbone avec très faible impact environnemental de par une production de déchets sur chantier réduite. De plus, les circuits courts sont privilégiés avec la mobilisation des filières locales.

6.1.1.1 Analyse du cycle de vie

La paille est un excellent puits de carbone durant la durée de vie de l'ouvrage puisque pendant sa phase de croissance, la plante prélève du dioxyde de carbone atmosphérique par photosynthèse (Figure 1.26). D'après la base de données nationale de référence sur les données environnementales et sanitaires des produits et équipements de la construction INIES, avec une durée de vie de référence (DVR) d'une structure porteuse de 50 ans, 1 m² de mur en bottes de paille utilisé comme isolant absorbe 24,7 kg CO₂ eq. pendant la phase de croissance, il peut donc être admis que la botte utilisée en tant qu'élément structurel affiche un résultat sensiblement similaire. En considérant de la paille à l'intérieur d'une structure de 1 m² (charge porteuse/ossature), par exemple, avec une densité de 120 kg/m³ pour la charge porteuse et 100 kg/m³ entre les ossatures, on pourrait capturer une quantité supplémentaire d'environ 20% de CO₂, équivalant à environ 30 kg CO₂ m². Lors des différentes étapes de cycle de vie, la paille va tour à tour capter, stocker ou émettre du CO₂ (Tableau 1.4).

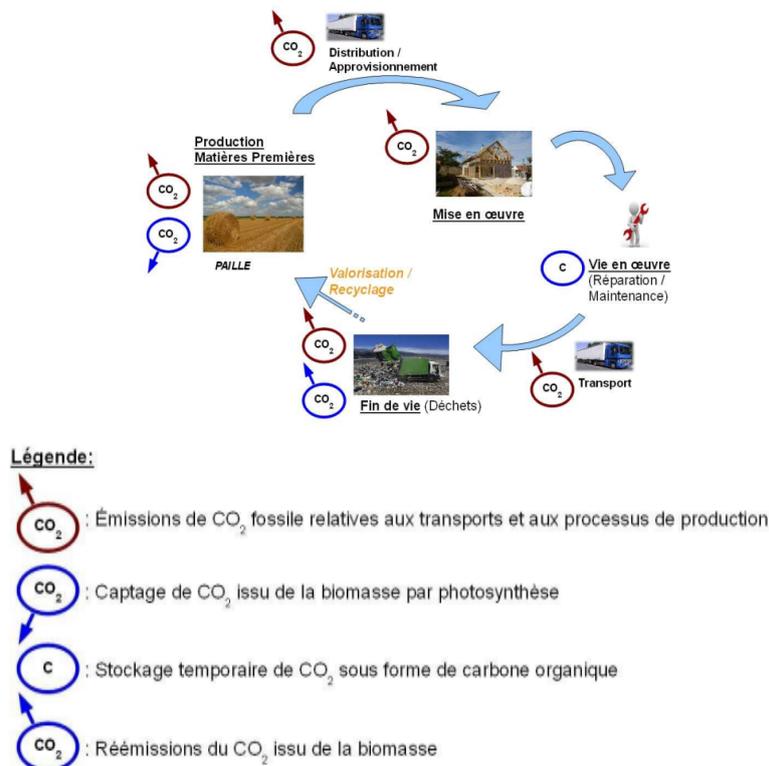


FIGURE 1.26. Etapes du cycle de vie d'un produit organique, émissions de CO₂ fossile et cycle du carbone issu de la biomasse

Phase de vie	Captage de CO ₂	Emissions de CO ₂	Stockage du CO ₂
Production			
Croissance de la paille	X		
Utilisation de matériels agricoles et de véhicules de transport		X	
Mise en œuvre			
Utilisation de matériels et d'outils thermiques et électriques		X	
Vie en œuvre			X
Fin de vie			
Relargage d'une partie du CO ₂ atmosphérique stocké		X	
Utilisation de véhicules de transport vers les centres de traitement		X	

TABLE 1.4 – Captage et émission de carbone de la paille dans le temps

6.1.1.2 Paille comparée aux autres matériaux biosourcés

L'emploi de la paille se justifie également par rapport à la quasi-absence de transformation qui consiste simplement à un reconditionnement sous forme de botte. Cela en fait le matériau biosourcé le moins transformé. Il en découle pour ce produit, disponible en toute saison, un prix extrêmement bas de 5€ la petite botte de 120 kg/m³.

Par exemple, en comparant l'indicateur d'émission de CO₂ pour un même coefficient de transmission thermique U de 0,10W/m²k, un mur en paille avec enduit chaux à l'extérieur et enduit terre à l'intérieur absorbera 88 kg de CO₂ eq. par m² contrairement aux autres modes constructifs qui en émettront grossièrement entre 50 et 100 kg (Tableau 1.5).

Mode constructif	U (W/m ² K)	Emission de CO ₂ (kg de CO ₂ éq. par m ²)
Briques de chaux/sable, isolé avec du polystyrène extrudé	0,10	108
Paille avec enduit chaux à l'extérieur et enduit terre à l'intérieur	0,10	-88
Mur béton avec laine de lin	0,10	89,84
Ossature bois avec isolant en laine de chanvre	0,10	53,64

TABLE 1.5 – Comparaison des émissions de CO₂ en fonction du mode constructif - Source : Base INIES

Autre exemple : une maison en paille de 200 m² va séquestrer plus de 17 tonnes de CO₂ tandis qu'une maison conventionnelle de 100 m² en rejettera 22 tonnes [SNEL2015] . Il est estimé que si 1% des logements étaient construits en paille en France (c'est à dire environ 5,000 logements), 5000 * (22-17) = 25 000 tonnes de CO₂ seraient économisées par an.

Le Picbleu®, encyclopédie en ligne et indépendante sur l'habitat durable, propose un graphe comparatif des matériaux isolants au m² ayant une même résistance thermique R de 5 m²K /W Figure 1.27. La paille arrive en première position avec un prix de 4€ TTC pour une épaisseur très similaire aux autres de 20 cm.

De même, en comparant la quantité d'énergie grise requise pour leur production, la paille se classe en tête suivi de la ouate de cellulose et de la laine de mouton, en affichant des valeurs acceptables (entre 5 et 21 kWhEp/UF). Tous les autres matériaux, même biosourcés, sont tous très énergivores.

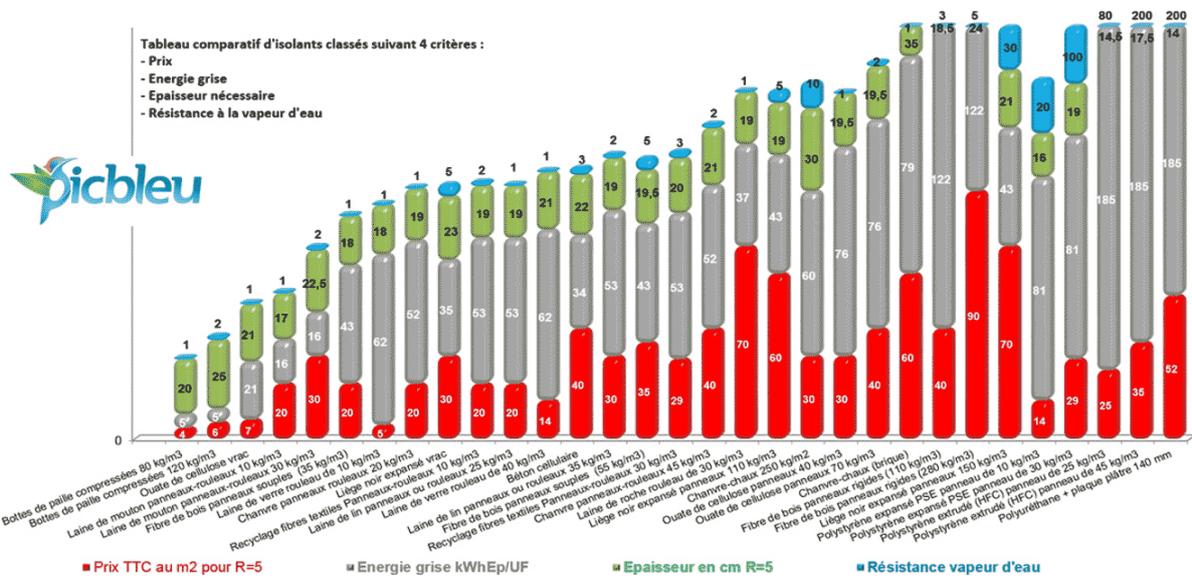


FIGURE 1.27. Tableau comparatif des matériaux isolants thermiques pour isoler un bâtiment neuf ou en rénovation - (Source : PicBleu (2023))

D'après Floissac, parmi les matériaux biosourcés employés en France, la ouate de cellulose représente actuellement 40% contre 18% pour la laine de bois. Au niveau national, 45 000 tonnes de ouate de cellulose sont consommées dont 1/3 sont importés [LRA2014]. Il a été estimé qu'en 2050, selon le scénario le plus défavorable BS+++ de Terracrea selon lequel 75% des logements seraient isolés en biosourcés, les besoins en matériaux isolants biosourcés atteindraient environ 435 000 tonnes par an afin d'isoler 600 000 logements. En conservant la répartition actuelle des matériaux biosourcés utilisés comme isolant, il faudrait produire de 200 000 tonnes de ouate de cellulose par an, ce qui est impossible. En revanche, si la paille remplaçait la ouate dans le classement, il faudrait 1 million de tonnes de paille et il y a suffisamment de paille produite en France pour répondre aux futurs besoins en matériaux isolants.

La paille étant un coproduit agricole, elle ne fait pas d'ombre aux surfaces cultivées destinées à des fins alimentaires. De plus, sa valorisation dans le BTP permettrait de créer de nouvelles possibilités de revenus pour les agriculteurs.

6.1.1.3 Une filière du bois sous tension

Il est important de souligner que ce mode constructif est un moyen de réduire l'utilisation du bois en construction. En 2014, des simulations proposées par le Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse (LRA) portant sur les ressources en bois, ont montré qu'elles risquaient de ne pas être en capacité de répondre favorablement à une demande toujours plus importante [LRA2014]. Les événements de ces dernières années ont accéléré cette tendance.

En effet, la crise sanitaire de 2020 a fortement contribué à la pénurie des diverses ressources et le bois n'y a pas échappé. Beaucoup d'entreprises ont été amenées à ralentir ou à arrêter leur activité pendant plusieurs mois mais c'était sans compter sur une reprise qui s'est révélée à la fois intense et rapide, déclenchant ainsi un dérèglement logistique critique.

Des événements géopolitiques ont empiré le phénomène :

- Dès fin 2017, Donald Trump a décidé d'augmenter les taxes américaines sur le bois canadien. Cette hausse des tarifs douaniers combinée à la mise en place d'une prime de rénovation a conduit à une augmentation considérable des exportations françaises.
- Au même moment, la Chine a voulu anticiper les conséquences liées au conflit russo-ukrainien dès janvier 2022, sachant que 70% des exportations russes lui étaient dédiées [ESCA2021]. De plus, suite à une surexploitation de ses forêts, un décret chinois a été mis en place en 2017 afin d'interdire l'abattage des chênes pendant 99 ans et de subventionner ses entreprises pour qu'elles aillent acheter du bois à l'étranger. Ainsi, un chêne sur trois coupé en France part en Chine.

La demande européenne couplée aux besoins en bois de ces deux géants aura fait flamber les prix qui sont redevenus plus raisonnables depuis.

Enfin, une raison technologique explique cette pénurie de bois en France. A l'heure actuelle, les forêts sont constituées à 72% de feuillus et à 28% de résineux. Or, les proportions de sciages sont complètement inverses à ces chiffres. En effet, les sciages de résineux représentent 85% des sciages totaux effectués par nos scieries, contre 15% de feuillus [FCBA2022].

Les raisons pour lesquelles les scieries de feuillus sont peu développées et d'après Coudert [COUD2022] s'expliquent par plusieurs raisons :

- approvisionnements encore peu sécurisés de certaines essences d'arbres car absence d'outil prévisionnel informatique au niveau national de mobilisation du bois (volume, localisations, qualité),
- outils industriels peu modernisés,
- manque d'attractivité de la profession : trop peu de visibilité et de communication sur ce secteur, peu de formations et de recrutement pour la filière,
- problèmes de structuration de la filière : trop hétérogène et présente une faible culture partenariale, avec en prime des problèmes de transmission quand il n'y a pas de repreneur familial,
- manque de financement jusqu'à très récemment.

Ce problème d'industrialisation oblige les entreprises françaises à s'approvisionner à l'étranger et cela pénalise donc la balance commerciale. La France est fortement importatrice de bois et ses produits dérivés avec un ratio de 20,6M€ contre 11,9M€ de produits exportés [AGRE2022].

Le changement climatique a malheureusement impacté la filière négativement : la sécheresse et la prolifération de certains parasites, comme les scolytes qui rongent les épicéas. Ainsi, les trois quarts des 200 millions d'euros initialement consacrés à la filière dans le plan de relance 2021-2022 ont été redistribués à la plantation de 50 millions d'arbres, le reste étant destiné à la modernisation du secteur, notamment des scieries [OHEN2021].

La multiplicité des emplois du bois est à prendre en considération et il devient primordial de ne pas tout miser sur ce matériau. En effet, si le secteur du BTP concentre 52% des produits bois, d'autres secteurs lui font concurrence :

- les produits de consommation courante (21 %) : articles en papier ou en carton, les objets en bois, les produits manufacturés (instruments de musique, cercueils, jeux et jouets, cintres, ...),
- l'emballage bois et carton, avec la tonnellerie (11 %),
- l'ameublement (6 %),
- l'énergie (10 %).

De plus, depuis 2020, le Ministère de la Transition Ecologique communique sa volonté de se tourner *«vers le recours massif au bois et aux matériaux biosourcés»* mais va encore plus loin en affirmant vouloir intégrer du bois dans toutes les constructions : *«à l'horizon 2030, l'usage du bois et des matériaux biosourcés quasi-systématique, y compris en structure (gros œuvre) dans les maisons individuelles»* [MINI2020_RE2020].

Ajouté à cela, le bois d'énergie (bois de chauffage et biocarburant) prendra une place plus importante dans les années à venir [ECOL2022]. L'emploi du bois doit être planifié sur plusieurs décennies et la gestion de ses stocks revisitée en fonction de ces nombreux facteurs.

Si le recours aux matériaux biosourcés est une bonne chose, la filière bois n'est malheureusement pas encore prête à faire face à ce nouveau défi. La paille porteuse permettrait d'alléger la consommation de bois et de faire des économies.

Avec les techniques actuelles, pour une maison d'une centaine de mètres carrés, l'économie en bois serait de l'ordre de 1 à 3 m³ de bois alors qu'une maison traditionnelle en charpente en requiert environ 3,5. Afin de maximiser l'économie en bois, plusieurs alternatives tendent à évoluer vers un recours toujours moindre de ce matériau qui n'est pas inépuisable :

- optimiser les ossatures (poutres en I, poutres treillis), et favoriser l'économie circulaire
- développer la construction en paille porteuse.

6.1.2 Insertion sociale et ancrage territorial

D'après Floissac, la construction en paille de manière générale favorise un ancrage territorial qui permet aux constructeurs de fonctionner en circuit court, tout en limitant les transports. En effet, 90 % des approvisionnements proviennent de sources distantes de moins de 50 km des chantiers [LRA2014].

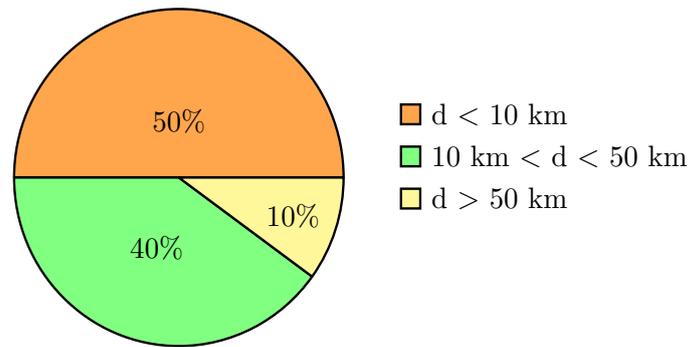


FIGURE 1.28. Distance d'approvisionnement des chantiers d - (Source : LRA (2014))

De plus, elle permet de nombreux emplois dans les filières agricoles et sylvicoles non délocalisables, contribuant au dynamisme économique des régions où elles sont implantées.

D'un point de vue socio-culturel, l'utilisation de matériaux biosourcés permet de reconnecter l'acte de construire ou de rénover aux territoires et d'intégrer les savoir-faire industriels à des techniques locales. Des propos assez similaires ont été employés par Léonore Moncond'huy la maire de Poitiers lors du 1er Congrès sur la paille en février 2023.

6.1.3 Isolant thermique

Les caractéristiques thermiques d'un mur en bottes de paille sont influencées par plusieurs critères :

- la paille : longueur et orientation des brins, type de céréales,
- la botte : teneur en eau, densité,
- la mise en œuvre : nombre et étendue des vides entre les bottes, densité de l'enduit utilisé pour le comblement,
- l'enduit : nature et épaisseur,
- les ouvertures : nombre et taille.

Dans les modes constructifs conventionnels, les propriétés mécaniques des isolants (tassements possibles) et des malfaçons créant des discontinuités peuvent favoriser l'apparition de ponts thermiques. La botte de paille structurelle limite ce type de déconvenue. En effet, le mur de bottes faisant également office d'isolant et qui plus est, précomprimé, de façon à assurer une bonne homogénéité et continuité du matériau.

Un autre aspect garantit la performance générale du bâti, et ce indépendamment du mode constructif choisi. Cela concerne l'isolation du sol, de la toiture et la jonction des niveaux adjacents aux murs. Les performances thermiques actuellement en vigueur en construction paille doivent répondre aux exigences de la Réglementation environnementale RE2020 et plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour les obtenir.

Le mur peut être testé par la « méthode de la plaque chaude », de la « sonde thermique », de la « boîte chaude gardée », par le contrôle de performance en conditions réelles, par modélisation, ou encore par thermographie infrarouge des murs.

Le coefficient de conductivité thermique (λ) dépend de l'orientation des brins donc du mode de fabrication des bottes (Tableau 1.6) :

- botteuse à canal central : l'enchevêtrement homogène des brins verticaux permet d'atteindre un coefficient de conductivité thermique (λ) de $0,052 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$,
- botteuse à canal latéral : Les brins étant dans le sens de la largeur de la botte, le coefficient de conductivité thermique (λ) dépend du sens de pose de la botte.

	Type de bottes			
	Petites bottes		Grandes bottes/bottes matelas	
Orientation des brins Données thermiques	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Type de presse	Canal central	Canal latéral	Canal central	Canal latéral
Organisation des brins	Enchevêtrés	Parallèles aux flux de chaleur	Enchevêtrés	Parallèles aux flux de chaleur
Coefficient de conductivité thermique λ (W/m.K)	0,052	0,08	0,052	0,052
Résistance thermique R (m ² K/W) à plat avec 46 cm de large	9	5,8	/	/
Résistance thermique R (m ² K/W) à plat avec 80 cm de large	/	/	15,38	0,052
Résistance thermique R (m ² K/W) à chant avec 70 cm de large	/	/	13,46	Sans objet

TABLE 1.6 – Performances thermiques en fonction de l’orientation des brins pour les petites bottes ($\rho < 120$ kg/m³) – (Source : RFCP (2023))

Dans le Tableau 1.7 sont listés les avantages de l’utilisation des petites bottes selon l’orientation des brins.

Orientation des brins Données visuelles & techniques	Vertical	Horizontal
Type de presse	Canal central	Canal latéral
Repères visuels	Les brins sont généralement plus courts et très enchevêtrés. Ce type de botte ne présente pas de face coupée ou pliée.	L’un des chants présente des galettes aux brins pliés (orientés vers les nœuds des liens) et l’autre des brins coupés.
Avantages	Bonne propriété thermique à plat	Adhérence de l’enduit optimale
Inconvénients	Moins bonne adhérence de l’enduit	Bonne propriété thermique à plat. Disponibilité faible des petites bottes avec une densité supérieure à 95kg/m ³ sur base sèche. Sa forme trapézoïdale oblige à alterner le sens de pose lors du montage.

TABLE 1.7 – Résumé des avantages selon l’orientation des brins pour les petites bottes – (Source : RFCP (2023))

La paille porteuse présente également des avantages par rapport à l’utilisation d’une ossature bois avec isolant paille (Figure 1.29). Par exemple, il a été estimé que, pour une paroi d’une surface donnée en paille porteuse, la résistance thermique valait $R = 8.85$ m².k/V pour 6.9m².k/V pour une paroi en paille de remplissage. On compte un volume de bois multiplié par 2.5 en simple ossature bois et de 4.5 en double ossature bois. Pour de meilleures performances, le volume en bois est bien moindre. C’est donc également intéressant écologiquement et du point de vue économique.

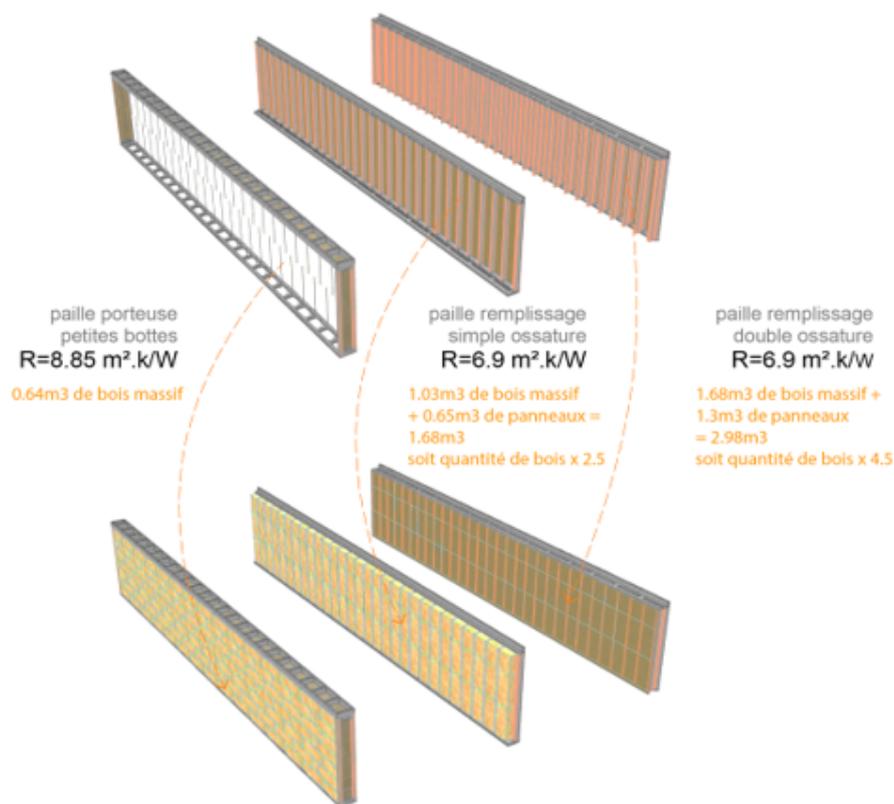


FIGURE 1.29. Comparaison des performances thermiques

6.1.4 Autres propriétés

6.1.4.1 Confort acoustique

En 2008, le FASBA a conduit des essais de mesures de l'isolation acoustique selon la norme DIN EN ISO 140-1, sur un mur en bottes de paille de 356 mm d'épaisseur, enduit à la terre sur ses deux faces (Tableau 1.8). $R_{w,P}$ est l'indice d'affaiblissement acoustique en laboratoire. En appliquant les critères de DIN 4109, il découle $R_{w,R}$ la valeur de calcul déduite d'une valeur corrective de 2 dB.

$R_{w,P}$ paille nue [dB]	$R_{w,R}$ [dB]	$R_{w,P}$ paille + enduit terre [dB]	$R_{w,R}$ [dB]
45	43	46	44

TABLE 1.8 – Résultats des essais d'isolation acoustique – (Source : FASB2008)

6.1.4.2 Performances structurelles

Les performances structurelles de la paille sont abordées au chapitre 2.

6.1.4.3 Qualité de l'air

La botte de paille a été classée en catégorie A+ en termes d'émission en polluants volatils selon les normes ISO 16000 [VERI2013].

6.2 Freins au développement

Malheureusement, des aspects non négligeables freinent le développement de la paille porteuse. Ces obstacles sont d'ordre psychologique mais également liés à la méconnaissance de ce matériau qui a été peu étudié par le passé.

6.2.1 Représentation de la paille dans l'imaginaire collectif

6.2.1.1 Etymologie

Le mot paille vient du latin *palea* (XII^{ème} siècle) et signifie « balle de blé, de céréale ». Aujourd’hui, il se rapporte au coproduit agricole associé au blé. En dehors du nom donné à l’ustensile servant à boire, il est d’après le Larousse et le Littré souvent utilisé dans des expressions pour le moins péjoratives :

- « Homme de paille » : une personne mise en avant dans une affaire douteuse, une escroquerie qui se fait pour le compte d’autrui.
- « Être sur la paille » : se trouver dans un état d’extrême misère, d’extrême pauvreté.
- Dans l’Évangile, « voir une paille dans l’œil de son prochain, et ne pas voir une poutre dans le sien » : remarquer les moindres défauts chez les autres et ne pas voir les siens propres.
- « Tout y va, la paille et le blé » : se dit d’un prodigue qui dépense tout.
- Ou le mot « paille » seulement : quantité négligeable.

On l’utilise également dans la boxe pour désigner les boxeurs de moins de 105 livres [47,128 kg] chez les professionnels.

Ces expressions populaires peu flatteuses engendrent dans l’inconscient collectif une impression de fragilité, et donc une certaine méfiance vis-à-vis de ce matériau.

6.2.1.2 Les Trois Petits Cochons

Cette impression de fragilité été amplifié par l’adaptation par Walt Disney en 1933 d’un conte traditionnel datant du XVIII^{ème} siècle : *les Trois Petits Cochons*. Les trois petits cochons quittent le cocon familial pour voler de leurs propres ailes. Le premier petit cochon se construit une maison de paille, le deuxième en réalise une en bois et le troisième en briques. Le grand méchant loup détruit les maisons des deux premiers petits cochons en soufflant dessus. Ceux-ci partent se réfugier chez le troisième. Le loup frustré de ne pouvoir détruire la maison du dernier cochon décide alors de rentrer par la cheminée mais tombe dans une marmite d’eau et s’ébouillante. Il parvient à s’enfuir en bondissant hors de la cheminée laissant les cochons en paix.

Le conte aborde plusieurs thèmes utiles au développement de l’enfant comme la prévoyance et le courage face à l’adversité. Seule la personne se construisant une base solide à l’aide de briques, les éléments du savoir, peut faire face aux aléas de la vie. Ainsi, le matériau paille est devenu dans l’imaginaire des gens un matériau fragile, léger, ne permettant pas une protection utile. Malheureusement cela a eu une grosse incidence sur le développement de la construction paille et provoque encore aujourd’hui un certain mépris.

6.2.2 Durabilité

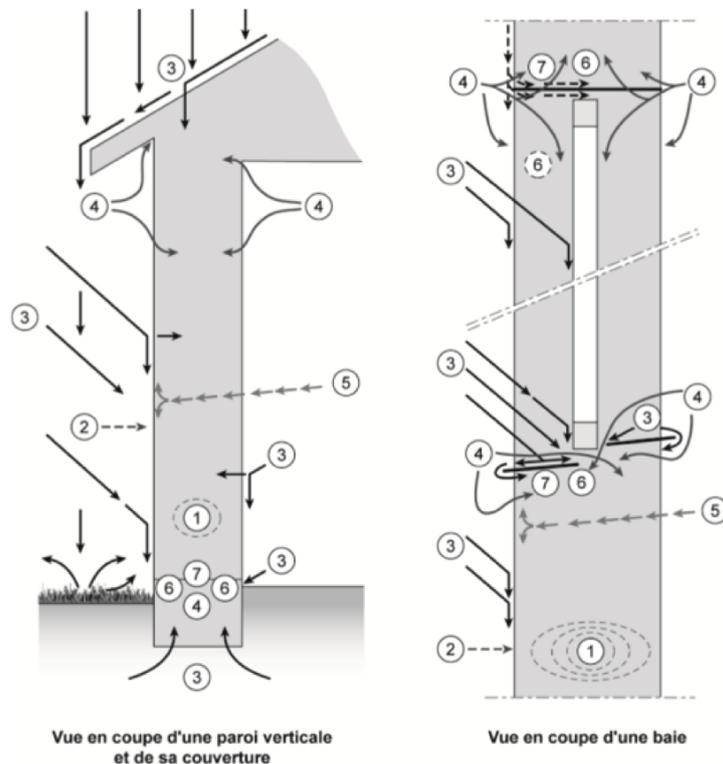
6.2.2.1 Facteurs d’altérations potentiels

Comme tout ouvrage, un bâtiment en paille porteuse peut être sujet à des désordres de nature diverse dus par exemple au non-respect des recommandations de conception et de mise en œuvre.

Des sinistres peuvent également être générés par des événements météorologiques exceptionnels ou par une sur-sollicitation non conforme à l’usage initial de la bâtisse. Enfin, un entretien insuffisant ou inexistant impacte négativement l’ouvrage sur le long terme.

6.2.2.1.1 Sources de désordre

D’après la (Figure 1.30), le RFCP répertorie sept facteurs de dégradation des murs en bottes de paille [RFCP2018].



1. Densité insuffisante de la paille
2. Dégradation du parement (fissure, fente) suite à choc, percement, etc.
3. Eau pénétrant dans la paroi (pluie, ruissellement, arrosage, accidentel ou eau d'origine)
4. Défaut d'étanchéité à l'air
5. Pénétration puis blocage interne de la vapeur d'eau
6. Condensation de la vapeur d'eau (pont thermique, etc.)
7. Migration d'eau par capillarité

FIGURE 1.30. Désordres à l'origine d'altérations structurelles et hygrothermiques au sein d'un ouvrage en paille porteuse - (Source : RFCP (2018))

En paille porteuse, les altérations de la paille et de l'enduit créent des faiblesses structurelles. Il est donc primordial d'être vigilant sur ce point.

Dans le Tableau 1.9, une première analyse est proposée sur la pertinence des facteurs de dégradation vis-à-vis du mode constructif paille porteuse. En effet, certains aspects ne présentent plus forcément un problème quand on utilise la paille comme élément porteur.

6.2.2.1.2 Désordres en phase de chantier C'est en phase chantier que l'ouvrage en paille est le plus exposé à d'éventuels désordres. Parmi ce qui a pu être observé sur les chantiers, des retours d'expériences ont permis d'en lister quelques-uns listés ci-dessous :

- Défaut du matériau :
 - ◊ bottes humides à cœur suite à un bâchage ponctuel insuffisant voire absent,
 - ◊ mauvaise formulation de l'enduit,
- Surcharge mécanique non anticipée due à une descente de charges mal calculée :
 - ◊ déformation des éléments en bois associés : flexion des lisses hautes et basses, flambement des pré-cadres de menuiseries dû à la compression,
 - ◊ tassements différentiels des murs,
- Préparation et mise en œuvre défaillantes :
 - ◊ manque de densité d'une botte ponctuelle qui aurait nécessité une recompression en amont,
 - ◊ prise en compte insuffisante voire absente de la saisonnalité pourtant primordiale lors de la réalisation d'éléments qui génèrent potentiellement de l'humidité dans le bâti (enduits, dalles...),

Facteurs de dégradation des constructions en paille	Pertinence vis-à-vis de la paille porteuse
Densité insuffisante de la paille	Non concerné car les bottes de paille sont très denses (>95 kg/m ³ sur base sèche). Les joints entre les bottes forment une discontinuité et constituent donc une fragilité structurelle. Ils doivent être comblés avec un mélange terre-paille le plus dense possible.
Dégradation du parement	Dépend de la mise en œuvre et de l'entretien de celui-ci. Les enduits, s'ils sont bien préparés et appliqués correctement, accrochent extrêmement bien à la paille.
Pénétration d'eau dans la paroi	Dépend de la mise en œuvre et de la conception.
Défaut d'étanchéité à l'air (si étanchéité à l'air il y a)	Idem
Pénétration puis un blocage interne de la vapeur d'eau	Idem
Condensation de vapeur d'eau due à un pont thermique, ou un matériau froid inclus dans les bottes de paille	Les broches insérées dans les rangées de bottes pour le maintien latéral ne doivent pas être en métal (De Bouter (2009) et Jones (2005)). Il n'y a normalement pas de matériau risquant de provoquer une condensation par choc thermique.
Migration d'eau dans la paroi par capillarité	Pour éviter tout risque de remontées capillaires ou les effets des éclaboussures lors d'épisodes pluvieux en pied de mur, les lisses basses doivent être isolées (De Bouter (2009) et Jones (2005)). La plomberie ne doit jamais être intégrée dans un mur en paille. Une fuite ne serait pas facilement détectable et très difficilement réparable. Il est possible de contourner le problème en insérant les canalisations dans des tubes PVC inclinés. Cela permet également d'éviter que la condensation sur les tuyaux d'eau froide humidifie la paille. La plomberie devra donc passer de préférence par les vides sanitaires, les planchers et les cloisons intérieures qui le permettent (De Bouter (2009)).

TABLE 1.9 – Réflexion autour des facteurs de dégradation de murs en paille

- ◇ absence ou manque de précompression en cas d'utilisation de petites bottes,
- ◇ manque de rigueur lors de l'application de l'enduit conduisant à son retrait et donc à des fissurations structurelles (si l'enduit est préparé et appliqué correctement, il s'accroche très bien à la paille).

6.2.2.1.3 Désordres en période de service Une période de stabilisation structurelle est nécessaire à tout ouvrage et peuvent alors émerger des désordres ponctuels liée à l'eau, à la structure et au feu. Si c'est le cas, il faudra mettre en place des méthodes de maintenance reposant sur une maîtrise multidisciplinaire des risques :

- approche technique : diagnostic et évaluation de l'état de l'ouvrage, risques et obligations réglementaires, optimisation des coûts et impact environnemental, solutions,
- levier humain : évaluation de la compétence actuelle, formation,
- démarche organisationnelle : planification des interventions, gestion et externalisation des opérations.

Le problème qui a été le plus souvent constaté sur les ouvrages en paille porteuse est la dégradation du parement. Mais encore une fois, elle est directement liée à un manque de rigueur lors de sa mise en œuvre et d'un entretien insuffisant voire inexistant.

A titre d'exemple, la maison de Werner Schmidt, la Haus Braun-Dubuis, construite en 2002, avait été correctement exécutée et jusqu'à maintenant, aucun ravalement de façade n'a été nécessaire [SNEL2015].

6.2.2.1.4 Entretien du bâti

L'entretien du bâti en paille porteuse s'inscrit dans une démarche préventive. Comme il a été expliqué précédemment, tout bâti nécessite une attention soutenue sur son évolution dans le temps. Le maître d'ouvrage a le devoir de contrôler l'aptitude au service de chaque élément constituant le bâti.

Pour en citer quelques-unes, voici des actions préventives qui limitent l'apparition de désordres :

- gérer l'écoulement des eaux,
- entretenir les éléments pouvant potentiellement laisser l'eau s'infiltrer :
 - ◇ la toiture et la zinguerie,
 - ◇ les pieds de murs afin de gérer les éclaboussures d'eau,

- ◇ les vêtements² intérieures et extérieures de l'ouvrage,
- contrôler visuellement les zones à risques structurels :
 - ◇ les interfaces des menuiseries,
 - ◇ les enduits (absence de fissures) et réfection éventuelle.

6.2.2.2 Risques de dégradation liés à l'eau

L'eau peut être une importante source de dégradation si des précautions ne sont pas prises. Ainsi, il y a deux risques à contrôler si on veut s'assurer de la pérennité d'un bâtiment en bottes de paille :

- éviter la pénétration d'eau liquide venant de l'extérieur ou de l'intérieur,
- gérer la pénétration de vapeur d'eau dans les murs.

6.2.2.2.1 Résistance à l'humidité

Deux règles sont à respecter pour éliminer les risques liés à l'eau : éviter l'infiltration d'eau et gérer la pénétration de vapeur d'eau dans les murs. En construction, la condensation est dangereuse pour les matériaux dont l'éventuelle dégradation entraînerait généralement celle de la qualité de l'air. Les moisissures ne se développent que sur un support physique et la paille en est un.

Les Règles Professionnelles de la Construction en Paille (RPCP2018) donnent des indications sur la sélection des bottes et sur leurs conditions de mise en œuvre en tant qu'isolant. Ces recommandations se retrouvent dans les Règles Professionnelles en Paille Porteuse en cours de rédaction [RFCP2023] que nous développerons au chapitre 2. Un humidimètre permet de contrôler la teneur en eau des bottes et si elle est inférieure à 20% sur poids sec, elles sont stockées au mieux dans un endroit sec et ventilé. Un contrôle visuel de la totalité des bottes et un contrôle à l'humidimètre à raison d'un contrôle toutes les 20 bottes est considéré comme suffisant.

Les désordres sont engendrés par des défauts de conception et à des problèmes de mise en œuvre. Il n'y a pas de matériau risquant de créer une condensation par choc thermique. L'emploi de broches en métal entre bottes est à proscrire et les lisses basses doivent être impérativement calfeutrées par l'enduit lui-même ou par un ruban adhésif [DEBO2009].

Aucune plomberie ne doit être insérée dans un mur en paille.

6.2.2.2.2 Importance de la conception face aux risques de condensation

Dans son ouvrage, De Bouter donne des recommandations pour faire face aux risques de condensation [DEBO2009]. L'humidité vient principalement de celle contenue dans les matériaux utilisés dans la construction. La paille mise en œuvre a normalement une humidité variant de 11% à 20% tandis que le bois peut contenir plus de 25% d'humidité. Il faut compter en général entre deux et trois ans pour qu'un bâtiment « sèche » entièrement. La paroi doit garantir une certaine perméabilité à la vapeur d'eau S_d ³(Tableau 1.10).

PAREMENT EXTÉRIEUR (éléments nommés du plus proche de la paille au plus éloigné)	PAREMENT INTÉRIEUR (éléments nommés du plus proche de la paille au plus éloigné)	RÈGLE À OBSERVER
Enduit	Enduit	$S_{d,ext} < S_{d,int}$
Plaque + Enduit	Frein-vapeur + Lame d'air + Plaque	$S_{d,ext} \leq S_{d,int}/5$
Plaque + Pare-pluie + Espace ventilé + Bardage	Frein-vapeur + Lame d'air + Plaque	$S_{d,ext} \leq S_{d,int}/5$
Enduit	Frein-vapeur + Lame d'air + Plaque	$S_{d,ext} \leq S_{d,int}/5$
Plaque + Enduit	Enduit	$S_{d,ext} \leq S_{d,int}/3$ ou 1m
Plaque + Pare-pluie + Espace ventilé + Bardage	Enduit	$S_{d,ext} < S_{d,int}$
Enduit	Pare-vapeur + Parement quelconque	$S_{d,ext} \leq 1m$

TABLE 1.10 – Critères de perméabilité - (Source : RFCP (2018))

2. Une vêtiture de façade est un élément extérieur qui vient se poser sur le bâti déjà existant.

3. S_d : résistance à la diffusion de la vapeur d'eau, elle est définie comme l'épaisseur de la couche d'air équivalente à la diffusion, exprimée en mètre. Plus la valeur S_d est faible, plus le produit est perméable à la vapeur d'eau.

Le DTU concernant les constructions à ossature bois impose l'emploi d'un pare-vapeur. Or, les murs en paille n'ont pas le même comportement hygrothermique que les murs à ossature bois. Ayant une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau relativement élevée, la botte de paille enduite stocke bien l'humidité. En pénétrant la paroi, la vapeur d'eau qui est en faible quantité se diffuse lentement. Les murs en paille ont une certaine capacité à absorber et à diffuser cette vapeur sans dommage, en supposant que les valeurs limites du coefficient de perméabilité S_d préconisées par les RPCP 2018 sont respectées. Si un pare-pluie est posée sur la face extérieure du mur (dans le cas d'un bardage par exemple), le DTU 31,2 préconise une perméance à la vapeur d'eau supérieure à $0,5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ (soit $1,04 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) et un coefficient S_d inférieur à $0,18 \text{ m}$. L'emploi d'un pare-vapeur, frein-vapeur, ou encore pare-pluie n'est pas nécessaire ni même souhaitable. Leur utilisation augmente la quantité de matériaux de construction (une plaque à enduire doit être fixée) et une mise en oeuvre défectueuse augmente les risques de condensation en cas de défaut d'étanchéité à l'air.

Si un pare-pluie est posée sur la face extérieure du mur (dans le cas d'un bardage par exemple), le DTU 31,2 préconise une perméance à la vapeur d'eau supérieure à $0,5 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{mmHg}$ (soit $1,04 \times 10^{-9} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$) et un coefficient S_d inférieur à $0,18 \text{ m}$.

L'emploi d'un pare-vapeur, frein-vapeur, ou encore pare-pluie n'est pas nécessaire ni même souhaitable. Leur utilisation augmente la quantité de matériaux de construction (une plaque à enduire doit être fixée) et une mise en oeuvre défectueuse augmente les risques de condensation en cas de défaut d'étanchéité à l'air.

De plus, l'emploi de film empêcherait la formation du complexe paille-enduit qui contribue fortement à la performance structurelle (cf. Chapitre 2). Des rubans adhésifs peuvent être utilisés localement au niveau des cadres de menuiseries et des jonctions mur/plancher et mur/toiture. Les boîtiers électriques fixés dans le mur doivent être correctement isolés.

6.2.2.2.3 Gestion de dégâts liés à l'humidité

De même, De Bouter explique comment corriger les dégâts liés à l'humidité [DEBO2009]. Dans un bâtiment déjà construit, si de l'humidité a causé des dommages sur une zone relativement petite (fuite sous une fenêtre, fissure repérée rapidement, etc.), un séchage naturel peut s'avérer suffisant. En pratique, une teneur en eau de 39% sur base sèche peut ne pas provoquer de développement microbien, mais par précaution, elle ne devrait jamais dépasser 25% d'humidité.

Dans certains cas, le séchage artificiel peut être employé avec succès cependant l'air expulsé provoque un apport d'oxygène conséquent pouvant ainsi accélérer l'échauffement de la zone humide. Cela peut contribuer à la croissance de la population de bactéries et champignons et donc entraîner sa décomposition. Une fuite de 4 à 5 litres d'eau pénétrant une paroi est considérée comme un « très petit volume d'humidité » et, si elle est séchée « très » rapidement, ne provoquera pas obligatoirement de décomposition. Une décomposition paraît trop avancée quand des marqueurs physiques apparaissent :

- dégagement de chaleur émanant de la zone,
- odeur de moisissure,
- taches noires visibles, etc.

Dans ce cas, il est préférable de déconstruire une partie du mur. Pour localiser la zone à déposer, des mesures précises doivent être relevées à l'aide d'un thermomètre à compost au centre de la botte. Une telle manœuvre aura cependant une incidence négative sur le plan structurel. En effet, l'ouvrage fonctionnant comme un ensemble compact, non seulement l'opération ne sera pas aisée mais en plus, le mur reconstruit n'aura plus les mêmes qualités structurelles. C'est pourquoi il est conseillé de tenter un séchage naturel avant d'amorcer toute opération. Dans un premier temps, il faudra peut-être déposer une partie de l'enduit et abriter la façade grâce à une bâche relativement éloignée du mur pour accélérer le séchage. Il n'y a actuellement aucun retour d'expérience de dépose d'un mur en paille porteuse suite à un dégât d'humidité en France.

La Haslow House construite en 1913 aux Etats-Unis est toujours debout mais serait, d'après les occupants, sujette à ce genre de problèmes. Les murs seraient à l'origine d'allergies originellement provoquées par la présence de moisissure et donc d'acariens [HENR2012]. Aucune information n'a pu être recueillie sur le contrôle des bottes il y a 100 ans. Leur taux d'humidité n'était pas mesuré avant leur mise en oeuvre et les revêtements n'étaient pas sélectionnés par rapport à leurs qualités hygrothermiques (perspirabilité notamment). Malgré cela, la structure résiste toujours aux aléas météorologiques.

La maison Braun-Dubuis, construite en Suisse en 2002, est aujourd'hui encore intacte. Une extension a été réalisée sous la maison qui était construite sur pilotis. Près de vingt ans après, les enduits sont bien conservés. Aucune fissure n'est apparue et les habitants sont toujours aussi satisfaits de la forte inertie thermique de la maison qui leur assure un très bon confort été/hiver [SNEL2015].

6.2.2.3 Risques de dégradation structurelle



FIGURE 1.31. Pose d'un témoin au mortier de plâtre - (Source : RFCP (2023))

Plusieurs facteurs peuvent causer des fissures dans l'enduit et donc fragiliser la capacité porteuse du mur. Cela peut être lié à une infiltration d'eau, à un mauvais recouvrement des sangles ou des boucles en acier. Les chocs, l'arrachement d'un équipement même léger, ou des tassements différentiels peuvent également engendrer des fissurations. On pourrait supposer qu'une relaxation des sangles puisse aussi faire émerger ce phénomène. Il est important de savoir interpréter les réactions de surface qui vont être les révélatrices de désordres parfois plus ou moins importants (Figure 1.31).

6.2.2.4 Risques de dégradation par les rongeurs, les insectes et les termites

6.2.2.4.1 Rongeurs

Le risque de présence d'animaux dans les murs est surtout présent durant la phase de chantier, avant l'application de l'enduit. Les joints entre les bottes offrent des espaces confortables pour un rongeur. Pour se prémunir de cela, il est conseillé de poser un grillage à poule au niveau du soubassement.

Pour rappel, la paille contient de la silice, ce qui la rend difficile à ronger.

De plus, la densité des bottes de paille (90 à 155 kg/m³ en paille porteuse) freine le déplacement des rongeurs dans les bottes de paille.

Cependant pour un panneau isolant de densité comprise entre 10 et 40 kg/m³ (comme pour les rouleaux de laine minérale ou de bois), la protection au risque n'est plus assurée. Un système de protection (grilles, enduits, plaques, etc.) doit être prévu à la conception. Finalement, cela dépend encore une fois plus des modes constructifs et de la conception que de la résistance du matériau en lui-même.

Il paraît peu probable que des rongeurs creusent entre 3 et 6 cm d'enduit dense. S'il n'y a pas d'enduit, mais une simple étanchéité sur la paille, une protection sous forme de filet contre les insectes et rongeurs peut être fixée. D'après des retours d'expérience, des fouines s'étaient installées dans des toitures isolées en paille (comme c'est le cas, là encore, pour les laines de bois ou minérales) mais il n'existe pas de cas répertorié dans les murs enduits.

6.2.2.4.2 Termites

Des chercheurs étudiant l'attitude des termites vis-vis de la paille ont constaté que peu d'espèces de termites parvenaient à digérer la paille, et qu'elles lui préféraient le bois comme nourriture [SNEL2004]. Il semblerait que le taux de silice ainsi que la cuticule de cire naturelle de la paille en soit la cause. En 2010, des essais entomologiques effectués par le FCBA sur l'initiative du RFCP ont montré que les termites survivaient moins bien dans la paille que dans les systèmes constructifs contenant du bois [FCBA2010]. La paille n'est pas suffisamment nutritive pour la survie des termites à long-terme. A la fin des essais, la survie moyenne des termites s'élevait à seulement 17%. La paille porteuse employant moins de bois pourrait donc être préférée à une structure à ossature bois.

Comme pour le bois, un soubassement de 20 à 30 centimètres suffit pour les éloigner et assurer la pérennité d'un bâtiment construit en bottes de paille. Notons qu'aucune attaque de termite n'a été recensée jusqu'à présent sur les murs correctement séparés du sol [DEBO2009].

6.2.2.4.3 Insectes

La présence d'insectes ou d'acariens est généralement due à un problème d'humidité et il est important de garder la paille bien sèche (max. 15% à la pose). Il existe peu de cas connus d'occupation d'insectes dans des murs en bottes. Un cas a été localisé en Italie. Les occupants d'une maison ont attesté que des insectes étaient restés pendant les 2 premières années mais pour une raison totalement inexpliquée, ils avaient ensuite disparu sans avoir causé de dommage.

Afin de se prémunir de ce type de désagrément, une moustiquaire entre la paille et l'étanchéité est parfois installée en phase chantier. Cette mesure n'est pas indispensable et est même plutôt rare comme le démontrent les nombreux bâtiments en paille sans dispositif et pourtant intacts.

6.2.2.5 Risques liés au mode de culture

La teneur en azote contenue dans la paille dépend du mode de culture et influence ainsi le constructeur dans le choix de sa paille. Par exemple, un modèle de production employant des fertilisants (pour la plupart à

base d'azote, de phosphore et de potassium) produira des céréales plus riches en azote. L'azote favorise la décomposition des plantes dans le sol et donc une botte issue de ce type de culture présentera plus de risques de pourrissement [DEBO2009]. A l'heure actuelle, la grande majorité des cultures emploie malheureusement des fertilisants.

La toxicité de la paille varie en fonction des pesticides utilisés et du moment de leur projection sur les cultures. Certains pesticides se dégradent rapidement en matière inerte tandis que d'autres restent actifs et toxiques pendant des années [DEBO2009]. Le choix des bottes est effectué en fonction des sensibilités des constructeurs et futurs habitants et doit être étudié au cas par cas.

Une terre fertilisée chimiquement augmente le taux de nutriment dans les tiges et aide à la prolifération des bactéries et des champignons tout en réduisant les défenses naturelles de la paille. Une paille biologique contient moins de nutriments et se voit plus résistante à la biodégradation [ATBA2009]

6.2.2.6 Comportement au feu

En sécurité incendie, il faut distinguer la résistance au feu à la réaction au feu. La réaction au feu désigne la capacité qu'a un matériau à s'enflammer et à provoquer un départ de feu. La résistance au feu renvoie à la durée durant laquelle l'élément de construction testé freine la propagation d'un incendie.

Plusieurs tests au feu ont été effectués sur des murs en paille en remplissage et sur la botte de paille nue. Deux essais ont été réalisés sur des murs en paille porteuse. En 2006, une équipe des laboratoires Intertek de San Antonio au Texas a placé les murs conformément à l'ASTM E-119 [ASTM2022], dans un four de 3 m x 3 m à une température comprise entre 900 et 1000°C (Tableau 1.11).

