

ASSOCIATION RÉGIONALE DE PROMOTION DE L'ÉCO-CONSTRUCTION (ARPE)

BIOBAT : ANALYSE DES BESOINS EN RECHERCHE PARTICIPATIVE SUR LES ÉCOMATÉRIAUX LOCAUX NORMANDS

JANVIER 2020

ARPE NORMANDIE



Association Régionale pour la Promotion