Mur	Caractéristiques	Résultats	Commentaires
1	<ul style="list-style-type: none"> — Bottes de 40 cm de large posées à plat. — Précompression du mur à 8,76 kN/m. — Enduit terre de 25 mm en deux fois : <ul style="list-style-type: none"> — Une 1^{ère} couche d'enduit à J0. — Une 2^{ème} à J+10. — Mur de 45 cm d'épaisseur. — Durée du test : 1 h. 	<ul style="list-style-type: none"> — Apparition de fissures après 25 minutes de test sur les deux faces. — Propagation et multiplication des fissures par la suite. — Carbonisation sur 7 à 10 cm des autres bottes et des poupees de paille de rebouchage en vrac sans enduit. — Test de vérification de la solidité de l'ouvrage à l'aide de la pression obtenue avec une lance à incendie. — Effritement du reste de l'enduit. — Absence de mouvement des bottes malgré leur combustion partielle. 	<ul style="list-style-type: none"> — Apparition d'une fissure de 8 mm lors de la manutention du mur sur la face extérieure du mur et n'a pas été réparée avant l'essai.
2	<ul style="list-style-type: none"> — Bottes de 30 cm de large posées sur chant. — Précompression du mur à 8,76 kN/m. — Renfort sur les deux faces par un grillage métallique à maille hexagonale, fixé dans les bottes grâce à des agrafes de 15 à 20 cm de long. — Enduit ciment-chaux de 25 mm en deux fois : <ul style="list-style-type: none"> — Une 1^{ère} couche d'enduit à J0. — Une 2^{ème} à J+10. — Mur de 35 cm d'épaisseur. — Durée du test : 2 h. 	<ul style="list-style-type: none"> — Apparition de fissures après 20 minutes de test sur la face exposée à la chaleur du four. — Propagation et multiplication des fissures sur cette même face mais pas sur la face extérieure. — Bombement de la face exposée aux flammes qui est seulement maintenu par le grillage 25 cm de la paille. — Fonte des ficelles de liage en polypropylène mais conservation de la cohésion des bottes grâce à la précompression. — Carbonisation sur plusieurs cm des bottes et des poupees de paille de rebouchage en vrac sans enduit. — Test de vérification de la solidité de l'ouvrage à l'aide de la pression obtenue avec une lance à incendie. — Effritement du reste de l'enduit. — Absence de mouvement des bottes malgré leur combustion partielle. 	

TABLE 1.11 – Résultats des essais au feu de Intertek – (Source : Intertek (2006))

En combinant les connaissances sur la paille porteuse, les résultats des tests américains et la résistance au feu des murs en paille enduits, il est possible de déterminer la résistance au feu d'un bâtiment en paille porteuse. En France, des essais sont prévus pour 2023 par le RFCP.

Néanmoins, il est nécessaire de rappeler que le risque d'incendie est davantage présent durant la phase de mise en œuvre. En effet, la paille en vrac éparpillée au sol suite à la manipulation des bottes est très inflammable car peu dense. Dans toute construction en paille, la paille doit être très régulièrement évacuée afin d'éviter tout incident.

En 2001, aux Etats-Unis, la résistance au feu des murs en bottes de paille a été classé dans la catégorie F90 soit l'équivalent d'un mur de béton de 25 cm d'épaisseur[SCHMIDT_web]. Cette classification n'est peut-être pas nécessaire pour du logement individuel mais devient essentielle pour la réalisation d'ERP ou de logements collectifs.

En France, les essais de réaction au feu doivent être conformes à la norme NF-EN-ISO-11925-2 depuis décembre

2002. Deux critères sont pris en compte : la combustibilité et l'inflammabilité.

En France, les essais de réaction au feu doivent être conformes à la norme NF-EN-ISO-11925-2 depuis décembre 2002. Deux critères sont pris en compte : la combustibilité et l'inflammabilité.

En 2010, les essais français organisés par le RFCP et son équivalent allemand la FASBA ont permis de classer ce matériau dans la catégorie E. Un autre test de résistance au feu a été effectué en 2012. Cette fois-ci, un mur en ossature bois avec remplissage paille, enduit à la chaux sur ses deux faces, a été testé selon les normes de l'essai SBI (Single Burning Item) par le FCBA, l'organisme référent français en sécurité incendie et son homologue allemand le MPA [FCBA2010_feu].

Cette fois-ci, le complexe paille-enduit a été classé en catégorie B-s1,d0 (Figure 1.32) :

- B : il a été considéré comme combustible mais ininflammable d'après son équivalence dans l'ancienne classification française.
- s1 : la quantité et la vitesse de production de fumée ont été jugées faibles. Il convient de préciser que ces fumées ne sont pas toxiques contrairement à celles de certains isolants synthétiques.
- d0 : un incendie ne produit aucun débris enflammé ni gouttelette.

Les résultats ont donc été très satisfaisants.

Classement des EUROCLASSES selon EN 13501-1			Exigences réglementaires françaises
Comportement au feu	Production de fumée	Gouttelettes enflammées	
A1	-	-	Incombustible
A2	s1	d0	M0
A2	s1	d1	
A2	s2	d0	
	s3	d1	M1
B	s1	d0	
	s2	d1	
	s3		
C	s1	d0	M2
	s2	d1	
	s3		
D	s1	d0	M3
	s2	d1	M4 (non gouttant)
	s3		
E	Non applicable	d1	M4
E	Non applicable	d2	Pas de classement
F	Non applicable	Non applicable	Pas de classement

FIGURE 1.32. Classement de réaction au feu - (Source : extrait de la norme EN 1350-1)

L'Euroclasse B-s1,d0 correspond à l'ancienne classe française M1, Cette classification allant de M0 à M4 (de l'incombustible au combustible) n'est actuellement valable que pour les matériaux d'aménagement intérieur.

6.2.3 Réglementations et normes

6.2.3.1 Dans le monde

Actuellement dans le monde, il n'y a que les Etats-Unis et le Royaume-Uni qui offrent un cadre normatif validant la construction des bâtiments en paille porteuse. Voici l'historique menant à l'officialisation d'une norme aux Etats-Unis [DEBO2009] :

à la fin des années 80, sont délivrés les premiers permis autorisant la construction de maisons en bottes de paille. Par exemple, en 1989, l'Etat de New York accorde le premier permis dans la ville de Kortright,

mais c'est en 1995, dans l'Etat du Nevada, que l'utilisation de la paille structurale est autorisée sans que soit définie une méthodologie officielle,

en 1992, le California Straw Bale Code (HS 18944) propose des recommandations qui ne sont pas systématiquement appliquées de façon officielle par les autres États mais qui servent de base officieusement dans la plupart des comtés.

A travers le monde, les réglementations encadrant les constructions en paille porteuse varient en termes de statut.

En France, le développement est essentiellement freiné par des verrous réglementaires et assurantiels liés au manque d'études poussées de recherche.

En 2012, le Réseau Français de la Construction Paille (RFCP) a publié des règles professionnelles [RFCP2012] axées sur la paille comme isolant et support d'enduit. Ces règles, équivalentes à un DTU, servent de référence

pour garantir la conformité aux normes auprès des assureurs. Actuellement, des Règles Professionnelles de la Construction en Paille Porteuse sont en cours d'examen [RFCP2023]. Mais cet absence de support normatif dessert son développement et contribue au manque de reconnaissance de cette technique.

6.2.3.2 En France

Jusqu'en 1995, les techniques « non courantes » en construction étaient exclues des garanties de travaux mais cela a été considérée comme abusif et abrogé. Les techniques « non courantes » et/ou traditionnelles sont autorisées par la loi et imposées aux assureurs si elles sont justifiées par une étude structurelle. Actuellement, si un assureur refuse d'accorder une garantie biennale ou décennale, c'est le Bureau Central de Tarification (BCT) qui décide. Si la technique est considérée comme valide, l'assureur doit répondre favorablement à la demande du futur assuré [DEBO2009].

Fondé en 2006, le RFCP vise à promouvoir et à faire reconnaître l'usage de la paille dans le bâtiment. En 2012, le Moniteur publie la première version des Règles Professionnelles du RFCP qui constituent le cadre de référence pour l'utilisation de la paille comme matériau isolant et support d'enduit. La Commission Prévention Produits (C2P) a approuvé ces règles en juin 2011 et, après avoir été suivies pendant quatre ans, elles ont été acceptées sans nécessité de retour d'expérience en janvier 2017.

Les Règles Professionnelles s'inscrivent dans le domaine traditionnel et des techniques courantes de construction, à l'instar des DTU. Depuis, deux autres rééditions ont vu le jour et le RFCP est devenu le principal référent des institutions du pays. Présentement, une troisième édition a été éditée (Figure 1.33).

Les constructions isolées en paille qui sont conformes à ces règles de conception et de mise en œuvre sont considérées comme des "techniques courantes" de construction, ce qui permet aux concepteurs et aux entreprises de construction de bénéficier de barèmes d'assurance standards. Cependant, la mise en œuvre de ces matériaux doit être réalisée par des professionnels qualifiés et, pour répondre à cette exigence, le RFCP a mis en place une formation de cinq jours appelée "Pro-Paille" qui couvre les pratiques décrites dans les règles professionnelles.

Aujourd'hui, le RFCP compte 800 adhérents et organise une fois par an les rencontres nationales de la construction paille, ainsi que des rencontres régionales. En 2023 a été organisé le premier Congrès professionnel de la construction paille.

Cependant, le document ne propose rien concernant la construction en paille porteuse. Un Groupe Paille Porteuse a vu le jour au RFCP et a été chargé de rédiger des recommandations professionnelles. Un premier document conséquent a permis de les passer au statut de "Règles Professionnelles" et celles-ci sont en cours d'examen auprès de l'Agence Qualité Construction (AQC)[RFCP2023].

Un particulier ou une entreprise qui voudraient construire en paille en suivant les Règles Professionnelles de 2018 doivent valider, au préalable, une formation certifiée RFCP ou faire valider leurs acquis par cet organisme. De plus, des fiches d'auto-contrôle mises à disposition par le RFCP doivent être remplies et leur être renvoyées. Cette démarche permet au RFCP de suivre l'évolution des pratiques de chantier et également établir un recensement. L'inventaire des données de chantiers permettra de comparer les pratiques et les coûts, et de les trier en fonction des méthodes qu'il faudrait conserver.

6.2.4 La paille porteuse en recherche

Les chercheurs s'intéressent de plus en plus à l'emploi de la botte de paille comme en témoigne la Figure 1.34. On y trouve l'évolution du nombre de publications avec les mots-clés « Straw+bales+construction » dans la base de données Elsevier pour un total de 1171 mentions.



FIGURE 1.33. Règles professionnelles de construction en paille [RFCP2018]

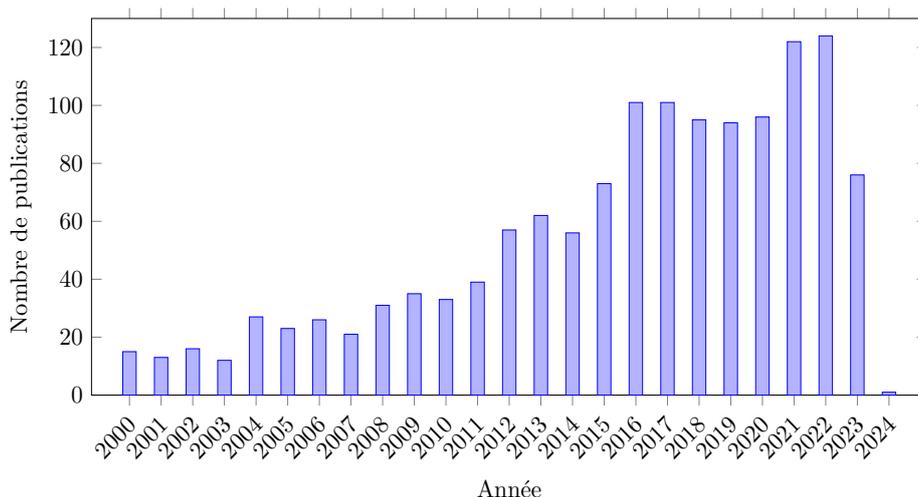


FIGURE 1.34. Evolution du nombre de publications avec les mots-clés «Straw+bales+construction » dans Elsevier

Si on s’attarde seulement sur les mots « Load+bearing+straw+bale », ce nombre descend à 24 ce qui atteste bien du manque d’attrait de la recherche vis-à-vis de la paille porteuse. Ces travaux de recherche sont pourtant nécessaires à la valorisation, mais surtout à la normalisation de la paille porteuse afin qu’elle puisse être considérée comme un mode constructif à part entière.

7. Développement des pratiques en paille porteuse

Cette section explore les méthodes de construction en paille porteuse de type Nebraska. De l’Amérique à l’Europe, différentes pratiques ont émergé et continuent d’évoluer, chacune adaptant la paille à ses besoins climatiques et architecturaux ou ses usages constructifs. La particularité d’une telle pratique réside dans son manque d’accessibilité qu’il faut compenser en se formant sur chantier ou par des ateliers encadrés.

7.1 Recensement des pratiques en paille porteuse de type Nebraska

La paille porteuse de type Nebraska utilise des bottes de paille comme isolant et élément structural. Les bottes sont empilées entre des lisses en bois et l’ensemble est comprimé à l’aide de sangles. Cette technique offre de bonnes performances thermiques et structurales, tout en réduisant la consommation de bois.

7.1.1 Etats-Unis

La méthode du voile mince travaillant est décrite par Bruce King (2006), traduit en français par André de Bouter (2011) et dans le code californien de construction en paille « California Straw Bale Code » HS 18944 [CSBC2021]. C’est l’une des seules techniques où l’aspect mécanique a été bien explicité.

Des lois de comportement ont été extrapolées à partir de quelques essais en laboratoire pour différentes configurations de bottes de paille enduites. Le code californien est un de premiers textes réglementant la construction en paille porteuse et est à ce titre une source d’inspiration. Cependant il faut prendre avec précaution les préceptes et les lois qui ont pu y être établies car l’approche californienne se focalise essentiellement sur l’utilisation de la petite botte dans des climats doux. Il prend également en compte les risques naturels violents qui traversent régulièrement la région à savoir les séismes et les ouragans.

Voici quelques éléments qui donnent matière à réflexion :

- Plusieurs types de bottes ont été testés par B. King et son équipe (2006). Il serait possible d’utiliser les ordres de grandeur des résultats et les tendances de comportement sur la paille de blé nue pour des prédimensionnements de projets, en prêtant attention aux différences entre celles utilisées dans les travaux de recherche et celles disponibles en France (type de céréales, densité, dimensions).
- L’utilisation de ciment Portland (de 5 à 15% massique) est une pratique courante dans la fabrication des enduits américains. Ceux-ci possèdent de fortes résistances à la rupture en compression mais sont également plus rigides et plus cassants. La chaux est une ressource plus rare en Californie. Les modes de rupture des murs correspondent principalement à ceux des enduits aux abords des lisses en bois.

- Les enduits sont souvent fibrés ou renforcés par des treillis métalliques. Ceux-ci augmentent la résistance mécanique, limitent la fissuration de l’enduit par séchage et permettent ainsi de conserver son rôle d’étanchéité à l’air.
- Le code californien recommande une précompression minimale des murs de 150kg/ml, soit d’environ 1% de la hauteur du mur, ce qui est bien plus faible que ce qui est pratiqué en Europe où les valeurs de précompression varient de 3 à 6%.
- La résistance à la rupture dimensionnante en compression ($Q_{u,Rd}$) est de l’ordre de 450 kg/ml pour un mur en petites bottes avec enduits terre et 1200 kg/ml pour un mur enduit au ciment selon cette approche.

Ces pratiques privilégient une sollicitation mécanique des enduits au détriment de la botte puisque les enduits peuvent être en fonction des formulations jusqu’à 10 000 fois plus rigides que les bottes. Cela contribue ainsi à la dénomination de voiles minces travaillant en compression et cisaillement. Cette méthode requiert donc de s’assurer de la bonne qualité de l’enduit et d’une bonne mise en œuvre des lisses en tête et pied de mur.

7.1.2 Royaume-Uni

Cette méthode est largement employée en Europe depuis le début des années 1990 par le groupe anglais de constructrices en paille Amazonails. Barbara Jones explicite dans son ouvrage [JONE2015] les pratiques de conception et d’exécution qu’elle a développées pendant des années sur ses chantiers. Ces conseils ont permis à la fin du 20ème siècle la construction de plusieurs bâtiments désormais témoins de la durabilité et de la fiabilité de ses méthodes. C’est elle qui a permis de faire connaître la technique de la paille porteuse en Europe et à la crédibiliser. La justification par le calcul structurel de l’élément de mur enduit n’est donc souvent pas nécessaire au Royaume-Uni.

Parmi les préconisations de conception qui impactent le comportement mécanique, voici quelques éléments :

- Les petites bottes doivent être très denses, supérieures à 100 kg/m³ sur base sèche de préférence. La précompression est de l’ordre de 500 à 600 kg/ml soit 3% de la hauteur environ afin de maximiser la rigidité du mur avec des moyens de chantier raisonnables.
- Les enduits présentent des formulations variables (terre, chaux, plâtre) mais sans ciment et présentent une épaisseur de 4 cm en général. La fragilité du ciment peut causer des fissures et l’absence de comportement hydro-régulateur font du ciment un mauvais parement en climat humide.
- Les enduits recouvrent généralement les lisses ainsi les charges transmises par la lisse haute passent brièvement par la paille avant de transiter via l’élément le plus rigide, les couches d’enduit.
- Les chevrons constituant les lisses ont des sections de 10 x 5 cm environ afin d’assurer le chaînage et la répartition des charges de manière homogène sur le mur.
- Des broches en noisetier sont insérées dans les bottes pour maintenir les bottes en phase chantier. Ces broches n’ont pas de rôle mécanique et servent seulement à guider la botte.

7.1.3 Suisse

En Suisse, la filière paille et les exigences répondant aux normes énergétiques amènent à privilégier l'utilisation de la grosse botte à très haute densité.

Cela lui permet de prévoir les tassements instantanés des différentes façades sous le poids propre du bâtiment. Sur ses chantiers, Peter Braun adapte alors le mode de pose de la charpente et des planchers : les éléments horizontaux en bois sont posés sur les bottes ou lisses et accompagnent les tassements des murs en paille en phase chantier, puis sont fixés à leur niveau définitif lorsqu'ils ont atteint les valeurs prédites. En cas de légères différences entre les tassements des murs calculés et ceux observés, certaines façades ou zones du bâtiment sont lestées afin d'y induire des tassements supplémentaires.

L'enduit est appliqué bien plus tard, quelques semaines ou mois après la pose du toit, afin de permettre au bâtiment de trouver sa forme d'équilibre avant toute contribution structurelle de l'enduit. Ceci permet ainsi de justifier la descente des charges de poids propre dans la paille nue. Les enduits dits « crépis » ne sont jamais à base de ciment et sont pris en compte comme éléments structurels dans la justification de la reprise des surcharges.

Peter Braun considère le complexe paille-enduit comme un panneau composite comportant deux matériaux de rigidités différentes. Il combine un modèle élastique linéaire pour la paille avec un modèle élasto-plastique pour l'enduit. Ce modèle discret permet d'approcher le comportement du mur à celui d'un treillis (Figure 1.35) . Il permet également d'estimer des charges critiques de flambement du mur. En variant les caractéristiques des matériaux on peut étudier la sensibilité du modèle à la rigidité et à l'épaisseur de l'enduit ainsi qu'à l'épaisseur de la paille.

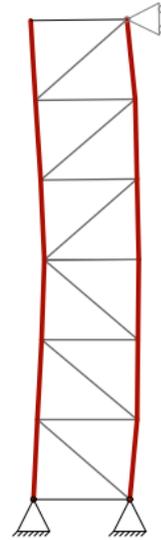


FIGURE 1.35. Modèle en treillis - (Source : Braun(2020))

7.1.4 Allemagne et Autriche

En Autriche, la Baubiologie recense et expérimente de nouvelles formes de construction en paille porteuse. Le FASBA en Allemagne est également très actif et effectue de nombreux tests pour valider les différentes techniques de construction en paille.

7.1.5 France

En France, il existe un groupe de travail dédiée à la reconnaissance de la paille porteuse au sein du Réseau de Construction en Paille. La collaboration de divers acteurs du bâtiment a abouti à la rédaction des Règles Professionnelles de la Construction en Paille Porteuse et elles sont actuellement soumises à examen [RFCP2023].

7.1.5.1 La méthode française

En France, le savoir-faire est directement inspiré de celles des Amazonails et de connaissances empiriques acquises par des années de pratique. D'un point de vue réglementaire, cette approche n'est souvent pas reconnue comme étant valable telle quelle par les autorités compétentes et les assureurs français. Ainsi, des compléments de justifications structurels sont demandés.

7.1.5.2 La méthode de la précontrainte = ELU

Cette approche a été proposée sur plusieurs projets en France et se base sur l'hypothèse que le mur en paille nue est un matériau élastique linéaire. La précompression n'est plus considérée comme un moyen de densifier et rigidifier *légèrement* le mur mais de le préparer à l'ensemble des charges qu'il subira au cours de sa vie d'exploitation.

En appliquant une précompression équivalente à la sollicitation maximale (dite « chargement à l'ELU »), le mur précomprimé restera immobile, il ne subira pas de déformation supplémentaire :

- les sangles permanentes (dites de précompression) l'empêchent de se dilater,
- son état de contrainte aidant, le mur répondra à toute surcharge inférieure ou égale à sa charge de précompression.

Avec cette approche, il est possible d'envisager des valeurs de précompression adaptées pour chaque mur en fonction des charges verticales à l'ELU. Un calage par de l'isolant rigide est possible en tête de mur afin d'obtenir

la même hauteur finale de mur partout. Les modules élastiques des murs peuvent ainsi être homogénéisés et les prédictions des tassements sous un chargement ELU sont affinées grâce à des essais de fluage.

Cette méthode permet d'écarter l'enduit de la justification structurelle, en faisant théoriquement uniquement travailler la paille nue en compression. Ceci explique la popularité qu'a suscitée cette approche de justification car dans le cadre réglementaire français, la justification de la contribution structurelle de l'enduit demande des preuves supplémentaires (modèles numériques, campagnes d'essais) qui peuvent être chronophages.

7.1.5.3 La méthode hybride bois-paille

Plusieurs bâtiments ont été construits en paille porteuse en France sans justification structurelle impliquant la paille. Souvent utilisée par l'association Nebraska, cette technique consiste à justifier structurellement le bâtiment via les éléments en bois du bâtiment. Des murs de refends servant aussi d'aide au montage de murs longs et des éléments de menuiseries (précadres) sont dimensionnés pour reprendre les charges verticales. Il s'agit donc d'un système en fonctionnement poteau-poutre et la légère augmentation des sections de bois permet de s'affranchir d'une justification structurelle de la descente des charges via la paille.

Toutefois, dans certaines situations, une approche combinant paille et bois peut être utilisée pour résoudre ces problèmes. Si les architectes ou l'entreprise souhaitent utiliser exclusivement de la paille porteuse pour les murs, même si l'architecture du bâtiment ne le permet pas en raison d'une répartition de charge non homogène ou excessive, ou de surcharges localisées, il est possible de renforcer localement la structure en utilisant du bois pour épaissir certains éléments, tout en minimisant l'impact sur la méthode de construction.

La reconnaissance de la construction en paille s'est jouée sur plusieurs niveaux en instaurant un cadre normatif afin de régulariser les méthodes de mise en œuvre mais également en mettant en place des formations pratiques.

7.2 Acculturation et formation

La construction en paille porteuse est encore trop récente pour bénéficier d'une reconnaissance qui lui permettrait de mettre en place des formations officielles. Très récemment, de plus en plus d'établissements scolaires s'intéressent à la construction en paille et souvent, ça fera l'objet d'une simple présentation comme j'ai pu le faire avec une classe d'apprentis en CFA de construction conventionnelle. Mais bien que des efforts soient faits dans l'Enseignement Supérieur pour intégrer un aspect plus écologique dans toute formation confondue, le manque de normes rend la diffusion de la formation en paille porteuse moins aisée. Cela passe par des moyens moins conventionnels. Donc, afin de d'acquérir la culture et l'expérience adéquate pour pouvoir parler de manière avisée de la construction en paille porteuse, j'ai réalisé plusieurs visites et formations tout au long de mes travaux de thèse.

7.2.1 Visite d'une maison individuelle à Grenoble

En 2018, une maison individuelle sur deux niveaux a été construite au sud de Grenoble par Cédric Hamelin et Mathilde Lapierre, tous deux membres de l'association Nebraska. Le bâtiment est essentiellement en paille porteuse avec enduit terre intérieur et bardage bois extérieur. De petites bottes de 110x46x36 cm et d'une masse volumique minimale de 95 kg/m³ ont été utilisées. Le coût total du projet a été de 185 000 € TTC.



(a)



(b)

FIGURE 1.36. Maison en paille porteuse à Grenoble : (a) Des brise-soleil orientables (BSO) protègent la paroi vitrée à l'est. Des canisses sont ajoutées l'été sur le vitrage sud ; (b) Salon et cuisine : murs enduits à la chaux - (Source : C. Hamelin et M.Lapierre (2017))

7.2.2 Formation encadrée

En mars 2020, j'ai suivi une formation de 5 jours sur la construction en paille porteuse avec l'association Nebraska. La formation avait lieu à Villefontaine (38) dans les Grands Ateliers gérés par l'association Amàco. Les objectifs étaient les suivants :

- connaître les potentiels et les limites de la technique de la paille porteuse,
- comprendre les caractéristiques du matériau en paille, les notions de résistance mécanique, tassement, hygrométrie,
- maîtriser la matière, les outils et les gestes professionnels de la technique de la botte de paille porteuse en condition de chantier (maquette à échelle 1),
- savoir reproduire et expérimenter des constructions en paille porteuse, et des enduits en terre crue,
- découvrir les bases et les avantages des finitions en terre crue sur botte de paille (enduit de corps, finitions, détails).

Cela m'a permis d'avoir une première expérience en paille porteuse avant les périodes de restrictions liées à l'épidémie Covid et de me former afin de pouvoir lancer mes essais dans l'année qui a suivi.



(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 1.37. Formation à Villefontaine : (a) Montage d'un mur avant sanglage, (b) Détermination de la longueur moyenne d'une botte, (c) Cours théorique sur les matériaux, (d) Assemblage des lisses - (Source : Association Nebraska et Amàco (2020))

7.2.3 Chantiers

Enfin, j'ai pu participer à deux chantiers de construction liés à des cas concrets de mise en œuvre de la paille porteuse. J'ai surtout été présente durant la phase de montage de murs et cela m'a permis de connaître toutes les subtilités et astuces qui ne pouvaient être dispensées lors de ma formation encadrée.

7.2.3.1 Construction d'une chambre froide à Grenoble

Au sud de Grenoble, au printemps 2021, s'est déroulé la construction d'une chambre froide avec l'association Nebraska. Le chantier se situait en milieu urbain sur la ferme de l'association Mille Pousses. Les murs de cette chambre froide sont constitués de murs en bottes de paille porteuse avec un parement intérieur en enduit terre et un enduit chaux appliqué à l'extérieur.

Le chantier participatif s'est déroulé sur 4 semaines, j'ai participé principalement au montage des murs.



(a) Montage des murs avant précompression



(b) Chambre froide après précompression et abaissement temporaire de charpente bois

FIGURE 1.38. Chambre froide à Grenoble – (Source : Association Nebraska (2021))

7.2.3.2 Construction d'une salle polyvalente à Villeurbanne

J'ai participé à la réalisation d'un Espace de Partage et d'Innovation (EPI) sur le site des Gratte-Ciel à Villeurbanne au printemps 2022. Ce projet a été financé par Rhône Saône Habitat, avec la participation de la société d'économie mixte SERL ; il est géré en partenariat avec le groupement d'intérêt économique La Ville Autrement.

Le projet de construction de l'EPI comprend :

- 4 containers aménagés destinés à YOUSTA (micro-distillerie et bar bio et équitables),
- une terrasse,
- un petit bâtiment en paille porteuse réalisé par l'association Nebraska ; ce sera l'un des premiers établissements recevant du public construit de la sorte.



(a) Murs avant mise en place de la lisse haute



(b) Murs avant précompression

FIGURE 1.39. Salle polyvalente à Villeurbanne – (Source : photothèque personnelle (2021))

8. Conclusion

Dans ce chapitre, il a été constaté que la paille était un matériau polyvalent utilisé dans divers domaines tels que l'agriculture, l'énergie, la phytotechnologie et la construction. En agriculture, la paille est utilisée comme litière pour les animaux, pour protéger les sols et comme fertilisant. Elle est également utilisée dans la production de bioéthanol et d'autres biocarburants. En phytotechnologie, certains types de blé sont utilisés pour traiter les sols contaminés. En construction, la paille présente des propriétés intéressantes, telles que sa rigidité et sa résistance à la traction, et peut être utilisée pour la construction de logements et d'autres structures. La disponibilité de la paille dépend du type d'agriculture pratiqué, mais en général, elle ne devrait pas faire concurrence à d'autres utilisations. Les bottes de paille, fabriquées à partir de paille en vrac, sont utilisées dans la construction en tant que matériau porteur, et leur qualité dépend des conditions de récolte et de la machine utilisée.

Ensuite, les différentes techniques de construction en paille ont été répertoriées. En France, l'ossature bois avec remplissage paille est la technique la plus courante, tandis que d'autres approches sont moins répandues. L'auto-construction et l'aide de professionnels sont des options pour la mise en œuvre. Au Royaume-Uni, la technique de la paille porteuse est plus répandue. Elle est utilisée dans plusieurs pays, avec des variations selon les réglementations et les matériaux disponibles. Elle inclut des pratiques telles que le voile mince en Californie, les petites bottes densifiées en Angleterre et la grosse botte à haute densité en Suisse. Des méthodes de calcul ont été développées pour évaluer la résistance des murs de paille. En France, le savoir-faire des Amazonails est largement utilisé, mais nécessite parfois des justifications structurelles supplémentaires pour être accepté par les autorités et les assureurs.

La construction avec de la paille porteuse présente de nombreux avantages écologiques. La paille est un matériau renouvelable, peu transformé et abordable. Elle séquestre du CO₂ pendant sa croissance et permet de réduire les émissions de CO₂ lorsqu'elle est utilisée comme isolant. La construction en paille porteuse favorise les circuits courts, crée des emplois locaux et réduit la consommation de bois. C'est une alternative durable et économique dans la construction.

Néanmoins, la représentation négative de la paille dans l'imaginaire collectif a freiné son développement en tant que matériau de construction. Les expressions péjoratives et le conte des Trois Petits Cochons ont renforcé l'idée de fragilité et ont contribué à une perception défavorable de la paille comme matériau de construction fiable. De plus, la durabilité d'un bâtiment en paille porteuse dépend de la qualité de conception, de la mise en œuvre, de l'entretien et de la gestion des risques liés à l'eau. Des facteurs tels que la densité de la paille, l'étanchéité à l'eau et à l'air, ainsi que la prévention de la condensation sont importants pour assurer la durabilité à long terme du bâtiment.

Un autre frein vient s'ajouter au développement de la paille porteuse. La construction en paille porteuse est encadrée par des normes et réglementations principalement aux États-Unis et au Royaume-Uni. En France, des verrous réglementaires et assurantiels limitent son développement. Le Réseau Français de la Construction en Paille élabore actuellement des règles professionnelles spécifiques.

Si beaucoup de réalisations ont pu voir le jour, les techniques utilisées en paille porteuse relèvent beaucoup de l'empirisme, de la transmission. Elles ont connu peu de travaux de recherche exhaustifs pour caractériser le comportement et proposer des modèles applicables aisément sur chantier. Ces travaux de recherche sont essentiels pour la valorisation et la normalisation de la paille porteuse en tant que mode constructif.

Avant d'aller plus loin, il est donc intéressant de recenser les études réalisées de façon disparate pour pouvoir proposer ensuite les essais permettant de construire des modèles efficaces pour la conception d'ouvrages en paille porteuse.

Chapitre 2

Etat de l'art

1. Introduction

Dans ce chapitre, l'objectif est d'établir un état de l'art sur la construction en paille porteuse afin de mesurer le chemin à parcourir pour en assurer sa qualification en tant que solution constructive. Les charges, qu'elles soient liées au poids de la structure, des occupants, du mobilier ou des conditions climatiques telles que le vent et la neige, ainsi que les sollicitations exceptionnelles comme les séismes, jouent un rôle important dans la conception des bâtiments. La question se pose de savoir si les bâtiments construits en paille porteuse peuvent répondre à ces exigences. 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 du niveau de précompression appliqué via les sangles et du niveau de chargement. La ductilité de l'enduit frais permet d'accompagner ces déplacements. Puis le séchage amène un accroissement de la rigidité et donc de la résistance de l'enduit, occasionnant un transfert progressif des charges et un fonctionnement se rapprochant d'un « panneau sandwich ». La structure ainsi obtenue peut ensuite supporter des charges additionnelles liées à la finalisation de la construction et aux charges variables d'usage.

On distingue deux phases de fonctionnement des structures en paille porteuse :

- Le comportement « en service » : les charges sont reprises par le composite paille uniquement tant que l'enduit n'est pas sec ou tout simplement mis en place.
- Le comportement « en construction » : les charges de toiture sont progressivement transférées de la paille à l'enduit.

D'après les retours d'expérience des artisans et constructeurs, plusieurs phénomènes ont soulevé des interrogations durant la phase chantier essentiellement le fluage et le flambement qu'il n'est pas forcément facile d'évaluer. Afin de mieux orienter les axes de recherche, il s'est avéré nécessaire d'établir un état de l'art exhaustif des essais structurels effectués sur les bottes de paille et sur les murs en bottes de paille indépendamment de la technique de montage. Il a été jugé également utile d'étudier les enduits qui contribuent structurellement aux murs en paille porteuse. L'ensemble des études qui ont été recensées ont été classées suivant le type de caractérisation effectué (compression, fluage, cisaillement, etc.) et la pertinence de ces études est liée à leur intégration dans les différentes étapes de la construction dont le déroulement est décrit dans la Figure 2.1. Cet état de l'art a pour but de mieux orienter mes travaux de recherche. Ceci a été effectué en procédant par méta-analyse des données disponibles.

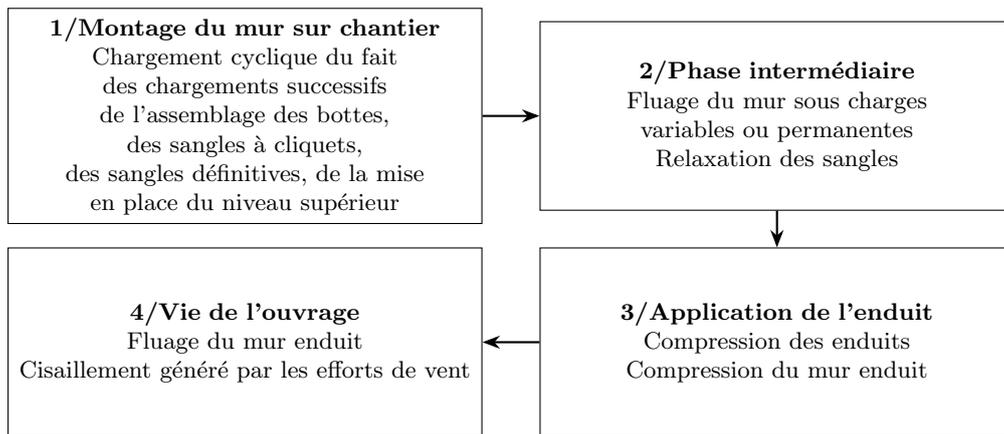


FIGURE 2.1. Étapes d'une construction en paille porteuse suivant la technique Nebraska et phénomènes mécaniques associés

2. Compression

Selon les usages de la construction en paille porteuse, une précompression correspondant à une déformation estimée entre 3% et 6% est appliquée sur les rangées de bottes via les sangles. Cela peut représenter un déplacement de 7 à 15 cm sur une hauteur de mur de 2,50 m. En abordant le problème dans le sens inverse, les artisans estiment une précompression de 3,5 à 6 kPa.

Ces éléments d'information servent uniquement comme ordres de grandeur approximatifs, afin d'orienter nos recherches bibliographiques.

Les murs en paille non-enduits ne peuvent supporter que de modestes charges avant d'être comprimés au-delà des limites acceptables ou jusqu'au flambement. Une fois enduits, leur capacité portante augmente considérablement, et cela d'autant plus que le transfert des charges a été soigneusement conçu et mis en œuvre depuis la partie supérieure jusqu'aux fondations.

Sous charge verticale, il existe cinq modes de dégradation qui ont été mis en évidence de façon isolée ou combinée par divers essais conduits à ce jour (Figure 2.2 et Figure 2.3).

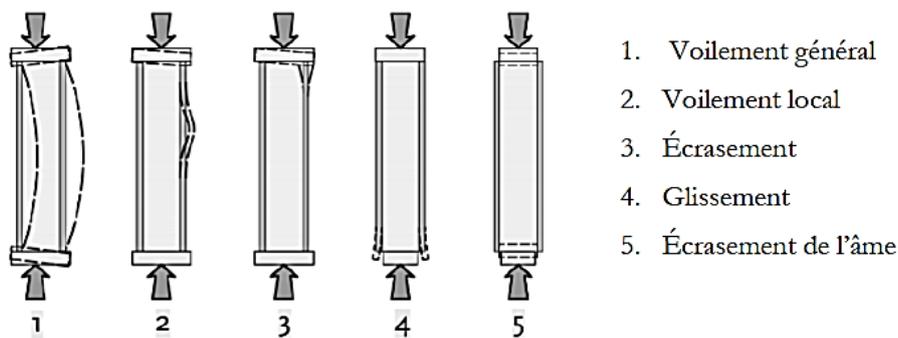


FIGURE 2.2. Mode de dégradation des murs en paille porteuse enduits - (Source : De Bouter (2006))

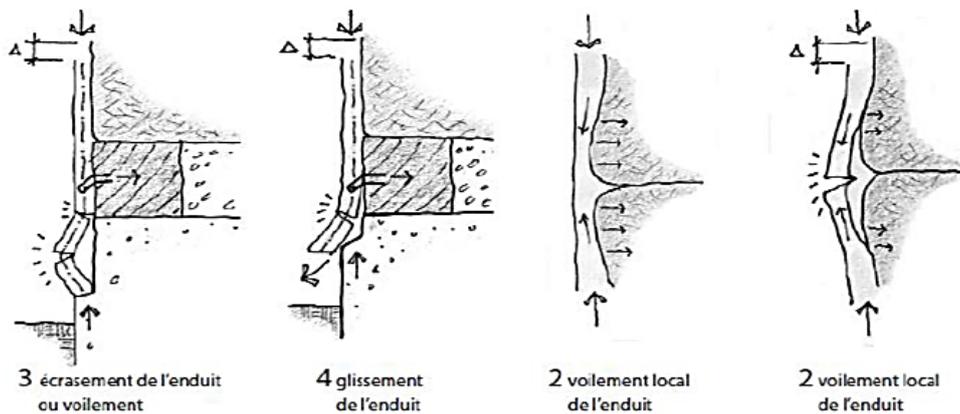


FIGURE 2.3. Schémas des désordres locaux – (Source : De Bouter (2006))

Il est intéressant de se demander si les problèmes rencontrés en construction paille en général pourront se retrouver en paille porteuse. Les résultats de cette réflexion proviennent de témoignages informels et sont listés dans le Tableau 2.

Mode de dégradation	Explication	Fréquence d'apparition
Voilement général	L'ensemble du mur se voile et casse; cela peut se produire pour un mur correctement construit mais dont la charge est appliquée de façon excentrée.	Rare
Voilement local	Une partie de l'enduit se délite et se détache de l'âme en paille ou de la couche d'enduit inférieure. Cela peut provenir d'une mauvaise application de l'enduit provoquant une adhérence insuffisante, d'un treillis non fixé aux bottes de paille ou d'une trop grande irrégularité de la surface du mur.	Fréquent
Ecrasement	L'enduit est écrasé contre la lisse haute ou basse, ou bien la lisse s'écrase sous le bord de l'enduit : les divers composants du mur n'ont pas été conçus ou construits pour supporter la concentration de contraintes au niveau des liaisons.	Fréquent
Glissement	L'enduit non maintenu glisse par-dessus la lisse haute ou basse : c'est généralement dû à une rupture des liens qui fixent le treillis sur les côtés des lisses ou des poutres.	NC
Ecrasement de l'âme	Si la charge n'est appliquée que sur la paille, celle-ci sera déformée par écrasement : d'où l'importance de concevoir un transfert des charges via les couches d'enduit.	NC

Une vingtaine de chercheurs s'est penchée sur le comportement en compression des bottes et des murs enduits ou non pendant les 30 dernières années.

2.1 Essais sur bottes en paille nue

Globalement, il a été constaté que pour les essais sur bottes, les modules d'élasticité de celles-ci sont souvent exprimés en fonction de leur masse volumique.

Les protocoles d'essais étaient tous similaires. Une botte posée à plat ou sur chant était installée sous une plaque pilotée par un vérin (Figure 2.4). La mesure du déplacement se faisait via un comparateur ou un appareil équivalent.



(a) Essai sur chant au début de l'essai



(b) Essai à plat avec une déformation de 0,77

FIGURE 2.4. Dispositif d'essai de compression pour deux configurations différentes – (Source : Lecompte, Le Duigou (2017))

2.1.1 Petites bottes

Plusieurs paramètres influençant le comportement des bottes soumises à un effort de compression ont pu être évalués. Etant donné que la paille ne reste nue que durant la phase chantier, les charges sont essentiellement de poids propre et ne sollicitent pas les bottes jusqu'à leur rupture. Par contre, l'évaluation du module d'Young est importante pour caractériser les déformations en cours de montage.

2.1.1.1 Influence de la masse volumique

Le premier travail paru dans la littérature est celui de Bou-Ali qui constate un lien entre la densité des bottes et la rigidité [BOUA1993].

De même, Thomson et al., Ashour et al., Krick, Danielewicz et al. observent que le module d'Young était proportionnel à la masse volumique [THOM1995, ASHO2003, KRIC2008, DANI2008]. Lecompte et Le Duigou constatent que, pour des masses volumiques de l'ordre de 90 à 110 kg/m³, le module d'Young des bottes sous faible chargement dépendait du rapport entre la densité apparente de la paille et celle de la botte [LECO2017]. Maraldi propose une évolution du module d'Young proportionnelle au carré de la densité [MARA2017].

Abdaless a étudié des bottes de faible masse volumique (85 kg/m³) en les chargeant à 30 MPa et en a déduit un module d'élasticité de 0,15 MPa (pour un chargement à 30 MPa) [ABDA2009]. Il a calculé également un module d'élasticité de 0,51 MPa après un deuxième cycle de chargement à 65 MPa ce qui semble contradictoire.

Selon Bou-Ali, la rigidité des bottes à plat augmentait avec une compression croissante [BOUA1993]. Les bottes à plat n'auraient donc pas un comportement linéaire en compression. Il a également constaté qu'elles reprenaient quasiment leur forme initiale après retrait de la charge selon un phénomène de « *rebond* ». Les bottes soumises à la charge maximale et comprimées jusqu'à moitié de leur hauteur, ont repris leur taille initiale le lendemain. Zhang a également noté, comme d'autres auteurs, que les bottes se reforment très bien après le relâchement de la charge [ZHAN2002].

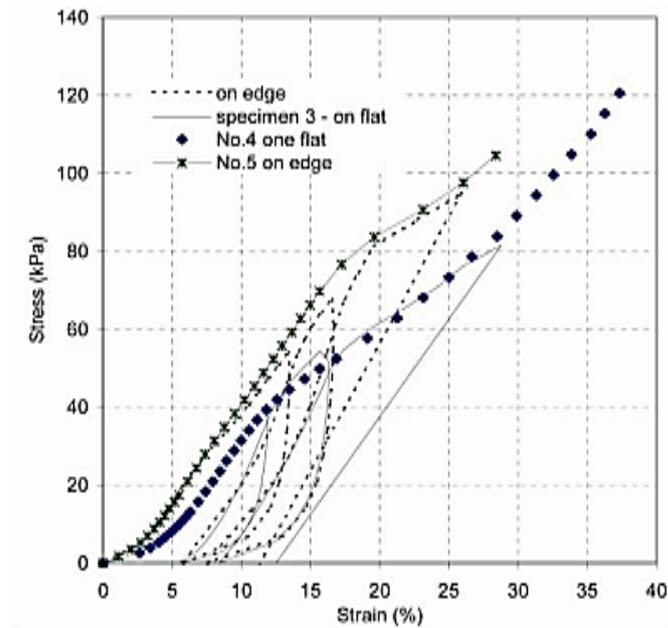


FIGURE 2.5. Essais de compression sur bottes à plat et sur chant - (Source : Zhang (2002))

Quirant et al. (2018) ont effectué des essais de compression sur bottes nues à plat dont les résultats sont présentés dans le Tableau 2.1.

Série	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	E_4 (MPa)	E_5 (MPa)	E_6 (MPa)	E_7 (MPa)
1	0,528	0,689	0,723	/	/	/	/
2	0,394	0,751	0,839	0,854	0,862	0,892	0,873
3	0,779	1,260	1,454	/	/	/	/
Moyenne	0,567	0,900	1,005	/	/	/	/

TABLE 2.1 – Essais cycliques de compression sur bottes en paille nue – (d’après Quirant et al. (2018))

Pour tous les auteurs à l’exception de Jafferji [JAFF2011], la paille présente un comportement élastique quand elle est à plat avant de passer sur une phase plastique. Avant d’atteindre un comportement linéaire, la mise en place des bottes de paille, notamment dans les murs en bottes de paille, implique une phase où les brins se réorganisent de manière optimale et les bottes se rapprochent pour réduire les espaces entre elles. Cela se traduit par une légère concavité à la base de la courbe contrainte-déformation. Il a été constaté que les bottes de paille pouvaient encore développer une résistance significative au-delà de leur limite apparente d’élasticité : c’est ce qu’on appelle la « réserve de résistance » ; bien que de peu d’importance pour la conception aux états limites de service, ce comportement offre une marge de sécurité significative et une capacité de dissipation de l’énergie en cas de surcharge.

Un assemblage de l’ensemble des résultats des essais proposant les densités les plus réalistes peut être mis sous forme graphique et pourra être utilisé dans la suite de la thèse (Figure 2.6).

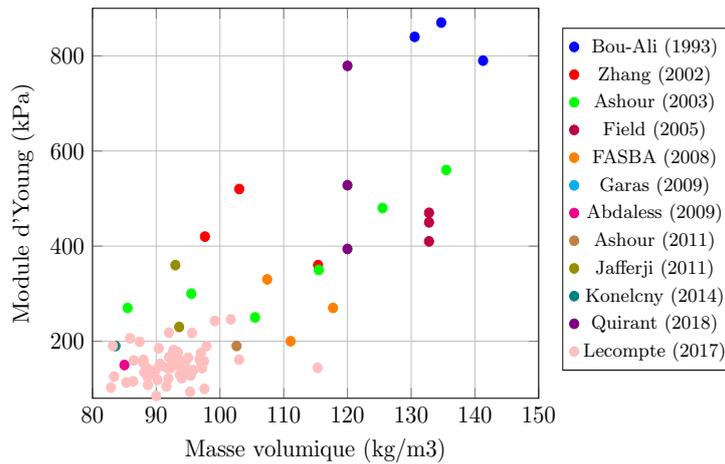


FIGURE 2.6. Synthèse des résultats des essais de compression sur petites bottes en paille nue disposées à plat

L'ensemble des essais permet d'établir un modèle reliant le module d'Young à la masse volumique de façon plus ou moins fidèle :

$$E = 3 \times 10^{-5} \rho^2 - 0.0643 \quad R^2 = 0.62 \quad (2.1)$$

Cependant, un examen plus approfondi révèle que cette approche est fortement influencée par ses valeurs extrêmes. Nous observons notamment qu'avec des valeurs de masses volumiques courantes (entre 110 et 140 kg/m³), les modules d'élasticité présentent une dispersion très importante, tout en restant compris entre 0,2 et 0,8 MPa avec une moyenne de 0,426 MPa. Or dans les Règles professionnelles du RFCP [RFCP2018], il est souvent question d'un module d'Young moyen de 0,5 MPa.

Cette méthode présente l'avantage de proposer un comportement simple pour la paille, mais elle résulte de la compilation de travaux de différents auteurs qui n'ont pas tous défini les valeurs d'élasticité de la même manière. En effet, les auteurs adoptent plusieurs méthodes pour calculer cette élasticité :

- En divisant soit la contrainte maximale, soit une contrainte identifiée comme la contrainte de service, par la déformation observée correspondante.
- En déterminant la pente de la courbe contrainte-déformation à une contrainte donnée, considérée comme la contrainte de service.
- En approximant la partie de la courbe contrainte-déformation qui s'approche d'un comportement élastique.
- En fournissant parfois les résultats pour un cycle après avoir effectué des chargements cycliques sans qu'il y ait d'informations sur le choix effectué.

En raison de ces différentes approches, l'équation déterminée peut varier de manière significative selon la méthode de calcul utilisée.

C'est pourquoi il a été décidé de lancer nos propres essais pour avoir notre propre base de données.

2.1.1.2 Influence de l'orientation des brins

Watts et al., Zhang, Vardy et MacDougall, Brojan et Clouston, Lecompte et Le Duigou ainsi que Maraldi ont effectué des tests sur des bottes à plat et sur chant pour étudier l'influence de l'orientation des brins [WATT1995, ZHAN2002, VARD2013, BROJ2014, LECO2017, MARA2017]. Ils ont observé une plus grande rigidité pour les bottes à plat.

Pour Brojan et Clouston, la rigidité à plat était multipliée par 1,5 par rapport à celle sur chant. La botte nue était capable de supporter une charge courante en construction mais la déformation était beaucoup trop importante. Une différence remarquable de 50 % de déformation a été constatée entre la botte sur chant et celle à plat.

Par contre, les auteurs constatent un comportement quasi linéaire pour les bottes sur chant ce qui n'a pas été observé sur les bottes à plat.

Lecompte et Le Duigou ajoutent que, pour des densités de l'ordre de 90-110 kg/m³, le module d'Young des bottes sous faible chargement était indépendant de l'orientation de la botte. C'est pour les bottes plus denses qu'ils constatent que le module d'Young dépend de l'orientation de la botte, même sous faible chargement.

Garas et al. sont les seuls à observer un comportement inverse de ramollissement (« softening ») pour les bottes à plat [GARA2009].

Sur la Figure 2.7, l'ensemble des résultats est présenté sous forme graphique.

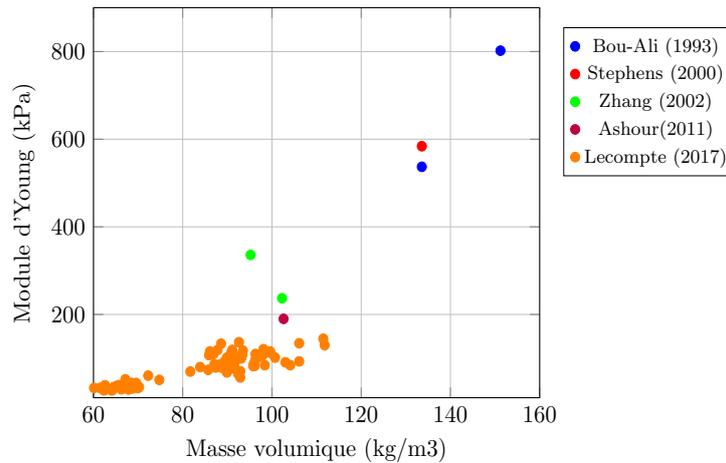


FIGURE 2.7. Synthèse des résultats des essais de compression sur petites bottes en paille nue disposées sur chant

Un modèle reliant le module d'Young à la masse volumique peut être déduit :

$$E = 0.0034e^{0.0358\rho}, \quad R^2 = 0.84 \quad (2.2)$$

En comparant les Figure 2.6 et Figure 2.7, on constate que les bottes disposées à plat sont plus rigides que celles sur chant et l'augmentation de la densité a eu un effet bénéfique sur la résistance et la déformabilité.

2.1.1.3 Influence de la teneur en eau

Watts et Thompson ont observé que la teneur en eau avait une influence sur la rigidité des bottes [WATT1995, THOM1995]. Les auteurs ont conclu que l'exposition continue à des taux d'humidité élevés faisait diminuer le module d'Young.

2.1.1.4 Influence du type de céréale utilisé

Dans la littérature, on constate que les auteurs parviennent à des résultats assez différents et contradictoire. Des auteurs ont conclu à des comportements différents selon le type de céréale. C'est le cas de Watts puis de Ashour qui ont constaté que les bottes de blé étaient plus rigides que celles en orge [WATT1995, ASHO2003]. A noter que seules les bottes en orge présentaient un comportement non linéaire mais c'est sûrement dû au fait que les contraintes appliquées étaient trop faibles. De leur côté, Garas et al. soulignent une meilleure résistance des bottes de riz attribuée à la haute teneur en silice des brins [GARA2009].

D'autres ont conclu que la rigidité était surtout dépendante de la densité des bottes, notamment Thompson et al. qui ont effectué des essais de compression sur des balles de paille de blé, d'avoine et d'orge posées à plat [THOM1995].

Maraldi a lui obtenu une masse volumique moyenne des bottes en paille de millet de 141 kg/m³ contre 114 pour celles en riz [MARA2017]. Celles en blé, blé dur, sorgho avoine et foin présentaient une densité moyenne de 94 kg/m³. Pour lui aussi, c'est surtout la densité des bottes qui influent sur le module d'Young.

2.1.1.5 Influence de la vitesse de chargement

Danielewicz et al. ont voulu étudier l'influence de la vitesse de chargement et n'ont constaté aucune différence dans le comportement des bottes [DANI2008].

2.1.1.6 Influence du type de botteleuse

Garas et al. ont testé des bottes façonnées par trois types de botteleuse dont une industrielle et deux fabriquées « maison » [GARA2009]. Les échantillons présentaient donc des dimensions, masses volumiques et teneurs en

eau différentes. Les auteurs recommandent de privilégier les botteleuses « maison » afin d’obtenir des bottes suffisamment denses. Ce point est peut-être valable si on veut atteindre de bonnes performances mais le but de la construction en paille porteuse est de réutiliser les bottes produites par l’agriculteur et de gagner du temps en les réutilisant telles quelles. De plus, les modules des bottes ainsi constituées sont extrêmement élevés avec des valeurs d’environ 20 MPa contre 0,5 MPa en moyenne issues de botteleuses conventionnelles.

Lecompte et Le Duigou ont testé 183 bottes de paille de blé issues de deux moissons et donc bottelées par deux presses différentes en Bretagne. Les deux récoltes présentaient une large plage de densités permettant ainsi d’évaluer l’impact de la densité et celui de la technique de bottelage. Cependant ce serait plus la densité de la botte que la technique de bottelage qui influencerait sur le module d’Young [LECO2017].

Pour conclure, on peut dire que la densité, l’orientation des brins et la teneur en eau sont les éléments prépondérants pour s’assurer de la rigidité de la botte. En complément du module d’Young, des auteurs se sont penchés sur la détermination du coefficient de Poisson.

Bou-Ali a indiqué que le coefficient de Poisson était d’environ 0,30 [BOUA1993]. Watts et al. l’ont mesuré à la fois longitudinalement et transversalement et obtenu les valeurs respectives de 0,37 et 0,11 (valeurs moyennes) avec une moyenne de 0,30 [WATT1995]. Les essais ont fait apparaître un coefficient de Poisson plus élevé dans le sens longitudinal que dans le sens transversal. Selon Maraldi, les bottes de paille sous compression ont présenté un effet de Poisson uniquement dans la direction longitudinale et non dans la direction transversale [MARA2017].

Ashour et Maraldi ont également voulu comparer l’influence de l’orientation des brins sur le coefficient de Poisson [ASHO2003, MARA2017]. Selon Maraldi, Le coefficient de Poisson n’était pas constant pendant le chargement et variait en fonction de l’orientation des brins. Dans le cas des bottes à plat, il augmentait rapidement jusqu’à une valeur maximale, puis diminuait graduellement. Cependant, le coefficient de Poisson a toujours augmenté avec la déformation pour les bottes sur chant. Il ne constate aucune influence de la densité, du taux de chargement, de la précompression des ficelles et du type de céréale (sauf pour le sorgho) sur le coefficient de Poisson. Les résultats sont répertoriés dans le Tableau 2.2.

Auteur	Coefficient de Poisson ν pour bottes à plat	Coefficient de Poisson ν pour bottes sur chant
Bou-Ali (1993)	0,3	
Watts et al. (1995)	0,3	
Ashour (2003)	0,28 à 0,44	0,12 à 0,35
Maraldi (2017)	0,4 (0,24 à 0,51)	0,19 (0,09 à 0,32)

TABLE 2.2 – Synthèse des coefficients de Poisson

2.1.2 Grosses bottes

Pour les essais sur grosses bottes, seuls ceux réalisés par le FASBA (équivalent allemand du RFCP) ont pu être répertoriés. Ils ont testé des bottes de 1,85 m de long, 45 cm de large et 45 cm de haut [DANI2008] :

Densité (kg/m³)	115	119	120	122	131	132	146
Module d’élasticité E (kPa)	522	494	426	537	531	577	802

TABLE 2.3 – Résultats des essais de compression sur grosses bottes à plat du FASBA

On peut en déduire la relation suivante :

$$E = 0.0751e^{0.0157\rho} \quad R^2 = 0.74 \quad (2.3)$$

On constate évidemment que plus la masse volumique est élevée, plus le module d’Young est important. Cependant, il faut noter que ces bottes sont peu communes dans la construction en France et les valeurs ne sont pas très représentatives de ce qui peut se trouver habituellement.

2.2 Essais sur bottes enduites

Les essais sur bottes enduites ne concernent que les petites bottes. Trop peu d'essais ont été menés pour en tirer des lois de comportement à proprement parler, cependant une analyse a pu être faite en agglomérant les conclusions rédigées par les différents auteurs. Plusieurs facteurs sont ainsi susceptibles d'influencer la rigidité des bottes enduites : mode d'application de chargement, de l'orientation des brins, de l'épaisseur d'enduit, etc.

2.2.1 Influence du mode d'application de chargement

Zhang a testé six bottes de paille de blé à deux ficelles enduites à plat de 100kg/m^3 [ZHAN2002]. Souhaitant étudier le transfert des charges dans le mur, l'auteur a appliqué les charges de 3 façons différentes :

- directement à travers l'âme en paille seule, en haut et en bas du mur ;
- directement à travers l'âme en paille en haut, mais avec un appui pour la paille et l'enduit à la base du mur.
- sur l'ensemble paille et enduit, en haut et en bas du mur.

Selon l'auteur, les différents régimes de chargement lors des essais sur bottes enduites, ne produisent pas une différence significative en termes de résistance à la charge.

Il est tout de même important de noter que les deux premiers essais sont plutôt des essais de cisaillement, les deux suivants sont des essais hybrides et seuls les deux derniers sont de vrais essais de compression. En France, l'usage veut que les lisses recouvrent l'ensemble paille et enduit cependant au Royaume-Uni, l'enduit n'est pas considéré comme porteur et est donc laissé en porte-à-faux. Seuls les modules des essais sur paille et enduit ont été considérés.

Jafferji a effectué des tests de compression sur bottes enduites mais le chargement était perpendiculaire à la face de l'enduit [JAFF2011]. Les résultats n'ont pas été pris en compte dans le Tableau 2.4.

2.2.2 Influence du type d'enduit

Selon Zhang, l'enduit ciment n'apporte pas une résistance significative par rapport à l'enduit terre [ZHAN2002]. Ce point est remis en cause dans d'autres travaux. L'enduit ciment retarderait cependant l'apparition des fissures par rapport à l'enduit terre.

Field et al. ont également testé des bottes enduites par un mélange argile et paille hachée [FIEL2005]. Cependant, la presse a été placée au-dessus de la botte de paille mais ne dépasse pas sur l'enduit ce qui fait que l'essai qui était au départ un essai de compression devient un essai de cisaillement. Les résultats seront donc commentés dans la partie II-4 Cisaillement.

Abdaless a effectué des essais sur deux bottes enduites avec de la terre pour l'une et de la chaux pour l'autre. Il constate que l'enduit chaux apporte une meilleure rigidité [ABDA2009].

2.2.3 Influence de l'orientation des brins

Pour Zhang, il y avait une différence d'adhérence de l'enduit suivant l'orientation de la botte (à plat ou sur chant) [ZHAN2002].

Vardy a lui aussi testé des bottes à la fois à plat et sur chant avec trois enduits de résistance différente puis trois enduits d'épaisseur différente [VARD2004]. Chacune des configurations de ces 3 paramètres (orientation des bottes, résistance et épaisseur de l'enduit) a été répétée trois fois afin de déterminer la variabilité des résultats obtenus. Il montre l'importance de l'orientation des bottes : les bottes enduites disposées sur chant ont enregistré une plus faible résistance à la rupture que celles disposées à plat. Pour les bottes sur chant, dotées d'une épaisseur d'enduit de 13 mm, cette résistance était d'environ 25kN/m tandis que pour les bottes disposées à plat, elle était d'environ de 35kN/m . Cette différence est attribuée par l'auteur à la meilleure adhérence de l'enduit sur la paille lorsque les bottes sont disposées à plat.

Brojan et Clouston ont comprimé quarante-huit bottes enduites qui avaient subi une cure pendant 3 mois avant d'être testées [BROJ2014]. Durant la période de séchage, la teneur en eau était relevée toutes les semaines et celle-ci avait augmenté de 4% en moyenne suite à l'application de l'enduit. La manutention a provoqué des fissures à la surface de l'enduit avant l'essai. Les auteurs ont montré qu'indépendamment de l'enduit, l'orientation des bottes avait un réel impact sur leur résistance à la compression. L'endommagement des bottes à plat correspond dans un premier temps à l'effritement de l'enduit tandis que sur chant, il résulte du flambement de l'enveloppe d'enduit.

2.2.4 Influence de l'épaisseur de l'enduit

Vardy a testé des bottes dotées d'une couche d'enduit plus épaisse qui ont présenté une résistance à la rupture plus élevée [VARD2004]. En doublant l'épaisseur de l'enduit (de 12,5 à 25 mm), la résistance des bottes a été multiplié par 1,8 passant de 32 à 58 kN/m. Par contre, en triplant l'épaisseur de l'enduit (de 12,5 à 40 mm), la résistance des bottes a été multipliée par 2,25 en passant de 32 à 72 kN/m. En augmentant l'épaisseur de l'enduit, on augmente donc la résistance à la compression des bottes dans une proportion qui ne suit pas directement l'épaisseur de l'enduit. La paille contribue donc bien à la résistance à la compression confirmant le comportement composite de l'ensemble paille et enduit.

2.2.5 Influence de la résistance de l'enduit

Selon Vardy, en augmentant la résistance de l'enduit, la résistance à la compression d'une botte de paille enduite s'accroît [VARD2004]. En multipliant la résistance de l'enduit par 1,7 (de 0,69 à 1,20 MPa), on a multiplié la raideur des bottes par 1,3 en passant de 45 à 58 kN/m. Avec un facteur de 2,5 (de 0,69 à 1,72 MPa), l'augmentation est de 1,65, La résistance de l'enduit influence bien l'ensemble paille et enduit.

2.2.6 Influence de la présence de renforts par armatures

Rakowski a conçu cinq prototypes pour tester l'effet de la hauteur de l'assemblage de bottes de paille (une ou trois bottes), le nombre de points d'application de la charge (deux ou trois), et la présence de renforts (aucun et deux types de grillage métallique) [RAKO2011]. Cependant, l'enduit n'était appliqué que sur une demi-longueur de la botte à partir du quart de la longueur de celle-ci. Les résultats n'ont donc pas été retenus dans le Tableau 2.4.

Kim, Reberg et Hossein ont voulu tester l'apport de l'enduit et du renfort dans la résistance à la compression de bottes [KIM2012]. Le problème est que les bottes étaient confinées dans des boîtes en bois qui les empêchaient de s'allonger librement. Les résultats n'ont pas été retenus non plus.

2.2.7 Conclusion

Il a été constaté que le type, l'épaisseur et la résistance de l'enduit ainsi que l'orientation des brins sont les paramètres qui vont régir la réponse du complexe paille-enduit.

Le Tableau 2.4 synthétise les résultats des essais les plus pertinents et significatifs.

Auteur	Type d'enduit	e (mm)	ρ botte (kg/m ³)	Module d'élasticité (MPa)	
				Botte	Moyenne
Zhang (2002)	Terre	50	100	0,312	0,283
Abdaless (2009)		50		0,234	
Brojan, Clouston (2014)		58	93	0,87	
Zhang (2002)	Ciment	50	100	0,367	0,367
Abdaless (2009)	Chaux			0,245	1,2975
Brojan, Clouston (2014)		58	90	2,35	
Brojan, Clouston (2014)	Chaux-ciment	53	92	8,3	8,3

TABLE 2.4 – Tableau récapitulatif des essais de compression sur bottes enduites

2.3 Essais sur murs en paille nue

Des auteurs ont voulu caractériser le comportement de l'assemblage de plusieurs bottes matérialisant une géométrie correspondant à l'échelle 1 d'un mur.

Bou-Ali par exemple a réalisé trois murs avec des bottes de paille de blé à trois ficelles, longs de 3,60 m et hauts de 2,40 m qui ont été chargés axialement jusqu'à 70 kN soit 0,04 MPa [BOUA1993]. Des fers à béton

ont été enfoncés à travers les bottes comme cela se pratiquait avant. On observe un comportement non-linéaire plastique.

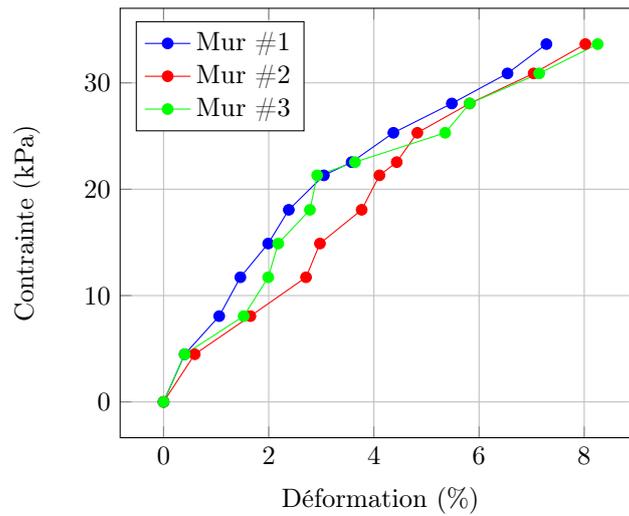


FIGURE 2.8. Essais de compression sur murs en paille nue – (d’après Bou-Ali (1993))

D’autres paramètres ont aussi été étudiés tels que le type de céréale et le niveau de précompression.

2.3.1 Influence du type de céréale

Blum a réalisé deux murs longs de 2,30 m et hauts de 1,60 m, composés de cinq rangées de bottes de paille de blé à deux ficelles, disposées sur chant, qui ont été testés à la compression. Aucune broche de renfort n’a été utilisée [BLUM2002].

Mur	Type de céréales	Charge ultime (kN/m)	Tassement vertical Δh (cm)	Elongation horizontale Δl (cm)
1	Blé	5,1	7	20
2		4,2	7,5	8
3	Avoine	11	16,5	2,5
4		7	15	5

TABLE 2.5 – Résultats des essais sur murs en paille nue - (d’après Blum (2002))

Les élongations latérales sont supérieures aux tassements verticaux, ce qui est plutôt surprenant (Tableau 2.5). C’est peut-être dû au fait qu’elles étaient très peu denses. Blum note qu’en maintenant la déformation pendant trois jours, la contrainte baisse de moitié par les effets du fluage à court-terme.

Les murs en paille d’avoine avaient une résistance plus élevée en moyenne.

2.3.2 Influence de la précompression

Walker a testé cinq piles de 6 bottes de paille d’orge à deux ficelles, de 0,9m de long, hautes de 2,25 m et épaisses de 50 cm [WALK2004]. Elles étaient un peu plus denses que ce qui est utilisé habituellement en construction. Celle qui ne contient pas de tige de noisetier et celle faite de demi-bottes de paille ne sont pas précomprimées. Les modules d’élasticité sont respectivement de 0,35 MPa et de 0,4 MPa. Un mur en paille précomprimé a été testé mais aucune information n’a été donnée sur le niveau de précompression. Le mur précomprimé est respectivement 1,7 et 1,8 fois plus rigide que le mur en demi-bottes et celui comportant des tiges en bois.

Les modules d’élasticité des essais sont répertoriés dans le Tableau 2.6.

Auteur	Mur	ρ bottes (kg/m ³)	Module d'élasticité (MPa)	Commentaires
Bou-Ali (1993)	1	136,40	0,435	Masse volumique moyenne calculée à partir des essais sur bottes
	2	136,40	0,433	
	3	136,40	0,392	
Walker (2004)	Tiges de noisetier	125	0,353	Masse volumique des bottes variant de 118 et 137 kg/m ³ pour une valeur moyenne de 125 kg/m ³
	Demi-bottes	125	0,369	
	Construction standard	125	0,627	

TABLE 2.6 – Tableau récapitulatif des essais sur murs en paille nue

2.4 Caractérisation des enduits

L'enduit permet de reprendre les charges dans le panneau sandwich enduit/paille/enduit. Il est donc indispensable de déterminer sa résistance propre pour évaluer sa contribution structurelle dans la tenue de l'assemblage.

El Gharbi a testé en compression des briques de terre crue de 0,29 x 0,10 x 0,14 m [ELGH1993]. Elles comportaient divers dosages de ciment : 0, 4 et 8% de ciment. Les résultats listés dans le Tableau 2.7 présentent des incohérences puisque les valeurs caractéristiques mécaniques tels que le module d'Young ou la contrainte de rupture en compression devraient augmenter avec un dosage en ciment croissant. Or ce n'est pas le cas pour le mortier avec 4% de ciment.

Échantillon	E (MPa)	Coefficient de Poisson	Limite élastique (MPa)	Contrainte de rupture (Compression)	Contrainte de rupture (MPa) (Traction)
Bloc Bruts	800	0,2	0,6	3,2	0,21
Mortier à 4% de ciment	650	0,2	0,7	1,5	0,07
Mortier à 8% de ciment	1000	0,2	0,8	2,4	0,24

TABLE 2.7 – Résultats des essais de compression sur briques de terre crue (d'après El-Gharbi, 1993)

Abdaless note une nette différence de rigidité qui est de l'ordre de 50% entre les éprouvettes d'enduit terre et celles d'enduit chaux qu'il a testées. Les résultats sont répertoriés dans le Tableau 2.8.

Enduit	N° éprouvette	E à 7 j (MPa)	E à 28 j (MPa)	E moyen à 28 j (MPa)
Terre	1	/	132.2	138.73
	2	/	118	
	3	/	166	
Chaux	1	236.2	273.7	301.00
	2	251.7	296.4	
	3	301.9	332.9	

TABLE 2.8 – Résultats des essais de compression sur enduit chaux et terre – (d'après Abdaless (2009))

Taylor et al. ont testé en compression plusieurs enduits afin de déterminer l'impact de différents paramètres [TAYL2006] : teneur en eau donc les conditions de séchage, le temps de séchage, le ratio sable/terre, l'origine et le taux d'argile, la nature des enduits et la teneur en ciment (Tableau 2.9).

Les auteurs ont voulu étudier l'influence de la provenance et du taux d'argile. Afin d'atteindre 0,7 MPa, il fallait 4,6% d'argile naturel alors que 11,8% d'argile commerciale était nécessaire pour atteindre 0,8 MPa. Donc pour eux, afin d'obtenir une résistance similaire, la quantité d'argile requise est plus importante si le matériau vient du commerce. L'argile trouvée sur place peut donc être une solution aussi performante que celle achetée dans le commerce à condition de pratiquer les tests de résistance adéquats.

De plus, pour le même type de sol, en augmentant le volume d'argile dans l'échantillon, la résistance de l'enduit s'est accrue. En effet, si pour 4,6% d'argile, l'échantillon atteint une résistance de 0,7 MPa, celle-ci passe à 1,42 MPa quand il y a 10,3% d'argile. En multipliant par 2,2 le taux d'argile, on double la résistance finale. L'ajout d'argile serait intéressant mécaniquement mais il faudrait déterminer un taux optimal. Des recherches restent à effectuer.

Echantillon	Description	Résistance à la rupture sur cube(MPa)	E(MPa)
M1	Teneur en eau initiale : 0.126	1,5	1672
M2	Teneur en eau initiale : 0.132	1,2	1431
M3	Teneur en eau initiale : 0.134	1,1	2086
M4	Teneur en eau initiale : 0.144	1,1	1827
M5	Teneur en eau initiale : 0.146	1,0	1811
C1	Conditions de séchage – Four à 110°C	1,8	2285
C2	Conditions de séchage – Laboratoire	1,0	758
C3	Pièce humide avec HR = 100%	0,7	562
T1	Temps de séchage en jours : 10	0,9	890
T2	Temps de séchage en jours : 14	1,0	758
T3	Temps de séchage en jours : 18	1,0	1848
R1	Sol sableux – volume = 1.0	1,5	2500
R2	Sol sableux – volume = 1.5	1,0	758
R3	Sol sableux – volume = 3.0	0,7	1787
S1	Argile provenant du commerce	0,8	1731
S2	Argile locale	1,0	758
P1	Enduit ciment/chaux avec E/C = 1.08	1,1	395
P2	Enduit ciment/chaux avec E/C = 1.18	1,1	839
P3	Enduit ciment/chaux avec E/C = 1.28	0,9	443

TABLE 2.9 – Caractéristiques et résultats des essais – (d'après Taylor et al. (2006))

En comparant P1, P2 et P3, on peut également constater que plus le dosage en ciment est élevé à savoir que plus le rapport de volume entre eau et ciment E/C est petit, plus la résistance en compression est accrue. On peut tout de même noter une certaine hétérogénéité des résultats pour un même mélange (Figure 2.9).

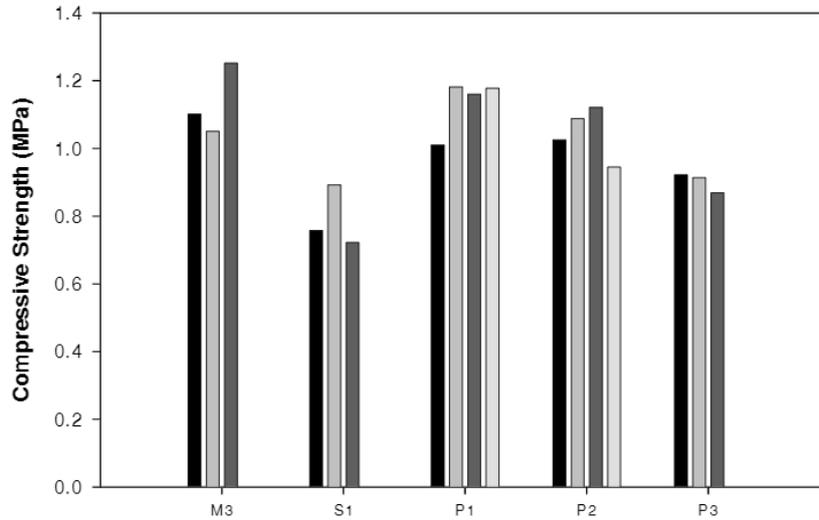


FIGURE 2.9. Comparaison de la valeur de la résistance en compression des différents enduits – (M3) enduit dont la terre était composée de 69% de silt, 27% d’argile et de 4% de sable ; (S1) mélange composé d’argile provenant du commerce ainsi qu’à des enduits ciment/chaux ; (P1) enduit ciment avec un rapport E/C = 1,08 ; (P2) enduit ciment avec un rapport E/C = 1,18 ; (P3) enduit ciment avec un rapport E/C = 1,28 – (Source : Taylor et al. (2006))

Lerner et Donahue ont également réalisé des essais sur différents mélanges ciment/chaux/sable et en ont déduit le module d’élasticité et la contrainte de rupture de certaines formulations [LERN2003]. Le module d’élasticité (Tableau 2.10) est obtenu par compression simple d’une éprouvette cubique de 5,1 cm de côté et la contrainte de rupture est obtenue par flexion 3 points d’une éprouvette de 20,3 cm de long pour 5,1 cm de haut et de large.

Ciment	Chaux	Sable	Eau	E (MPa)
1	1	6	Inconnu	6320
1	1	6	Inconnu	9481
1	0	6	0,75	545
1	0	4,5	1	2147,5
1	0	3	0,75	3750
1	5	4,5	0,75	3300

TABLE 2.10 – Caractéristiques des enduits ciment - (d’après Lerner, Donahue (2003))

Les auteurs notent que ces résultats semblent proches de ce que l’on peut trouver par la corrélation :

$$E = 4733\sqrt{\varepsilon^l}, \quad R^2 = \text{inc.} \quad (2.4)$$

De la même façon, des éprouvettes cubiques d’enduits de terre sont testées en compression simple. On reporte les modules d’élasticité dans le Tableau 2.11.

Echantillon	Argile	Limon	Sable	Paille	Contrainte max imposée (MPa)	E (MPa)
1	13	8	29	50	0,607	16,8
2	13	8	29	50	0,662	7,08
3	13	8	29	50	0,414	13,6
4	13	8	41	38	0,524	18,3
5	13	8	41	38	0,545	25,1
6	13	8	41	38	0,538	20,7

TABLE 2.11 – Influence du taux sable/paille sur la contrainte maximale et sur le module d’élasticité des enduits terre – (d’après Lerner, Donahue (2003))

Ces modules sont calculés en prenant la partie élastique des courbes de déformation des échantillons et le domaine élastique est situé entre 1 et 4% de déformation avec une contrainte allant jusqu'à 0,3 MPa environ.

Dans le cadre de sa thèse sur les assemblages paille-enduit soumis à un chargement excentré, Vardy a établi une bibliographie et a tracé un graphe en comparant les résultats de travaux antérieurs sur les enduits [VARD2006]. Sa modélisation prend en compte les volumes de ciment, chaux, sable et de liants soit les rapports des volumes de liant et de sable $\left(\frac{V_{cm}}{V_s}\right)$ et des volumes de ciment et de chaux $\left(\frac{V_c}{V_l}\right)$:

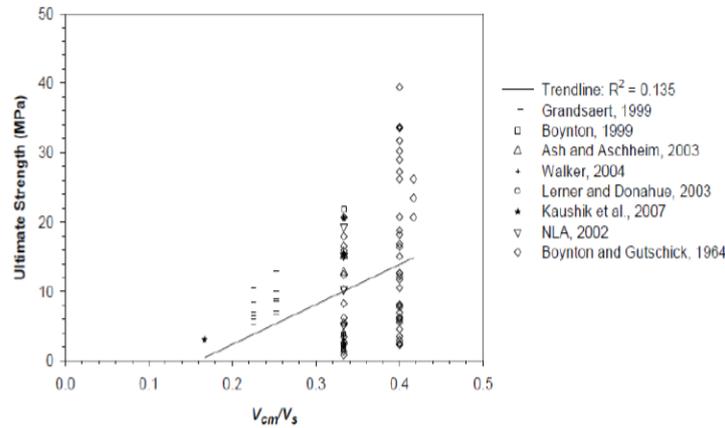


FIGURE 2.10. Influence du rapport de volume de liant sur celui de sable sur la contrainte ultime - (Source : Vardy (2006))

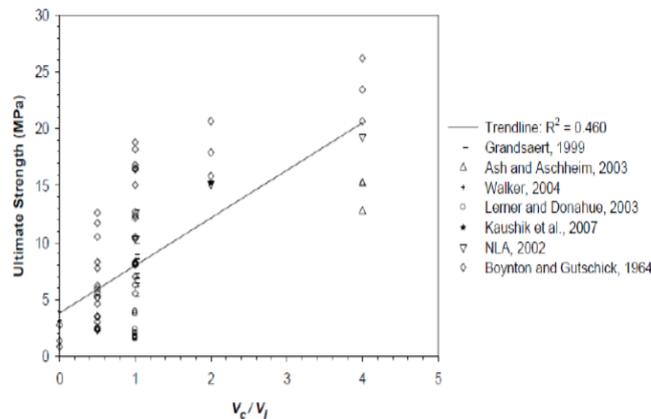


FIGURE 2.11. Influence du rapport de volume de ciment sur celui de chaux sur la contrainte ultime - (Source : Vardy (2006))

Vardy a exploité ces résultats et a proposé une modélisation. Selon lui, la contrainte de rupture en compression d'une éprouvette cubique qui a été laissée à sécher pendant 28 jours serait liée aux rapports de volumes car ce sont des enduits ciment-chaux-sable :

$$f'_{cube,28} = -1,119 + 35,075 \left(\frac{V_{cm}}{V_s} \right) \left(\frac{V_c}{V_l} \right), \quad R^2 = 0,942 \quad (2.5)$$

Plus le volume de liant ou de ciment est élevé, plus la résistance est importante. Dans le 1^{er} cas, le liant assurant la cohésion entre les grains permet une meilleure transmission des efforts entre ceux-ci. Le ciment qui possède une résistance à la compression plus importante que celle de la chaux augmente la rigidité du mélange.

D'autre part, le module d'élasticité des enduits sable-chaux-ciment d'une éprouvette cylindrique est une fonction linéaire de la contrainte de rupture pour des charges comprises entre 10 et 40% de la valeur ultime :

$$E_{cyl} = 818f'_{cyl}, \quad R^2 = 0.914 \quad (2.6)$$

Le module d'élasticité était compris entre 528 MPa à 20 333 MPa pour les spécimens testés.

Enfin, l'auteur a relevé que cette contrainte f'_c est la contrainte de rupture en compression d'un cylindre et il faut donc passer par la relation suivante pour pouvoir l'adapter à une éprouvette cubique :

$$\frac{f'_{cyl}}{f'_{cube}} = 0,0221f'_{cube} + 0,719, \quad R^2 = 0.08 \quad (2.7)$$

On peut constater que le coefficient de corrélation donnée par les auteurs est particulièrement faible donc elle est à prendre avec précaution.

Jafferji a lui mené des essais sur des éprouvettes cylindriques d'enduits [JAFF2011]. Il y avait 16 cylindres de 15,2 cm [6 pouces] de longueur et de 7,6 cm [3 pouces] de diamètre et 20 cylindres de 20,3 cm [8 pouces] de longueur et de 15,2 cm [6 pouces] de diamètre (Figure 2.12). Divers mélanges ont été testés :

- un enduit terre,
- un enduit à base de chaux et de sable,
- trois enduits terre dosés à 10, 25, 40% de fumier,
- un enduit ciment.



FIGURE 2.12. Eprouvettes cylindriques d'enduits de différentes natures - (Source : Jafferji (2011))

Les résultats de ces essais sont présentés dans le Tableau 2.12.

Désignation	Composition	Contrainte max (MPa)	Contrainte max moy. (MPa)
L3	Chaux et sable	0,279	0,286
L4	Chaux et sable	0,294	
E5	Terre	0,330	0,334
E6	Terre	0,269	
E7	Terre	0,438	
E8	Terre	0,298	
4A	Terre + 10% de fumier	0,362	0,362
4B	Terre + 10% de fumier	Rupture	
5A	Terre + 25% de fumier	0,486	0,500
5B	Terre + 25% de fumier	0,515	
6A	Terre + 40% de fumier	0,609	0,609
6B	Terre + 40% de fumier	(0,361)	
C5	Ciment + chaux	19,547	19,626
C6	Ciment + chaux	19,705	

TABLE 2.12 – Influence de la nature de l’enduit et du taux de fumier dans les enduits terre-fumier sur la contrainte maximale – (d’après Jafferji (2011))

La Figure 2.13 montre que l’enduit à base de chaux et de sable est moins résistant que les autres enduits à base de terre. A l’exception du résultat donné par l’échantillon 6B que l’on a négligé dans l’évaluation de la moyenne, on peut constater que plus on ajoute de fumier dans le mélange terre/fumier, plus la résistance augmente. Les fibres présentes renforcent le mélange.

Aucun des enduits précédemment cités n’atteint la performance de l’enduit ciment/chaux qui est 40 à 70 fois plus résistant que les autres.

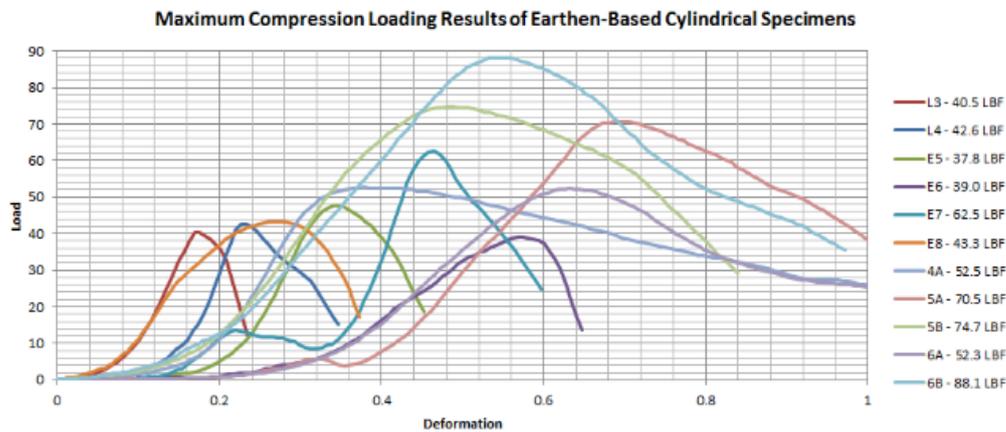


FIGURE 2.13. Influence de la nature de l’enduit et du taux de fumier dans les enduits terre-fumier sur la charge maximale [livre-force] - (Source : Jafferji (2011))

2.4.1 Influence de la teneur en eau

Taylor et al. ont cherché à déterminer l’impact de la teneur en eau sur les enduits en argile [TAYL2006]. Afin d’obtenir une teneur en eau quasi nulle, l’enduit a été placée dans un four à 110°C. Il a été constaté que plus la teneur en eau baissait, plus la résistance augmentait. Par exemple, avec une teneur en eau de 0,1%, les échantillons présentaient une résistance moyenne de 1,90 MPa tandis qu’avec une teneur en eau de 11%, la résistance était descendue à 0,75 MPa. Donc en multipliant la teneur en eau par 10, on divise par plus de 2,5 la résistance en compression de l’enduit. La teneur en eau est de toute évidence un paramètre à ne pas négliger.

2.4.2 Influence du temps de séchage

Vardy a lui constaté que l'augmentation de la teneur en eau des éprouvettes abaisse la contrainte à la rupture en compression. Il ajoute que le temps avait également un impact sur cette contrainte et tente d'inclure ce paramètre via l'équation suivante :

$$\frac{f'_{cube}}{f'_{cube,28}} = 0.329\sqrt[3]{t}, \quad R^2 = 0.991 \quad (2.8)$$

Avec f'_{cube} la contrainte à un temps t et $f'_{cube,28}$ la contrainte à 28 jours.

Taylor et al. ont aussi tenté d'étudier l'influence du temps de séchage sur le module d'élasticité. Entre 10 et 14 jours de séchage, aucun changement significatif n'a été constaté par contre à 18 jours le module a augmenté. Celui-ci a été en moyenne multiplié par 2,4 en 4 jours ! Les auteurs ont admis qu'il aurait fallu relever plus de valeurs avant le 10^{ème} jour et poursuivre l'essai au-delà du 18^{ème} jour afin de déterminer une réelle tendance du comportement mécanique. Nous n'avons pas plus d'informations sur les conditions de séchage donc nous ne pouvons pas vraiment savoir si ça a été le seul paramètre influent.

2.4.3 Influence de l'intégration de fibres

Ashour et al. ont mené des essais sur des mélanges de terre et de fibres telles que de la paille de blé (5 cm de longueur), du foin mais également des fibres de bois (2 cm de longueur) avec divers dosages [ASHO2010]. La terre était composée de 31% d'argile, de 22% de silt et de 47% de sable. La résistance à la compression avait augmenté dans chacun des cas (?? 29). L'irrégularité du réseau de fibres avait contribué à cette amélioration et les échantillons présentaient moins de fissures et une limite d'élasticité plus élevée. Les auteurs ont rapporté que la densité était légèrement plus élevée pour les enduits renforcés avec des fibres de bois et ce serait peut-être dû au fait que les fibres soient plus fines, cependant la paille hachée densifie également le mélange (Tableau 2.13).

Type d'enduit	Fibre (%)	Densité sèche (kg/m ³)
Paille de blé hachée	75	1123,9
	50	1416,3
	25	1699,6
Foin haché	75	1100
	50	1402
	25	1617,7
Fibres de bois	75	1273
	50	1397,5
	25	1605,1
Aucun	0	1804

TABLE 2.13 – Influence de la nature de l'enduit et du taux de fibres dans les enduits terre-fibres sur la densité sèche – (d'après Ashour et al. (2010))

Type d'enduit	Fibre (%)	Teneur en eau (%)
Paille de blé hachée	75	2,78
	50	1,3
	25	0,61
Foin haché	75	2,68
	50	1,04
	25	0,8
Fibres de bois	75	1,11
	50	0,87
	25	1,51
Aucun	0	1,11

TABLE 2.14 – Influence de la nature de l'enduit et du taux de fibres dans les enduits terre-fibres sur la teneur en eau – (d'après Ashour et al. (2010))

La teneur en eau augmente au fur et à mesure qu'on ajoute des fibres. Les fibres absorbent peut-être mieux l'eau que le sol. La teneur en eau des mélanges avec foin et paille est plus élevée que l'enduit avec fibres de bois (Tableau 2.14).

Type d'enduit	Fibre (%)	Taux d'érosion (cm/h)
Paille de blé hachée	75	0,11
	50	0,67
	25	0,75
Foin haché	75	0,10
	50	0,47
	25	0,53
Fibres de bois	75	0,34
	50	0,75
	25	1,73
Aucun	0	12

TABLE 2.15 – Influence de la nature de l'enduit et du taux de fibres dans les enduits terre-fibres sur le taux d'érosion – (d'après Ashour et al. (2010))

Les auteurs ont mis en place un dispositif pour simuler le processus d'érosion par les gouttes de pluie. Des gouttes d'eau tombaient d'une buse à un débit constant d'environ $65 \text{ cm}^3/\text{min}$. La buse était positionnée à une hauteur d'environ 1,35 m au-dessus du bloc d'enduit et était reliée à un réservoir d'eau. Le bloc d'enduit était placé au-dessus d'un récipient afin de collecter l'eau qui s'écoulait à travers lui. Les chercheurs ont constaté que le taux d'érosion baissait à mesure que celui de fibres augmentait (Tableau 2.15). De plus, le taux d'érosion de l'enduit renforcé au foin était le plus bas tandis que celui avec des fibres de bois était élevé. Comme on pouvait s'en douter, l'enduit sans renfort présentait le taux le plus élevé.

2.4.4 Conclusion

Les éléments que l'on peut tirer de ces différentes études sont les suivants :

- **Nature de l'enduit** : il existe deux grandes familles d'enduits en paille porteuse qui sont les enduits ciment et les enduits terre. Les enduits ciment sont très performants cependant ils sont plus fragiles que la terre. Pour des raisons financières, écologiques et/ou esthétiques, la terre peut lui être préférée. Même si ses performances mécaniques sont moindres, l'enduit terre présente de bons résultats. Cela est attesté par sa présence depuis des millénaires dans de nombreux ouvrages et bâtiments. L'avantage de l'enduit terre est qu'il adhère bien à la paille et présente un comportement plus ductile. Cependant, il se déforme plus et il reste à vérifier si ces déformations ne dépassent pas les valeurs seuils fixées par les normes de constructions actuelles en France. Les enduits terre composés d'argile naturelle présentent de meilleures performances.

- **Temps de séchage** : d'après les travaux de Taylor et al. (2006), c'est un paramètre à ne pas négliger car l'impact peut être assez variable. Malheureusement, il n'a pas pu être bien caractérisé.
- **Teneur en eau** : la formulation et les conditions de séchage sont des paramètres déterminants concernant la performance structurelle de l'enduit. Plus l'enduit est sec, plus il est rigide mais aussi fragile, ce qui est notamment le cas pour les enduits ciment. Il faudrait trouver une teneur en eau optimale qui permette de garantir la solidité de l'enduit mais également une bonne adhérence et une bonne complémentarité avec la paille.
- **Présence de fibres** : plusieurs auteurs (Lerner et Donahue, 2003; Ashour et al, 2010; Jafferji, 2011) se sont intéressés à l'ajout de matériau fibreux dans l'enduit afin d'augmenter leur résistance. Le taux d'érosion de l'enduit est significativement diminué. Cependant, les fibres retiennent plus l'eau que la terre et peuvent augmenter la teneur en eau de l'enduit.

2.5 Essais sur murs enduits

Des études ont été menées pour caractériser le comportement de murs s'approchant des conditions réelles de réalisation pour de l'habitation. Le complexe enduit – paille – enduit forme un panneau sandwich dont les paramètres de comportement sont évalués.

2.5.1 Influence de la présence d'enduit

Carrick et Glasford puis Dick ont construit trois murs de 3,6 m de long pour 2,8 de haut et 45 cm de large [CARR1998, DICK2002]. Mais leur protocole a consisté à mener d'abord les murs jusqu'au flambement avant de les tester à nouveau en compression. Les résultats ne sont donc pas exploitables.

Walker a étudié l'influence de l'enduit sur un mur précomprimé en paille nue puis un autre enduit [WALK2004]. Ce dernier a été comprimé jusqu'à réduire sa hauteur de 1% puis enduit de deux couches de chaux hydraulique. Au moment des essais, soit 29 jours après avoir appliqué la seconde couche, la résistance à la compression était de 2,9 MPa. L'épaisseur totale de l'enduit variait de 20 à 60 mm (40 mm en moyenne).

Le post-traitement des résultats permet de déduire les modules d'élasticité : 624 kPa pour le mur nu et 3113 kPa pour le mur enduit (Figure 2.14).

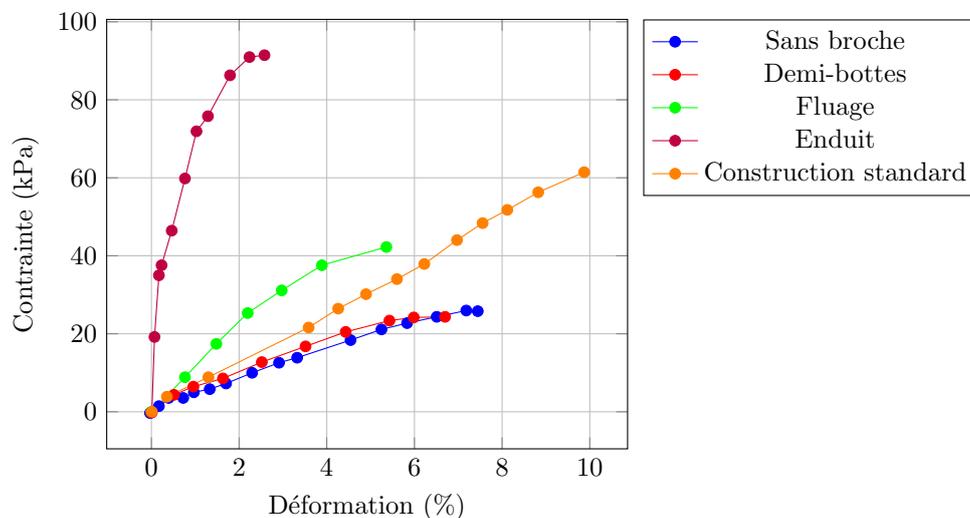


FIGURE 2.14. Essais de compression sur murs

2.5.2 Influence du nombre de ficelles de bottes

Rupert et Grandsaert ont voulu tester trois configurations de trois murs en paille d'orge de 3,7 m de long pour 2,4 m de haut avec des petites bottes à deux et à trois ficelles [RUPE1999]. Ces configurations leur permettaient d'étudier l'influence du nombre de ficelles et la contribution d'un renfort. Malheureusement, les bottes à deux ficelles étant plus denses que les bottes à trois ficelles (respectivement 153 kg/m³ et 148 kg/m³), les essais ne permettent pas de séparer l'influence des deux variables. Les auteurs ont eux-mêmes critiqué leur protocole. Visiblement, ce serait plutôt la densité qui influencerait le Module d'Young

2.5.3 Influence du type d'enduit

MacDougall a utilisé des petites bottes de masse volumique soit très faible (84 kg/m³) soit standard en paille porteuse (123kg/m³), à plat et sur chant (Tableau 2.16). Les murs sont constitués de 2,5 bottes de long pour

6 de haut [MACD2008]. Un enduit chaux-ciment, un enduit terre et un mélange des deux ont été utilisés. Dans certains murs, des renforts de type treillis ont été intégrés (Tenax). Les murs enduits au ciment sont plus résistants. Le mélange terre-ciment ne semble pas apporter plus de résistance que le mur enduit à la terre, ce que l'auteur attribue à une réaction chimique inappropriée. Le type d'enduit a influencé la résistance et les murs dont les enduits étaient de résistances similaires avaient un module d'Young très proches. Comme on pouvait s'y attendre, plus l'enduit est résistant, plus le mur est rigide. L'ajout de paille contribue à une augmentation de la résistance et freine la rupture.

N°	Précompression (mm)	Enduit	Résistance compression enduit (MPa)	Résistance traction enduit (MPa)	Orientation bottes	Module élasticité (MPa)	Résistance en compression mur (MPa)
1	200	Ciment	11,3		Sur chant		1,9
2	200	Terre	0,8		Sur chant		0,4
3	25	Mélange des deux	1	0,7	A plat	21,29	0,70
4	25	Terre (paille)	1	1	A plat	20,04	1,00
5	25	Ciment (sous-couche argile)	18,5	3,3	A plat	6,73	3,30
6	200	Terre (paille + sous couche argile)	0,7		Sur chant		0,30
7	25	Terre (paille + Tenax)	0,7	0,4	A plat	13,74	0,40
8	200	Ciment	20,3		Sur chant	49,61	3,30
9	25	Ciment (Tenax)	30,5	5,6	A plat	38,06	5,60
10	25	Ciment	30,7	2,5	A plat	38,94	2,50

TABLE 2.16 – Influence de divers paramètres sur le module d'élasticité et la résistance en compression du mur (d'après MacDougall (2008))

Vardy a érigé des murs de bottes de 80 cm de long, 47,5 cm de large pour 37,5 cm de haut et dont la masse volumique variait entre 78 et 112 kg/m³ [VARD2009]. Les 3 premiers murs d'une hauteur de 2,31 m étaient constitués de 7 bottes empilées et 3 autres murs de 0,99 m étaient faits de 3 bottes. L'auteur aurait précomprimé ces murs sans que la valeur ne soit définie.

L'enduit utilisé était un mélange sable/chaux/ciment pour des proportions égales à 4,5/1,25/0,25, Des éprouvettes cubiques de 4,5 cm de côté ont été testés, leur résistance en compression valait en moyenne 0,783 MPa avec des valeurs qui oscillaient entre 0,606 MPa et 0,959 MPa. L'enduit a été appliqué en une seule couche de 2,5 cm.

L'auteur tente de relier le comportement du mur à la résistance de l'enduit sans jamais tenir compte du fait que le matériau est composite.

En poursuivant les travaux préliminaires de Zhang sur des bottes individuelles, Faine et Zhang se sont intéressés à l'étude des capacités portantes des murs [ZHAN2002, FAIN2002]. Deux murs ont été précontraints par des câbles métalliques et enduits respectivement au ciment et à l'argile. Cependant, les configurations de base n'étant pas similaires (4m de haut pour 2,60 m de long pour l'un, 2,60 m de haut pour 2,70 m de long pour l'autre), les résultats ne peuvent donc pas être comparés de manière fiable.

2.5.4 Influence de l'orientation des brins

Faine et Zhang ont étudié l'influence de l'orientation des brins [FAIN2005]. Il semblerait que l'orientation verticale des brins de paille (jouant le rôle de renforts aléatoirement groupés) ait accru la rigidité du mur. L'enduit serait intuitivement plus difficile à appliquer sur les bottes disposées sur chant en raison de l'orientation des brins de paille et les ficelles en polypropylène céderaient rapidement sous la charge. Aucune de ces deux hypothèses ne s'est vérifiée, ni pendant la construction, ni au cours de l'essai. Selon eux, il semblerait que la méthode d'édification avec des bottes disposées sur chant soit une technique raisonnable pour les maisons en bottes de paille.

MacDougall a voulu également étudier l'influence de l'orientation des brins sur la rigidité des murs [MACD2008]. Cependant, il a voulu tester beaucoup de paramètres en même temps et on ne peut pas déterminer clairement

ce qui a influencé les résultats.

2.5.5 Influence de l'intégration de renforts dans l'enduit

Grandsaert a voulu déterminer l'apport de l'intégration de renforts en treillis et en fibres dans l'enduit [GRAN1999]. Il a indiqué que l'enduit renforcé par des fibres en polypropylène avait beaucoup mieux adhéré à la paille que celui renforcé par un treillis. D'autre part, la présence de treillis de renfort a largement contribué à empêcher le flambement local de l'enduit.

Dreger a érigé deux murs de 2,30 x 2,40 m avec six assises de bottes de paille d'avoine à deux ficelles, renforcées par deux treillis de maille sur les faces du mur reliés à travers les bottes avec de la ficelle polypropylène tous les 40 cm [DREG2002]. Cette configuration est assez surprenante car les bottes étaient enduites sur leur bouts et placées dans le sens de leur largeur selon le schéma de la Figure 2.15. Cela ne permet pas d'exploiter les résultats comparativement aux autres essais.

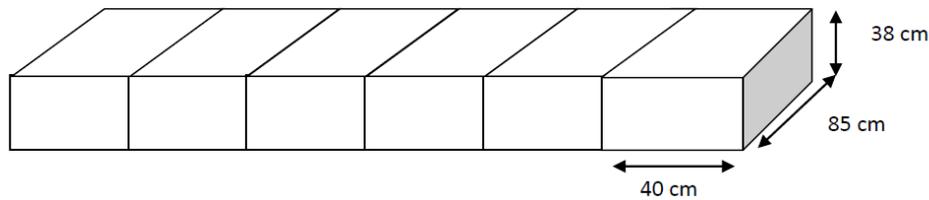


FIGURE 2.15. Schéma de principe – (Source : Desille (2010))

MacDougall a testé des murs enduits à la terre, au ciment et avec un mélange terre-ciment (Tableau 2.17) [MACD2005]. Il a intégré des renforts et pour lui, le treillis n'améliore pas la résistance à la compression, au contraire car la présence du renfort fragilise l'interface paille-enduit précipitant l'apparition d'un voilement local. Sa présence altère le maintien latéral assuré par l'enduit causant ainsi le voilement de l'enduit puis de la botte de paille. L'auteur note tout de même un aspect positif après rupture car les déformations latérales ont peut-être été plus rapides mais elles ont été moins importantes.

Test#	Orientation botte	Type d'enduit	Renfort	Résistance à la compression sur cube d'enduit (MPa)	Charge max (kN)	Déplacement (mm)		Épaisseur (mm)			Contrainte max (MPa)	Mea/Theo
						Moy	Localisation	Moy	Max	Min		
1	Sur chant	Ciment-Chaux	Aucun	11,3	110,23	1,1	milieu/haut	35	79	12	1,9	17%
2	Sur chant	Argile	Aucun	0,8	25,21	0,9	milieu/bas	35	79	12	0,4	53%
3	Plat	C-L/Argile	Aucun	1/18,5	40,78	0,9	milieu/haut	35	79	12	0,7	70/4%
4	Plat	Argile	Aucun	1	57,26	9	milieu	35	79	12	1	102%
5	Plat	Ciment-Chaux	Aucun	18,5	190,58	11	haut	35	79	12	3,3	18%
6	Sur chant	Argile	Argile	0,7	20,47	3	haut	30	62	12	0,3	50%
7	Plat	Argile	Argile	0,7	40,18	4,5	haut	38	106	20	0,4	59%
8	Sur chant	Ciment-Chaux	Tenax	20,3	127,24	11	milieu	24	69	8	3,3	16%
9	Plat	Ciment-Chaux	Aucun	30,5	217,42	4	haut	41	80	8	5,6	18%
10	Plat	Ciment-Chaux	Tenax	30,7	156,81	7	milieu	40	80	13	2,5	8%

TABLE 2.17 – Résultats des essais sur bottes – (d'après MacDougall 2005)

L'ensemble des paramètres testés permet de mettre en exergue l'influence du type d'enduit et donc de sa résistance dans la résistance globale du mur enduit.

Remarque : Selon le code californien, une méthode simplifiée de dimensionnement des murs porteurs en bottes de paille est en cours de développement [DEBO2009]. Pour calculer la charge maximale admissible (C_{adm}) pour un mur en paille porteuse, il est nécessaire de considérer les enduits comme des voiles porteurs fins et de prendre en compte leurs propriétés d'adhérence et de résistance à la compression (f'_c), ainsi que les caractéristiques des bottes de paille.

La formule pour C_{adm} est la suivante : $C_{adm} = \frac{f'_c * A_p}{FS}$ où f'_c est la résistance à la compression de l'enduit, ε la déformation relative de l'enduit en compression, et E_c le module d'élasticité en compression de l'enduit sec. A_p représente l'aire de la section transversale de l'enduit. Le facteur de sécurité FS est un coefficient choisi par le concepteur en fonction des autres paramètres influençant la qualité des enduits et des bottes de paille. Dans le cas des murs porteurs, la valeur courante de ce coefficient est de 4.

2.6 Analyse et conclusion

Des analyses précédentes sur les essais de compression, il a été conclu plusieurs éléments concernant les bottes de paille :

- **Masse volumique** : le module d'Young varie de manière exponentielle à la masse volumique. Lorsqu'une paille est à plat, elle présente une élasticité jusqu'à ce qu'elle atteigne une phase plastique. Dans le cas de la construction de murs en bottes de paille, il y a une étape préalable où les brins de paille se réorganisent de manière optimale et les bottes se rapprochent pour diminuer les espaces entre elles avant d'atteindre un comportement linéaire.
- **Orientation des brins** : il est observé que les bottes disposées à plat sont plus rigides que celles positionnées sur chant, et l'augmentation de la densité a apporté des avantages en termes de résistance et de déformabilité.
- **Nombre de ficelles** : ce serait davantage la densité que le nombre de ficelles qui jouerait sur la rigidité de la botte.
- **Teneur en eau** : l'exposition prolongée à des taux élevés d'humidité entraîne une diminution du module d'Young.
- **Type de céréale** : c'est la densité des bottes qui influence le module d'Young, plutôt que le type de céréale utilisé.
- **Vitesse de chargement** : il n'y aurait aucune différence dans le comportement des bottes.
- **Type de botteuse** : ce serait plus la densité de la botte que la technique de bottelage qui influencerait sur le module d'Young.

Quand il est question d'étudier le comportement de bottes ou de murs enduits viennent s'ajouter aux remarques précédentes des aspects liés à l'enduit lui-même :

- **Épaisseur de l'enduit** : en augmentant l'épaisseur de l'enduit, la résistance à la compression des bottes augmente, mais pas proportionnellement à l'épaisseur de l'enduit. Ainsi, la paille contribue effectivement à la résistance à la compression, confirmant ainsi le comportement composite de l'ensemble paille et enduit.
- **Résistance de l'enduit** : l'augmentation de la résistance de l'enduit entraîne une augmentation de la résistance à la compression d'une botte de paille enduite. Ainsi, la résistance de l'enduit influence effectivement l'ensemble paille et enduit.
- **Présence de renforts** : l'enduit renforcé par des fibres adhère mieux à la paille que celui renforcé par un treillis. Ce dernier ne paraît pas contribuer à améliorer la résistance à la compression. Au contraire, la présence du renfort semble fragiliser l'interface entre la paille et l'enduit, ce qui entraîne l'apparition précoce d'un voilement local. La présence du treillis altère également la capacité de maintien latéral assurée par l'enduit, ce qui conduit au voilement de l'enduit puis de la botte de paille. Néanmoins, après la rupture, les déformations latérales ont peut-être été plus rapides, mais elles ont été moins prononcées.

3. Fluage

Le fluage est un phénomène physique qui provoque la déformation plastique différée dans le temps d'un matériau soumis à une contrainte, constante pendant une durée suffisante mais inférieure à la limite d'élasticité du matériau.

Lors de la construction d'un mur en bottes de paille, les bottes sont empilées en quinconce les unes sur les autres. De ce fait, chaque botte de paille supporte une charge correspondant au poids des bottes situées au-dessus d'elle. Une fois les murs érigés, il n'est pas rare que les artisans conservent la structure telle quelle pendant un certain temps, pouvant s'étendre sur plusieurs semaines, avant de commencer à installer la toiture et à appliquer l'enduit. Étant donné ces méthodes de travail, nous allons nous référer aux résultats obtenus lors d'essais, qui ont pour but de reproduire cette période spécifique où les bottes de paille sont montées dans le mur, mais n'ont pas encore reçu d'enduit.

Il faut bien faire la différence entre le tassement initial qui caractérise la baisse de hauteur à court-terme due au réarrangement des bottes et le fluage qui correspond au tassement à long-terme d'un matériau ou d'une structure soumis à une charge constante, qui peut parfois n'être que son poids propre (Bouter et King 2009). Avant l'application de l'enduit, une fois que les murs ont été précomprimés, le niveau supérieur (plancher, toiture) est installé et durant cette période, qui s'étend de quelques semaines à quelques mois, les constructeurs de bâtiments en paille porteuse ont constaté que les bottes de paille se tassaient malgré la précompression des sangles. Le but de cette synthèse est donc d'établir les facteurs qui favorisent ce phénomène et de cibler ou suggérer des solutions pour s'en affranchir.

3.1 Essais sur bottes

3.1.1 Grosses bottes

Danielewicz et al. ont mené des essais de fluage sur grosses bottes ainsi que sur des petites bottes en paille nue. 7,4 à 21 % (35 à 100 mm/botte) de déformation instantanée ont été mesurés auxquels s'ajoutent 0,8 à 1,4% (7 à 50 mm/botte) de déformation différée en un mois [DANI2008]. Au bout d'un mois, les bottes avaient subi 86 à 94% de la déformation instantanément et 6 à 14% de déformation différée. La déformation initiale a ainsi été multipliée par 1,1 environ.

3.1.2 Petites bottes

Danielewicz et al. ont aussi testé trois petites bottes de blé disposées à plat dont la densité variait de 87 à 97 kg/m³ et chargées à 60 kPa. Les bottes sont très similaires aux modèles français et de faible densité pour de la paille utilisée dans le cas d'un chargement aussi important.

1,5 à 4 % de déformation instantanée ont été observés auxquels s'ajoutaient 6,5 à 11 % de déformation en un mois. Au bout d'un mois, les bottes avaient subi 25 à 35% de la déformation instantanément et 65 à 75% de déformation différée. En un mois la déformation initiale a donc été multipliée par 3 voire 4, les résultats étant très hétérogènes.

Jusqu'à maintenant les auteurs avaient présenté des travaux expérimentaux sans comparer les résultats à ceux d'une approche analytique. Maraldi et al (2018) ont essayé de proposer un modèle : 26 petites bottes à deux ficelles disposées à plat ont été testées. Même si cette approche paraît intéressante, on peut regretter la durée trop courte des essais (5 jours) pour pouvoir réellement conclure sur les expériences.

3.2 Essais sur murs

3.2.1 Murs non précomprimés

Smith a été le premier à réaliser une série d'essais de fluage étalés sur un an dans le cadre du projet avec EBNet [SMIT2003]. Ils ont été menés sur des petites bottes à 3 ficelles avec une densité de 116kg/m³ en paille de riz sauf une qui était en paille de blé. Smith a fait varier des paramètres et observé trois phases :

- Tassement initial (mesuré juste après l'application du chargement) : il diffèrait de façon assez imprévisible selon les piles. Cela peut s'expliquer pour plusieurs raisons :
 - les bottes n'avaient pas été mises en place de façon très uniforme,
 - elles n'avaient été ni tassées, ni précomprimées, contrairement à ce qui se pratique souvent aujourd'hui dans la construction en paille.

Généralement, on considère le tassement initial comme la phase où les bottes, dotées d'une surface souvent irrégulière, trouvent leur place et s'imbriquent les unes dans les autres, tandis que le fluage est la période où les brins de paille se déforment durablement avec le temps. Comme ces deux phénomènes se produisent plus ou moins simultanément, il est assez difficile de les différencier. Le tassement initial avoisinait 2,5 cm

pour une charge de 180 kg, soit 1,1 %, et 5,7 cm sous une charge de 725 kg, soit 2,5 %. Il est à noter que la pile faite de bottes à deux ficelles s'est tassée d'environ 4,5%.

- Fluage précoce : il semble qu'il se soit produit un fluage relativement rapide sur les deux premières semaines, tout au moins avec les charges les plus élevées.
- Fluage ralenti : après la période initiale, la plupart des piles se sont beaucoup tassées pendant les cinq à huit semaines suivantes.
- Stabilisation : au bout de dix semaines, la plupart des piles étaient stables et ne présentaient plus de déformation de fluage mesurable. Globalement, la déformation de fluage des bottes de paille de riz à trois ficelles était d'environ 2 cm sous charge faible (0,9 %) et de 2,8 cm sous charge élevée (1,2 %) représentant respectivement 80 % (2,0 / 2,5 cm) et 49 % (2,8 / 5,7 cm) du tassement initial. Contrairement aux autres piles, celle soumise à la plus lourde charge, à 13 kPa, a continué à se tasser tout au long de la période. La pile de bottes en paille de riz sur chant a présenté une période de fluage beaucoup plus longue (43 semaines) avant de se stabiliser de façon perceptible tout en présentant des caractéristiques de fluage analogues (1,4 %).

Walker a réalisé des essais de fluage sur deux murs qui ont été soumis à une contrainte de 16,6 kN/m² soit une charge de 840 kg pendant 74 jours [WALK2004]. Cela a permis de précomprimer les murs avant de les tester, une fois enduits, jusqu'à la ruine. Les murs ont été réalisés selon les recommandations professionnelles britanniques [SNAB2022].

L'échelonnement dans le temps du chargement semble aggraver le phénomène de fluage (Figure 2.16).

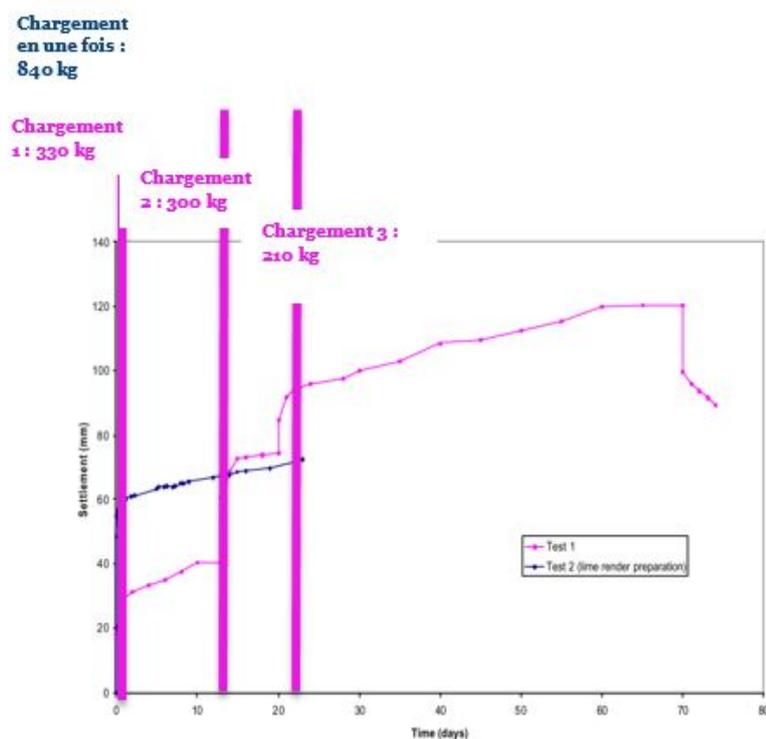


FIGURE 2.16. Evolution du tassement en fonction de la mise en place du chargement - (Source : Walker (2004))

3.2.2 Murs précomprimés

Bustarret et Hamelin ont établi un premier état de l'art sur des essais de fluage et ont présenté les travaux effectués en 2017 par des étudiants de l'IUT de Nîmes dans le cadre de leur projet de fin d'étude [QUIR2018]. Les travaux avaient été supervisés par J. Quirant et J. Averseng du LMGC de Montpellier (Figure 2.17).

Des essais étalés sur un an ont été réalisés sur deux murs de six rangées de petites bottes dont la densité sur base sèche était de 100kg/m³, précomprimés avec des sangles à 1,2 t/ml (5% de la hauteur). L'un était en paille nue et l'autre enduit avec un mélange de terre, de chaux, de paille et de plâtre d'épaisseur 3,5 cm posé en deux couches.

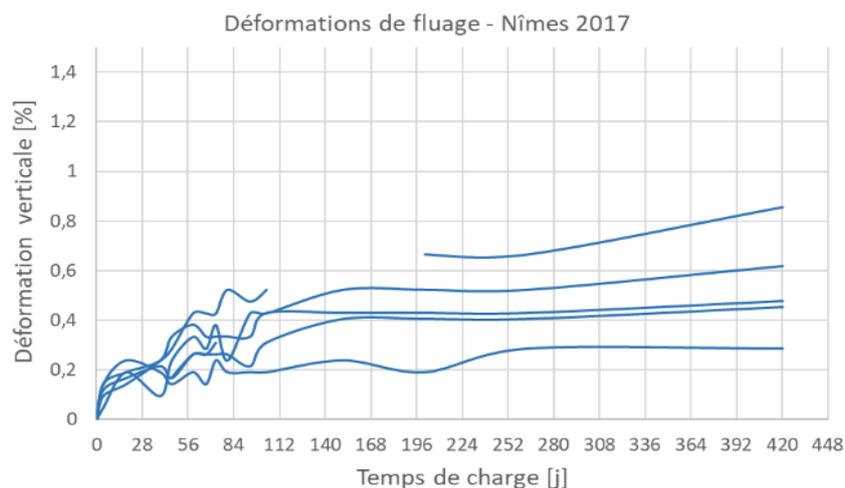


FIGURE 2.17. Evolution de la déformation verticale sur 14 mois de murs précomprimés, prise en différents points du mur - (Source : Bustarret et al. (2018))

3.2.3 Conclusion

Il est possible de conclure que plusieurs paramètres impactent le fluage d'un mur en bottes de paille :

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

D'après les différents essais, il a été constaté que la petite botte de paille nue (sans précompression) fluait rapidement et de manière importante tandis que la botte jumbo ou matelas nue réagissait mieux au fluage.

- **L'influence de la précompression du mur**

La comparaison des résultats d'essais sur petites bottes à Nîmes suggère que la précompression a considérablement limité le fluage de la paille nue sans l'annuler pour autant. Cela peut s'expliquer de deux façons :

- la précompression augmente la densité de la paille et réduit le fluage,
- ou elle induit un réarrangement préalable des brins et des bottes permettant une rigidification du matériau.

- **Le temps de stabilisation de la déformation dans le temps**

Les essais de Smith (2003) sur les bottes non précomprimées montraient qu'après 3 mois la déformation n'évoluait presque plus [SMIT2003]. Pour Quirant, le temps de stabilisation qui a été évalué à 4 mois différait pour un mur de même hauteur mais légèrement moins dense et moins chargé [QUIR2018].

Il apparaît que très peu d'essais de fluage ont été effectués. Sur des murs montés selon la technique Nebraska, seul l'essai effectué à l'IUT de Nîmes est valable, ce qui est peu. Cependant, les configurations d'essai de Smith (2003) sont intéressantes.

4. Relaxation

La relaxation est un phénomène touchant les matériaux comme l'acier des câbles de précontrainte et agit de manière duale au fluage. Le terme relaxation caractérise la réduction de la contrainte existante sous une déformation constante de matériau, là où le fluage est une déformation différée permanente apparaissant sous contrainte constante. Le but de cette synthèse est d'établir les facteurs qui favorisent ce phénomène. Concrètement, ce sont surtout les sangles qui pourraient être susceptibles de se relaxer

4.1 Essais de relaxation standards sur bottes

4.1.1 Influence du taux de déformation

Danielewicz et al. ont mené de nombreux essais dans le cadre d'un projet pour la FASBA [DANI2008]. Leurs essais sur petites bottes consistaient à appliquer des déformations constantes sur 20 jours. Ils obtiennent des résultats assez contradictoires et il est difficile de conclure même si les faibles précompressions semblent moins subir de relaxation.

Ils ont également mené des essais sur grosses bottes qui ne subissaient pas seulement différents taux de déformation mais présentaient également des densités différentes. Il est donc difficile de statuer sur l'influence du paramètre prépondérant.

Maraldi et al. ont testé treize petites bottes de paille de blé à deux ficelles de 94 kg/m^3 dont sept à plat et six sur chant afin d'être soumises à 3 différents taux de déformation $\varepsilon_0 = 0,15, 0,25$ et $0,3$ [MARA2018].

Ils ont proposé un modèle de type Maxwell généralisé, mais avec une loi puissance dans le terme en exponentiel qui donne la contrainte :

$$\sigma(t) = \sigma_\infty - \Delta\sigma e^{-\left(\frac{t}{\tau_R}\right)^{b_R}}$$

Avec :

- σ_∞ la valeur asymptotique de la contrainte
- $\Delta\sigma = \sigma_\infty - \sigma_0$ est la différence de contrainte
- $\tau_R > 0$ la période de relaxation caractéristique et b_R l'exposant.

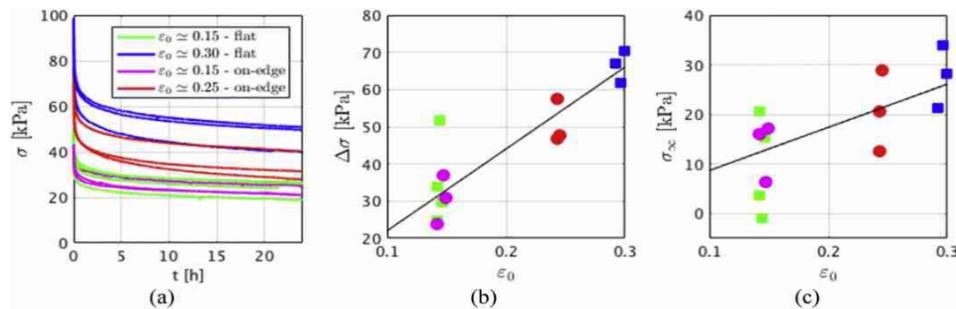


FIGURE 2.18. Essais de relaxation : (a) Courbes des contraintes en fonction de la déformation imposée et de l'orientation de la botte - (b) Différence de contraintes et (c) contrainte asymptotique fonctions de la déformation imposée - (Source : Maraldi et al. (2018))

D'après les graphes (Figure 2.18), toutes les bottes ont un comportement similaire : l'effort a tendance à se relâcher avec le temps jusqu'à atteindre une valeur asymptotique. Cette réponse peut être justement assimilée à une fonction exponentielle. σ_∞ et $\Delta\sigma$ sont proportionnels à la déformation imposée ε_0 . Plus la botte est déformée, plus la contrainte se relâche.

Pour les auteurs la régression inversement exponentielle est similaire pour les bottes à plat et sur chant. L'orientation des bottes n'a aucune influence.

4.1.2 Influence de la masse volumique de la botte et de la durée de l'essai

Danielewicz et al. ont mené des essais sur grosses bottes cependant les bottes ne présentent pas seulement des densités différentes mais subissent également différents taux de déformation et durées d'essais [DANI2008] (??). Il est donc difficile de statuer sur l'influence de la masse volumique.

Les auteurs ont également voulu étudier l'influence de la durée de l'essai. Ils ont testé trois grosses bottes pendant 33 jours, une quatrième pendant 4 jours et une dernière pendant 7 jours. Mais seules les bottes 10 et 7 (Tableau 2.18) ont des paramètres initiaux comparables.

N° botte	Masse volumique [kg/m ³]	Déformation 0 [%]	Durée [j]	Contrainte T ₀ initiale [kPa]	Contrainte T _f finale [kPa]	Perte de contrainte (T ₀ - T _f)/T ₀ [%]
10	122,7	30	33	139	57	59
9	138,2	20	33	126	68	46
13	130,1	10	33	46	20	56
7	119,0	30	4	146	71	51
6	121,6	20	7	96	51	46

TABLE 2.18 – Synthèse des résultats des essais – (Source : Danielewicz et al. (2008))

La relaxation est mesurée à 3 reprises durant l'essai :

- Phase 1 : jusqu'à 1h après l'application de la charge,

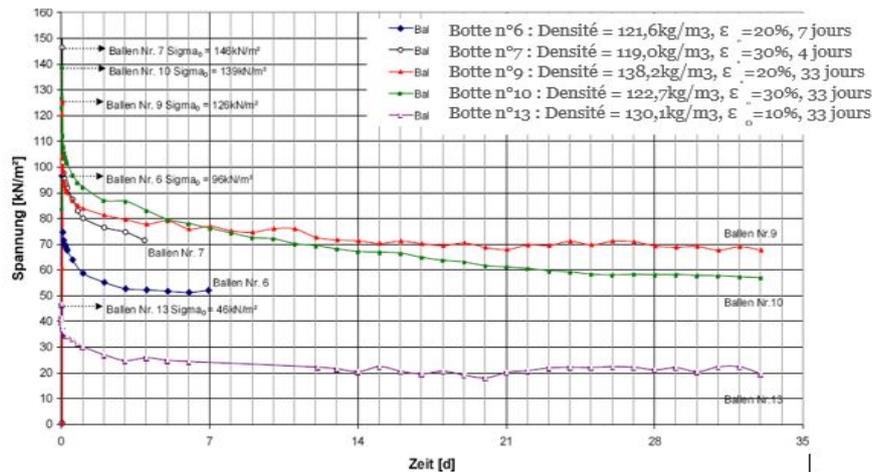


FIGURE 2.19. Essai de relaxation sur les bottes 6, 7, 9, 10, 13
Diminution de l'effort à déformation constante – (Source : Danielewicz (2008))

- Phase 2 : jusqu'à 2 jours après l'application de la charge,
- Phase 3 : jusqu'à la fin de l'essai.

Interprétation

- Phase 1 : Une heure après l'application de la charge, la tension diminue déjà de 20% à 30 %. La perte de contrainte se déclenche dès que la charge est appliquée. La valeur moyenne de la perte des 5 bottes est de 24% et la moyenne entre les bottes 9, 10, 13 qui seront testées à long-terme est de 22%.
- Phase 2 : Les pertes atteignent en moyenne 41 % (moyenne parmi 5 bottes) ou 38% (moyenne des bottes 9, 10 et 13) par rapport à la contrainte initiale et cela correspond à 73 % de la perte de contrainte finale. D'après les auteurs, l'influence de la masse volumique des bottes ne semble pas déterminer la valeur de la perte de contrainte. Cependant, ils admettent que leur analyse est à prendre avec précaution en raison du nombre réduit de bottes testées et de l'influence de la hauteur de la compression qui ne peut être considérée indépendamment de la masse volumique.
- Phase 3 : Lors de cette dernière phase, la perte d'effort devient lente et constante.

4.2 Essais de relaxation combinés à des situations accidentelles sur bottes

Danielewicz et al. ont mené des essais de relaxation sur des petites bottes dans plusieurs configurations mais qui avaient les mêmes caractéristiques de départ [DANI2008] :

- simulation de rupture de fils : pour simuler une rupture de fils, la relaxation a été mesurée plus de 24 heures après l'application de la contrainte pour garantir que la botte d'essai se comportait de manière similaire aux autres bottes. Ensuite, les fils ont été coupés et la relaxation s'est poursuivie pendant 48 heures.
- simulation de dégâts des eaux : pour cet essai, le banc d'essai a été équipé d'un film qui formait un bac imperméable à l'eau sous et autour de la botte. Après application de la contrainte, la relaxation a été enregistrée sur 24 heures. Ensuite, de l'eau a été versée jusqu'à une hauteur de 10 cm maintenue constante dans la cuve, et la relaxation a été enregistrée toutes les heures pendant 48 heures.

La rupture de fils n'a qu'une influence marginale sur le comportement en relaxation en raison d'un protocole qui a pour effet de confiner la botte. La contrainte résiduelle chute spontanément de seulement 1,43%. Par contre, la simulation de dégâts des eaux affecte considérablement le comportement avec une chute de contrainte d'environ 25% par rapport à la contrainte initiale et une stabilisation à une valeur très basse. Les auteurs avancent que la lignine dans les cellules de la paille redevient flexible une fois humide et que la botte perd sa rigidité.

4.3 Essais sur murs

Danielewicz et al. ont aussi réalisé des essais sur deux murs en grosses bottes de paille nue [DANI2008]. Ils étaient précomprimés par un système de tiges boulonnées intégrées à l'intérieur des bottes.

Le mur 1 a été comprimé pour une déformation de 23,5%. Pour cela une force de 163 kN a été appliquée, la contrainte initiale étant de 113 kPa. Cinq jours après sa construction le mur a dû être déchargé pour modifier légèrement le système d'introduction de charge. Suite à cette intervention la déformation initiale de 23,5% a été à nouveau appliquée. Cet aléa est visible sur la Figure 2.20.

De même qu'avec les bottes individuelles, la plus grande perte de la précompression s'est effectuée immédiatement après son application. On observe après 50 jours que la perte de précompression devient négligeable. La baisse est néanmoins importante puisqu'on passe de 163 kN à 100kN (-39%).

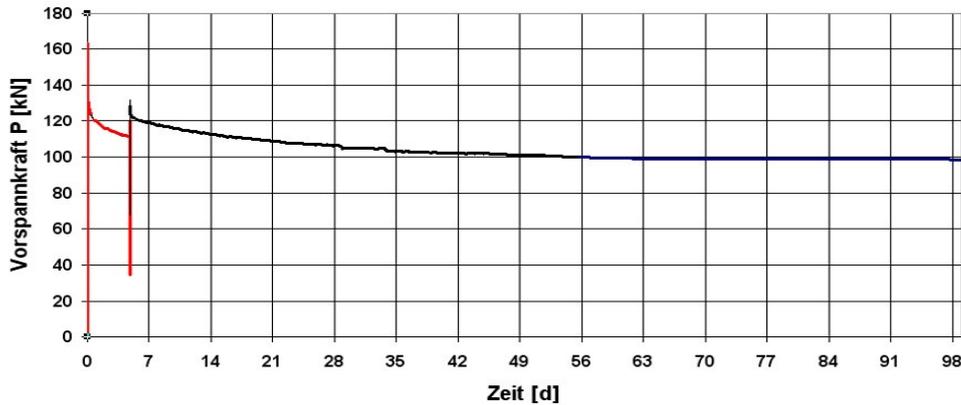


FIGURE 2.20. Courbe représentant la perte d'effort dans le mur 1 maintenu sous une déformation constante $\epsilon_h = 23,5\%$ -Mesures du 13/09/2006 au 22/12/2006 (99 jours) - (Source : Danielewicz et al. (2008))

Le mur 2 a été soumis à une déformation de 16% en position horizontale. L'effort de précompression initiale correspondant était de 114 kN, soit une contrainte de 79 kPa. La mise en position verticale au bout du 7^{ème} jour a induit une charge verticale de 652 kg due au poids propre et de 92 kg correspondant au cadre instrumenté. On peut donc supposer un déchargement des barres sous tension de l'ordre de 7,5 kN. Cette valeur correspond très bien au changement de l'effort de précompression mesuré le septième jour.

Le 31^{ème} jour, le mur a été soumis à un effort de compression qui a conduit à la réduction de la précompression initiale. D'après les auteurs, l'augmentation légère de la compression (jour 35 à 40) et la diminution à partir du jour 70 sont probablement liées aux influences climatiques du fait que tous les essais ont été effectués dans un hall d'essai non climatisé.

Pour le mur 2, la relaxation ne s'est pas stabilisée entièrement. Si les "sauts" après 7 et 30 jours sont corrigés, la contrainte initiale P_0 est équivalente à 100,5 kN, avec $P_{85} = 40$ kN à la fin de l'essai, la perte de contrainte est d'environ 60%. La progression des courbes colorées correspond aux 4 points de mesure permettant d'introduire l'effort de précompression (??).

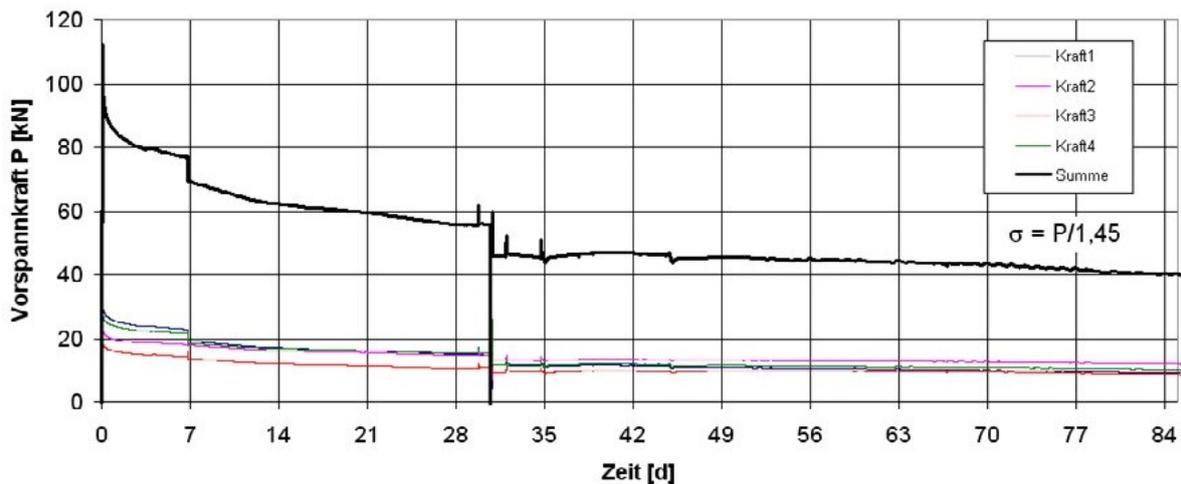


FIGURE 2.21. Courbe représentant la perte d'effort dans le mur 2 maintenu sous une déformation constante $h = 16\%$ -Mesures du 15/01/2007 au 26/04/2007 (101 jours) - (Source : Danielewicz et al.(2008))

Les auteurs ont également réalisé des murs de petites bottes enduit et en paille nue. Ils ont constaté que le mur enduit montrait de fortes fluctuations. Ceci est attribué aux conditions météorologiques car les tests ont eu lieu à l'extérieur. Il n'a pas été possible de déterminer si la météo influençait le système d'instrumentation ou le comportement du mur lui-même. La courbe du mur enduit est incomplète en raison d'un dysfonctionnement de

l'enregistreur de données. Il est frappant de constater que le mur enduit subissait une relaxation plus élevée que le mur non enduit, les résultats n'ont donc pas été retenus.

4.4 Conclusion

Les essais de relaxation sur bottes seules n'ont pas vraiment d'intérêt contrairement à ceux effectués sur murs. Cependant les essais n'ont pas eu les résultats escomptés

5. Cisaillement

L'essai de cisaillement sur botte permet notamment de qualifier l'accroche d'un enduit sur la paille. Une fois le bâtiment érigé, il est soumis à des efforts de vent ou potentiellement à des séismes qui viendront solliciter horizontalement le mur. Il est primordial de considérer sur le long terme les effets de telles sollicitations en terme de durabilité. Une ancienne modélisation de l'ensemble paille + enduit préconisait de le considérer comme une poutre en I. L'âme est alors ramenée à une épaisseur équivalente dont le module d'élasticité est égal à celui de l'enduit (Figure 2.22).

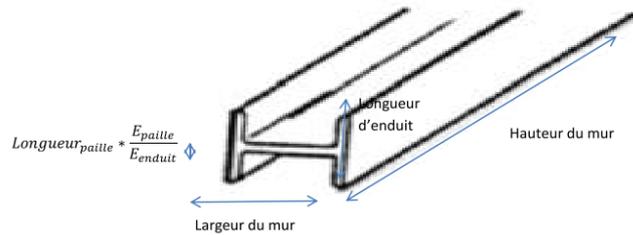


FIGURE 2.22. Principe de fonctionnement du système paille-enduit en tant que poutre en I - (Sources : Principe établi par King et De Bouter (2009)- Schéma de Desille (2010))

Mais ce modèle considérait une adhérence parfaite entre les deux matériaux ce qui est loin d'être le cas concrètement. On note qu'il existe très peu d'essais concernant l'interface paille - enduit.

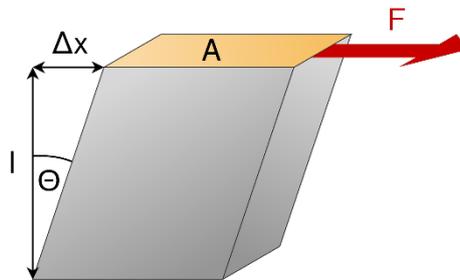


FIGURE 2.23. Principe de fonctionnement du système paille-enduit en tant que poutre en I - (Sources : Principe établi par King et De Bouter (2009) -schéma de Desille (2010))

Dans le domaine élastique, la loi de Hooke donne :

$$G = \tau * \gamma \quad (2.9)$$

La formule générale pour calculer la contrainte de cisaillement est :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.10)$$

Avec

- τ la contrainte de cisaillement, ou scission ;
- F la force tangentielle appliquée ;
- A l'aire de la section tangentielle à la force.

L'angle de glissement se traduit par :

$$\gamma = \frac{\Delta x}{l} \quad (2.11)$$

Avec

- Δx : le déplacement latéral ;
- l : la hauteur ou l'épaisseur.

5.1 Essais sur bottes

Dick et al. ont tenté de comprendre les mécanismes d'interface entre la paille et un enduit ciment [DICK2009]. Ils ont appliqué la pression sur les couches d'enduit de 38 mm situées de chaque côté de la botte de paille. Pour que ces couches descendent de 3 mm ($\varepsilon = 0,8\%$), il a fallu fournir une pression de 0,728 MPa (ramené à la surface d'enduit) et aller jusqu'à 3,447 MPa pour obtenir la rupture.

Field et al. ont également testé des petites bottes d'une masse volumique estimée à 132,80 kg/m³ [FIEL2005]. L'enduit appliqué était un mélange sable-argile en proportions égales renforcé avec de la paille hachée. Cependant, si la presse a été placée au-dessus de la botte de paille, elle ne prenait pas appui sur l'enduit ce qui fait que l'essai qui était au départ un essai de compression revenait à un essai de cisaillement. A partir de la seule des trois courbes expérimentales fournie, un module de cisaillement de 0,4 MPa a pu être recalculé.

Desille a fabriqué des sets de 2 petites bottes, collées par un enduit ciment-chaux de 4 à 5 cm, et soumises à un test de cisaillement selon le schéma présenté en Figure 2.24 [DESI2010]. Les petites bottes étaient au préalable précomprimées dans un gabarit afin d'avoir des dimensions de 46 cm de long pour 30 de large et 36 de haut. L'essai suivait les étapes suivantes :

- une botte est placée sous le vérin de la presse (σ_c),
- l'autre botte est posée sur un appui fixe,
- une précompression (σ_p) de l'enduit (interface) est introduite latéralement, mais celle-ci étant très faible, elle est négligeable face à la contrainte perpendiculaire aux fibres.

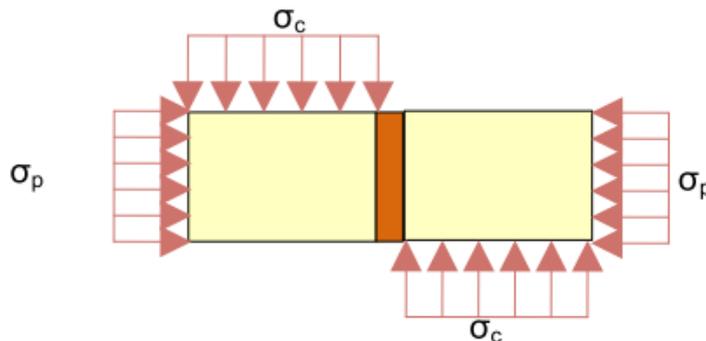


FIGURE 2.24. Schéma de principe de l'essai - (Source : Desille (2010))

Trois essais ont été réalisés et consistaient à appliquer une déformation continue. L'interface paille-enduit testée subit un endommagement qui se traduit par la rupture des brins de paille. Aucune rupture brutale n'a été constatée. Ce résultat était prévisible en raison du caractère fibreux de l'interface. Le schéma sur la Figure 2.25 explique l'interaction entre la paille et l'enduit.

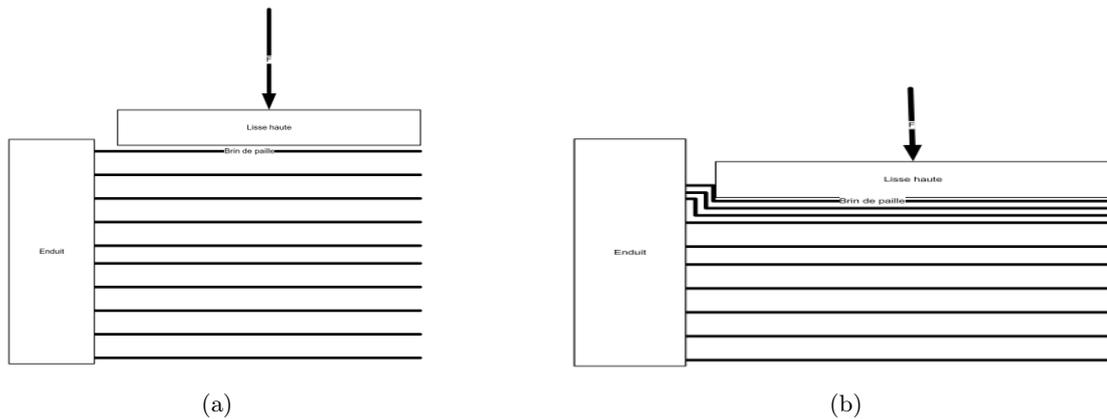


FIGURE 2.25. Rupture au cisaillement de l'interface paille-enduit - (Source : Desille (2010))

Pour les 3 essais, connaissant l'effort maximum, les valeurs respectives de d'effort de cisaillement critique ont été déduites : 0,055, 0,091 et 0,200 MPa. En raison des efforts de frottement parasites observés pendant les essais, la dernière valeur a été jugée non exploitable. L'ordre de grandeur de la valeur limite de la contrainte de cisaillement critique paille paille-enduit (0,05 à 0,1 MPa) est cohérent avec les quelques valeurs relevées dans la littérature.

D'après Forêt et al. (2012), l'essai présenté est cependant très perfectible, car le système de précompression peut provoquer une mise en flexion parasite : l'interface n'est plus alors soumise au seul cisaillement. Des modélisations numériques et des essais complémentaires (type push-out basé sur le même principe mais chargé symétriquement sur deux faces) seraient donc nécessaires pour caractériser les propriétés de l'interface paille-enduit.

A l'IUT de Nîmes, des essais ont été réalisés par des étudiants sous la supervision de J. Quirant et de C. Hamelin en 2019, Deux bottes enduites à la chaux, une botte en paille nue et un mur en paille d'une masse volumique d'environ 120kg/m^3 ont été testés par cisaillement.

Pour cisailier les bottes, une boîte métallique inspirée de l'essai de Casagrande a été réalisée avec des plaques de tôle brutes.

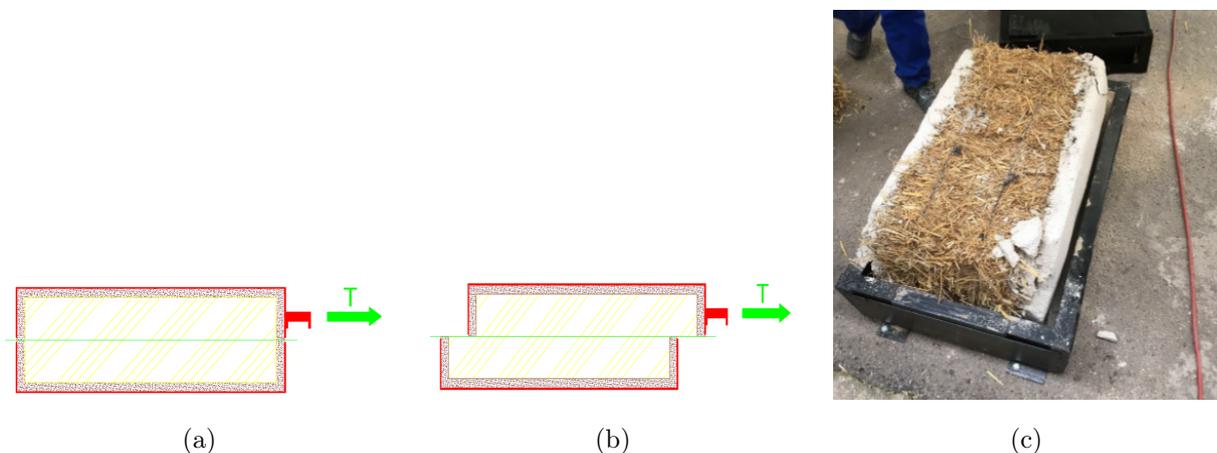


FIGURE 2.26. Schéma du principe de l'essai de cisaillement sur bottes (a) - Botte enduite cisailée (b) - (Source : Rapport de PFE des étudiants de l'IUT de Nîmes (2019))

Les bottes enduites présentaient un module de cisaillement G de 0,052 et 0,054 MPa contre 0,015 MPa pour celle sans enduit. Il y a donc un facteur de 3,5 entre les deux valeurs. Il a été conclu que l'enduit jouait donc un rôle important, permettant ainsi de rigidifier la botte et jouant un rôle de contreventement, mais les résultats sont à prendre avec circonspection car les appareils de mesure étaient assez rudimentaires (dynamomètre et comparateur)

Comme vu précédemment, Zhang a réalisé des essais de compression qui s'avéraient être des essais de cisaillement pour certains, hybrides pour d'autres, dont les résultats peuvent être comparés aux autres auteurs moyennant corrections [ZHAN2002]. Des bottes de 100kg/m^3 enduites à la terre ou au ciment ont été testées pour étudier l'influence du type d'enduit. On constate une différence de 16% entre les modules de cisaillement avec une valeur de 0,330 MPa pour la botte enduite à la terre contre 0,392 MPa pour celle enduite au ciment.

Le Tableau 2.19 permet de synthétiser l'ensemble des résultats.

Auteur	Type d'enduit	e (mm)	ρ botte (kg/m ³)	Module de cisaillement (MPa)
Zhang (2002)	Terre	40	100	0.330
	Ciment	40	100	0.392
Field et al. (2005)	Terre	/	132.8	0.4
IUT de Nîmes (2019)	Chaux	55	116	0.052
	Chaux	55	116	0.054
	Paille nue	/	116	0.015

TABLE 2.19 – Synthèse des résultats des essais de cisaillement sur bottes

5.2 Essais sur murs

Bou-Ali voulait étudier l'effet du cisaillement sur trois murs en paille nue en appliquant une masse de 953 kg sur un pan de 3,65 m de longueur pour une largeur de 0,58 m et une hauteur de 2,43 m [BOUA1993]. Une plaque en bois de 2,5 cm a été placée directement sur le pan et connectée à un câble qui traversait le mur de bout en bout. Cette technique a pour but d'assurer un chargement uniformément réparti. Selon l'auteur, les résultats ont prouvé que les bottes de paille reprennent à elles seules une quantité importante d'énergie, mais que l'ajout de n'importe quel type de contreventement améliorerait considérablement les performances des murs soumis au cisaillement.

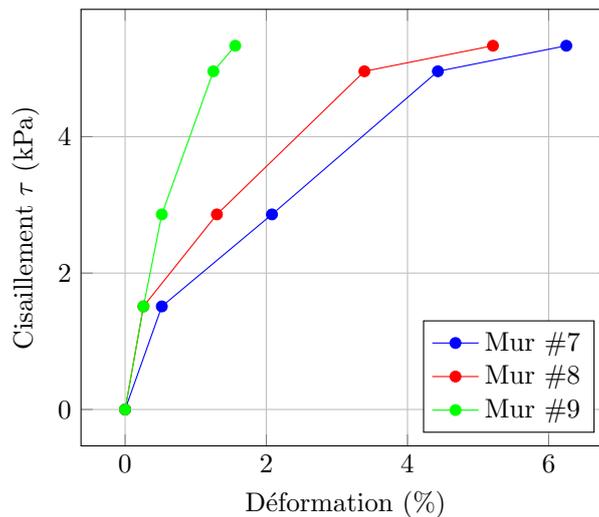


FIGURE 2.27. Essais de cisaillement sur murs en paille nue (d'après Bou-Ali (1993))

Danielewicz et al. ont procédé à quelques essais sur deux murs de paille nue constitués de 7 grosses bottes et deux murs enduits dans le cadre d'une campagne lancée par le FASBA [DANI2008]. L'enduit utilisé était un loam (52 % de sable, 28 à 50 % de limon et de 7 à 27 % d'argile) qui recouvrait le mur sur ses quatre faces de sorte à former un confinement. Cette procédure a sûrement joué sur les résultats. Les murs enduits absorbaient mieux le cisaillement et l'enduit jouait un rôle important, permettant ainsi de rigidifier la botte et son utilisation comme élément de contreventement. On note que les résultats sur les murs en grosses bottes sont bien plus élevés que les murs en petites bottes cités précédemment.

Vieux-Champagne et Sieffert ont récemment testé cinq murs enduits à la terre dont quatre contenaient des fibres et un mur enduit à la chaux. L'enduit était appliqué sur une seule face. Ils ont également fait varier les conditions limites. Les caractéristiques des essais sont présentées dans le Tableau 2.20.

N° Mur	Mortier	Épaisseur de mortier sur 1 face (mm)	Conditions limites	Détail technique
1	Terre fibrée	36	Confiné verticalement	-
2	Terre fibrée	40	Lesté à 400 kg	-
3	Terre fibrée	33	Confiné verticalement	-
4	Terre non fibrée	32	Confiné verticalement	-
5	Terre fibrée	45	Confiné verticalement	Fenêtre centrale
6	Chaux	30	Confiné verticalement	-

TABLE 2.20 – Caractéristiques des murs enduits – (Source : Vieux-Champagne et Sieffert (2022))

D'après les résultats présentés dans le Tableau 2.21, le mur enduit à la chaux (6) était plus résistant. Il est par contre plus difficile de se prononcer sur la contribution des fibres dans l'enduit terre car il n'y avait qu'un mur sans fibre (4) et affichait un module G de $15,6 \cdot 10^6$ kPa contre $12,1 \cdot 10^6$ kPa pour le mur 1 et $16,9 \cdot 10^6$ kPa pour le mur 3,

L'insertion d'une menuiserie a rigidifié le mur 5. Selon les auteurs, il est possible de supposer que lors de la première phase, les épaisseurs de mortier participent au contreventement en permettant la transmission des charges par des bielles de compression. En revanche, lors de la seconde phase, les épaisseurs de mortier se désolidarisent complètement de la lisse basse, laissant la paille porteuse et sa structure de pieux seuls responsables du contreventement.

Auteur	Mur	Enduit	Conditions aux limites	Module de cisaillement G (kPa)
Bou-Ali (1993)	1	Paille nue	/	82,45
	2		/	95,82
	3		/	333,84
Danielewicz et al. (2008)	1	Paille nue	/	571,57
	2		/	764,44
	1 + enduit	Terre	/	1407,95
	2 + enduit		/	1350,89
Vieux-Champagne et Sieffert (2022)	1	Terre fibrée	Confiné verticalement	$12,1 \times 10^6$
	2	Terre fibrée	Lesté à 400 kg	$11,1 \times 10^6$
	3	Terre fibrée	Confiné verticalement	$16,9 \times 10^6$
	4	Terre non fibrée	Confiné verticalement	$15,6 \times 10^6$
	5	Terre fibrée	Confiné verticalement + Fenêtre centrale	$18,0 \times 10^6$
	6	Chaux	Confiné verticalement	$23,2 \times 10^6$

TABLE 2.21 – Résultats des essais de cisaillement sur murs

6. Essais cycliques ou essais sismiques sur murs

Ramírez rapporte les résultats de deux murs de 2,44 m de haut sur 2,44 m de long, dont un enduit de ciment d'un côté et de plâtre renforcé par un treillis métallique galvanisé de l'autre [RAMI1999]. Les murs étaient intégrés dans une ossature de poteaux et de poutres en bois. Dans le mur 1, seules les bottes à trois ficelles étaient directement confinées par le cadre en bois. Donc ça revenait à faire un essai de cisaillement sur paille nue. Dans le mur 2, l'ensemble bottes à deux ficelles + enduit de plâtre étaient encadrés par l'ossature bois. Les deux spécimens ont été soumis à une charge latérale cyclique appliquée au sommet du mur. Aucune charge gravitaire superposée n'a été appliquée. La réponse charge-déplacement est présentée sur la Figure 2.28.

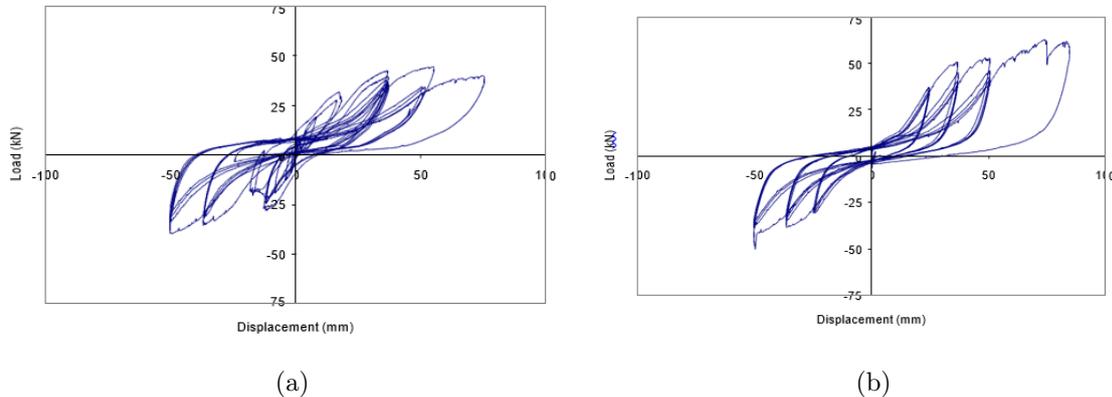


FIGURE 2.28. Cisaillage cyclique sur les murs 1 (a) et 2 (b) – (Source : Ramirez (1999))

Les résistances maximales étaient de 44,4 kN pour le mur 1 et de 50,8 kN pour le mur 2, ce qui illustre une augmentation de 37 % de la résistance résultant du confinement direct de l'enduit par l'ossature de poteaux et de poutres.

Le mur 1 a atteint sa résistance maximale à une déformation de $\pm 2\%$ (égale à un déplacement du toit de $\pm 50,8$ mm). À $\pm 3\%$ de déformation, la résistance latérale est tombée à moins de 80 % de la résistance maximale (une définition courante de la capacité de déplacement ultime) et l'essai a été interrompu afin de préserver l'intégrité de l'ossature pour les essais futurs.

Le mur 2 avait une résistance latérale à une déformation de 2 % de 53,7 kN, soit 18 % de plus que le mur 1, Le mur 2 avait une résistance latérale maximale de 60,4 kN à une déformation de 3 %. À une déformation de +3,1 %, le montant en sapin s'est fissuré ce qui a provoqué une chute instantanée de 20 % de la résistance du mur. L'essai a été interrompu après l'apparition de cette fissure.

Si l'auteur a voulu faire une simulation d'un mur en construction paille, les essais ne permettent malheureusement pas de distinguer l'apport de chaque élément dans la résistance au cisaillement. Par contre, il apparaît clairement que le mur enduit résiste mieux au cisaillement que le mur en paille nue.

Nichols et Raap ont testé un mur 2,44 m x 2,44 m au cisaillement [NICH2000]. Il était constitué de 6 rangées de bottes de riz à 3 ficelles et était ancré à une fondation en béton. Un enduit ciment d'environ 3,2 cm d'épaisseur a été appliqué en 3 couches sur les deux faces du mur et renforcé avec du treillis métallique soudé de 1,23 mm de diamètre et de 5,1 cm de maille. La rupture a été obtenue lors du troisième test. Peu de temps après l'apparition de fissures sur la face droite à 142 kN, la face gauche qui avait commencé à se fissurer à 0,9 kN, a commencé à se briser en contrainte au centre du mur. La force latérale maximale était de 160 kN.

Ash, Aschheim et Mar ont testé 6 murs en paille porteuse pour étudier l'influence du type d'enduit [ASH2003] : trois avaient des revêtements en terre et trois étaient enduits au ciment. Certains comportaient des renforts. Cinq des murs ont été testés sous une charge cyclique afin de simuler leur réponse aux secousses sismiques. Le mur restant présentait des détails caractéristiques d'une construction non sismique et a été testé sous une charge monotone. Sur la base des discussions précédentes, plusieurs conclusions peuvent être tirées :

- les propriétés du ciment semblent mieux définies que celles de l'enduit terre,
- les ruptures en tension ductiles n'ont été obtenues qu'avec les murs revêtus de ciment,
- tous les murs ont présenté une réponse stable à des niveaux de déformation élevés (5 et 7,5 %), sans aucune indication d'effondrement imminent.

Les auteurs ont également étudié l'influence de l'intégration de renforts dans les enduits et ont observé que :

- l'absence de treillis d'armature dans le mur A a conduit à une résistance plus faible et à des problèmes d'adhérence de l'enduit à la lisse haute.
- l'ajout de broches et de traverses dans le mur F n'a pas entraîné d'amélioration notable de la performance par rapport au mur E.

Faurot et al. ont eux testé un mur de 1,22 m de long pour 2,44 m de haut constitué de petites bottes de paille de riz [FAUR2004]. Un grillage à poule était intégré dans l'enduit chaux-ciment qui était composé de 12 volumes de sable, 4 volumes de ciment Portland et d'un volume de chaux. L'épaisseur de l'enduit était de 3,8 cm sur chaque face. Contrairement à Ash, Aschheim et Mar (2003), aucune charge verticale n'a été superposée à l'essai de cisaillement cyclique [ASH2003]. La charge maximale était de 31,1 kN pour un déplacement correspondant de 6,2 cm. Les auteurs ont enregistré un déplacement maximal de 11 cm pour une charge correspondante de 1,75 kN. Donc au-delà de 6,2 cm, le mur avait grandement vu sa résistance baisser car l'enduit s'était décollé. C'est surtout le grillage à poule qui reprenait l'effort.

La méthode de construction utilisant la paille porteuse a été étudiée dans le cadre du projet PAKSBAB, dirigé par Darcey Donovan à l'Université du Nevada de 2008 à 2009 [DONO2009]. Cette approche prometteuse a montré des résultats encourageants pour les structures en paille porteuse, en particulier dans les régions montagneuses du Pakistan, sujettes aux séismes. Son objectif est de fournir une solution parasismique abordable en utilisant des matériaux locaux, tout en offrant une isolation thermique pour faire face aux variations de température.

Des tests de résistance aux séismes ont été réalisés avec succès sur des murs et un prototype de maison construits selon cette technique. Les résultats ont démontré que la paille porteuse renforcée surpassait les murs traditionnels en briques, en parpaings ou en pierre. Les principaux avantages de cette approche résident dans sa rentabilité et sa capacité à tirer parti des ressources locales. Les autorités urbaines commencent à reconnaître son potentiel pour la construction dans les zones densément peuplées exposées aux séismes.

Par ailleurs, Werner Schmidt a également apporté sa contribution en proposant l'utilisation de paille de riz, un déchet agricole abondant, pour renforcer les structures des bâtiments devant résister aux séismes dans la région d'Azad Kashmir. Des méthodes de presse manuelle et de renforcement, telles que l'utilisation de sangles de précompression et de filets de pêche, ont été développées pour faciliter la construction de maisons en bottes de paille.

Actuellement, la technique de la paille porteuse est mise en œuvre dans les régions rurales montagneuses du Pakistan et dans d'autres parties du monde pour construire des habitations durables et résistantes aux séismes. La recherche se poursuit afin de perfectionner davantage cette méthode et d'explorer pleinement le potentiel offert par la paille porteuse.

Jalali (2013) a développé des valeurs admissibles de cisaillement pour les assemblages de murs en bottes de paille en se basant sur les combinaisons de plâtre et d'armature, utilisant les données d'essais disponibles. Les déplacements latéraux des murs en bottes de paille, soumis à des forces latérales dans le plan, se sont révélés similaires à ceux des murs à ossature légère avec un revêtement en bois, ce qui suggère que ces deux types de murs peuvent être interchangeables. Pour les charges sismiques, les murs en bottes de paille doivent être conçus en respectant les limites de déformation habituelles des étages.

Différentes approches ont été employées pour déterminer les paramètres de conception sismique. L'approche la plus rigoureuse, fondée sur la FEMA P695, a conduit à des valeurs recommandées du coefficient de modification à la réponse sismique R qui sont listées dans le Tableau 2.22.

Configuration	R
Paille porteuse avec enduit argile	3,5
Paille porteuse avec enduit ciment	2,5
Murs en bottes de paille lorsque la règle de déplacement égal est appliquée	5,4
Lorsque la règle de déplacement égal ne s'applique pas	3,5
Murs à ossature légère avec des panneaux de contreventement en bois : murs porteurs	3,7
Murs à ossature légère avec des panneaux de contreventement en bois : ossature avec remplissage paille	3,9

TABLE 2.22 – Valeurs recommandées de R en fonction du mode constructif

En se basant sur ces analyses, des valeurs provisoires de R de 3,5 sont recommandées pour les murs en paille dans porteuse, et de 4,0 pour les systèmes d'ossature de bâtiment. Un facteur de sur-résistance de 3 est préconisé,

et des facteurs d'amplification du déplacement de 3 et 3,5 sont considérés comme étant prudents compte tenu des exigences actuelles du code. La méthode actuelle (FEMA P695) peut être conservatrice pour les systèmes à courte période, tels que les murs en bottes de paille, et d'autres approches sont également envisagées pour déterminer les facteurs de conception sismique appropriés.

A l'IUT de Nîmes, des essais ont été réalisés par des étudiants sous la supervision de J. Quirant et de C. Hamelin en 2019. Un mur en bottes d'environ 120 kg/m^3 et enduit d'un mélange ciment-chaux sur ses deux faces a été soumis au cisaillement. Le mode de ruine s'est produit par fissuration de l'enduit sur les deux faces du mur suivant des directions en cohérence avec la sollicitation appliquée. Les modules de cisaillement sont respectivement de 2402 kPa, 2747 kPa et 8989 kPa pour les essais 1, 2 et 3,

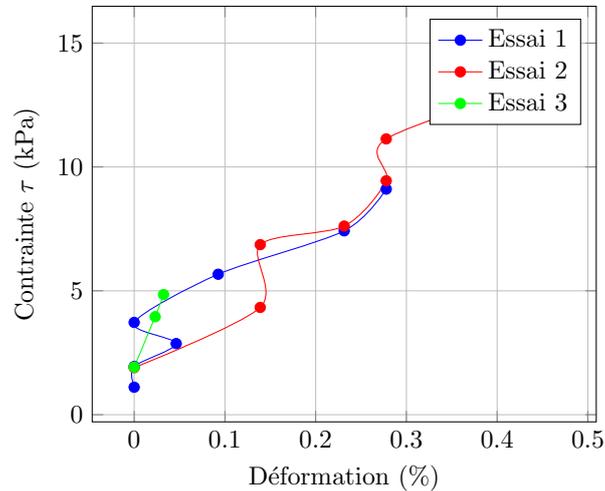


FIGURE 2.29. Contrainte τ en fonction de la déformation pour les trois essais

Conclusion

Comme prévu, les essais de cisaillement permettent de montrer que l'enduit permet de contreventer les parois et que la résistance au cisaillement va dépendre de la résistance au cisaillement de l'enduit qui est influencée elle-même par plusieurs paramètres : nature et épaisseur de l'enduit, intégration de brins ou de mailles. Les enduits en ciment et en chaux présentent de très bons résultats. Cependant, pour rester en accord avec la démarche écologique de cette thèse, il serait pertinent de se focaliser sur les enduits terre et de trouver une formulation optimale qui soit un mélange de terre, sable et paille.

7. Flexion – Chargement hors-plan

Cette partie évoque une configuration assez particulière puisque les situations dans lesquelles les parois en paille porteuse seraient soumises à de la flexion serait dans le cas où une lourde charge serait posée contre le mur (charge excentrée poussant sur une partie de la hauteur du mur) en phase chantier ou durant la vie de l'ouvrage une fois l'enduit sec.

Les enduits avaient les caractéristiques suivantes :

- L'enduit terre était composé d'un volume de sol argileux, 1,5 volumes de sable et 1,5 volumes de fibres de riz. L'argile était lui-même composé de 17% de sable, de 31% de silice et de 52 % d'argile. Il était appliqué en une seule couche pour former une épaisseur totale de 5 cm.
- L'enduit ciment était du Quikret « Exterior Stucco Mix » (n°1209) composé d'un volume de ciment contre 3 volumes de sable. Il était appliqué en deux couches pour former une épaisseur totale de 2,5 cm [1 pouce]. D'après ces essais, on constate une fois de plus que l'enduit rigidifie le mur. Le mur nu (test 8) ploie plus rapidement à mesure que la charge augmente. L'enduit ciment stabilise mieux que l'enduit terre (tests 1, 2, 3 et 4).

Les auteurs ont également cherché à déterminer l'impact des liaisons aux extrémités haute et basse en variant le type de connexion et leur espacement. Ainsi plusieurs configurations ont été étudiées (Tableau 2.23) :

Type de liaison N° test	En tête	En pied
1	Rotule	Rotule
2	Rotule	Rotule
3	Rotule	Rotule
4	Libre	Encastrement
5	Encastrement	Encastrement
6	Encastrement	Encastrement
7	Encastrement	Encastrement
8	Rotule	Rotule

TABLE 2.23 – Synthèse du type de liaison en tête et en pied de mur

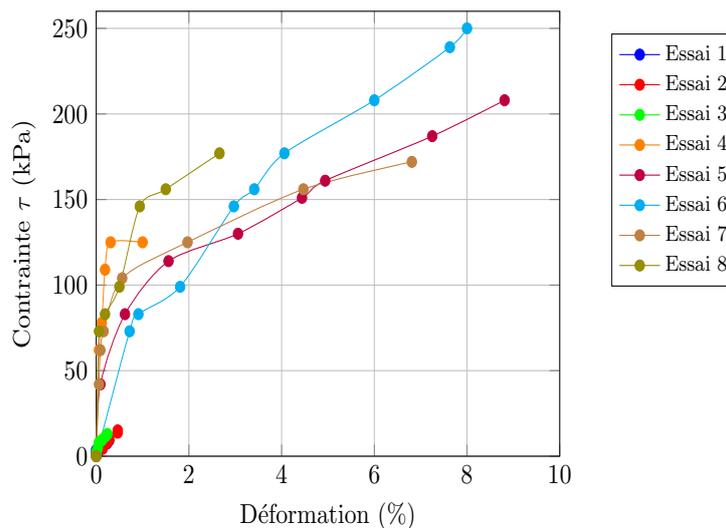


FIGURE 2.30. Essais de flexion sur murs enduits – (d'après Donahue et al. (2003))

D'après ces essais, on constate que :

- les systèmes rotulés semblent mieux réagir à la flexion (tests 1, 2, 3) mais ceci est à vérifier car il n'y a pas assez de cas pour l'affirmer et semble contre-intuitif,

- il n’y a pas d’information sur les conditions du 4^{ème} essai mais on peut supposer que l’absence de connexion en tête a dû engendrer un problème technique et que l’essai n’a pas pu se poursuivre.

Enfin, les auteurs ont étudié en parallèle la contribution de divers renforts dans la résistance à la flexion : grillage à poule, treillis soudés en acier, grillage en plastique, inclusion de tiges en bambou. Ils ont constaté que la flexion est influencée par la qualité de mise en œuvre que ce soit pour l’agencement des bottes, la pose de l’enduit ainsi que la position des connexions et du type de renfort. Malheureusement, on peut regretter qu’il y ait une telle variation de paramètres avec le mur témoin. Il est difficile de qualifier et quantifier la contribution de chacun d’entre eux. Malgré le manque de détails, on constate que :

- l’utilisation de grillage ou de treillis est plus efficace que l’ajout de fibres dans la composition de l’enduit.
- l’insertion de tiges en bambou tests (5 et 6) a aussi permis d’augmenter la rigidité du mur notamment celles qui traversent horizontalement le mur (test 5).

8. Essais d’impact

Des auteurs ont voulu étudier la résistance aux chocs de murs en paille pour simuler la survenue d’impacts lors de situations accidentelles, climatiques ou autres. Ces essais ont été effectués sur des murs enduits et donc sont pertinents pour étudier la durabilité de l’ouvrage.

Bilello a testé des murs enduits au ciment [BILE1999]. Les murs étaient constitués de 5 rangées de bottes de 0,37 x 0,61 x 1,62 m d’environ 30 kg. Les bottes étaient fixées à une base avec des barres d’ancrage en acier. L’enduit ciment a été réparti sur les deux faces du mur et a été maintenu grâce à l’un des deux types de grillage : à poule ou léger en métal déployé.

L’enduit dont l’épaisseur variait de 3,8 à 7,6 cm était constitué de 18 volumes de sable, de 2 volumes de ciment Portland, d’un volume de ciment à maçonner de type S et de fibres en plastique. L’enduit a été appliqué en 3 couches et seule la couche de finition ne contenait pas de fibres en plastique. Les murs ont été impactés par un projectile en leur centre. Le projectile était modélisé par une planche de bois de 6,8 kg de section 5,1 x 10,2 cm frappant le mur dans l’axe longitudinal de la planche et perpendiculairement au mur. L’essai simule une tornade dont le vent souffle à 400 km/h ce qui équivaut à lancer un impact à 160 km/h ou 45m/s. Ce critère est utilisé dans la conception afin de protéger les occupants en cas de choc. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.24.

N° du tir	Vitesse du missile (m/s)	Profondeur de pénétration dans le mur (cm)	Type de grillage utilisé	Endommagement constaté
I	27,7	33	Grillage à poule	Petites fissures radiales dans l’enduit au niveau de l’impact sur la face arrière.
II	31,5	53,3	Grillage à poule	Écaillage de l’enduit au niveau de l’impact sur la face arrière sans endommagement du grillage.
III	37,5	38,1	Grillage à poule	Effritement de gros morceaux d’enduit au niveau de l’impact sur la face arrière.
IV	45,1	33	Métal déployé	Effritement de gros morceaux d’enduit au niveau de l’impact sur la face arrière sans impact sur le grillage.
V	40,8	Perforation complète	Métal déployé	Perforation du mur et donc du grillage.

TABLE 2.24 – Résultats des essais d’impact – (d’après Bilello (1999))

Les auteurs établissent que la vitesse de seuil de perforation de la construction en bottes dépend de nombreuses variables :

- densité et qualité de la botte,
- niveau de précompression des bottes,
- emplacement de la botte impactée dans le mur,
- qualité de la construction,
- type de grillage,
- qualité de l’enduit,
- longueur des fibres en plastique.

Selon eux, l’utilisation de treillis métallique et d’enduit a amélioré la réponse du système à l’impact. Ce n’est pas le comportement des éléments indépendants mais de l’assemblage paille - enduit- grillage qui est à considérer

dans son ensemble La grillage et l'enduit ont fonctionné comme un filet pour contenir la paille et amortir le projectile, ce qui a permis au système d'absorber l'énergie de l'impact. D'après ces tests préliminaires, le type de grillage utilisé ne semble pas affecter de manière significative la valeur seuil de perforation et il se pourrait que la qualité de l'enduit et de son application soient plus susceptibles d'influencer la valeur seuil quel que soit le type de grillage utilisé. Les auteurs n'ont pas mesuré les diamètres des impacts mais uniquement leur profondeur, ce qui aurait pu être plus significatif.

Quirant et al. ont testé un mur (2,2 x 2,85 x 0,53 m) précomprimé et composé de 6 rangs de petites bottes de 100kg/ m³ [QUIR2018]. Un enduit de 4 cm d'épaisseur à base de terre, plâtre et chaux a été appliqué sur les deux faces du mur. Celui-ci fut chargé durant un an pour un essai de fluage mais n'a pas subi de déformation à la décharge. Le mur n'était donc plus sous charge au moment de l'essai de choc à 900 joules mais faisait partie d'un module composé de 4 murs. Sa liaison par les extrémités de sa lisse haute à d'autres murs a pu influencer la réponse du mur à l'impact.



FIGURE 2.31. Essais d'impact sur un mur enduit – (Source : Quirant et al. (2018))

Selon la norme NF P08-302 (Murs extérieurs – résistance aux chocs – Méthodes d'essais et critères), l'impact doit être provoqué par une masse de 50 kg sphérique molle (M50) avec une énergie de 900 joules. Limité par la hauteur sous abri et pour respecter l'angle de 65° maximum préconisé par la norme, un sac de sable sphérique de 76,5 kg a été lâché 1,2 m au-dessus du point d'impact. Le sac était pendu à une corde de 2 m. Le point d'impact était situé à 1,25 m au-dessus de la lisse basse du mur, pour respecter les préconisations de la norme. Selon la relation $W = h * m * g$, on obtient $= 1,2 * 76,5 * 9,81 = 900,6J$

Avec

- W en joules,
- h la différence d'altitude en m,
- m la masse du sac en kg,
- g l'accélération de la pesanteur.

Juste après l'impact, une personne rattrapait le sac pour éviter tout rebond sur le mur. Chaque mur est supposé être testé une seule fois mais les auteurs ont enchainé par la suite deux autres impacts sur le même mur. Ils ont mesuré les dimensions du cratère de l'impact mais également la déformation hors-plan générée qui est à vérifier selon la norme NF P08-302, La valeur maximale acceptable selon la norme vaut $h/200 = 11$ mm. Les résultats sont résumés dans le Tableau 2.25.

N° essai	Diam. de l'impact (cm)	Profondeur de l'impact (mm)	Déformation hors-plan sur la face arrière (mm)	Déformation acceptable selon la norme NF P08-302 (<11mm)	Commentaires
1	50	5	7	oui	L'essai a impacté au niveau de la sangle de précompression se qui a influencé certainement la propagation des fissures.
2	40	15	12	non	Le deuxième impact s'est produit sur un point distant de 40 cm de la sangle la plus proche.
3	50	13	10	oui	Le troisième impact concernait un point distant de 50 cm des sangles.

TABLE 2.25 – Résultats des essais d'impact sur un mur – (d'après Quirant et al. (2018))

Selon les auteurs, le caractère massif et ductile du mur mais également la nature de l'enduit influence les dimensions de l'impact. L'enduit à base de plâtre et de chaux est plus cassant, fragile qu'un enduit terre.

Le comportement d'un mur de paille soumis à un impact a été très peu étudié et de ce fait, la littérature est très pauvre. Visiblement la résistance et l'épaisseur de l'enduit ont un impact sur la résistance générale du mur comme on pouvait se douter. Étant le premier matériau au contact de l'élément perforant et étant le matériau le plus rigide dans l'ensemble paille-enduit, ce sont ses caractéristiques qui détermineront la profondeur et le diamètre de perforation.

9. Conclusion

Cet état de l'art a permis de faire un tour d'horizon des essais structurels qui avaient été explorés dans de précédents travaux. Il apparaît que de par la nouveauté de cette thématique de recherche, beaucoup d'aspects restent à explorer et le peu de travaux existants nous obligent à faire des choix et de s'orienter vers les problématiques les plus souvent évoquées en chantier par les professionnels : fluage, cisaillement et flambement. Cette revue exhaustive des essais structurels sur les murs en bottes de paille dévoile des informations cruciales pour la compréhension de ce matériau de construction. Les essais de compression sur les bottes de paille mettent en lumière l'impact significatif de la masse volumique, de l'orientation des brins et de la densité sur le module d'Young. Il apparaît que la densité, plutôt que le nombre de ficelles, joue un rôle déterminant dans la rigidité de la botte, tandis que des facteurs tels que la teneur en eau, le type de céréale, la vitesse de chargement et le processus de bottelage influencent également les propriétés mécaniques. Les essais de fluage sur les murs en bottes de paille révèlent des différences marquées entre les petites bottes nues et les bottes jumbo ou matelas nues, mettant en évidence la résistance supérieure de ces dernières au fluage. De plus, la précompression du mur émerge comme un moyen efficace de limiter le fluage, contribuant à une augmentation de densité via un réarrangement des brins. Cependant, les essais de relaxation sur les bottes seules présentent un intérêt limité par rapport à ceux effectués sur les murs. Les essais de cisaillement soulignent le rôle crucial de l'enduit dans la contreventement des parois, avec des résultats positifs pour les enduits en ciment et en chaux. Néanmoins, une perspective écologique oriente vers les enduits terre. L'étude de la résistance à la flexion avec divers renforts montre que des éléments tels que grillages, treillis et tiges en bambou peuvent améliorer cette résistance, mais la qualité de la mise en œuvre reste un facteur déterminant. Enfin, l'examen du comportement sous impact révèle l'influence significative de la résistance et de l'épaisseur de l'enduit sur la résistance globale du mur. Les caractéristiques de la paille dictent la profondeur et le diamètre de la perforation résultant d'un impact. En conclusion, cette synthèse met en avant l'importance de ces essais dans la caractérisation des murs en bottes de paille, tout en soulignant la nécessité de poursuivre les recherches pour explorer davantage cette voie prometteuse de construction durable.

Chapitre 3

De la botte à la structure : études expérimentales

1. Introduction

Les bases ont été posées dans les deux premiers chapitres. Dans un premier temps, nous avons contextualisé le processus constructif de la paille porteuse dans le domaine de l'éco-construction en analysant ses diverses potentialités. Ensuite, nous avons répertorié les essais structurels effectués à l'échelle de la botte et du mur sur des prototypes en paille nue ou enduits. Cela nous a permis dégager plusieurs axes de recherche qu'il serait intéressant d'explorer. Nous nous penchons sur les propriétés mécaniques de la paille dans des conditions de compression, de fluage et de cisaillement comme il a été évoqué dans la Figure 2.1 afin de rester cohérents avec les phénomènes rencontrés par le mur durant ses différentes phases de vie.

Ces études expérimentales permettent de donner une dimension tangible à nos idées théoriques et d'évaluer la validité de nos hypothèses :

- le module d'Young dépend de la densité des bottes
- en deçà d'une certaine masse volumique (120 kg/m³ sur base humide soit 100kg/m³ sur base sèche), la botte n'est pas adaptée à une utilisation en paille porteuse.
- plus le mur en paille est dense donc rigide et plus le fluage s'atténue.
- l'enduit permet de contreventer la paroi en paille.

Ces théories servent de base à d'autres interrogations :

- En fonction du niveau de précompression, au delà de quel niveau de chargement, la précompression ne permet-elle plus d'arrêter le fluage ?
- Quelle formulation d'enduit permet d'atténuer au mieux le fluage ?
- Laquelle limite au mieux le cisaillement ?

À travers ces protocoles expérimentaux, nous cherchons à obtenir des données fiables permettant de proposer une méthode de dimensionnement assurant une réponse appropriée de la structure, tant en phase de construction qu'en service. Ces données sont destinées à enrichir notre compréhension des caractéristiques de la paille dans des applications réelles. Cela permettra d'éclairer les avantages, les limites et les potentiels de la paille en tant que composant structurel.

2. Protocoles expérimentaux

Afin de qualifier la paille porteuse en tant que solution constructive, nous avons procédé à trois types d'expérimentations pour apporter les données permettant de bâtir les modèles décrivant le comportement de la paille porteuse à court moyen et long terme :

- essai de compression sur bottes et enduits,
- essai de fluage sur murs enduits ou non,
- essai de cisaillement sur murs enduits.

Les essais se sont déroulés selon le planning donné dans la Figure 3.1.

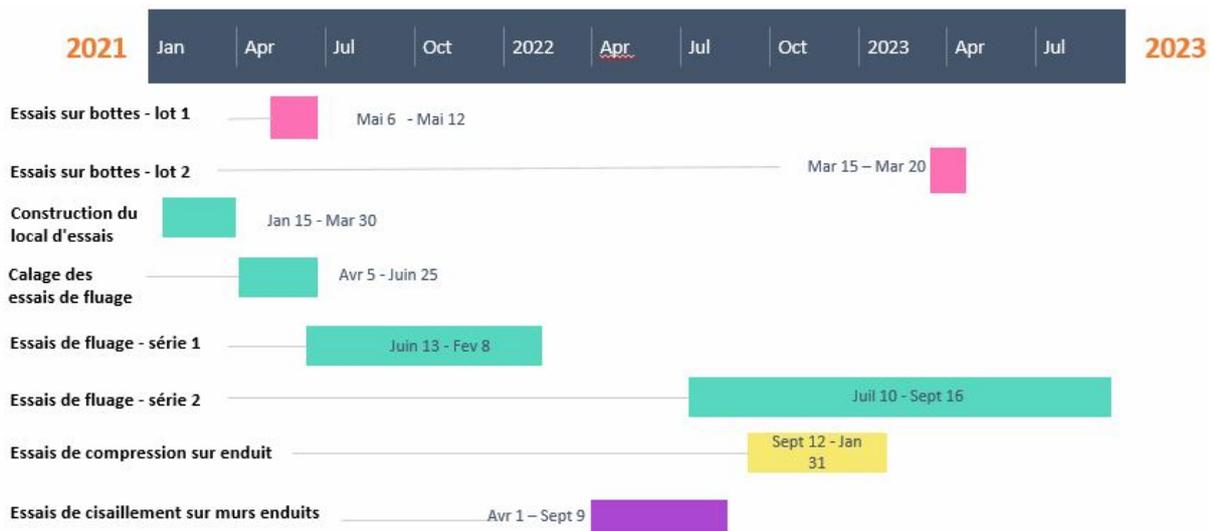


FIGURE 3.1. Planning des essais

2.1 Essai de compression sur bottes et enduit

La compression est un phénomène mécanique qui résulte de l'application d'une force sur un matériau ou une structure, entraînant un raccourcissement ou un tassement dans la direction de la force appliquée. Il est important avant de caractériser le fluage d'évaluer le comportement des bottes et des enduits sous compression.

2.1.1 Bottes

Des bottes provenant des deux lots différents ont été testées à plat et sur chant en utilisant une presse pour étudier leur comportement vis-à-vis de la compression et évaluer l'influence de l'orientation des brins. Ces tests permettront d'établir la courbe contrainte-déformation offrant ainsi une vue détaillée de leur réponse pour déterminer si le comportement est fragile (rupture instantanée et brusque, comme dans le cas du béton ou du bois) ou ductile (rupture lente et déformable, à l'instar de l'acier, avec une redistribution de la charge avant la rupture).

2.1.1.1 Description

Le choix du champ de provenance des bottes est réalisé avec soin. Au fil des années, l'agriculture traditionnelle a favorisé les variétés de céréales de moindre envergure afin de minimiser les résidus, ce qui se traduit par des brins de paille plus courts. Cependant, il est envisageable que dans le futur, la revalorisation des sous-produits agricoles puisse infléchir cette orientation.

Les bottes utilisées dans le processus de construction des spécimens à deux ficelles provenaient de fournisseurs locaux (Gard). Il demeurerait impératif que ces bottes affichent une densité adéquate pour leur incorporation dans l'édification. En prenant en considération les ressources disponibles dans la région, le choix s'est porté sur un approvisionnement auprès de JCL Agri, un entreposeur qui fournissait des bottes issues de la localité d'Aigues-Mortes (30) et qui étaient parfaitement adaptées à la conception de structures porteuses en paille.

Pour façonner ces bottes, une presse à haute densité de modèle Massey Ferguson MF 1840, équipée d'un canal central, a été utilisée.

Deux lots d'environ trente bottes de paille de blé ont été commandés respectivement en 2020 et en 2021. Ils ont été abrités sous un hangar ouvert avant d'entamer les expérimentations. Les courants d'air circulant dans l'abri ont permis de préserver un niveau d'humidité relativement constant. Les bottes de petite taille présentent une masse volumique d'au moins 100 kg/m^3 à l'état sec. Cette mesure est vérifiée conformément au protocole stipulé dans les Règles Pro CP 2012.

Les bottes de paille de blé (36 x 46 x 120 cm) affichaient une masse moyenne d'environ 26 kg et présentaient une densité relativement élevée, atteignant 131 kg/m^3 . Le nombre et le type de ficelles utilisées ont un impact sur la rigidité des bottes. Les bottes fournies étaient liées par deux ficelles en polypropylène COTESI 250, dont les caractéristiques sont énumérées dans le Tableau 1.3 :

Marque	Masse d'une bobine [kg]	Diamètre [mm]	Hauteur [mm]	Résistance linéaire [kN]	Résistance au nœud [kN]
T 250	5	240	255	2.236	1.363
T 350	5	240	255	1.402	0.883
T 400	5	240	255	1.226	0.775
T 500	5	240	255	1.030	0.647

TABLE 3.1 – Caractéristiques des ficelles - (Source : Extrait des données catalogue TAMA)

2.1.1.2 Dispositif d'essai : presse, pilotage et interface presse/botte

2.1.1.2.1 Presse

La presse permet d'étudier le comportement d'un élément de structure sous chargement vertical. Deux presses ont été utilisées pour les essais :

- Les bottes du lot 1 ont été testées sous une presse hydraulique à pilotage manuel (Figure 3.2) ce qui ne permettait pas de contrôler complètement la vitesse de montée en charge.



FIGURE 3.2. Presse hydraulique

- Pour réaliser des essais plus maîtrisés, un banc d'essai 3R composé d'un banc fixe autoporteur sur lequel se déplaçaient 2 châssis portiques, équipés de vérins a été utilisé. Le plus petit châssis qui est plutôt conçu pour des essais sur poutres a été spécialement adapté pour des essais sur bottes (Figure 3.3). La presse hydraulique à pilotage électrique comportait un vérin de 400 kN.



FIGURE 3.3. Dispositif d'essai de compression sur bottes

2.1.1.2.2 Conditions aux limites Deux systèmes différents ont permis d'appliquer un effort de façon homogène sur les bottes car deux presses avaient été utilisées :

- Dans le premier cas, les bottes du lot 1 étaient fixées en bas sur une plaque qui a servi de lisse basse pour les essais de fluage et une plaque de bois rigide de 2 cm sur laquelle reposaient deux lourdes poutres en bois jouait le rôle d'interface avec le vérin.
- Les bottes du lot 2 ont été installées sur une plaque en bois rigide de 2 cm posée sur deux poutres en bois elles-mêmes calées sur le bâti métallique. Pour éviter leur flexion, de grosses cales en bois avaient été installées en dessous. Le vérin appliquait effort sur un profilé métallique appelé chevêtre, dont les deux appuis étaient séparés d'une distance de 60 cm. Le chevêtre était posé sur deux poutres elles-mêmes posées sur une plaque rigide de 2 cm au contact de la botte.

2.1.1.2.3 Protocole de chargement et instrumentation Le pilotage est réalisé en déplacement. C'est à dire que l'on impose un déplacement en tête du mur monotone croissant. Le déplacement augmente dans ce cas jusqu'à la rupture du mur ou jusqu'à la limite de déplacement latérale possible avec le portique.

Pour le lot 1, un capteur de type comparateur d'évaluer le déplacement dans la direction axiale. Pour le lot 2, il y avait un comparateur fixé sur le bâti, en contact avec la plaque en bois supérieure et un capteur LVDT intégré dans le vérin de chargement qui permettaient de mesurer le déplacement dans la direction axiale (Figure 3.4).



FIGURE 3.4. Vérin et capteurs de déplacement

Pour l'évaluation du coefficient de Poisson, les elongations ont été mesurées au mètre-ruban. Les masses volu-

miques des bottes ont été calculées et comparées pour vérifier leur homogénéité, permettant ainsi d'étudier la corrélation entre densité et module d'élasticité.

2.1.2 Enduits

Une campagne d'essais sur une gamme d'enduits a été menée afin de caractériser leurs caractéristiques mécaniques. L'argile jaune provient d'une extraction réalisée en Isère (38). Elle est traitée artisanalement, ce qui la rend sujette aux variations saisonnières d'humidité. Elle est très fine et se présente sous une granulométrie de 0-6 mm avec une densité de 1100 kg/m³. Le sable commercial est grossier et semi-concassé. Les brins de paille ont une longueur qui varie de 4 à 8 cm Figure 3.5.



2.1.2.1 Préparation des éprouvettes

Des éprouvettes 4 x 4 x 16 cm ont été réalisées en s'inspirant de la norme EN 196-1. Elles présentaient différentes formulations dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 3.2.

FIGURE 3.5. Paille en vrac

Composition	N° essai	Terre (vol.)	Sable (vol.)	Paille (vol.)
1 - Terre	1	2,5	0	0
2 - Terre + Paille	2,1	0,75	0	1/5
	2,2	0,75	0	1/3
	2,3	0,75	0	1/2
3 - Terre + Sable	3,1	1,25	1	0
	3,2	0,5	1	0
	3,3	0,5	3/2	0
4 - Terre + Paille + Sable	4,1	0,5	0,5	1/5
	4,2	1	1	1/3
	4,3	1	1	1/2
	4,4	1	2	1/5
	4,5	1	2	1/3
	4,6	1	2	1/2
	4,7	1	3	1/5
	4,8	1	3	1/3
4,9	1	3	1/2	

TABLE 3.2 – Composition des enduits

2.1.2.1.1 Préparation du mortier

Le moule est huilé avant d'être fixé sur une table vibrante. La hausse est positionnée avec précision au-dessus du moule. L'ensemble, composé du moule et de la hausse, est fixé sur la table vibrante à l'aide d'une bride métallique (Figure 3.6).

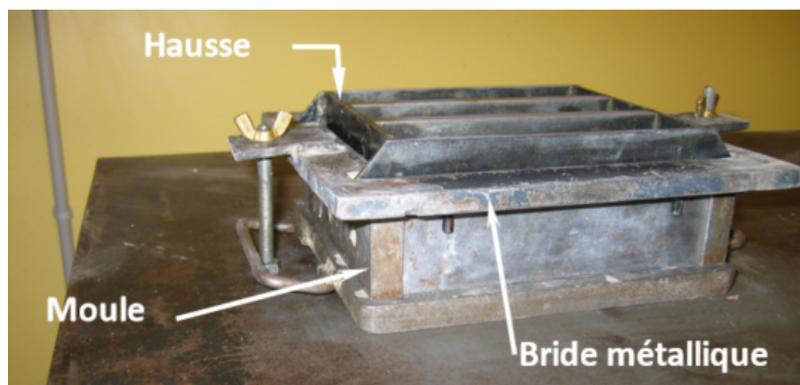


FIGURE 3.6. Moule de fabrication des éprouvettes

Les ingrédients nécessaires pour préparer une gâchée, permettant de confectionner 3 éprouvettes, sont rassemblés en fonction de la formulation à réaliser.

Le malaxeur est mis en marche et le programme de malaxage conforme à la norme EN 196-1 est sélectionné :

- malaxage à petite vitesse (140 t/mn) pendant une durée de 30 secondes,
- introduction automatique du sable au cours des 30 secondes suivantes,
- malaxage à grande vitesse (280 t/mn) pendant 30 secondes supplémentaires,
- arrêt du malaxeur ; pendant cette pause, les parois du récipient sont raclées afin de garantir une homogénéité parfaite du mortier,
- reprise du malaxage à grande vitesse pendant une durée de 60 secondes,
- arrêt définitif du malaxeur.

Le sable est versé dans la trémie située en partie supérieure. L'eau est versée dans le récipient, suivie de l'introduction de la terre et de la paille. Le bol est ensuite remonté avant d'activer le processus de malaxage. Pendant la pause du malaxeur, les parois du récipient sont raclées, afin qu'aucune partie du mortier ne soit laissée sans mélange.

2.1.2.1.2 Moulage des éprouvettes

À l'aide d'une spatule, la première couche de mortier est introduite dans chaque compartiment du moule directement à partir du récipient de malaxage. La couche est étalée uniformément en utilisant la spatule à araser, tenue verticalement avec ses épaulements en contact avec la partie supérieure de la hausse. Elle est tirée une fois dans chaque direction, c'est-à-dire en avant et en arrière le long de chaque compartiment du moule.

Ensuite, la première couche est serrée en utilisant la table vibrante. La vibration est arrêtée dès que le serrage paraît correct et sa durée est notée (environ 60 secondes). La seconde couche de mortier est introduite, nivelée avec la spatule, puis à nouveau serrée par vibrations. Avec précaution, le moule est retiré de la table et la hausse est enlevée. Immédiatement, l'excès de mortier est enlevé à l'aide de la règle à araser posée de chant, animée de lents mouvements de scie transversaux (Figure 3.7). La surface des éprouvettes est lissée en utilisant la même règle tenue presque à plat. Le résidu de mortier restant sur le périmètre du moule suite à l'arasement est enlevé.

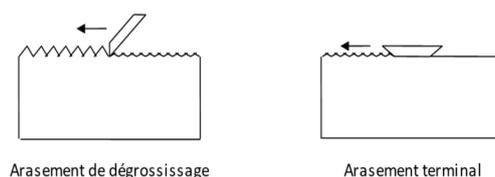


FIGURE 3.7. Détails sur l'arasement des éprouvettes

2.1.2.2 Dispositif d'essai

Pour réaliser les essais de compression sur enduit, une presse hydraulique a été utilisée (Figure 3.8a). Les prismes d'enduit étaient insérés dans un dispositif de compression via des plaques d'appui (40 x 45 mm) qui permettaient de réaliser deux essais sur la longueur d'une éprouvette en veillant à ne pas les soumettre à des

contraintes parasites (Figure 3.8). Le dispositif de compression est positionné sur le disque central, situé sur le bâti inférieur de la presse. La charge doit augmenter de manière régulière à une vitesse de $2400 \text{ N/s} \pm 200 \text{ N/s}$.



(a) Presse hydraulique



(b) Dispositif de compression

FIGURE 3.8. Dispositif d'essais de compression sur enduit

2.2 Fluage

Les bottes de paille empilées ont tendance à subir un phénomène de déformation progressif, connu sous le nom de fluage. Cela signifie que, sur de longues périodes, les bottes de paille se tassent de manière permanente. Ce phénomène est courant dans la construction et peut se produire avec n'importe quel matériau ou structure et il est pris en compte lors des calculs s'il devient non négligeable. Lorsque les bottes de paille sont empilées, même sous leur propre poids, elles vont inévitablement subir un tassement. La valeur de ce tassement peut varier, allant d'une fraction infime de la hauteur totale du mur à quelques pourcents, selon la densité et des bottes et selon qu'elles sont enduites ou non.

On distingue le fluage, qui correspond au tassement à long terme d'un matériau ou d'un assemblage soumis à une charge (même si cette charge est uniquement le poids du matériau lui-même), et le tassement initial, qui se produit immédiatement après le chargement du mur de bottes.

2.2.1 Création d'un local d'essais

2.2.1.1 Objectifs

Lors de travaux préalables effectués à l'IUT de Nîmes dans le cadre de projets de 2ème année, il avait été caractérisé le comportement en compression et le fluage de murs entiers. Les protocoles expérimentaux étaient intéressants mais nécessitaient des améliorations. Le but était de réaliser des essais de fluage sur des piles de bottes nues ou enduites sur plusieurs mois. Pour les expérimentations, nous nous sommes inspirés des travaux de Smith [SMIT2003]. Afin d'établir les protocoles expérimentaux, il était nécessaire de prendre en considération plusieurs questions provenant des analyses issues de la recherche bibliographique effectuée dans le chapitre précédent :

- Dimensions du prototype : l'échelle des essais a été déterminée en fonction des dimensions de la salle à disposition, soit 4,85 m par 4,62 m pour une hauteur de 3,10 m. Quelles sont les dimensions maximales en fonction du nombre de paramètres à caractériser ?
- Paramètres à étudier : quels paramètres doivent être privilégiés ? Combien peut-on en étudier ? Combien de prototypes doivent être conçus simultanément ?
- Système de précontrainte et de chargement : quelle méthode de précontrainte des bottes est la plus couramment utilisée pour les structures en paille porteuse ? Y a-t-il des améliorations possibles ? Comment les bottes doivent-elles être chargées ?

- Système d'instrumentation : peut-on adopter les méthodes déjà utilisées dans les travaux antérieurs? Existe-t-il des méthodes à la fois fiables et pratiques à mettre en place? En fonction de ce système, combien de prototypes peuvent être réalisés?
- Durée des essais : quelle doit être la durée minimale d'un essai pour permettre une caractérisation valide du comportement des prototypes?

En conséquence, deux séries d'essais de fluage ont été réalisées sur différentes configurations de bottes de paille chargées verticalement pendant respectivement 8 mois et 12 mois. La première série était composée de six piles de trois bottes de paille soumises à des charges et des taux de précompression différents. Une seconde série permet d'étudier l'influence de l'enduit et sa formulation sur la réponse au fluage : six piles ont été soumises au même chargement et à un taux de précompression similaire. Pour le chargement, une masse a été placée au sommet de chaque pile.

2.2.1.2 Contraintes

Afin de répondre aux conditions nécessaires pour réaliser des prises de vues optimales lors du traitement par corrélation d'images et pour des exigences de sécurité, les aménagements suivants ont été réalisés :

- Structure : le local, bien que temporaire, doit être suffisamment résistant pour supporter des charges, notamment une force maximale de 300 N exercée en s'appuyant sur les éléments verticaux. Bien que les éléments ne soient pas porteurs à proprement parler, ils ont été renforcés pour des raisons de sécurité en cas de basculement de la pile.
- Superficie : le local doit avoir une superficie minimale permettant d'accueillir au moins 6 bancs d'essai, avec suffisamment d'espace pour implanter des caméras à une distance de 3 à 4 mètres. Cette disposition est essentielle afin d'obtenir des prises de vues adéquates pour la corrélation d'images.
- Réseaux électriques : étant donné que l'instrumentation ne requiert pas une grande quantité d'énergie, l'installation d'un réseau électrique spécifique n'est pas nécessaire. Le local n'est pas destiné à être utilisé comme bureau, mais plutôt comme un abri pour les essais. Seul un câble d'alimentation est relié au secteur de la halle d'essais voisine.
- Éclairage : les ouvertures et puits de lumière du local doivent être obstrués afin d'éviter que ces sources lumineuses ne perturbent les prises de vues. Il est primordial que l'éclairage naturel n'atteigne pas un dixième de celui fourni par les spots lumineux qui éclairent la zone de prise de vue lors de chaque cliché afin de ne pas parasiter les images.
- Sécurité : étant donné que les bancs d'essai et les dispositifs d'instrumentation étaient présents sur place pendant plusieurs mois, des mesures de sécurité ont été prises pour prévenir tout risque de vol.
- Conditions météorologiques :
 - ◇ Le local est situé en hauteur, évitant ainsi l'accumulation d'eau de pluie.
 - ◇ En raison de son emplacement, le local peut être exposé à des contraintes dues au vent. En effet, un important couloir d'air se forme entre la halle d'essais et le local. En conséquence, la structure a été conçue pour résister à cette exposition.
- Accès : le local a été conçu pour permettre l'entrée et la circulation d'un transpalette manuel et d'un chariot élévateur. Le transpalette a été utilisé pour l'installation des éléments de support, tandis que le chariot élévateur a facilité la manutention des cuves de chargement sur les piles en paille porteuse. Par ailleurs, le portail du local a été conçu avec une hauteur suffisante pour permettre le passage en position basse du mât de levage du chariot, la hauteur maximale étant de 3,5 mètres.

2.2.1.3 Caractéristiques du local

2.2.1.3.1 Avant travaux

La prise de vues par corrélation d'images ne peut se faire que dans un environnement où l'éclairage est homogène et stable. Il a donc fallu aménager un abri pour le transformer en local fermé (Figure 3.9). Le matériel laissé en place nécessitait également de sécuriser les lieux ce qui a décalé temporellement le début des essais.

Le local de 4,85 m de longueur pour 4,62 m de largeur est un lieu de stockage ouvert. Un accès camion menant à la halle d'essais jouxte le local et il devait toujours être dégagé.

Des murs en maçonnerie de 2,18 m de haut encerclent le local. Ces murs combrent une partie des ouvertures formées par les portiques métalliques constituant l'ossature originelle de la structure. Les poteaux en acier ont été chemisés par du béton. Les pans latéraux présentent en partie haute une ouverture de 0,75 m pour la face avant et 1,15 m pour la face arrière. Ces ouvertures séparent le mur maçonné de la lisse de bardage métallique. La toiture est constituée de bacs métalliques avec un puits de lumière qui avait été réalisé en remplaçant une des tôles par un carré de 1 m de côté en plastique.



(a) Face avant du local

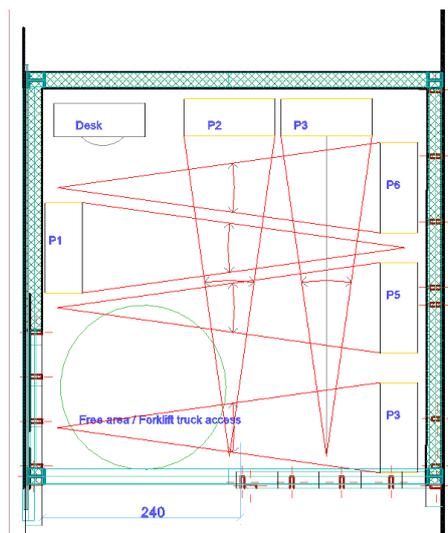


(b) Intérieur du local

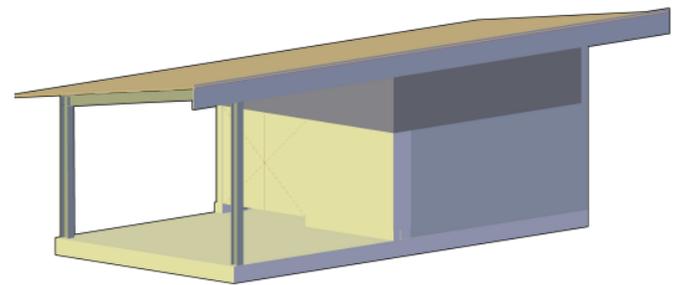
FIGURE 3.9. Photos de l'abri avant travaux

2.2.1.3.2 Après travaux

La façade avant du local est construite avec une ossature en bois qui atteint 2,20 m de hauteur et est ancrée dans une dalle en béton pour prévenir la capillarité (Figure 3.10a et Figure 3.10b). Elle est reliée par une poutre et comporte un portail en bois en ossature bois et panneaux OSB pour l'accès. La façade est également conçue pour être résistante à la pluie. Les autres façades sont similaires, utilisant des ossatures en bois et un pare-pluie.



(a) Vue en plan du local



(b) Vue 3D

FIGURE 3.10. Plans du local (Source : Conception par C.Hamelin et modifications par J.Lossignol)

À l'intérieur, un socle en béton restant a été converti en étagère de stockage. Divers autres aménagements incluent des étagères supplémentaires, un système d'éclairage et une source d'alimentation électrique reliée au bâtiment voisin.

2.2.2 Description des prototypes

2.2.2.1 Piles des bottes

Les bottes sont issues du lot 1 pour la série 1 et du lot 2 pour la série 2. Elles respectent les critères donnés par les préconisations des Règles Professionnelles de la Construction Paille Porteuse (2023) [RFCP2023]. Les piles faisaient 1,20 m de longueur pour 1,08 m de hauteur sans précompression. Le fluage des piles a été observé pendant plusieurs mois et divers paramètres ont été étudiés.

2.2.2.2 Précompression

L'effort de précompression des bottes est déterminé en fonction du taux de déformation que l'on souhaite



(a) Face avant du local



(b) Intérieur du local

FIGURE 3.11. Photos du local après travaux

imposer. Celui-ci est choisi arbitrairement mais d'après les retours d'expérience, il faudrait le faire varier entre 3 et 6 %.

Une réflexion a été menée autour du système de précompression temporaire :

- Solution 1 : des sangles à cliquet d'une résistance maximum de 5T par sangle
- Solution 2 : lors des travaux précédents, des câbles métalliques avaient été mis sous tension via des tireforts de la marque RIBITECH d'une capacité de 4T. Ce système avait été optimisé par un système de poulies.

Le nombre et le type de sangles ont une influence sur la précompression des piles. Il a été décidé d'opter pour deux sangles en raison de la longueur de la botte et de la hauteur de la pile qui ne permettait pas de tendre les tireforts jusqu'au niveau souhaité en raison de leur encombrement. Les sangles à cliquet avec mandrins de part et d'autre du mur permettait une meilleure maîtrise de l'introduction de la précontrainte. De plus la fixation et le retrait après précompression du système de poulies était trop laborieux pour pouvoir être mis en place.

Des sangles d'arrimage en polyester ont permis de maintenir l'effort après retrait des sangles à cliquet. Elles étaient serrées par une cerceuse et maintenues par une boucle en acier. Pour s'assurer de l'absence d'élongation des sangles sous l'effort de traction, des calculs préliminaires ont été réalisés en se basant sur les données catalogue.

2.2.2.3 Montage des prototypes

Les dimensions du local, notamment sa hauteur (3,10m au point bas) ne permettaient pas de faire des essais sur des murs à échelle 1 et de les charger. Il a fallu se limiter à des piles de 3 bottes (Figure 3.12).

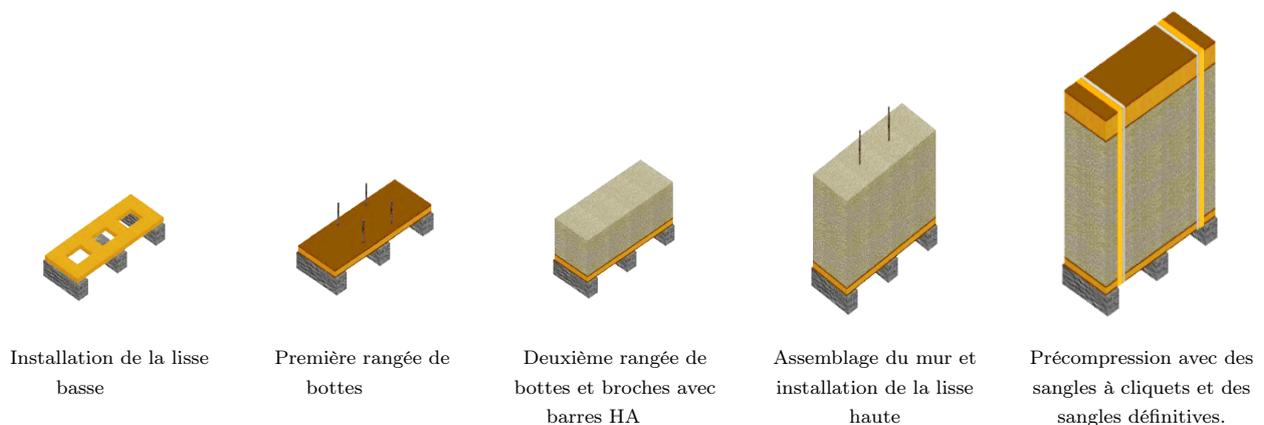


FIGURE 3.12. Montage d'une pile de bottes et précompression

Afin de faciliter la mise en œuvre et le chargement de ces piles dans le local, il a été décidé de réaliser 6 piles. Chaque batterie d'essai devait durer 4 mois minimum d'après ce qui avaient été observé par la FASBA lors des essais allemands en 2008. Ainsi la première série d'essais a duré 8 mois et la deuxième un an.

2.2.2.4 Chargement

2.2.2.4.1 Détermination du type de cuves de chargement

Les bacs de chargement, remplis de granulats, étaient en panneaux OSB, cerclés par des sangles textiles. Comme pour les murs, ces sangles en polyester étaient serrées par une cerceuse et maintenue par une boucle en acier (Figure 3.13).



FIGURE 3.13. Chargement des murs avec une cuve remplie de granulats

2.2.2.4.2 Calcul du chargement maximal

Dans un second temps, il a fallu calculer le chargement maximal à imposer aux piles afin d'en déduire un protocole de chargement en fonction des dimensions des cuves. Il fallait que la charge soit suffisante et répartie de manière homogène sur toute la surface supérieure de la pile. Il fallait donc des cuves suffisamment hautes pour contenir une masse de granulats importante. Il a été décidé pour des raisons pratiques de remplir les cuves avant qu'elles soient installées sur place.

La charge linéaire maximale supportée par une botte en compression est de 1,5T/ml. Les charges appliquées sont donc très éloignées de celles amenant à la rupture du matériau, mais elles sont bien supérieures à ce que des bottes supportent en construction, habituellement de l'ordre de 500 kg/m [NEBR2017].

2.2.2.5 Paramètres évalués

La première série d'essais devait permettre d'évaluer l'influence de la précompression qui, dans la pratique, est calculée à partir du taux de déformation du mur ou des bottes.

État initial après précompression \ Pile	1	2	3	4	5	6
Hauteur totale (cm)	133,70	136,00	136,10	135,85	135,98	136,28
Hauteur finale (cm)	126,38	129,50	128,00	131,25	128,90	128,90
Tassement total (cm)	7,32	6,50	8,10	4,60	7,07	7,38
Taux de précompression (%)	5,48	4,78	5,95	3,39	5,20	5,41

TABLE 3.3 – Mesures de tassement à l'état initial avec précompression – Première série

Il a été choisi d'avoir 4 piles avec un taux de déformation autour de 5 % (1, 2, 5 et 6), la pile 4 était moins précomprimée (3 %) et la pile 3 bien au-delà (~6 %).

La deuxième série permettait d'évaluer l'influence de la présence de l'enduit et de sa formulation ainsi que celle de l'incorporation de paille dans l'enduit. Les enduits utilisés étaient tendres : terre et sable, terre, sable et paille (Figure 3.14 et Tableau 3.4).



FIGURE 3.14. Prototypes de la série 2

Lors de la préparation des murs enduits testés au cisaillement, il avait été observé qu'il fallait 3 volumes de sable pour 1 volume d'argile. Souhaitant réduire l'utilisation de la quantité de sable afin de rester cohérent avec notre démarche écologique, il a été décidé d'utiliser 2,5 volumes de sable pour un volume d'argile.

État initial après précompression	Pile	1	2	3	4	5	6
Composition Terre/Sable/Paille (vol.)		2/5/0	2/5/0	2/5/1	2/5/1	2/5/0,5	2/5/0,5
Hauteur totale (cm)		133,35	135,03	135,35	133,65	135,00	134,68
Hauteur finale (cm)		128,58	127,98	128,30	127,65	128,25	128,60
Tassement total (cm)		4,78	7,05	7,05	6,00	6,75	6,07
Taux de déformation (%)		3,58	5,22	5,21	4,49	5,00	4,51

TABLE 3.4 – Mesures de tassement à l'état initial avec précompression – Deuxième série

Pour la première série, le chargement a été modifié sur les piles ayant une précontrainte du même ordre de grandeur (5%), avec une plage de variation allant de 447 kg à 855 kg.

État initial après précompression	Pile	1	2	3	4	5	6
Charge appliquée (kg)		706,5	723,5	717,5	730,5	447	855
Charge linéique (kg/m)		589	603	598	609	373	713
Contrainte totale (kPa)		12,80	13,11	13,00	13,23	8,10	15,49

TABLE 3.5 – Chargement à l'état initial pour la première série d'essais

Les piles de la deuxième série sont toutes soumises au même chargement à savoir 655 kg ce qui correspond à 11,9 kPa.

2.2.3 Instrumentation

L'essai de fluage requiert d'obtenir les valeurs de l'effort de précompression appliquées par les sangles, de la contrainte imposée par la cuve de chargement et également le tassement de la pile de bottes. Pour les déplacements, c'est la corrélation d'images qui a été choisie.

La corrélation d'images permet de mesurer le champ de déplacement d'une surface donnée à partir d'une image déformée comparativement à une image de référence. Les différences entre l'image de référence et l'image déformée sont supposées provenir seulement du champ de déplacement de la structure observée.

2.2.3.1 Mesure de la précompression et du chargement

La charge appliquée aux sangles/câbles de précompression est mesurée grâce à des dynamomètres Adam LHS 1500 (Figure 3.15). Le tassement est comparé aux valeurs obtenues sur les essais de bottes isolées.



FIGURE 3.15. Préchargement des murs avec des sangles à cliquet

La contrainte de compression amenée par la charge est simplement calculée en divisant la masse des granulats des cuves de chargement pesée sur une balance par la surface du fond de la cuve, de même dimension que la lisse haute, elle-même dimensionnée par rapport à la taille des bottes.

2.2.3.2 Mesure du fluage

Pour pouvoir suivre l'évolution du fluage sur plusieurs mois, il a été décidé d'utiliser la corrélation d'images, avec un enregistrement régulier de la géométrie.

2.2.3.2.1 Principe de la corrélation d'images

La corrélation d'images est une technique de traitement d'images qui mesure la similitude entre deux régions d'images en déplaçant une cible et en calculant la corrélation croisée entre les pixels (tracking). Les pics de corrélation indiquent les positions les plus similaires. Cela permet de mesurer les déformations à champ complet et non intrusive sur des systèmes plans, en utilisant l'appariement de motifs, la cartographie photométrique et l'interpolation à l'aide de fonctions de forme. Pour cela, un programme en Python a été réalisé.

La corrélation suit les déplacements de 12 cibles sur une pile de 3 bottes de paille, en évaluant comment leurs positions évoluent au fil des images :

- Acquisition des images et étalonnage : les images sont capturées à différents niveaux de fluage de la pile de bottes. L'étalonnage est effectué pour convertir les pixels des images en unités métriques en utilisant une image de référence qui est la première image de l'essai. Deux points dont la distance réelle est connue sont sélectionnés pour effectuer cette conversion. Cette distance de référence était la longueur de la lisse.
- Sélection des cibles : les positions des 12 cibles sont sélectionnées sur la première image en sélectionnant les régions autour des cibles qui étaient des images mouchetées collées sur les lisses (0 à 2 pour les lisses hautes et 7 à 9 pour les lisses basses) et sur les sangles (3 et 4 pour la sangle gauche et 5 et 6 pour la sangle droite). Des cibles ont également été sélectionnées au milieu des bottes des 3 bottes (10 à 12) (Figure 3.16).

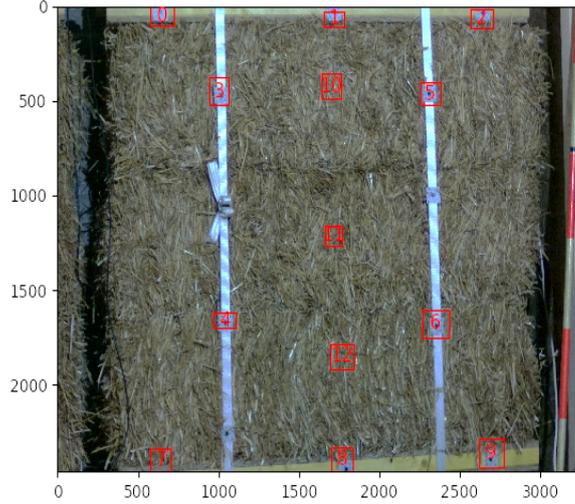


FIGURE 3.16. Sélection des cibles

- Suivi des cibles : à chaque étape du fluage, la région carrée autour de chaque cible est extraite de l'image. Le déplacement de cette région d'une étape à l'autre, correspondant au déplacement de chaque cible, est suivi à l'aide de l'algorithme de corrélation d'images (Figure 3.17).

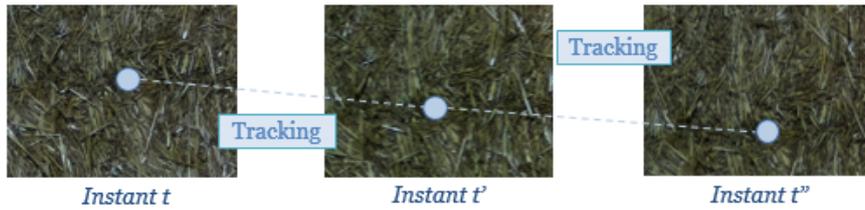


FIGURE 3.17. Principe de la corrélation d'images

- Calcul des tenseurs de déformation : à partir des déplacements des cibles, les tenseurs de déformation de Cauchy-Green et leurs invariants sont calculés pour déterminer comment les bottes de paille se déforment. Les matrices des tenseurs de déformation de Cauchy-Green (symétriques) pour chaque cible sont définies comme suit :

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

où E_{ij} est un élément du tenseur de déformation, u_i est le déplacement dans la direction i , x_j est la coordonnée dans la direction j .

2.2.3.2.2 Système d'acquisition des données

Le dispositif d'essai suit le processus d'acquisition décrit dans la Figure 3.18.

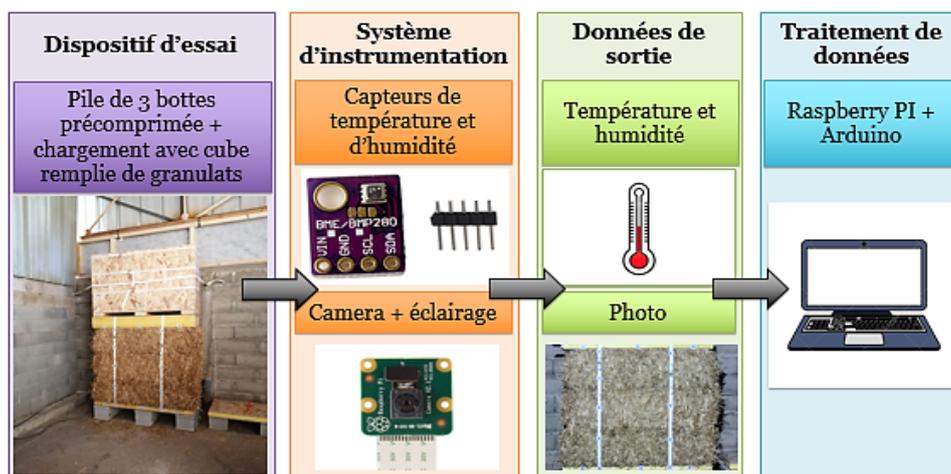


FIGURE 3.18. Diagramme du processus d'acquisition

Le dispositif d'essai utilise un Raspberry Pi (modèle 2 ou 3B selon les piles) pour coordonner la capture d'image avec la caméra et un Arduino Mega 2560 R3 pour collecter les données d'humidité et de température via des capteurs barométriques BME280.

Des spots LED de 20 W éclairant la zone de prise de vue sont pilotés par un module relais DC 5V à 2 canaux afin d'être synchronisés avec le déclenchement de la caméra Raspberry Pi appelée aussi PiCaméra.

Cette caméra HD offre un seul canal pour une résolution de 8 Mégapixels et peut capturer jusqu'à 30 images par seconde. Pour obtenir des images de qualité, un téléobjectif grand angle RPI-16MM-LENS de 50x39mm (HxDia.) a été ajouté. La distance focale de 16 mm possède une résolution de 10 Mégapixels pour une ouverture classée F1. 4-16. Une carte SD de 32Go est intégrée dans le boîtier Raspberry Pi pour sauvegarder les données.

Le dispositif implique ainsi plusieurs composants interconnectés pour l'acquisition de données et la capture d'images, chacun jouant un rôle spécifique :

- Raspberry Pi et caméra : le Raspberry Pi joue un rôle central en orchestrant les opérations. Il communique avec la caméra PiCamera, configurant les paramètres de capture et lançant le processus de photographie (Figure 3.19a).
- Capteurs : Dans un premier temps, des capteurs de pression résistifs plats (4 x 4 cm) avaient été insérés entre chaque rangées de bottes mais les résultats étant trop peu satisfaisants, cette solution a été abandonnée (Figure 3.19b). Des capteurs barométriques BME280 collectent les mesures d'humidité et de température. Ils sont insérés entre deux bottes pour chaque pile une fois que celle-ci a été précomprimée (Figure 3.19c).
- Gestion des données : le circuit Arduino fonctionne comme un nœud d'acquisition de données. Les données d'humidité et de température sont recueillies à partir de l'Arduino et stockées dans un fichier texte sur le Raspberry Pi. Le système décide du déclenchement de la capture d'image et des mesures en fonction des conditions prédéfinies, à savoir toutes les heures (Figure 3.19d).
- Capture d'image et traitement : lorsque les conditions sont remplies, le Raspberry Pi commande la caméra PiCamera pour capturer une image. Le circuit Arduino contrôle également un spot d'éclairage LED 20 W, qui s'allume pendant 10 secondes lors de la capture d'image (Figure 3.19e). Il est également possible de déclencher une capture d'image en appuyant sur un bouton directement fixé sur le circuit.
- Enregistrement des données : le Raspberry Pi enregistre les mesures d'humidité et de température ainsi que les captures d'image. Ces données sont horodatées et les numéros d'image sont enregistrés dans un fichier texte sur une carte SD.



(a) Boîtiers Raspberry Pi (2 ou 3B) et modules de relais 5V fixés sur le couvercle supérieur, caméras et téléobjectifs de 16 mm fixés sur leurs supports métalliques



(b) Capteurs de pression plats stabilisés sous les ficelles



(c) Capteurs d'humidité et de température insérés entre deux bottes



(d) Circuit Arduino Mega 2560 R3



(e) Spot d'éclairage LED 20 W

FIGURE 3.19. Système d'acquisition de données

2.3 Cisaillement

Dans le cadre de nos recherches sur la résistance au cisaillement des murs en bottes de paille, nous avons entrepris une série d'essais visant à caractériser la contribution de l'enduit. La présente partie détaille la méthodologie d'essai, les configurations de murs et les différentes formulations d'enduits.

2.3.1 Description

Quatre murs de 2,40 m de long pour 1,80 m de haut, constitués de petites bottes (46 x 37 x 120 cm) issues du lot 2, ont été testés au cisaillement dont 3 enduits et un nu. Dix bottes ont été empilées en quinconce sur 5 rangées. Les bottes ont été précomprimées entre deux lisses en bois via des sangles en polyester (Annexe A). Les bottes de 26 kg avaient une masse volumique sur base humide de 146 kg/m^3 soit 130 kg/m^3 sur base sèche avec un taux d'humidité de 11 %. Les bottes étaient donc particulièrement comprimées puisque généralement, ce sont des bottes de 110 kg/m^3 que l'on trouve sur le marché.

Le mur était appuyé contre un banc d'essai de géotechnique possédant un massif en béton rigide (Figure 3.20). Une plaque OSB sur laquelle étaient fixées deux rails de poulies accueillait les câbles. Les tireforts qui tendaient les câbles ont été accrochées directement aux dynamomètres.



FIGURE 3.20. Banc d'essai

D'après de précédents travaux menés et les retours d'expériences rapportés, il a été établi que les enduits et certains renforts contreventaient et rigidifiaient les assemblages de bottes (cf. Chapitre 2). Il est prévu d'enduire certaines piles avec des enduits plus ou moins tendres. Les formulations seront différentes afin de caractériser la contribution de certains composants.

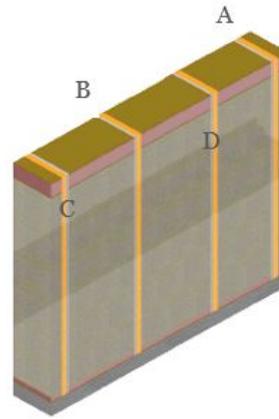
Trois murs ont été enduits. Dans un premier temps, une barbotine très liquide de 1 cm d'épaisseur constituait la couche d'accroche avant de recevoir a fresco¹ l'enduit de corps. Les enduits utilisés étaient semi-durs (argile, sable et chaux) pour les murs 1 et 2 et tendres (sable et argile) pour le mur 3 (Tableau 3.6). L'argile a été fourni par la société Alliance 4. L'argile jaune 0-4 mm était pur. Dans un premier temps, il avait été choisi de prendre un volume de sable contre trois d'argile mais l'enduit n'a pas tenu. La pureté de l'argile a conduit ainsi à reconsidérer la formulation et à choisir trois volumes de sable pour un d'argile.

Les enduits de corps présentaient des dosages différents en chaux et en paille dont la longueur des brins variait entre 4 et 12 cm.

1. Cela fait référence à l'application d'un enduit sur un support encore humide. Cette technique permet une meilleure adhérence et une durabilité accrue.



(a) Insertion des dynamomètres et précompression



(b) Ordre de roulement de précompression en allant de A à D

FIGURE 3.21. Précompression des murs

N°mur	Chaux (vol.)	Sable (vol.)	Argile (vol.)	Paille 4-10 mm (vol.)	Commentaires
1	1	1	3	0	Enduit collant chargé en eau qui n'a pas tenu. L'enduit a complètement fissuré. L'enduit a été retiré puis refait (mur 1bis)
1bis	1	3	1	1	Facile à appliquer – séchage rapide (3-4 jours)
2	0	3	1	2	Enduit collant chargé en eau – séchage lent (2-3 semaines)
3	1	3	1	2	Facile à appliquer – séchage rapide (3-4 jours)

TABLE 3.6 – Formulation des enduits de corps pour chaque mur

Il n'y a volontairement pas eu de couche de finition afin de caractériser mécaniquement la contribution dans la résistance au cisaillement des enduits en fonction de leur composition. Les fissures formées suite au séchage de la couche d'enduit ont été comblées avec une barbotine.

2.3.2 Préparation des essais

2.3.2.1 Montage des murs

Les bottes ont été préparées selon les préconisations et les techniques développées au Chapitre 1. Deux dynamomètres par face ont été intégrés entre les sangles (Figure 3.21a). Les valeurs de précompression en Newton permettaient de remonter au taux de déformation recherché. Les sangles ont été tendues en respectant un ordre de roulement donné dans la Figure 3.21b.

Il a été décidé d'opter pour cinq sangles en polyester permettant de reprendre de façon régulière la précompression des sangles à cliquets (Figure 3.22). Elles ont été tendues à l'aide d'une cerceuse et les boucles en acier ont été resserrées dans un étau au préalable afin d'éviter tout glissement et relâchement. Ces sangles dites définitives ont été par la suite noyées dans l'enduit.



FIGURE 3.22. Précompression des murs avec sangles définitives

Les taux de déformation ainsi que les valeurs de précompression correspondantes ont été résumés dans le Tableau 3.7.

Mur	1	2	3	4
Hauteur totale (cm)	180,75	180,50	183,50	181,85
Hauteur finale (cm)	168,65	170,50	172,25	171,78
Tassement total (cm)	12,10	10,00	11,25	10,08
Tassement par botte (cm)	2,42	2,00	2,25	2,02
Taux de déformation (%)	6,69	5,54	6,13	5,54

TABLE 3.7 – Synthèse des déformations verticales des murs et des charges de précompression correspondantes

2.3.2.2 Pose de l'enduit

Pour rappel, trois enduits sont nécessaires pour obtenir une épaisseur finale d'enduit qui permette un bon fonctionnement mécanique et un aspect esthétique correct :

- Couche d'accroche de 5 – 10 mm
- Enduit de corps de 25 mm
- Enduit de finition

Seules les couches d'accroche et la couche d'enduit de corps ont été appliquées afin de caractériser spécifiquement leur contribution mécanique indépendamment de celle de la couche de finition. Afin que l'enduit adhère mieux à la paille, les bottes ont été préalablement surfacées à l'aide d'un taille-haie. Des tasseaux servaient de guide pour indiquer l'épaisseur d'enduit à appliquer. Les couches d'enduit étaient composées comme ceci :

- La première couche appelée couche d'accroche de moins de 1 cm permettait de combler les espaces entre les bottes et d'enrober la paille afin qu'elle accroche bien l'enduit de corps (Figure 3.23a). La formulation de la première couche est un mélange de terre argileuse et d'eau (un volume d'eau pour deux volumes d'argile).
- L'enduit de corps a été directement appliquée après la pose de la couche d'accroche. Dans le cadre de ces essais, 3 compositions différentes ont été formulées. La formulation du premier mur était à revoir car la grande argilosité de la terre impliquait un plus fort dosage en sable et la présence de paille s'est révélée indispensable afin de limiter la fissuration. L'enduit était trop chargé en liant (eau + argile). L'enduit a été retiré et refait. Il a été décidé pour les murs suivants d'augmenter le volume en sable et donc en granulats.

Les fissures formées à la suite du séchage de la première couche d'enduit ont été comblées avec un enduit de même composition en rouvrant la fissure d'environ 1 cm pour une meilleure pénétration de l'enduit de rebouchage

(Figure 3.23b). Une fois la fissure rebouchée un joint d'enduit est posé par-dessus, de la même manière qu'un joint de plaque de plâtre. Enfin, une dernière couche d'enduit de corps a été appliquée avant d'être arasée à la règle (Figure 3.23c et Figure 3.23d).



(a) Couche d'accroche



(b) Fissures rebouchées



(c) Mise en œuvre du corps d'enduit



(d) Mur enduit

FIGURE 3.23. Application de l'enduit sur les murs à l'échelle 1

2.3.3 Instrumentation

Afin de relever les efforts appliqués et les déplacements générés sur les murs, des systèmes de mesure ont été mis en place :

- Système de mesure de l'effort : Des dynamomètres étaient fixés à des tiges filetées insérées dans le banc d'essai et étaient maintenues latéralement par des couronnes de banchage. Ils permettaient de mesurer l'effort de cisaillement appliqué (Figure 3.24).



FIGURE 3.24. Mesure de l'effort par dynamomètres

— Système de mesure du déplacement :

- ◇ Des lasers posés sur des supports fixes étaient orientés de manière à pointer sur l'un des pans du mur. A différents paliers de chargement, des marques étaient dessinées directement sur l'enduit à trois endroits (A, B et C) comme indiqué sur la Figure 3.25. A la fin de l'essai, les écarts entre les points étaient mesurés au mètre-ruban.



FIGURE 3.25. Localisation des points de mesure de déformation du mur

- ◇ Enregistrement vidéo : Enfin, un smartphone enregistrerait la vidéo de l'essai sur le pan opposé afin de visualiser le déplacement des murs 1, 2 et 3 dans leur intégralité ainsi que la propagation des fissures. Le 4^{ème} mur a été filmé par une caméra.

3. Résultats et analyse

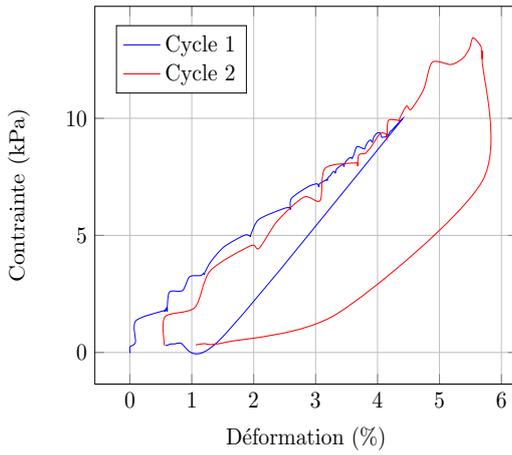
Cette partie présente les résultats des tests effectués ainsi qu'une analyse approfondie de ces données. Comme défini dans les protocoles présentés, nous nous penchons sur trois aspects clés : la compression, le fluage et le cisaillement. Chaque sous-section examine en détail les résultats obtenus, mettant en évidence les performances des matériaux et des structures dans différentes situations. Les discussions qui suivent fournissent des éclaircissements sur les comportements observés, les forces en jeu et les limites constatées pendant les expériences. Cette évaluation méthodique offre un aperçu des réactions structurelles, contribuant ainsi à une compréhension globale des systèmes étudiés.

3.1 Compression

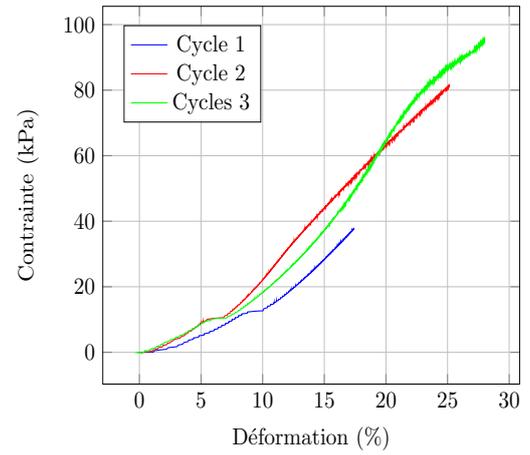
Les essais premiers pratiqués sur les bottes et les éprouvettes d'enduit mettent en évidence leur comportement face à la compression. Les données présentées dans les tableaux sont examinées pour en extraire des informations sur la résistance des matériaux. Ces analyses fournissent des aperçus précieux sur la capacité de charge, la déformation et d'autres aspects clés.

3.1.1 Bottes

Les bottes issues des lots 1 (L1) et 2 (L2) ont été soumises à des cycles de compression pour évaluer leur comportement sous des charges variables. Les données recueillies lors de ces essais sont examinées afin de dégager des tendances et des caractéristiques clés. Cette analyse permet de mieux comprendre la résistance et la déformation des bottes de paille (B1 à B4) en fonction de l'orientation, à savoir à plat (P) ou sur chant (C), ainsi que leur réaction aux contraintes appliquées. Les bottes du lot 1 ont été soumises à deux séries d'essais cycliques (a et b). Les deux lots n'ont pas été testés avec la même presse (Figure 3.2 et Figure 3.3). L'ensemble des résultats a été répertorié dans le Tableau 3.8.



(a) Diagramme contrainte-déformation de la botte 1 du lot 1 posée à plat



(b) Diagramme contrainte-déformation de la botte 1 du lot 2 posée à plat

FIGURE 3.26. Comparaison des diagrammes contrainte-déformation

Botte	Cycle 1		Cycle 2		Cycle 3		Masse volumique (kg/m ³)
	E(MPa)	R ²	E(MPa)	R ²	E(MPa)	R ²	
L1B1Pa	0,121	0,993	0,245	0,984	-	-	114,77
L1B1Pb	0,238	0,981	0,231	0,975	-	-	
L1B2Pa	0,170	0,978	0,271	0,985	-	-	120,45
L1B2Pb	0,258	0,991	0,317	0,984	-	-	
L2B1P	0,236	0,957	0,361	0,986	0,393	0,958	127,93
L2B2P	0,245	0,962	0,360	0,956	0,431	0,981	127,64
L2B3P	0,223	0,906	0,458	0,949	0,527	0,991	146,79
L2B4P	0,247	0,961	0,305	0,904	0,315	0,956	130,63
Moyenne	0,238	-	0,371	-	0,416	-	
L2B1C	0,239	0,991	0,345	0,981	0,374	0,969	156,15
L2B2C	0,282	0,984	0,388	0,981	0,390	0,982	142,71
L2B3C	0,288	0,973	0,410	0,985	0,475	0,976	156,80
Moyenne	0,270	-	0,381	-	0,413	-	

TABLE 3.8 – Module d'élasticité (E) des bottes des lots 1 et 2 sous essais cycliques

L'essai 1 du cycle 1 pour les bottes 1 et 2 (L1B1Pa et L1B2Pb) montre un module d'Young faible, avec une valeur moyenne de 0,145 MPa probablement due à des masses volumiques assez faibles en comparaison avec celles du lot 2. A mesure que les essais sont répétés, le module d'Young augmente. Les brins s'enchevêtrent, la botte se compacte et donc se rigidifie.

Les bottes disposées à plat du lot 2 montrent des modules d'Young(E) différentes du lot 1. Les cycles 2 et 3 présentent des modules d'Young plus élevées par rapport au premier cycle, avec des valeurs moyennes de 0,371 MPa et 0,416 MPa respectivement contre 0,238 MPa. Issues de ce même lot, sont listés les résultats des essais sur bottes à chant. Les bottes à chant du lot 2 révèlent également des différences dans l'élasticité (E) en fonction des essais cycliques. Les essais 1, 2 et 3 montrent des valeurs moyennes de rigidité de 0,270 MPa, 0,381 MPa et 0,413 MPa respectivement.

Dans les Figure 3.27a et Figure 3.27b est représentée l'évolution du module d'Young actualisé en fonction de la masse volumique pendant les cycles de compression.

On remarque que le module d'Young augmente à mesure des cycles traduisant une rigidification des bottes. L'ensemble de cette analyse permet de dégager des tendances significatives dans le comportement des bottes de

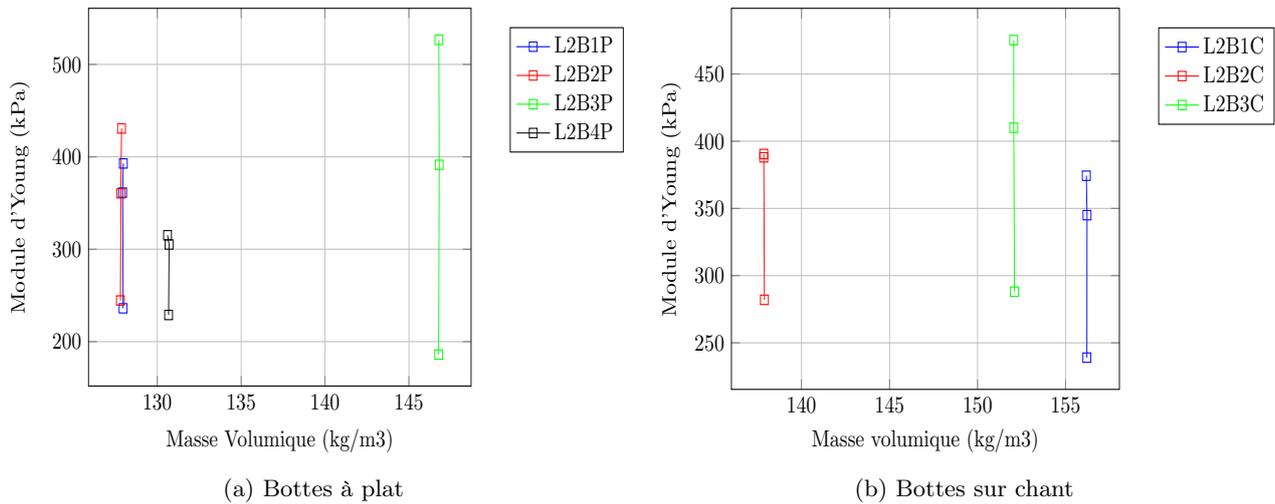


FIGURE 3.27. Evolution du module d'Young actualisé en fonction de la masse volumique pendant les cycles de compression

paille soumises à des charges cycliques mais ne permet pas d'établir très clairement si l'orientation des bottes joue un rôle.

Comme il avait été constaté dans l'état de l'art, le module d'Young augmente en fonction de la densité de la botte. En prenant comme éléments de comparaison le cycle 2 pour que les bottes aient subi au préalable une sorte de « conditionnement », on arrive à une relation quasi linéaire sur la plage testée (Figure 3.28).

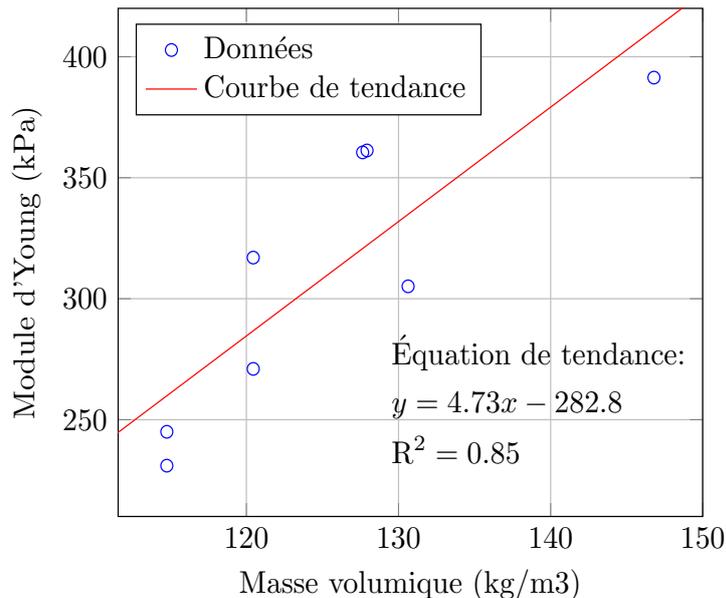


FIGURE 3.28. Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat lors du cycle 2

Les bottes doivent répondre à certains critères donnés par le RFCP dans les recommandations professionnelles [RFCP2012]. Leur teneur en eau doit être inférieure à 20%. Lors des essais, il était même inférieur à 10 % mais l'humidimètre ne donne pas plus de précision. Il est donc difficile de produire une loi de comportement sur la compression de la botte en fonction de la teneur en eau.

Les essais de compression sur bottes ont permis également de fournir un coefficient de Poisson moyen de 0,376 ce qui est assez cohérent avec les travaux de recherche précédents qui affichent des valeurs comprises entre 0,28 et 0,44.

Lors des essais cycliques de compression sur bottes seules, la figure Figure 3.27a de la section précédente permettait de constater que le module d'Young augmentait à mesure des cycles traduisant une rigidification des bottes. Dans la Figure 3.29 est représentée l'évolution du module d'Young en fonction de la masse volumique à partir des résultats issus des travaux de recherche répertoriés dans l'état de l'art du Chapitre 2. Les résultats

des essais effectués durant ma thèse et ceux effectués par des étudiants à l'IUT durant des projets ont été rajoutés. Dans notre cas, il a été décidé de se focaliser sur le cycle 2 car pendant le cycle 1, les brins de paille se réarrangent dans la botte et les essais de compression donnent un module d'Young un peu faible.

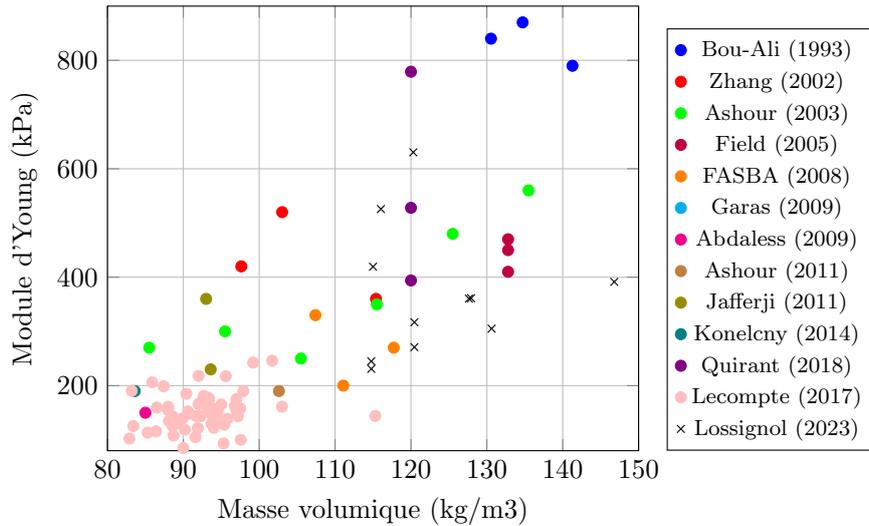


FIGURE 3.29. Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat

L'équation exponentielle régissant le comportement des bottes à plat serait la suivante :

$$E = 0.0288e^{0.02\rho}, \quad R^2 = 0.62 \quad (3.1)$$

Cependant, comme il a été expliqué dans la section 2, il a été décidé de ne se fier qu'à nos propres essais dont les résultats ont été regroupés dans la Figure 3.30.

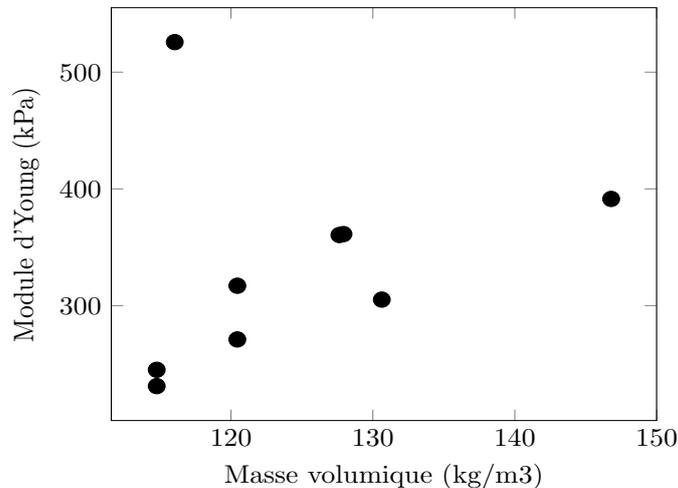


FIGURE 3.30. Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat

La corrélation entre le module d'Young et la masse volumique donne ainsi :

$$E = 0.0047\rho - 0.2828, \quad R^2 = 0.72 \quad (3.2)$$

Comme en avaient conclu les chercheurs dans leurs travaux, le module d'Young est proportionnel à la masse volumique. De là, l'enjeu est de déterminer à partir de quelle masse volumique on peut considérer que la botte a une rigidité admissible en paille porteuse. Si on se base sur un module d'Young de 300 kPa, on considère une première marge de sécurité avant la mise en précompression par les sangles. Cela reviendrait à choisir des bottes de 115 kg/m³ d'après l'Équation 3.1 et de 122 kg/m³ d'après l'Équation 3.2. Une botte atteignant 120 kg/m³ semble être un bon compromis.

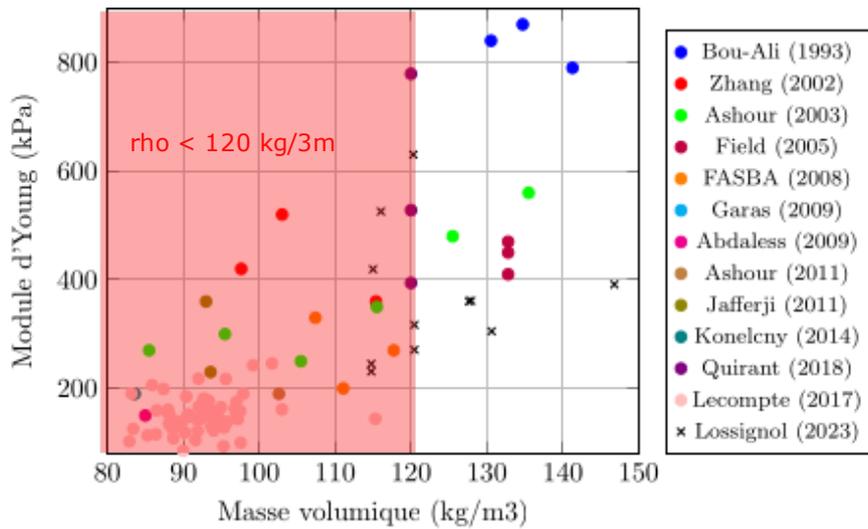


FIGURE 3.31. Evolution du module d'Young en fonction de la masse volumique pour les bottes à plat

Ainsi, il faudrait demander en amont aux agriculteurs de tendre les ficelles de façon à obtenir un minimum de 120 kg/m^3 par botte car en dessous de cette valeur, la rigidité serait trop faible pour répondre aux exigences sécuritaires. Si les bottes n'étaient éventuellement pas assez denses, plusieurs solutions seraient à envisager pour atteindre une :

- Tendre de manière plus importante les sangles lors de la précompression. Dans la pratique, cela peut être difficile pour les personnes agissant sur les mandrins des sangles à cliquet, et peut amener à multiplier les sangles de maintien définitive.
- Recomprimer les bottes mais ça demanderait d'avoir une presse ou d'en fabriquer une.

La technique Nebraska étant beaucoup utilisée en autoconstruction, la philosophie de ce procédé constructif est de le rendre accessible à un plus grand nombre avec une bonne condition physique, indépendamment de l'âge et du sexe des utilisateurs. Il faut donc simplifier au maximum sa mise en œuvre, sans étape supplémentaire. C'est le sens des Règles Professionnelles en cours de validation, pour un mode constructif écologique, économique, facile et rapide à mettre en œuvre.

3.1.2 Enduit

Dans le Tableau 3.9 et la Figure 3.32 sont répertoriés les essais de compression à la rupture sur des éprouvettes d'enduit 4 x 4 x 16 cm de compositions différentes. Le volume de référence est un b cher d'un litre.

Composition	N� essai	Terre (vol.)	Sable (vol.)	Paille (vol.)	Charge ultime (kN)	Contrainte (MPa)
1 - Terre	E10	2,5	0	0	1,89	1,07
2 - Terre + Paille	E21	0,75	0	1/5	2,33	1,33
	E22	0,75	0	1/3	4,50	2,56
	E23	0,75	0	1/2	4,17	2,37
Moyenne					3,67	2,08
3 - Terre + Sable	E31	1,25	1	0	2,33	1,33
	E32	0,5	1	0	1,67	0,95
	E33	0,5	3/2	0	2,25	1,28
Moyenne					2,08	1,18
4 - Terre + Paille + Sable	E41	0,5	0,5	1/5	4,08	2,32
	E42	1	1	1/3	5,17	2,94
	E43	1	1	1/2	4,17	2,37
	E44	1	2	1/5	4,67	2,65
	E45	1	2	1/3	5,00	2,84
	E46	1	2	1/2	4,58	2,60
	E47	1	3	1/5	3,67	2,08
	E48	1	3	1/3	4,67	2,65
	E49	1	3	1/2	5,83	3,31
Moyenne					4,65	2,64

TABLE 3.9 – Résultats des essais de compression sur éprouvette 4x4x16 jusqu' la rupture

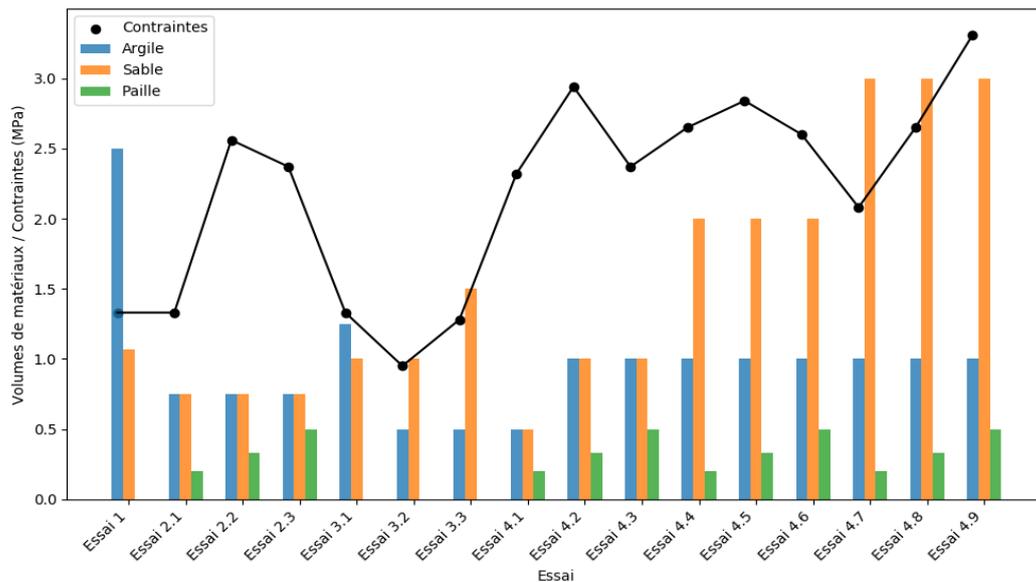


FIGURE 3.32. Résultats des essais de compression sur éprouvette 4x4x16 jusqu' la rupture

Voici ce qu'on peut constater :

- Terre Seule : L'échantillon de référence est dur et compact avec une résistance de 1,07 MPa.
- Terre + Paille : L'ajout de paille à la terre semble augmenter considérablement la résistance. La progression de la quantité de paille de 1/5 à 1/2 conduit à une augmentation de la résistance de 1,33 MPa à 2,37 MPa.
- Terre + Sable : L'ajout de sable augmente la résistance, mais les résultats ne montrent pas une tendance claire en fonction de la quantité de sable.
- Terre + Paille + Sable : Cette combinaison offre une excellente performance en termes de résistance. La présence de paille et de sable semble influencer la résistance d'une manière significative avec l'échantillon E49 ayant la contrainte la plus élevée de 3,31 MPa.

Les essais sur enduit montrent que pour de l'argile pur, il faut au moins 2 volumes de sable pour un volume d'argile. Cependant, ce n'est pas suffisant puisque sans brin de paille, l'enduit présente une résistance à la compression relativement faible.

Pour permettre un bon transfert de contraintes à travers les fissures, il est crucial que le dosage en paille soit suffisant pour assurer une adhérence solide avec la matrice. La combinaison des matériaux a une influence significative sur la résistance de l'enduit. La paille semble renforcer l'enduit en réduisant la sensibilité à la fissuration du mortier.

Il faudra faire attention à ne pas ajouter trop de paille car cela aura l'effet inverse de celui souhaité. On constate que l'incorporation d'une trop grande quantité de brins de paille a un impact négatif sur la maniabilité des mortiers. De plus, trop de brins créent des fragilités dans l'enduit car ils créent de la porosité après retrait. Cela est lié à l'absorption et au relargage d'eau par les brins. On a constaté un dosage optimal de paille de 1/3 de volume.

Il faut veiller à ce que la pose de l'enduit ne se fasse pas à une phase de fluage excessif car ça poserait des problèmes d'adhérence entre l'enduit et les bottes de paille.

3.2 Fluage

Pour chaque série, six piles de 3 bottes ont été précomprimées selon la méthode Nebraska et chargées par des cuves remplies de granulats. Les piles étaient à l'abri du vent et de la pluie dans un local fermé. Leur fluage a été observé durant de longs mois grâce à la corrélation d'images qui nécessitaient également un éclairage homogène et continu durant toute la durée des essais.

3.2.1 Série 1

La série 1 a été lancée le 9 juin 2021 et a duré 8 mois. Le but de cette série était d'évaluer l'influence du taux de précompression et du chargement. Les caractéristiques de ces essais ont été explicités au paragraphe Description de la subsection 2.2 Fluage de la section 2 Protocoles expérimentaux.

3.2.1.1 Evolution du fluage

3.2.1.1.1 Analyse des données traitées par corrélation d'images

Grâce aux images prises par la PiCaméra et sauvegardées dans le Raspberry Pi, un programme de corrélation d'images en Python a permis de connaître l'évolution du fluage pour les 12 cibles durant toute la durée de l'essai. Une calibration des images a été réalisée afin de prendre en compte l'angle entre la caméra et le centre de la pile mais la distorsion était tellement faible que cela n'avait pas réellement d'influence.

Si des coupures de courant ont eu lieu et ont perturbé l'essai, il a été possible de combiner les données pour pouvoir tracer des graphes sans rupture due aux coupures de courant et en superposant les données de température et d'humidité (Figure 3.33 et Figure 3.34).

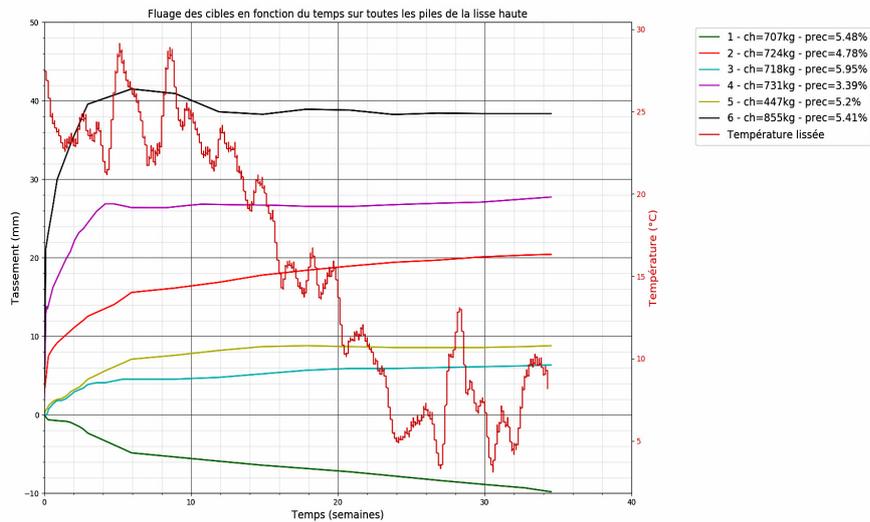


FIGURE 3.33. Evolution du fluage sur les 6 piles et de la température moyenne dans le local

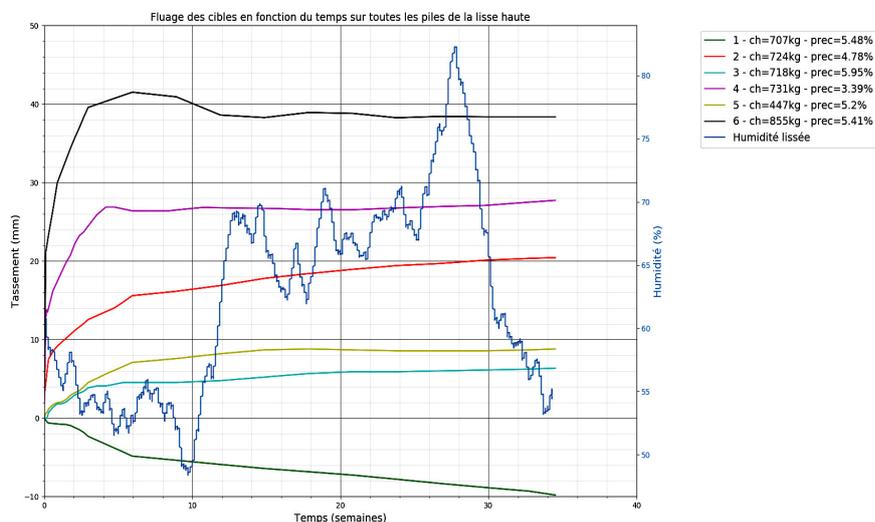


FIGURE 3.34. Evolution du fluage sur les 6 piles et du taux d'humidité moyen dans le local

On constate que le fluage s'effectue en 3 temps :

- Tassement initial mesuré juste après l'application du chargement : on a l'impression que les données ne démarrent pas à 0 mais en fait un tassement instantané assez important a lieu durant les 2-3 premiers jours. La différence observée entre les piles lors de cette phase peut s'expliquer par la différence de taux de précompression et la valeur de chargement.
- Fluage précoce : un fluage rapide s'est manifesté, notamment lors des 3 à 4 premières semaines, particulièrement sous les charges les plus élevées. Les données indiquent que des piles comme la pile 6 ont subi des déformations importantes dès le début, atteignant environ 40 mm, lors de cette phase.
- Chute du fluage : les fortes chaleurs de l'été ont contribué une baisse drastique du taux d'humidité faisant chuter la progression du fluage.
- Reprise du fluage : durant l'automne et l'hiver, l'air s'est bien chargé en eau provoquant ainsi une absorption d'eau par les granulats contenus dans la cuve.
- Fluage ralenti : après cette phase, une majorité des piles ont continué à se tasser pendant les 15 semaines suivantes.
- Stabilisation : au bout de la trentième semaine, la plupart des piles semblaient stables et n'ont plus montré de déformations de fluage notables. Cependant, la pile 6 a continué à se tasser durant toute la période d'observation ce qui s'explique par un chargement très élevé.

On observe que toutes les lisses hautes des piles ont subi du basculement (rotation autour de l'axe y sur la Figure 3.35 notamment les piles 1, 3 et surtout 6 (Figure 3.36). Cela témoigne d'un défaut de planéité lors de la mise en œuvre.

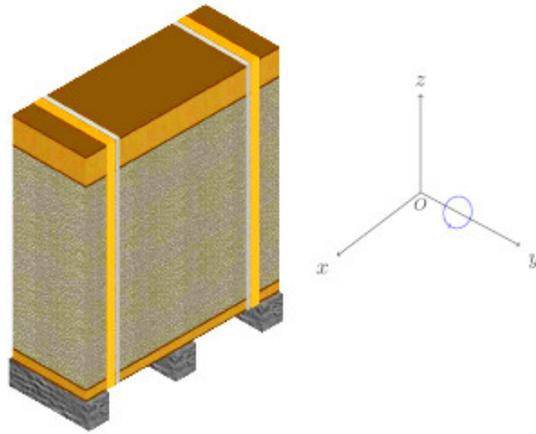


FIGURE 3.35. Basculement de la lisse haute (rotation autour de l'axe y)

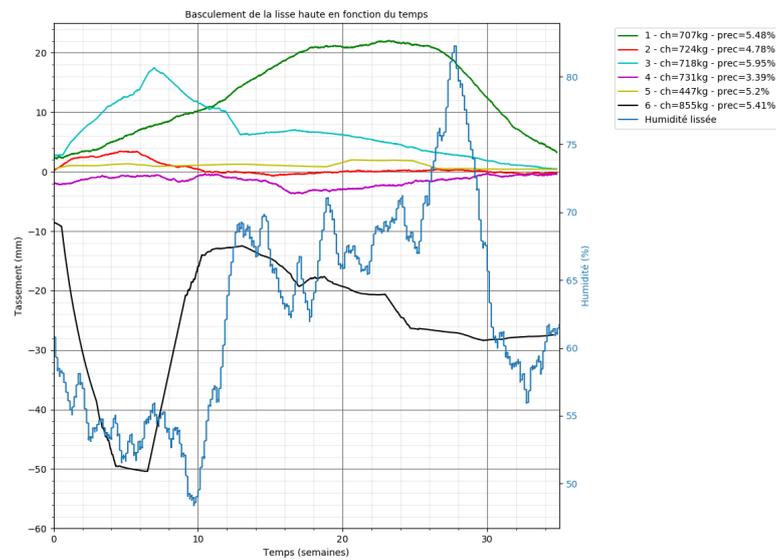


FIGURE 3.36. Basculement de la lisse haute pour les piles de 1 à 6

On remarque que les sangles des piles 2, 3 et 5 se sont peu relâchées (Figure 3.37 et Figure 3.38). Pour les piles 1 et 4, c'est surtout la sangle droite qui s'est détendue. La pile 6 qui était fortement sollicitée et qui a flambée a vu ses sangles se relâcher complètement donc les résultats s'ont pas été affichées sur les figures précédentes. La précompression n'avait plus du tout d'effet.

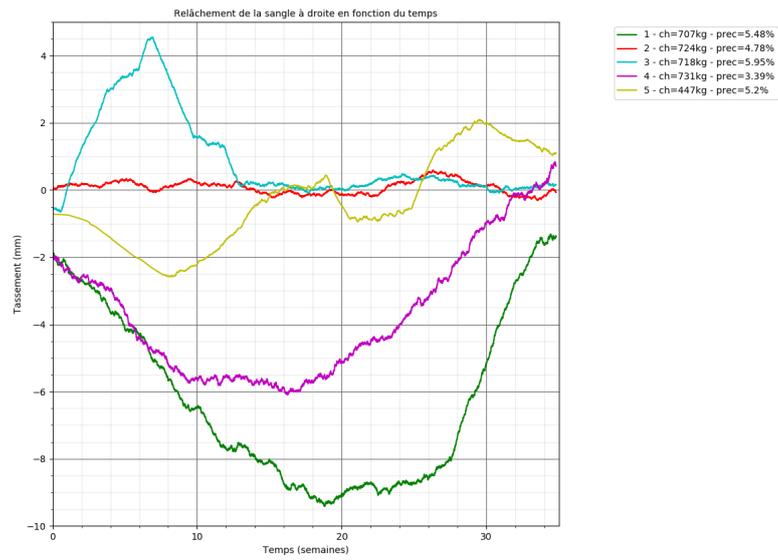


FIGURE 3.37. Relâchement de la sangle côté droit pour les piles 1 à 5

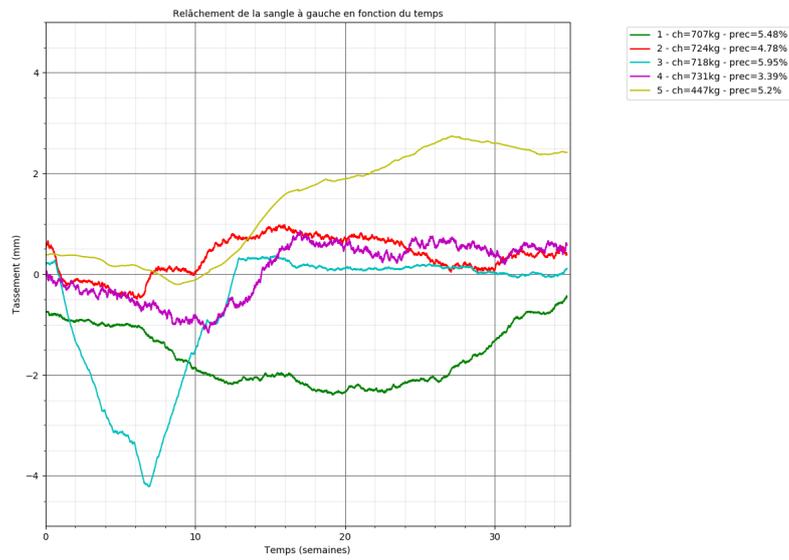


FIGURE 3.38. Relâchement de la sangle côté gauche pour les piles 1 à 5

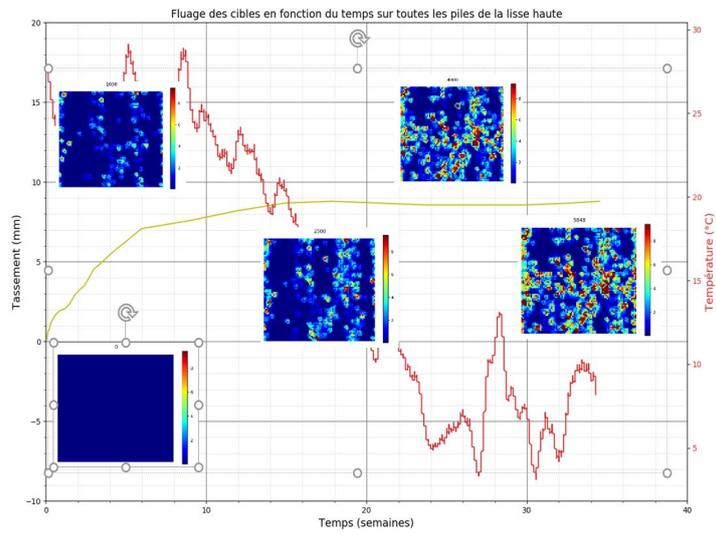


FIGURE 3.39. Evolution du fluage et de la déformation en fonction du temps de la pile 5
 - Chargement de 447 kg et taux de précompression de 5.07%

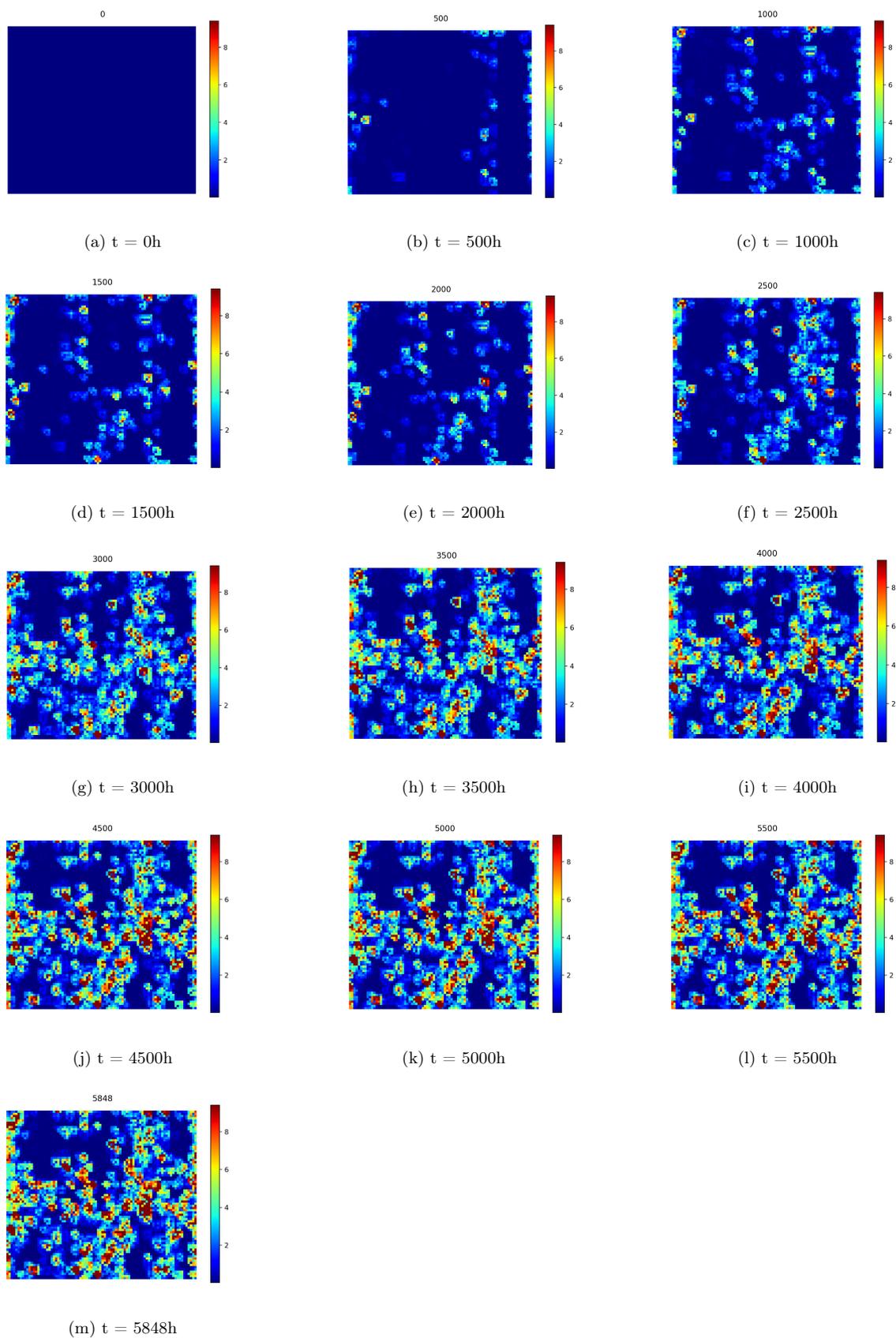


TABLE 3.10 – Evolution de la déformation verticale en fonction du temps (heures) de la pile 5

On observe de la déformation au niveau des sangles et assez peu dans les bottes de paille. Du bruit qui correspond aux brins de paille volants est venu perturber la visualisation des résultats. Cela a malheureusement dilaté l'échelle, les brins de paille volants se déplaçaient trop fortement et ne permettent pas de visualiser correctement les déformations. Cela n'a pas perturbé l'extraction des déplacements des cibles collées sur le prototype.

3.2.1.1.2 Analyse des mesures de tassement

L'analyse des données relatives à la détermination de l'effort de précompression des piles de bottes de paille révèle des informations essentielles sur la réaction de ces structures sous différentes conditions et charges. La pile 2 était la pile témoin avec un taux de précompression de 4,78% et un chargement de 723,5 kg.

Etat	Pile Caractéristiques	1	2	3	4	5	6
		État initial après précompression	Hauteur initiale	133,70	136,00	136,10	135,85
	Hauteur finale	126,38	129,50	128,00	131,25	128,90	128,90
	Déplacement imposé total	7,32	6,50	8,10	4,60	7,07	7,38
	Taux de précompression (%)	5,48	4,78	5,95	3,39	5,20	5,41
État initial après chargement	Masse appliquée (kg)	706,5	723,5	717,5	730,5	447	855
	Contrainte totale (kPa)	12,80	13,11	13,00	13,23	8,10	15,49
	Hauteur après chargement	126,70	129,00	128,40	131,30	129,08	128,73
	Tassement entre la précompression et le chargement (cm)	-0,33	0,50	-0,40	-0,05	-0,17	0,17
	Déformation (%)	-0,26	0,39	-0,31	-0,04	-0,14	0,13
État final après 8 mois	Hauteur finale	127,85	126,95	127,85	128,50	128,10	124,90
	Tassement (cm)	-1,15	2,05	0,55	2,80	0,97	3,83
	Déformation (%)	-0,86	1,51	0,40	2,06	0,72	2,81

TABLE 3.11 – Mesures de fluage à l'état initial avec précompression

Les piles se sont très peu comprimées après le chargement. Après une période de 8 mois, la pile 6 a subi une déformation conséquente de 3,83 cm soit 2,81% de déformation relative, ce qui est assez cohérent puisque c'était la plus chargée. À l'inverse, la pile 1 a vu sa déformation diminuer de 0,86% par rapport à son état initial mais cela est dû au basculement de la cuve en début d'essai, les résultats ne sont pas exploitables. La pile 3 qui était la plus précompressée au départ a subi une déformation beaucoup moins importante que les autres avec un tassement d'un demi-centimètre.

De même, la pile 5 qui était la moins chargée a subi un fluage assez faible.

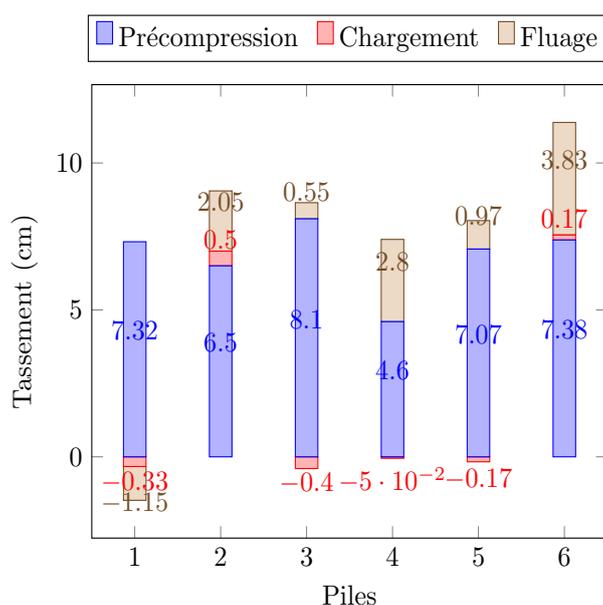


FIGURE 3.40. Evolution des tassements en fonction des phases de l'essai

On remarque que pour un chargement similaire, plus une pile est précomprimée et moins elle flue (pile 3). Pour des taux de précompression similaires, plus une pile est chargée, plus elle se tassera également à long-terme.

Suite au retrait des sangles, on constate que toutes les piles ont subi une déformation irréversible et ne sont pas parvenues à retrouver leur état initial. La pile 6 a été la plus impactée avec un tassement total de 10.73 cm en comparant avec la hauteur initiale avant précompression. Même les piles qui avaient été assez fortement précomprimées n'ont pas subi un tassement aussi important. La pile 5 qui a été la moins chargée a subi une déformation très similaire aux autres.

Etat après retrait des sangles \ Pile	1	2	3	4	5	6
Hauteur finale (cm)	128,60	127,50	128,10	128,85	129,00	125,55
Tassement total (cm)	5,10	8,50	8,00	7,00	6,97	10,73
Déformation (%)	3,81	6,25	5,88	5,15	5,13	7,87

TABLE 3.12 – Mesures de fluage après retrait des sangles

Dans un premier temps, c'est donc surtout la précompression qui doit déformer les bottes de manière plastique. Au-delà d'une certaine charge, quand la précompression ne peut plus reprendre la charge, celle-ci vient contribuer à la déformation plastique des bottes.

3.2.1.2 Evolution du chargement

Les données suivantes du Tableau 3.13 donnent l'évolution du chargement en fonction du temps.

Etat	Pile	1	2	3	4	5	6
	Caractéristiques						
État initial après chargement	Masse appliquée (kg)	706,50	723,50	717,50	730,50	447,00	855,00
	Poids correspondant (kN)	7,07	7,24	7,18	7,31	4,47	8,55
	Charge linéaire (kg/m)	589	603	598	609	373	713
	Contrainte (kPa)	12,80	13,11	13,00	13,23	8,10	15,49
État final après 8 mois	Masse appliquée (kg)	690,50	695,00	692,50	701,50	467,00	828,00
	Poids correspondant (kN)	6,91	6,95	6,93	7,02	4,67	8,28
	Charge linéaire (kg/m)	575	579	577	585	389	690
	Contrainte (kPa)	12,51	12,59	12,55	12,71	8,46	15,00

TABLE 3.13 – Mesures de chargement à l'état initial après chargement et à l'état final après 8 mois

Lors de l'état initial, la masse appliquée des spécimens variait de 706,50 kg à 855,00 kg, ce qui correspond à des poids allant de 7,07 kN à 8,55 kN. Après 8 mois, on observe une diminution de la masse appliquée dans toutes les piles sauf la 5, indiquant une perte de poids. Les variations des poids totaux après 8 mois sont plus faibles, avec des valeurs allant de 6,91 kN à 8,28 kN.

Perte ou gain de charge \ Pile	1	2	3	4	5	6
Variation de masse (kg)	-16,0	-28,5	-25,0	-29,0	20,0	-27,0
Variation de charge linéaire (kg/m)	-13,3	-23,8	-20,8	-24,2	16,7	-22,5
Variation de contrainte (kPa)	-0,3	-0,5	-0,5	-0,5	0,4	-0,5
Perte/gain de charge relatif (%)	-2,3	-3,9	-3,5	-4,0	4,5	-3,2

TABLE 3.14 – Perte ou gain de charge

L'analyse de l'évolution du chargement dû aux conditions météo révèle des variations importantes dans les

charges linéaires et les contraintes totales après 8 mois. Ces variations peuvent être attribuées à l'absorption d'humidité.

3.2.1.3 Abaque

En phase chantier, les murs de bottes sont soumis au poids du niveau supérieur (plancher, toiture) pour que les tassements différentiels se stabilisent pendant 2 à 3 semaines. Il est intéressant de caractériser l'influence de la précompression et du chargement sur les murs quand ils sont encore nus.

L'essai de fluage implique de soumettre les bottes de paille à une charge constante de plusieurs mois, simulant ainsi les poids propres des bottes, des lisses hautes, et de la toiture.

On propose une méthode de dimensionnement qui prend en compte un taux de précompression en supposant d'après les essais en compression un module d'Young moyen de 350 kPa.

Pile	1	2	3	4	5	6
Hauteur initiale (cm)	133,77	136	136,1	135,85	135,98	136,28
Tassement dû à la précompression d_{prec} (mm)	73	65	81	46	71	74
Taux de précompression (%)	5,48	4,78	5,95	3,39	5,2	5,41
Module d'Young E (kPa)	350					
Précompression initiale kPa	19,18	16,73	20,83	11,87	18,20	18,94
Charge	706,5	723,5	717,5	730,5	447	855
Contrainte due à la charge (kPa)	13,08	13,40	13,29	13,53	8,28	15,83
Rapport charge/précompression	68%	80%	64%	114%	45%	84%
Etat du fluage	Stabilisé	Stabilisé	Stabilisé	Stabilisé	Stabilisé	Stabilisé
Fluage après 8 mois (mm)	8	12	10	10	11	21
Tassement total d_{tot} : précompression + chargement (mm)	81	77	91	56	82	95
E final apparent (kPa) sur charge	218,84	236,62	198,62	328,22	137,78	227,32
E final apparent (kPa) sur charge + précompression	539,67	532,08	509,92	616,10	440,70	499,17

TABLE 3.15 – Tableau - Calcul du module d'Young apparent après précompression et chargement

Il y a une certaine stabilisation d'où notre proposition de dimensionnement pour un mouvement réduit de la structure durant le chantier :

- évaluer la charge devant être reprise par le mur
- au minimum doubler cette charge en termes de précompression pour se mettre en sécurité.
- se baser sur les déplacements d'une botte en supposant un module d'Young de 300 kPa pour une masse volumique autour de 120 kg/m³.

Pile	1	2	3	4	5	6
Masse volumique initiale d'une botte (kg/m ³)	120	120	120	120	120	120
Masse équivalente à l'effort précompression (kg)	86,7	88,1	88,2	88,0	88,1	88,3
Masse volumique due à la précompression (kg/m ³)	124,8	126,0	127,7	124,1	126,6	127,1
Masse volumique après chargement (kg/m ³)	125,5	127,2	128,7	125,0	127,7	129,2
Différence de masse volumique entre l'état initial et après chargement (kg/m ³)	5,5	7,2	8,7	5,0	7,7	9,2
Gain de masse volumique (%)	4,61	6,00	7,25	4,18	6,38	7,71

TABLE 3.16 – Tableau - Calcul de la masse volumique d'une botte après chargement

Le Tableau 3.16 donne la masse volumique des bottes après chargement et nous permet de constater un gain de masse volumique moyen d'environ 7 %.

En reprenant les résultats des piles 1 à 4 qui subissaient le même chargement (Tableau 3.15 et Tableau 3.16) mais ont connu des précompressions différentes, on a reconstitué l'abaque suivant (Figure 3.41).

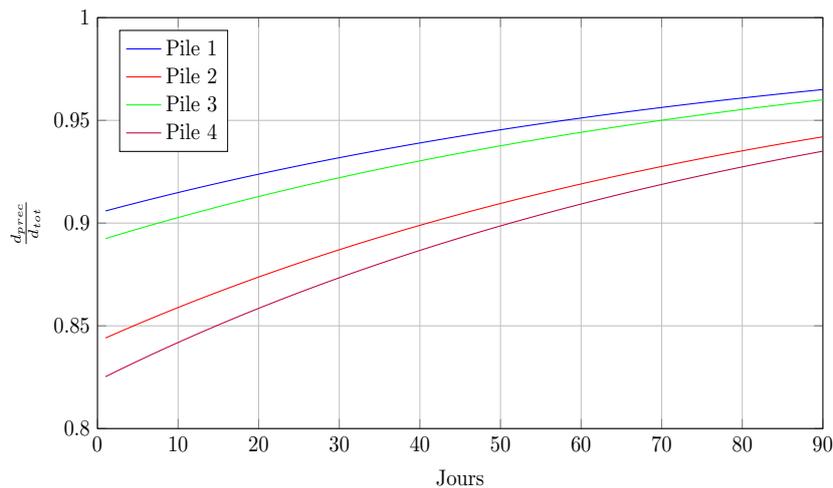


FIGURE 3.41. Abaque : évolution du flUAGE en fonction du rapport $\frac{d_{prec}}{d_{tot}}$ à partir des résultats des piles 1 à 4

On peut essayer d'annuler le flUAGE en imposant une précompression qui induira un déplacement équivalent à celui que peut générer le chargement. Si ce n'est pas possible, cet abaque donne une idée du nombre de jours à attendre avant l'application de l'enduit en fonction du rapport d_{prec}/d_{tot} . Concrètement, les artisans n'attendent pas plus d'un mois et donc ils ont tout intérêt à opter pour des bottes suffisamment denses en amont.

3.2.2 Série 2

Les piles de la série 2 n'ont présenté aucune variation de géométrie mesurable, indépendamment de la formulation de l'enduit qui avait été appliqué. Cela traduit le fait que le complexe enduit/paille/enduit présente une rigidité largement supérieure à la paille nue et suffisante pour assurer la résistance attendue d'un mur en compression. Les caractéristiques de ces essais ont été explicités dans la section 2 Protocoles expérimentaux.

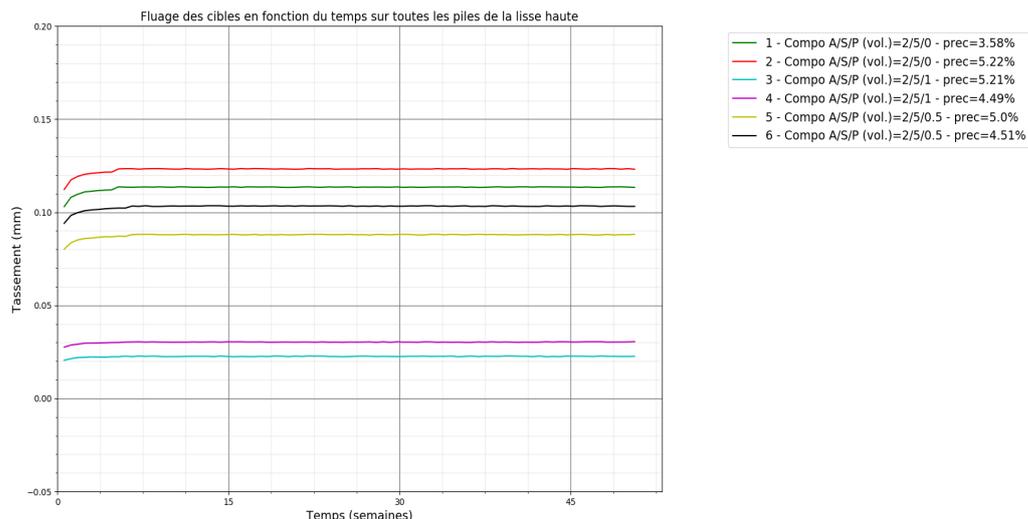


FIGURE 3.42. Evolution du fluage des piles en cours du temps (en semaines)

L'essai de fluage sur murs enduits implique d'évaluer la contribution de l'enduit en soumettant les bottes de paille à une charge, simulant ainsi les poids propres des bottes, des lisses hautes, et du niveau supérieur. Les murs enduits n'ayant presque pas flué (entre 0.02 et 0.13 mm), il est difficile d'en extraire des lois de comportement spécifique pour chaque formulation.

3.2.3 Conclusion

- Expérimentation : le système d'acquisition a nécessité la construction d'un local qui a décalé le début des essais de 3 mois. Mais la méthode de corrélation d'images a permis de mesurer avec précision le fluage sur une période de temps assez longue en différents points de la pile. Elle a également permis d'évaluer la déformation des bottes durant la durée de l'essai. Les valeurs obtenues par cette méthode sont très similaires à celles mesurée à la main. Cela vient confirmer l'efficacité de cette méthode.
- Phases du fluage : le fluage a comporté plusieurs phases qui concordent avec ceux observés dans la littérature [SMIT2003] à savoir le tassement instantané, un fluage précoce et un fluage ralenti. La pile la plus chargée (6) n'a pas pu se stabiliser contrairement aux autres. Initialement, c'est principalement la précompression qui est responsable de la déformation plastique des bottes. Lorsque la charge dépasse un certain seuil où la précompression n'est plus suffisante pour absorber cette charge, elle contribue alors également à la déformation plastique des bottes.
- Paramètres étudiés :
 - ◇ Influence du taux de précompression : plus le taux de précompression est élevé, plus les fibres s'enchevêtrent et la botte se compacte. Ainsi la pile de bottes se rigidifie ce qui permet de mieux encaisser les charges.
 - ◇ Influence du chargement : pour un taux de précompression similaire, les bottes se déforment plus à mesure que la charge est élevée. C'est cohérent avec le comportement des bottes en compression.
 - ◇ Influence de l'enduit : même en utilisant des enduits tendres (terre et sable ou terre, sable et paille), les piles de bottes ne se sont pas tassées.
- Relaxation des sangles : On a constaté que les sangles pouvaient se relâcher comme on a pu le voir pour la pile 6, il faudrait retendre les sangles à la demande en mettant en place d'un contrôle régulier en phase chantier avant la pose de l'enduit. Le relâchement des sangles sur un pan de mur pourrait déstabiliser l'ensemble de l'ouvrage donc il faudrait agir au plus tôt.
- Développement de modèles rhéologiques : des travaux en collaboration avec des étudiants ont permis de développer des modèles rhéologiques simples notamment en s'inspirant du modèle de Kelvin-Voigt. Cela a donné lieu à des résultats encourageants mais le manque de données expérimentales constitue un frein dans cette approche qui reste intéressante (Annexe B).

3.3 Cisaillement

Les essais ont eu lieu de 10 mai 2022. Les murs ont été testés jusqu'à leur rupture en cisaillement c'est-à-dire quand on ne pouvait plus augmenter l'effort de cisaillement et que le mur ne pouvait plus résister en contreventement.

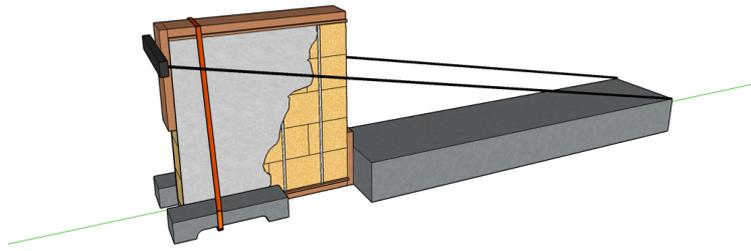


FIGURE 3.43. Schéma de principe de l'essai

Ci-dessous, un rappel des formulations d'enduit pour chaque mur :

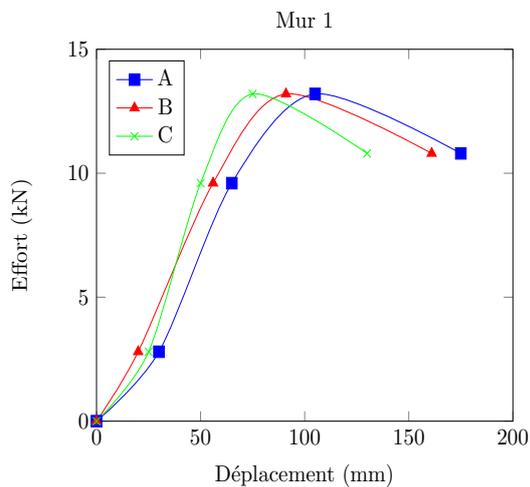
N° mur	Chaux (vol.)	Sable (vol.)	Argile (vol.)	Paille (vol.)
1	1	3	1	1
2	1	3	1	2
3	0	3	1	2
4	Paille nue			

TABLE 3.17 – Compositions d'enduit pour chaque mur

3.3.1 Résultats des essais

— Mur 1

Les fissures sont apparues à 5,6kN et enfin le mur rompt à 13,6kN. Les trois courbes ont la même tendance. Le point C se déplace moins que les autres points car le mur est bloqué en partie inférieure. Les fissures les plus grosses font environ 1 à 1,5 cm d'épaisseur avant la rupture du mur.



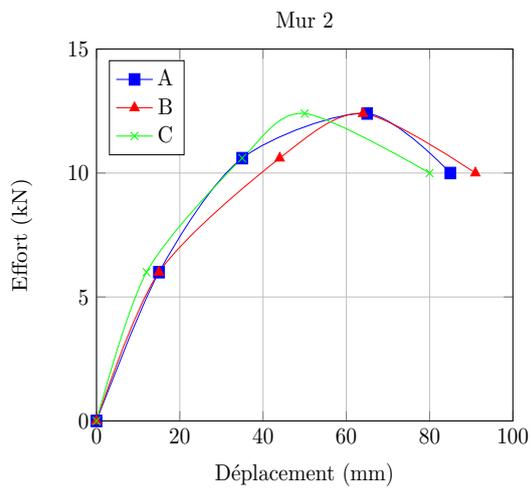
(a) Courbe effort-déplacement de l'essai en cisaillement



(b) Faciès du mur

FIGURE 3.44. Essai de cisaillement sur le mur 1

— Mur 2 Les fissures sont apparues à 4,0 kN et enfin le mur rompt à 12,4kN. Là également, les trois courbes ont la même tendance.



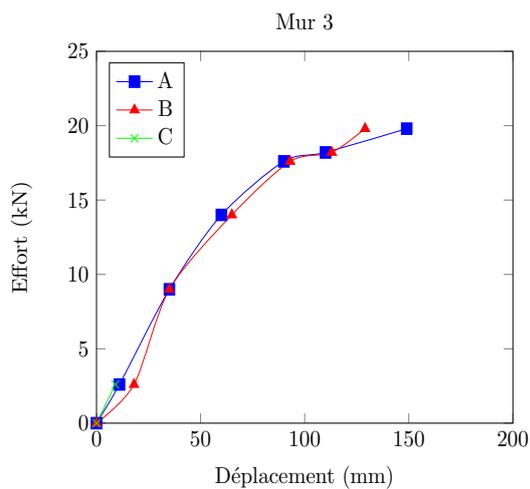
(a) Courbe effort-déplacement de l'essai en cisaillement

(b) Faciès du mur

FIGURE 3.45. Essai de cisaillement sur le mur 2

— Mur 3

Les fissures sont apparues à 2,6 kN et enfin le mur rompt à 18,2kN. Les trois courbes ont la même tendance. La sangle a été ramenée plus en arrière pour optimiser l'effet anti-basculement. Le point C se trouvait en plein milieu d'une fissure donc les données n'ont pas été exploitées. Les fissures atteignaient une largeur de 2,5 cm avant rupture.



(a) Courbe effort-déplacement de l'essai en cisaillement

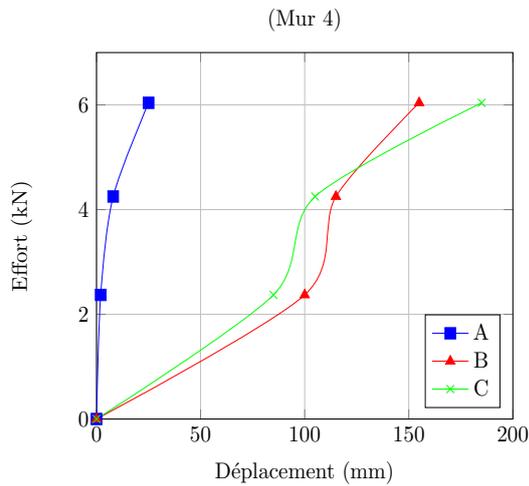
(b) Faciès du mur

FIGURE 3.46. Essai de cisaillement sur le mur 3

— Mur 4

Le mur a rapidement rompu car les bottes n'étant plus contreventées se déjointaient².

² La dégradation ou la séparation des joints qui lient les briques, les pierres ou les blocs de béton est généralement appelée déjointement de maçonnerie dans une construction en dur.



(a) Courbe effort-déplacement de l'essai en cisaillement

(b) Faciès du mur

FIGURE 3.47. Essai de cisaillement sur le mur 4

Des vidéos ont été prises mais il n'est pas possible de les exploiter en faisant de la corrélation d'images en raison du grand déplacement des câbles de tirage et des sangles qui dilate l'échelle des déformations au sein des murs. Cependant, elles permettent de visualiser le comportement dans leur ensemble.

3.3.2 Analyse

3.3.2.1 Mode de ruine

Dans tous les cas, la ruine s'est produite par fissuration de l'enduit sur les deux faces du mur. L'apparition de fissures a été observé dans un premier temps au centre du mur avant de se propager selon une diagonale à 45° ce qui correspond à la bielle de compression.

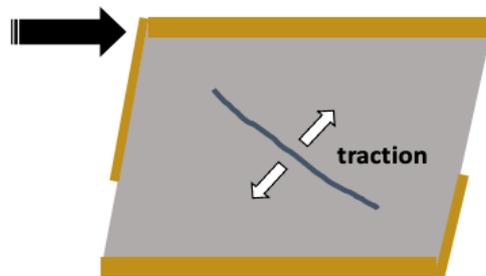


FIGURE 3.48. Fissuration dans la bielle de compression

Par la suite, quelques fissures très verticales au niveau des sangles sont survenues. Les sangles bien qu'étant noyées dans l'enduit n'adhèrent jamais complètement à l'enduit et génèrent donc des discontinuités qui fragilisent le mur vis-à-vis du cisaillement. Ceci s'explique car l'enduit avait déjà fissuré au niveau des sangles lors de la dessiccation. Des microfissures sont également apparues un peu partout sur le mur mais ne se sont pas agrandies et n'ont pas causé la ruine du mur.

Aucune rupture brutale du complexe enduit-paille-enduit n'a été constaté. L'enduit étant plus rigide que le matériau paille c'est surtout l'enduit qui a repris la charge de cisaillement. On ne constate pas de « déjointement » des bottes car la précompression des bottes entre les lisses avec les sangles permet une bonne adhérence des différentes rangées de bottes entre elles.

3.3.2.2 Comparaison des résultats et analyse des paramètres étudiés

C'est en tête de mur (point A) que le déplacement est le plus important donc les courbes ont été superposées dans la figure suivante :

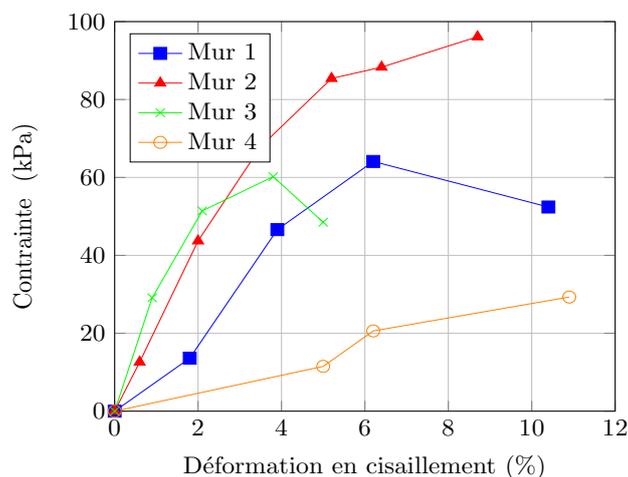


FIGURE 3.49. Courbes de contrainte- déformation en tête de mur (point A)

Le module de cisaillement est le rapport entre la contrainte de cisaillement τ et le taux de déformation en cisaillement γ .

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{h}} \quad (3.3)$$

avec :

- F : effort en cisaillement (N)
- A : aire cisailée (mm²)
- Δl : déplacement horizontal (mm)
- h : hauteur du mur (mm)

N°mur	Chaux/Sable/ Argile/Paille (vol.)	Force de rupture (kN)	Déplacement max (mm)	Module de cisaillement G(kPa)	Coefficient de détermi- nation R ²
1	1/3/1/1	13,2	175	1083	0,976
2	0/3/1/2	18,2	149	1435	0,949
3	1/3/1/2	12,4	85	1513	0,863
4	Paille nue	2,4	185	276	0,961

TABLE 3.18 – Comparaison des courbes de contraintes en cisaillement en tête de mur

Les résultats sont assez similaires à ceux obtenus par Danielewicz [DANI2008].

Plusieurs points sont à noter :

- Le complexe enduit-paille-enduit forme un panneau sandwich et les parements en rigidifie le mur en bottes et augmente considérablement sa résistance au cisaillement.
- Le mur composé seulement d'argile et de sable (2) a su encaisser plus d'effort en cisaillement que le mur composé d'argile stabilisé à la chaux (3) avec une augmentation de la résistance à l'effort de 46,7%. Concernant le module de cisaillement, cela correspond à une augmentation de 16,4%. L'argile est plus élastique que la chaux donc supporte mieux le cisaillement.
- L'influence de l'intégration de paille dans l'enduit est difficilement évaluable car lors de la prise de l'enduit le mur 3 avait plus fissuré que les autres au niveau des sangles et donc plus de joints de rattrapage avaient été réalisés sur celui-ci. La fissure dans la bielle de compression était beaucoup moins marquée. Il est difficile d'affirmer si les fissures étaient dues à un dosage plus important en paille. Dans l'hypothèse où se serait le cas, cela signifierait qu'ajouter de la paille fragilise le mur. La paille foisonnée contient de l'air et même si elle a été mélangée à l'enduit, il reste de l'air à l'intérieur du brin. Le fait que la paille soit un matériau moins rigide que l'enduit et qu'il subsiste de l'air fragilise l'enduit. L'avantage c'est que la paille limite la fissuration.

4. Conclusion

Afin d'explorer les différentes problématiques qui jalonnent la construction d'un ouvrage en paille porteuse, un état de l'art a été établi pour permettre au mieux d'orienter les recherches. Ainsi, il a été jugé nécessaire de lancer nos propres travaux afin de pouvoir caractériser mécaniquement les bottes (module d'Young notamment). Pour pouvoir garantir une rigidité suffisante, il a été montré qu'une masse volumique en base humide de 120 kg/m^3 soit 95 kg/m^3 sur base sèche était nécessaire. De potentiels problèmes de fluage peuvent apparaître durant la phase de chantier avant la pose de l'enduit. Comme on pouvait s'en douter, le fluage dépend fortement du niveau de précompression appliqué au mur mais également au niveau de chargement. Plus un mur est précomprimé et plus le fluage est diminué car la précompression permet de rigidifier le mur. Cela écrase les galettes de paille en accentuant l'enchevêtrement des brins. A partir des résultats, on a proposé un abaque qui permet de déterminer le rapport entre le déplacement total et celui induit par la précompression en fonction du temps.

On a aussi confirmé que l'enduit contribuait fortement à la résistance en compression mais aussi en cisaillement du mur. Le fluage était quasi inexistant une fois l'enduit appliqué et ce, indépendamment de la formulation choisie.

Concernant les enduits, les retours d'expérience sur les enduits à base d'argile se sont avérés justes puisqu'il faut 2 à 3 volumes de sable pour un volume d'argile. L'apport de paille hachée permet de rigidifier l'enduit mais au-delà d'un certain volume cela génère l'effet inverse. Les brins de paille absorbent l'eau de l'enduit quand il est frais cependant lors du retrait, les brins créent des fissures et donc des fragilités structurelles dans l'enduit. Donc, trop de brins de paille vont avoir un effet délétère.

Une fois l'ouvrage construit, les effets de vent ou de séismes cisailent les murs en imposant des efforts horizontaux. Là encore, cela a confirmé la présence de l'enduit dans la résistance au cisaillement des murs. Contrairement à ce qu'on aurait pu croire le mur en chaux-terre n'est pas plus performant car étant plus rigide, il a rompu plus rapidement. Cela confirme aussi les retours d'expérience des artisans de la construction en paille porteuse. Cela permet de montrer que si la chaux est nécessaire pour des raisons de durabilité vs-à-vis de l'humidité, son utilisation en parement extérieur suffit. Un parement intérieur en terre est à même de présenter des caractéristiques structurelles équivalentes.

Conclusion

Les nouvelles préoccupations environnementales ont amené les acteurs de la construction à repenser l'habitat. Bien que l'utilisation de la paille comme isolant n'est plus à prouver, la question de la légitimité de la botte de paille en tant qu'élément porteur a été soulevée. Cela a amené à examiner les enjeux et les potentialités de cette technique constructive et à de nombreuses interrogations sur sa pertinence : Malgré l'existence d'ouvrages en paille porteuse, est-ce un mode constructif valable ? Quelles sont ses limites ? Peut-on prouver par des essais expérimentaux les retours d'expérience des artisans et contribuer à valider les écueils de la norme régissant cette technique qui est en cours de développement ?

Une mise en perspective historique a montré que la paille porteuse a été développée par les premiers colons du Nebraska et leurs ouvrages sont un témoignage vivant de l'adaptabilité et de l'innovation humaine face à des ressources limitées. La maison Feuillette en France en est le symbole éloquent, incarnant la longévité et l'efficacité de cette technique. Dans un contexte mondial où l'éco-responsabilité est primordiale, le recours à des matériaux bio-sourcés comme la paille n'est plus une option, mais une nécessité. Le renouveau de l'utilisation de la paille au milieu des années 90 signale une évolution dans notre manière d'envisager la construction. Cela suggère une transition vers des méthodes plus durables, soutenues par des entités telles que le RFCP, qui œuvre pour une standardisation et une reconnaissance plus large de cette méthode. Le recensement des bâtiments en paille en France est incomplet, le RFCP a créé des moyens de sensibiliser le public et de recueillir des informations. La paille porteuse représente actuellement 3% de la construction en paille mais tend à se développer avec la montée des prix du bois causé par divers événements géopolitiques.

La botte de paille, considérée comme un coproduit agricole, offre une disponibilité telle pour le secteur de la construction que son utilisation ne nuirait pas aux autres secteurs (élevage, énergie, etc.). Non seulement elle constitue un puits de carbone remarquable, mais elle contribue également à des économies de par son coût mais aussi en réduisant considérablement l'utilisation de bois par exemple. De plus, la proximité de ravitaillement s'inscrit dans une démarche locale de développement équitable.

Cependant, malgré ses nombreux avantages, la construction en paille est encore entachée de préjugés. Les contes populaires comme "Les trois petits cochons" ont laissé une impression erronée sur la fiabilité de la paille. Il est donc vital de s'appuyer sur des études scientifiques rigoureuses pour démystifier ces conceptions.

Concernant sa durabilité, des interrogations sur son comportement au feu, les dégradations liées à l'eau et les potentielles invasions de ravageurs sont souvent invoquées. Cependant, la botte de paille a obtenu le classement européen au feu E, et un mur en ossature bois rempli de paille est classé Euroclasse B-s1-d0 depuis 2012. Des essais scientifiques conduits sur la nidification de termites ont donné des résultats satisfaisants et le taux de silice présent dans la paille la rend peu nutritive pour les petits animaux. Concernant l'humidité, il a été montré que tout se jouait lors de la conception, comme pour toute méthode constructive conventionnelle, et que c'est à ce moment-là qu'il fallait prendre le plus de précautions. Les résultats des tests de résistance thermique et acoustique montrent également les excellentes performances de la paille porteuse. Cependant en France, aucun travail scientifique ne s'était penché sur ses aspects structurels, si ce n'était des travaux étudiants.

Dans ce contexte, des essais reflétant les phénomènes d'instabilité liés aux différentes étapes de la construction d'un ouvrage en paille porteuse se sont avérés nécessaires. Des essais de fluage sur des piles de bottes, de compression sur des bottes, et de cisaillement sur des murs à l'échelle 1 ont été conduits et se sont montrés particulièrement révélateurs.

Dans un premier temps, les essais de compression sur bottes ont permis de montrer que les bottes devaient être suffisamment denses pour avoir un module d'Young minimal de 300 kPa. Une masse volumique en base humide de 120 kg/m³ soit 95 kg/m³ sur base sèche est recommandée. Pour cela, il faudrait faire la demande auprès des agriculteurs en amont du projet afin qu'ils compactent au maximum leurs bottes mais cela dépend aussi du

type de botteuse car les brins ne s'enchevêtrèrent pas de la même manière.

Les essais de fluage permettaient de simuler la phase pendant laquelle le mur en paille nue est chargé via un niveau supérieur (plancher ou toiture) afin de se stabiliser. Ainsi, les murs de paille subissent des tassements différentiels pendant 3-4 semaines avant l'application de l'enduit qui permettra de rigidifier la structure en formant un panneau-sandwich. Aucun des murs enduits n'a flué soulignant ainsi le rôle crucial de l'enduit indépendamment de sa formulation. Enfin, cela a permis de développer un premier abaque sur la durée de stabilisation d'un mur en paille nue en fonction du rapport entre le tassement lié à la précompression et le tassement final prévu en supposant que les bottes aient une masse volumique de 120 kg/m³ pour un module d'Young de 350 kPa. On a également proposé des modèles rhéologiques simples de fluage sur des bottes mais les paramètres restent à caler dans des travaux de recherches futurs.

En parallèle de mon travail de thèse, j'ai participé à l'élaboration des Règles Professionnelles qui sont en cours d'examen. Ce document présente les principales méthodes de construction utilisant la paille porteuse adoptées jusqu'à présent en France. Il découle d'un accord professionnel et sert de référence pour les designers, les bâtisseurs, les assureurs, les inspecteurs techniques et les experts impliqués dans la construction en paille porteuse. Plutôt que de prescrire des méthodes spécifiques, ce guide se concentre sur les objectifs de résultats, laissant ainsi la liberté aux différentes approches et à l'évolution de la pratique. L'attente envers ces règles professionnelles est grande au sein de la communauté professionnelle, notamment en raison des implications assurantielles. Ce document est le reflet des meilleures pratiques actuelles et s'appuie sur l'expertise de nombreux spécialistes dans le secteur.

Des perspectives de recherche ont été soulevées à la fin de la thèse. D'après les artisans, il serait question de limiter l'utilisation du sable dans la formulation des enduits afin de préserver les ressources. Or le sable contribue grandement à la résistance en compression, en cisaillement et en flambement de l'enduit. Cette décision aura un impact également sur l'adhérence entre l'enduit et la paille et il serait intéressant à l'avenir de tester ces enduits encore plus écologiques et de vérifier qu'ils puissent conserver des propriétés structurelles intéressantes.

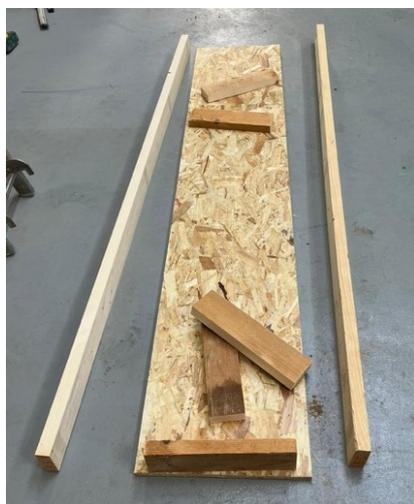
Il serait également pertinent de tester des murs au flambement car comme il a été observé durant les essais de fluage et d'après certains constructeurs quand le mur est trop chargé, il se déforme hors-plan. Il est difficile de solutionner le problème une fois qu'il apparaît. Il faudrait créer un abaque de dimensionnement prenant en compte le taux de précompression et le chargement pour empêcher ce type d'instabilité.

Ce mémoire s'est efforcé de jeter un éclairage complet sur la construction en paille porteuse, des origines historiques aux défis modernes, en passant par les avantages techniques et environnementaux. En somme, la construction en paille est bien plus qu'une simple tendance ou une méthode obsolète; elle est une solution durable et innovante aux défis contemporains. En reconnaissant son potentiel et en s'armant des connaissances nécessaires, nous pouvons envisager un avenir où les bâtiments ne sont pas seulement fonctionnels, mais également en harmonie avec la nature qui nous entoure.

Annexes

1. Annexe A : Préparation des murs pour les essais de cisaillement

Des chevrons de 38 x 100 cm de section ont été utilisés pour la confection des lisses de 2,36 m de longueur pour 46 cm de largeur. Les chevrons étaient liés par 5 entretoises de même section. Ensuite, une seule plaque d'OSB a été vissée afin d'être en contact avec les bottes (Figure 50a et Figure 50b)



(a) Éléments nécessaires à la réalisation des lisses



(b) Réalisation des lisses



(c) Appuis sous la lisse

FIGURE 50. Réalisation des lisses

Afin de faciliter le passage des sangles et le transport des murs par chariot élévateur, des appuis ont été vissés sous les lisses basses (Figure 50c).

1.1 Préparation des bottes

Les extrémités des bottes devaient être refaçonnées afin qu'elles puissent être les plus planes possibles. L'état de surface des têtes garantit une bonne adhésion entre les bottes et permet de réduire les efforts de poussée qui sont générés aux extrémités des murs. Dans notre cas, ces efforts ne sont pas gênants car les murs sont isolés mais lors de la réalisation de pans de mur d'une maison, ils perturbent la mise en œuvre des murs perpendiculaires et fragilisent l'enduit.

Afin de respecter le calepinage établi pour réaliser un mur de 5 rangées, il a fallu façonner 4 demi-bottes pour un mur (Figure 51).

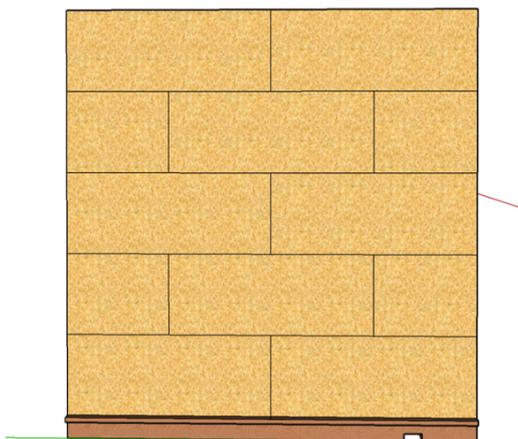


FIGURE 51. Calepinage

1.2 Montage des murs

1.2.1 Pose de la lisse basse

Des vis de 120 mm ont été intégrées dans les parois des lisses haute et basse permettant de stabiliser les bottes latéralement notamment lors de la précompression (Figure 52).



FIGURE 52. Mise en place des vis dans la lisse

1.2.2 Pose des rangées de bottes

La pose des bottes s'est déroulée selon le procédé décrit dans le Tableau 19.

N° rangée	Tâches
1	Les bottes devaient être bien centrées sur la lisse basse. Une poupée de paille a été calée entre les deux bottes.
2	La botte entière a été posée en premier et des poupées de bottes ont été installées avant que de caler les demi-bottes. 4 HA 10 (soit 2 par botte) de 85 à 90 cm de longueur ont été enfoncées pour reprendre la demi-hauteur des rangées 1 et 3 et la totalité de la rangée 2.
3	Cf. tâche rangée 1
4	Cf. tâche rangée 2 sans broche
5	Cf. tâche rangée 1 avec broches et lisse haute

TABLE 19 – Ordonnancement des tâches pour chaque rangée de bottes

L'aplomb a été régulièrement vérifié et les éventuels espacements entre les bottes avaient été rebouchées avec de la paille foisonnée.

1.2.3 Pose de la lisse haute

La lisse haute a été positionnée à l'aplomb de la lisse basse (Figure 53).



FIGURE 53. Montage du mur avant précompression

1.3 Précompression des rangées de bottes

1.3.1 Pose des rails pour les sangles à cliquets.

Quatre chevrons ont été disposés sur la lisse haute afin de recevoir les sangles (Figure 54). Ils permettaient de guider les quatre sangles afin qu'elles restent perpendiculaires à la lisse et de limiter leur frottement contre l'arête de la lisse. Les sangles entouraient entièrement l'élément mural et étaient espacées les unes des autres de 0.6m.



FIGURE 54. Rails et sangles à cliquets

2. Annexe B : Modèles rhéologiques

2.1 Modèles rhéologiques de base

La modélisation rhéologique permet de décrire le comportement de matériaux viscoélastiques présentant des comportements à la fois visqueux et élastiques. Sous l'application de contraintes, ces matériaux peuvent se déformer et se comporter de manière non linéaire. Lors d'une modélisation d'un modèle rhéologique, on utilise le plus souvent un ressort afin de modéliser un comportement élastique. Ce ressort permet de représenter la manière dont le matériau se déforme puis récupère son état initial à la suite de l'application d'une contrainte. Il représente également la partie élastique, où, selon la loi de Hook, la déformation est proportionnelle à la force appliquée. Les modèles rhéologiques comportent également un amortisseur qui permet de représenter le comportement visqueux des matériaux et particulièrement des fluides visqueux de type newtonien. Ces derniers subissent une déformation continue sous l'application d'une charge. L'utilisation de ressorts et d'amortisseur en parallèle, la modélisation viscoélastique, permet donc de modéliser des matériaux plus complexes. L'on peut obtenir, en utilisant les caractéristiques de chaque élément (ressort et amortisseur) et en combinant les lois qui régissent leur agencement en série et en parallèle, les équations rhéologiques résultantes. Ces dernières permettent de prédire comment le matériau se comportera sous différentes contraintes. Des modèles plus sophistiqués peuvent combiner plusieurs ressorts et amortisseurs en série et en parallèle afin de modéliser des comportements plus réalistes.

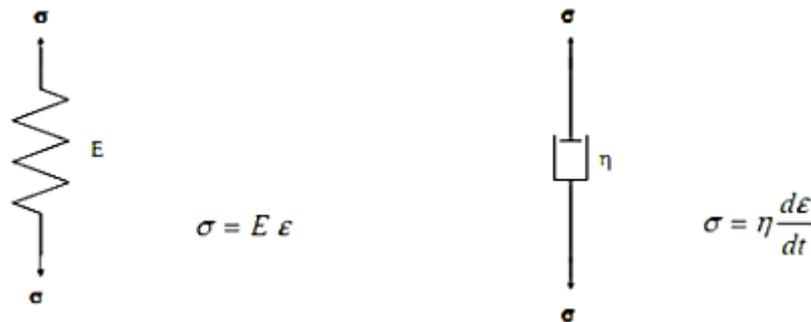


FIGURE 55. Représentation rhéologique d'un solide élastique et d'un liquide newtonien

2.2 Modèles analogiques de base

2.2.1 Modèle de Kelvin-Voigt

Le modèle de Kelvin-Voigt associe en parallèle un ressort de module d'élasticité E_0 et un amortisseur de coefficient de viscosité η .

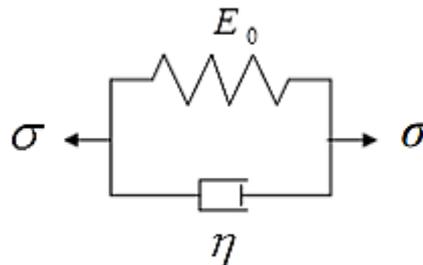


FIGURE 56. Représentation du modèle de Kelvin-Voigt

On retrouve dans le ressort et dans l'amortisseur $\varepsilon_{\text{ressort}}$ et $\varepsilon_{\text{amortisseur}}$ les déformations ainsi que σ_{ressort} et $\sigma_{\text{amortisseur}}$ les contraintes.

Le contraintes sont définies comme suivant :

$$\sigma_r = E_0 \varepsilon_r \quad (4)$$

$$\sigma_a = \eta \frac{d\varepsilon_a}{dt} \quad (5)$$

Basé sur les lois d'association en parallèle, la déformation et la contrainte totales s'écrivent :

$$\varepsilon = \varepsilon_a = \varepsilon_r \quad (6)$$

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_r \quad (7)$$

On obtient alors l'équation rhéologique suivante :

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

La résolution de l'équation différentielle permet d'obtenir l'expression de la fonction de fluage de Kelvin-Voigt :

$$F(t) = \frac{1}{E_0} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (9)$$

L'expression contient le paramètre τ appelé temps de retard, de valeur $\tau = \frac{\eta}{E_0}$. Cependant, ce modèle a certaines limites. Il ne peut en effet pas subir de déformation instantanée car cela impliquerait une contrainte infinie.

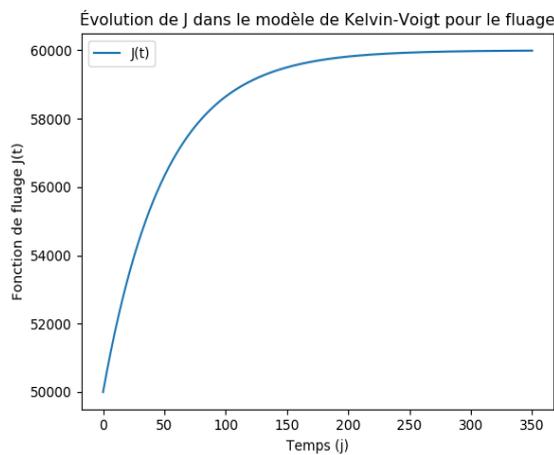


FIGURE 57. Courbe de fluage du modèle de Kelvin-Voigt

Limites du modèle

À contrainte constante, le modèle semble assez réaliste car il prédit une augmentation de la déformation avec le temps jusqu'à atteindre une valeur limite de $\frac{\sigma_0}{E}$. Le modèle s'avère extrêmement efficace pour modéliser le fluage des matériaux. Cependant, en ce qui concerne la relaxation, le modèle est beaucoup moins précis, fournissant une valeur inchangée sur la durée.

2.2.2 Modèle de Maxwell

Le modèle de Maxwell est composé d'un ressort et d'un amortisseur en série.

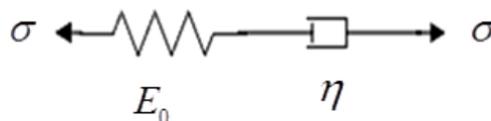


FIGURE 58. Représentation du modèle de Maxwell

Les lois d'association en série de la contrainte et de la déformation sont les suivantes :

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_r \quad (10)$$

$$\sigma = \sigma_a = \sigma_r \quad (11)$$

La dérivée de la déformation totale de l'équation précédente donne :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon_a}{dt} = \frac{d\varepsilon_r}{dt}$$

equation

Avec toujours les contraintes définies comme suivant :

$$\sigma_r = E_0 \varepsilon_r \quad (13)$$

$$\sigma_a = \eta \frac{d\varepsilon_a}{dt} \quad (14)$$

En combinant (3.1), (3.2) et (3.7), on obtient l'équation rhéologique du modèle de Maxwell :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \frac{d\sigma_a}{dt} + \frac{1}{\eta} \sigma \quad (15)$$

Une fois intégrée, l'expression précédente donne les expressions de la fonction de fluage et de relaxation :

$$F(t) = \frac{1}{E_0} + \frac{t}{\eta} \quad (16)$$

$$R(t) = E_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (17)$$

Avec $\tau = \frac{\eta}{E_0}$ le temps de retard de la fonction de relaxation.

Limites du modèle

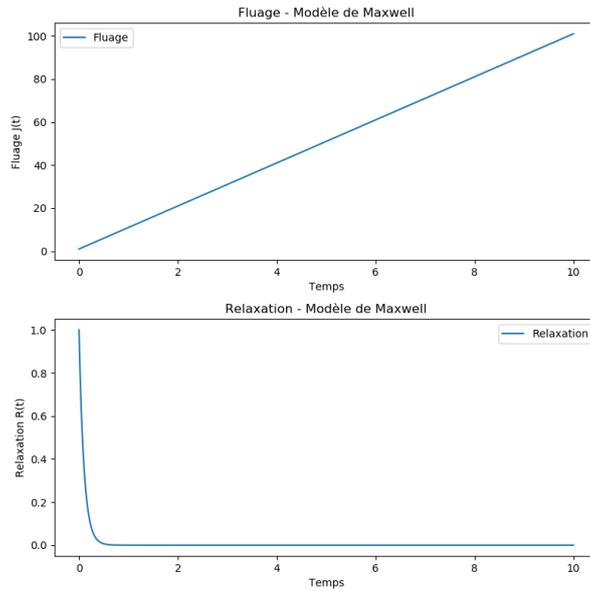


FIGURE 59. Courbe de fluage et de relaxation du modèle de Maxwell

Ce modèle reste très limité car il ne rend pas compte avec précision des conditions de fluage ou de contraintes constantes. Ce modèle suggère que la déformation augmente de manière linéaire avec le temps, ce qui n'est pas le cas.

2.2.3 Modèle viscoélastique de Poynting-Thomson

Le modèle d'un solide viscoélastique est composé d'un modèle de Kelvin-Voigt auquel est ajouté en série un ressort de module d'élasticité E_1 . Il s'agit du modèle le plus simple qui décrit avec précision à la fois le comportement de fluage et de relaxation sous contrainte d'un matériau viscoélastique.

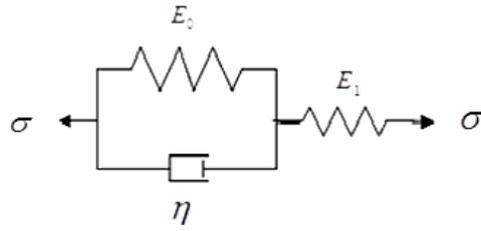


FIGURE 60. Représentation du modèle de Poynting-Thomson

En reprenant et combinant les raisonnements appliqués aux modèles de Kelvin-Voigt et de Maxwell étudiés précédemment, on obtient l'équation de comportement du modèle de Zener suivante :

$$(E_0 + E_1)\sigma + \eta \frac{d\sigma}{dt} = E_1(E_0\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}) \quad (18)$$

$$F(t) = \frac{1}{E_0} \left(\frac{\tau_f}{\tau_r} - \left(\frac{\tau_f}{\tau_r} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (19)$$

$$R(t) = E \left(\frac{\tau_r}{\tau_f} - \left(\frac{\tau_r}{\tau_f} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (20)$$

Avec $\tau_f = \frac{\eta}{E_1}$ le temps caractéristique de fluage et $\tau_r = \frac{\eta}{E_0 + E_1}$ le temps caractéristique de relaxation. On a également $\tau_r < \tau_f$

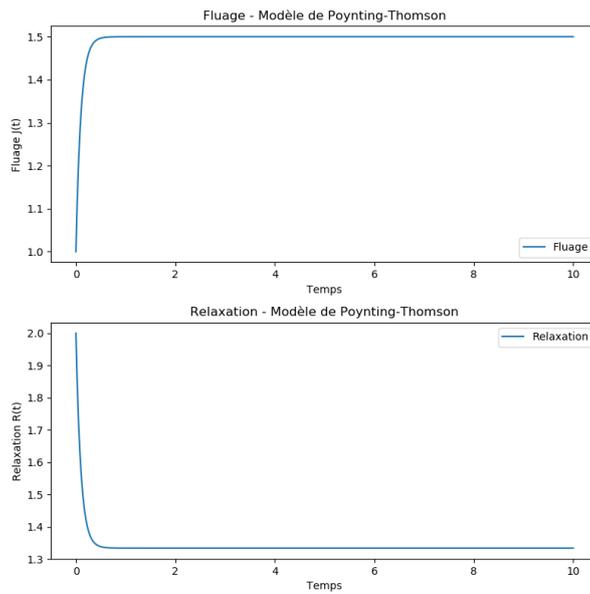


FIGURE 61. Courbe de fluage et de relaxation du modèle de Poynting-Thomson

2.2.4 Modèle viscoélastique de Zener

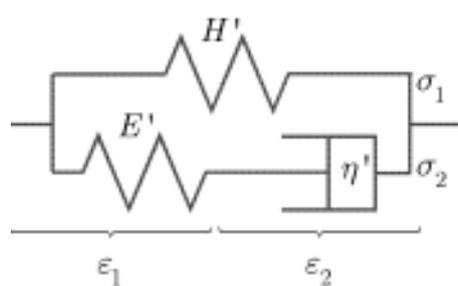
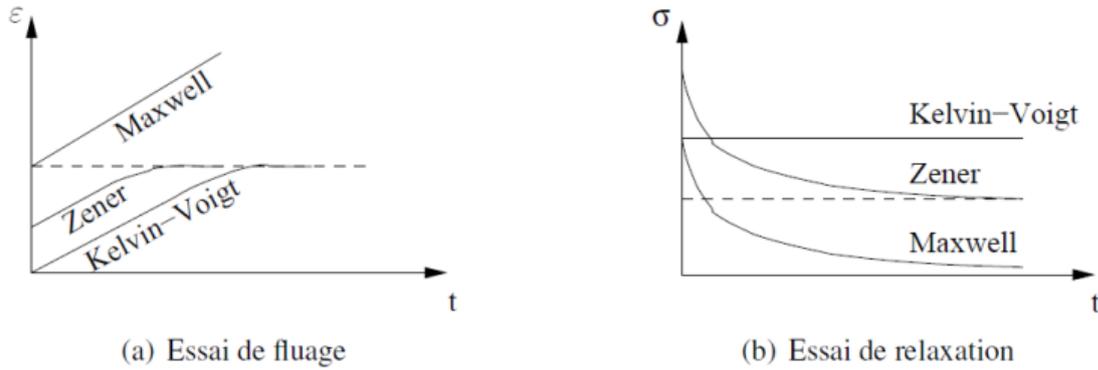


FIGURE 62. Représentation du modèle de Zener

Relaxation : $\tau_r = \frac{\eta'}{E'}$ et fluage : $\tau_f = \eta' \left(\frac{1}{E'} + \frac{1}{H'} \right)$

Cette représentation du modèle de Zener est équivalente au modèle de Poynting-Thomson.



2.3 Modèles analogiques généralisés

Les modèles précédents peuvent être améliorés avec des modèles généralisés composés d'un nombre plus important de paramètres.

2.3.1 Modèle de Maxwell généralisé

Le modèle de Maxwell généralisé est constitué un assemblage en parallèle de n modèles de Maxwell et élément élastique.

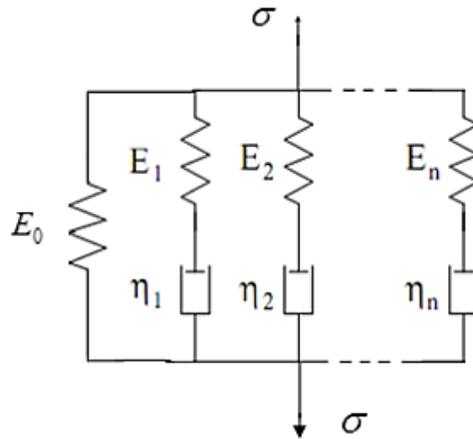


FIGURE 63. Représentation du modèle de Maxwell généralisé

$$\sigma(t) + \sum_{n=1}^N \eta_n \frac{d^n \varepsilon(t)}{dt^n} = \sum_{n=0}^N E_n \varepsilon^{(n)}(t) \quad (21)$$

$$R(t) = E_0 + \sum_{n=1}^N E_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (22)$$

2.3.2 Modèle de Kelvin-Voigt généralisé

Le modèle de Kelvin-Voigt généralisé est constitué d'un assemblage en série de n modèles de Kelvin-Voigt.

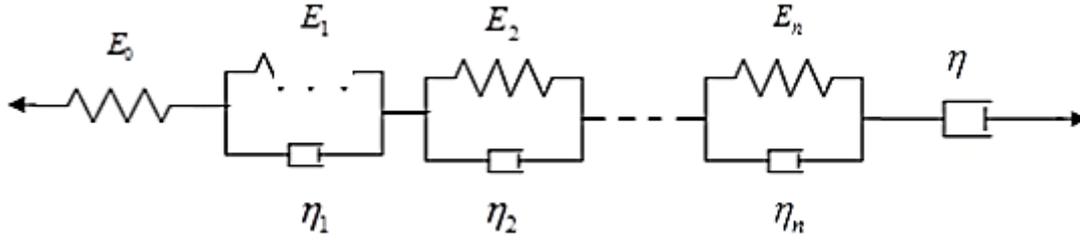


FIGURE 64. Représentation du modèle de Kelvin-Voigt généralisé

$$\sigma(t) + \sum_{n=1}^N \eta_n \varepsilon^{(n)}(t) + \sum_{n=1}^N E_n \sigma^{(n)}(t) = E_0 \varepsilon(t) \quad (23)$$

2.4 Implémentation d'un modèle

2.4.1 Le modèle de Kelvin-Voigt

Dans un premier temps, l'évolution de la déformation en fonction du temps d'une botte de paille simple, sans aucun enduit, a été tracée en se basant sur les résultats des essais FASBA menés en 2008 sur des bottes matelas.

Comme décrit précédemment, l'équation régissant l'évolution de la déformation en fonction du temps est la suivante :

$$\varepsilon(t) = \frac{\varepsilon_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_0} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (24)$$

avec : $\tau = \frac{\eta}{E_0}$

Dans un premier temps, les paramètres d'entrée dans le code du modèle sont : les dimensions des bottes, leur densité, les déformations instantanées ainsi que les contraintes s'appliquant verticalement sur les bottes. Ces éléments permettent de calculer le déplacement instantané, puis le module de Young initial, E_0 .

2.4.2 Mise en place d'un modèle

La botte va subir deux déformations successives. Dans un premier temps, une déformation instantanée, puis, dans un second temps, la déformation liée au fluage. Le module d'Young étant directement lié à la densité et donc à la masse volumique, il faut traduire l'impact de la déformation instantanée sur la masse volumique, afin de déterminer le nouveau module d'Young.

- E_0 est le module d'Young de la botte de paille au temps 0 : $E_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t=0)}$
- E_1 est le module d'Young de la botte après déformation initiale.

L'équation du modèle Kelvin Voigt devient :

$$d(t) = \frac{\sigma_0 * e_p}{E_0} + \frac{\sigma_0 * e_p}{E_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (25)$$

avec :

- d le déplacement
- $\tau = \frac{\eta}{E_1}$
- e_p l'épaisseur de la botte

Détermination du module d'Young E_1 :

Il faut déterminer la relation liant le module d'Young à la densité, afin de déterminer E_1 à partir de d_1 .

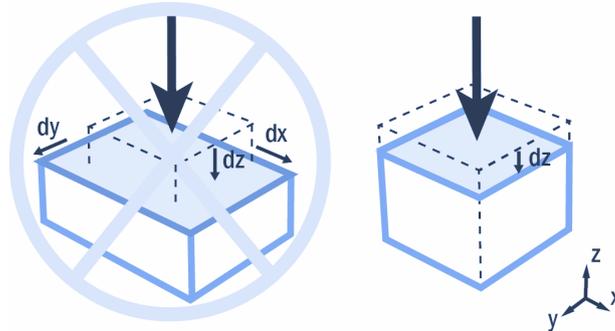
Une des manières d'obtenir une équation reliant la masse volumique au module d'Young est de créer une régression linéaire ou quadratique avec les données d'entrée qui les valeurs connues de E_0 et d_0 .

Dans le cas du modèle des bottes matelas, c'est la régression quadratique la plus adaptée. E_0 peut être calculé de nouveau ainsi que d_1 , permettant d'obtenir E_1 .

Hypothèses : Pour la suite de la modélisation, seuls les déplacements verticaux seront considérés et non longitudinaux et transversaux. Ainsi, on ne prendra pas en compte le coefficient de poisson ni les variations selon dx et dy .

Botte d'essai	1	2	3
État initial			
Largeur (m)	2,2		
Épaisseur (m)	0,5		
Longueur (m)	0,8		
Surface (m ²)	1,76		
Masse volumique initiale (kg/m ³)	133	122	116
Masse (kg)	117,0	107,4	102,1
Après déformation instantanée			
Déformation (m/m)	0,074	0,105	0,21
Épaisseur botte comprimée (m)	0,463	0,448	0,395
Masse volumique initiale (kg/m ³)	143,6	136,3	146,8
E ₀ (Pa)	5.61×10^5	3.81×10^5	1.89×10^5
Fluage			
E ₁ (Pa)	$5,23 \times 10^5$	$5,71 \times 10^5$	$4,71 \times 10^5$

TABLE 20 – Tableau récapitulatif des propriétés des 3 bottes matelas de l'essai FASBA - (Source : FASBA (2008))



A partir des données entrées, le fluage peut être calculé.

Le paramètre η permet de faire varier l'allure de la courbe et particulièrement sa "courbure". Cependant, après avoir mené plusieurs tests de superposition, on s'aperçoit que des écarts persistent entre la courbe modélisée et la courbe expérimentale. Il a été décidé par conséquent d'appliquer deux coefficients, α et β :

$$d(t) = \frac{\sigma_0 \cdot e_p \cdot \eta \cdot \alpha}{E_0} + \frac{\sigma_0 \cdot e_p \cdot \eta \cdot \beta}{E_1} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (26)$$

avec :

- α le coefficient correctif de déformation instantanée
- β le coefficient correctif de déformation de fluage

Avec les paramètres suivants ($\alpha = 0.15$; $\beta = 0.95$; $\eta = 5 \times 10^6$), voici les courbes de fluage obtenues numériquement superposées aux courbes expérimentales :

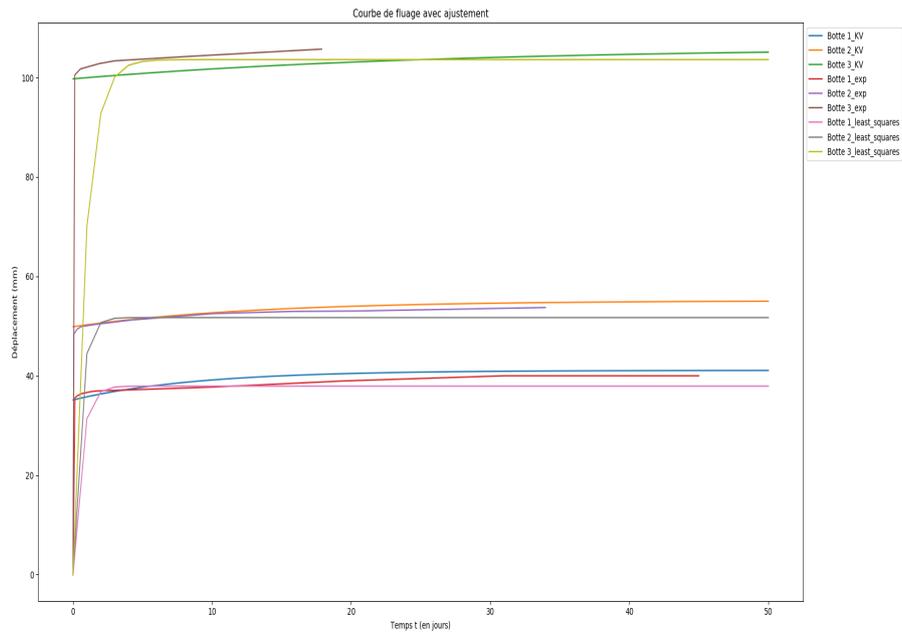


FIGURE 65. Courbes de déplacement (mm) en fonction du temps des bottes matelas

Les mêmes étapes sont réalisées pour les petites bottes.

Botte d'essai	1	2	3
État initial			
Largeur (m)	0,8		
Épaisseur (m)	0,36		
Longueur (m)	0,48		
Surface (m ²)	0,384		
Densité initiale (kg/m ³)	97,58	91,46	87,46
Poids (kg)	13,5	12,6	12,1
Après déformation instantanée			
Déformation (m/m)	0,035	0,035	0,02
Épaisseur botte comprimée (m)	0,347	0,347	0,353
Densité (kg/m ³)	101,1	94,8	89,2
E ₀ (Pa)	15.1×10^5	22.3×10^5	26.9×10^5
Fluage			
E ₁ (Pa)	11.0×10^5	18.4×10^5	24.8×10^5

TABLE 21 – Tableau récapitulatif des propriétés des 3 petites bottes de l'essai FASBA - (Source : FASBA (2008))

De manière similaire au cas des bottes matelas, on cherche l'expression de E₁ afin de se rapprocher des valeurs expérimentales. Après plusieurs essais, c'est la fonction affine qui se cale au mieux aux données. Avec les paramètres suivants ($\alpha = 0.2$; $\beta = 0.15$; $\eta = 1 \times 10^7$), on obtient l'évolution du fluage ci-dessous :

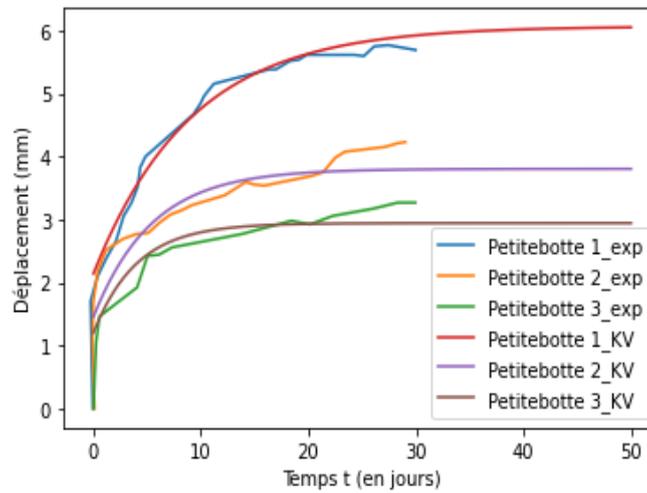


FIGURE 66. Courbes de déplacement (mm) en fonction du temps des petites bottes

2.4.3 Optimisation du modèle

On cherche maintenant à optimiser le modèle. Pour cela, on teste différents types d'optimisation (Optimisation globale, Contraintes des fonctions scalaires multivariées etc...) en se basant sur la bibliographie de python. On s'aperçoit qu'une seule méthode fonctionne réellement : celle des moindres carrés. Elle revient à minimiser l'erreur au carré moyenne entre les données y_i et le modèle théorique $f_a(x_i)$.

La fonction minimisant l'erreur quadratique moyenne est définie comme suit :

$$\min \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_a(x_i) - y_i)^2 \tag{27}$$

Où :

- n est le nombre de données,
- y_i sont les valeurs observées,
- $f_a(x_i)$ est le modèle théorique dépendant du paramètre a ,
- a est le paramètre à ajuster pour minimiser l'erreur.

L'objectif principal de l'ajustement de courbe est de minimiser l'influence des valeurs résiduelles aberrantes et contribuer à la robustesse de la solution. Pour cela, on crée une fonction résiduelle qui va mesurer la différence entre les valeurs observées dans les données expérimentales et les valeurs prédites par le modèle. Dans le contexte de l'optimisation, la fonction résiduelle est utilisée pour quantifier l'écart entre le modèle et les données réelles. La minimisation de cette fonction permet d'ajuster les paramètres du modèle de manière à rendre les prédictions du modèle aussi proches que possible des observations expérimentales.

En implémentant cette fonction, on peut maintenant représenter les trois courbes : la courbe expérimentale, la courbe obtenue grâce au premier modèle, et la courbe optimisée.

Malgré une convergence du modèle optimisé vers les données expérimentales et le modèle Kelvin Voigt, il y a des écarts flagrants entre les deux courbes, notamment au cours des 5 premiers jours. Il faudrait donc améliorer les fonctions d'optimisations afin de les éviter.

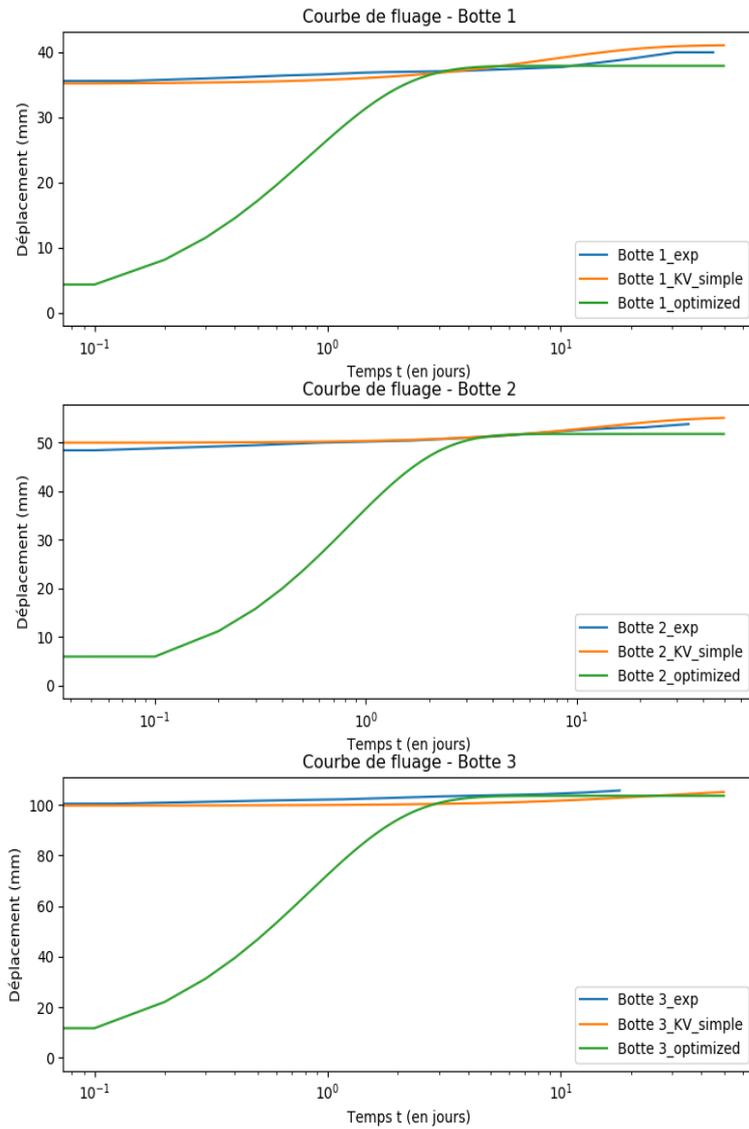


FIGURE 67. Courbes de déplacement (mm) en fonction du temps des bottes matelas (échelle logarithmique)

Références

1. Ouvrages

[DEBO2009]	De Bouter A., King B. (2009) Concevoir des bâtiments en bottes de paille. Champmillon : Éditions La Maison en paille, Paris : Eyrolles, 319 p.
[RIJV2007]	Rijven T. (2007) Entre terre et paille, La Roussière : Éditions Goutte de sable, 216 p.
[FCBA2022]	Institut Technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement). 2022, Mémento. Bordeaux : FCBA, 48p.
[FLOI2012]	Floissac, Luc (2012) La construction en paille : Principes fondamentaux, Techniques de mise en œuvre, Exemples de réalisations. Mens : Éditions Terre Vivante, 383p.
[JONE2015]	Jones B. 2015, Building With Straw Bales : A Practical Manual for Self-Builders and Architects. Cambridge : Green Books, 239p.

2. Articles scientifiques

[NISH1995]	Nishino T., Takano K., Nakamae K. (1995) Elastic modulus of the crystalline regions of cellulose polymorphs Journal of Polymer Science Part B Polymer Physics, 33, 1647-1651
[ABDA2009]	Abdaless B., Mise au Point d'Enduit à Base de Terre sur des Supports en Paille, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon, FRANCE, 2009,
[ASHO2003]	Ashour T. , The Use of Renewable Agricultural by-Products as Building Materials, Zagazig University, Benha Branch, EGYPTE, 2003,
[ASHO2011]	Ashour T. ; Wu W. (2010) The influence of natural reinforcement fibers on erosion properties of earth plaster materials for straw bale buildings. In : Journal of Building Appraisal, vol. 5, n° 4, p. 329-340, DOI : 10.1057/jba.2010.4,
[ATBA2009]	ATBA, l'Atelier, Bureau d'Architectes SA, Cauderay, E., Fuchs, S., Krumm, O. mars 2009. La construction en Botte de Paille, étude de faisabilité, Lausanne : ATBA.
[BILE1999]	Bilello ; Russell (17/03/99) Missile Perforation Threshold Speeds for Straw bale Wall Construction with a Stucco Finish. The Wind Engineering Research Center. The Wind Engineering Research Center.
[BLUM2002]	Blum ; K. Dick, Load Carrying of On Edge Straw Bale Walls, Université de Manitoba, Manitoba, ETATS-UNIS, 2002
[BOUA1993]	Bou-Ali G., Straw bales and straw bale wall systems. University of Arizona. Desille, Julien (2010a) Capacité portante des murs en bottes de paille enduits. Synthèse bibliographique. ENTPE Lyon
[BROJ2014]	Brojan L.& Clouston P. (2014). Effect of plaster type and loading orientation on compression behavior of straw bales for construction. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 9. 1645-1652.

[BUST2018]	Bustarret G., Hamelin C., Quirant J., Soubrier T.; Brillard F. (23/05/18) Essai d'impact 900J sur mur en Paille Porteuse.
[BUST2018]	Bustarret G., Hamelin C.,(09/18) Fluage des murs en bottes de paille : l'état de l'art. Avec la collaboration de Association Nebraska. Grenoble. En ligne : http://nebraskaconstruction.fr/wp-content/uploads/2019/02/FLUAGE-SYNTHESE-NEBRASKA-2018.pdf , consulté le 29 janvier 2020,
[DANI1996]	Danielewicz I., Fitz C.; Hofbauer W.; Klátecki M.; Krick B. Grundlagen zur bauaufsichtlichen Anerkennung der Strohbottenbauweise- Weiterentwicklung der lastragenden Konstruktionsart und Optimierung der bauphysikalischen performance », - Recherche Google. Avec la collaboration de FACHVERBAND STROHBOTTEN DEUTSCHLAND (FASBA).
[CARR1996]	Carrick, Preliminary Test Results Straw Bale Walls, University of New South Wales, Randwick, AUSTRALIE, 1997,
[CHAP2009]	L. Chapman B. Platts &, Developing and Testing the "Prestressed Nebraska" Method for Improved Production of Baled Fibre Housing, Canada Mortgage and Housing Corporation, 1996,
[DEBO2009]	De Bouter, André; King, Bruce. (2009) Concevoir des bâtiments en bottes de paille. Champmillon, Paris : la Maison en paille; Eyrolles.
[DESI2010]	Desille, Julien (2010a) Capacité portante des murs en bottes de paille enduits. Synthèse bibliographique. ENTPE Lyon.
[DICK2009]	Dick K., Krahn T., Strawbotte Building System Research and Ongoing Research at the Alternative Village, University of Manitoba, Manitoba, ETATS-UNIS, 2009,
[DONA2003]	Donahue K. (2003) Testing of straw bale walls with out of plane loads - Preliminary report
[DONA2012]	Donahue, K.; Hammer, M.; Aschheim, M. (2012) What is Strawbotte Construction? Part 2 : Out-of-plane, Uplift and Gravity Behavior and Design. In : STRUCTURE magazine, 10/2012
[DREG2002]	D. Dreger & K. Dick, Compression Resistance of a Stuccoed Straw Bale Wall, Université de Manitoba, Winnipeg, CANADA, 2002
[ELGH1993]	El Gharbi A.Z. (1993) Etude Expérimentale du Comportement Mécanique des Murs en Brique de Terre Crue, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Lyon.
[FIEL2005]	K. Field, J. Woods, C. Fedrigo, Structural Testing of Straw Bales in Axial Compression, University of New South Wales, Sydney, AUSTRALIE, 2005,
[GARA2009]	G. Garas, M. Hala, M. El Kady & A. El Alfy, Compressibility of Single Un-rendered Rice Straw Bales :Characteristics of Bales Used for Building, Dokki El Tahrir St., Le Caire, EGYPTE, 2009,
[GRAN1999]	M. F. Grandsaert, A Compression Test of Plastered Straw-Bale Walls, University of Colorado, Boulder, ETATS-UNIS, 1999,
[JAFF2011]	Jafferji Hajar; Raczka Karina; Wang Yao (2011) Straw bale Construction : The Application In Massachusetts.
[JALA2013]	Jalali, S.; Aschheim, M.; Hammer, M.; Donahue, K. (2013) Seismic Design Factors and Allowable Shears for Strawbotte Wall Assemblies. Department of Civil Engineering Santa Clara University.
[KIM2012]	YJ Kim, A Reberg, M Hossain (2012) Bio-Building Materials for Load-Bearing Applications : Conceptual Development of Reinforced Plastered Straw Bale Composite Sandwich Walls. Journal of performance of constructed facilities 26 (1), 38-45
[KONE2014]	Konečný, P., Teslík, J., & Hamala, M. (2013). Mechanical and Physical Properties of Straw Bales. In Advanced Materials Research (Vol. 649, pp. 250–253). Trans Tech Publications, Ltd.

[LECO2017]	Lecompte, T., & Le Duigou, A. (2017). Mechanics of straw bales for building applications. <i>Academic Journal of Civil Engineering</i> , 35(2), 306-313. https://doi.org/10.26168/icbbm2017.46
[LERN2003]	Lerner K.; Donahue K. (2003) Structural testing of plasters for straw bale construction.
[MACD2008]	C. MacDougall, Effect of Mesh and Bale Orientation on the Strength Straw Bale Walls, Queen's University, Kingston, CANADA, 2008
[MAR2003]	D. Mar, Bearing Test of Plastered Straw Bales, Ecological Building Network, Sausalito, Californie, 2003,
[MARA2017]	Maraldi, M., Molari, G., Molari, L., & Regazzi, N. (2017). Straw bales for buildings : mechanical behaviour under compression. <i>Academic Journal of Civil Engineering</i> , 35(2), 300-305. https://doi.org/10.26168/icbbm2017.45
[MARA2018]	Maraldi, Mirko; Molari, Luisa; Molari, Giovanni; Regazzi, Nicolò (2018) Time-dependent mechanical properties of straw bales for use in construction. In : <i>Biosystems Engineering</i> , vol. 172, p. 75–83, DOI : 10.1016/j.biosystemseng.2018.05.014,
[NICH2000]	Nichols; Raap (2000) Straw bale Shear Wall Lateral Load Test. California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
[OLIV1994]	Olivier M. (1994) <i>Le Matériau Terre</i> , Institut National de Sciences Appliquées, Lyon, France, 1994, Olivier M., Rojat F., Forêt G., Hamelin C., éd. (2012) <i>Construction en paille porteuse – méthodologie d'essais du comportement mécanique</i> . Colloque International Francophone NoMaD 2012, Toulouse, France, 19-20 Novembre 2012,
[PLAT1996]	B. Platts & L. Chapman, Developing and Testing the “Prestressed Nebraska” Method for Improved Production of Baled Fibre Housing, Canada Mortgage and Housing Corporation, 1996
[ROUS2014]	Rousset et al. 2014« Les litières en élevage : identification, test et évaluation des techniques ou des pratiques consistant à mieux gérer les litières avec moins de matériaux », <i>Innovations Agronomiques</i> n°34 (2014). 403-415
[SHIF2019]	Shiferaw Benjamin, Modélisation de la fissuration en milieu viscoélastique par approche Thick Level Set pour application au cas des enrobés bitumineux, Département des matériaux et des structures, Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR - MAST), 2019
[SMIT2003]	Smith Daniel (2003) Creep in botte straw.
[STEP2000]	D. Stephens, Budinger & associates, Inc. Essai en Laboratoire, Spokane, Washington, ETATS-UNIS, 2000,
[TAYL2006]	Taylor, Brendon; Vardy, Stephen; MacDougall, Colin (2006) Compressive Strength Testing of Earthen Plasters For Straw bale Wall Application. In : Mahesh D. Pandey, Wei-Chau Xie et Lei Xu, coord. : <i>Advances in engineering structures, mechanics construction</i> . Proceedings of an International conference on advances in engineering structures, mechanics construction, held in Waterloo, Ontario, Canada, May 14-17, 2006, 140e tome. Dordrecht : Springer (<i>Solid Mechanics and Its Applications</i> , vol. 140), p. 175–183,
[TRUO2008]	Truong, Montes, Singh, Aschheim, éd. (2008) Shear strength of straw bales plasters. The 14 World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, Chine, 12 au 17 Octobre 2008, Beijing, Chine. En ligne : https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/14_2-01-0246 , PDF
[VARD2006]	Vardy S, Mac Dougall C, Compressive testing and analysis of plastered straw bales. <i>Journal of Green Building</i> , 2006 1(1), pp.63-79.
[VARD2009]	Vardy, Stephen (2009) <i>Structural Behaviour of Plastered Straw bale Assemblies Under Concentric and Eccentric Loading.doc</i> . Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

[WALK2004]	P. Walker, Compression load testing straw bale walls, University of Bath, Bath, ALLEMAGNE, 2004,
[WATT1995]	Watts, K., Wilkie, K., Thompson, K., and Corson, J. (1995) Thermal and Mechanical Properties of Straw Bales As They Relate to a Straw House” Canadian Society of Agricultural Engineering Paper No 95-209, Ottawa, Ontario.
[ZHAN2002]	Zhang (2002) Load Carrying Characteristics of a Single Straw Bale Under Compression, University of Western Sydney, AUSTRALIA

3. Articles et rapports de presse

[ESCA2021]	Escalona, A. (2021) La Chine vide la France de ses forêts et de son bois, une "aberration économique et écologique" selon les instances. Journal <i>La Dépêche</i> .
[MINI2020_RE2020]	Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires (2020) RE 2020 Éco-construire pour le confort de tous – dossier de presse
[OHEN2021]	Oheneba, M. (2021) L'épineuse situation de la filière bois française. Journal Libération.
[RFCP2020_batiactu]	C.P, RFCP (2020) Pour les constructeurs paille, la RE2020 va "dans le bon sens" mais... Journal Batiactu.

4. Rapports de tests et de recherche

[AGPB2020]	AGPB (2020), Rapport d'activités 2019-2020 : Un nouveau pacte avec la société, Juin 2020.
[AGRE2022_stat_agri]	Agreste (2022) Statistique agricole annuelle 2021 (Version corrigée) - Chiffres définitifs - Chiffres et données N° 2022-15, Paru le : 23/11/2022 Mis à jour le : 06/12/2022
[BERT2012]	Bert, Hadj-Sahraoui, Leyval, Fontaine et Ouvrard (2012) Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : Etat de l'art et guise de mise en œuvre. ADEME, INERIS.
[COUD2022]	Coudert, S. et al. (2022) La scierie de feuillus du futur : quels choix stratégiques pour demain ? - NESE no 50, Décembre 2021, pp. 67-107
[CSTB2009]	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) (2009) Rapport d'essai n°26021044 concernant le comportement au feu d'un élément de façade. Marne-la-Vallée.
[DERA2014]	Deragne - Réseau Français de la Construction en Paille (RFCP) (2014) Tirer parti des évolutions des pratiques agricoles – Présentation de novembre 2014
[DONO2009]	Donovan, D. (2009) Seismic performance of Innovative straw Bale Wall Systems, Paksbab Seismic Research Project. Reno : University of Nevada, Reno, Novembre 2009.
[FCBA2010_feu]	Institut Technologique FCBA (Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement). 2010, Rapport d'essai réaction au feu n°404/10/260 du 06/10/2010, Bordeaux : FCBA.
[FCBA2010_termites]	Institut Technologique FCBA (2010) Rapport d'essai n°401/10/092Z/b/5 du 04/1, /10, Entomologie, Paille 5, Vérification de l'appétence vis-à-vis des termites selon EN 117 adaptée. Bordeaux : FCBA.
[FCBA2012_feu]	Institut Technologique FCBA (2012) Rapport de classement de la réaction au feu conformément à l'EN 13501-1 :2007, Bordeaux : FCBA.
[LRA2014]	Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse(LRA) et Association Les Amis de la Terre (2014) Disponibilités en terres arables métropolitaines pour une production soutenable de matériaux biosourcés pour la construction/réhabilitation de bâtiments compatibles avec les objectifs « Grenelle ». Projet de Recherche : TERRACREA. 182 p.
[ONRB2020]	L'Observatoire National des Ressources en Biomasse (ONRB) – FranceAgrimer (2020) Évaluation des ressources agricoles et agroalimentaires disponibles en France – édition 2020
[VERI2013]	Bureau VERITAS (2013) Etiquetage des émissions en polluants volatils d'une «botte de paille» fournie par le RFCP selon les normes ISO 16000 Rapport d'analyse N° D-010713-05230

5. Normes et réglementations

[ASTM2022]	ASTM E119-16a (2022) Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. Version de 2022
[CSBC2021]	California Health and Safety Code - HSC § 18944,40 (2021) Version de 2021
[RFCP2012]	Réseau Français de la Construction en Paille (RFCP) (2012) Règles professionnelles de construction en paille : Remplissage isolant et support d'enduit, Règles CP 2012, 1 ^{ère} édition. Paris : Éditions Le Moniteur
[RFCP2018]	Réseau Français de la Construction en Paille (RFCP) (2018) Règles professionnelles de construction en paille : Remplissage isolant et support d'enduit, Règles CP 2018, 3 ^{ème} édition. Paris : Éditions Le Moniteur
[RFCP2023]	Réseau Français de la Construction en Paille (RFCP) (2018) Règles professionnelles de construction en paille porteuse : Règles CP 2023, En cours de validation
[SNAB2022]	School of Natural Building (SNaB) and EU Interreg-funded UP STRAW project (2022) Technical Guide First Edition 2022

6. Textes législatifs

[PARL2015]	Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne (2015) Directive (UE) 2015/1513 du Parlement européen et du Conseil du 9 septembre 2015, v. init.
[PARL2018]	Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne (2018) Directive (UE) 2018/2001 du Parlement européen et du Conseil du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE.)
[LESU2019]	Lesueur et al. pour le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (2019) Mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France

7. Films et vidéos

[SNEL2004]	Snel, H. (2004) Bâtir en bottes de paille, Redécouverte d'un ancien matériau de construction [DVD], Ökofilm, 43mn.
[SNEL2015]	Snel, H. (2015) Des maisons en paille, 10 ans plus tard [DVD], Ökofilm, 63min (+ 17mn de bonus-matériel).

8. Sites web

[ECOL2022]	Site du Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires sur les biocarburants. Disponible au : https://www.ecologie.gouv.fr/biocarburants
[SCHMIDT_web]	Atelier Werner Schmidt (SCHMIDT). Häufig Gestellte Fragen Zum Thema Strohballenbau (“foire aux questions sur la construction en paille”)
[AGRE2022_tabledyn]	Tableau dynamique de l’Agreste disponible au : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-saiku/?plugin=true&query=query/open/COMEXTBOIS
[HENR2012_web]	Henry, Mike (2012) The Original Nebraska Straw Bale Buildings en ligne http://thesustainablehome.net/the-original-nebraska-straw-bale-buildings/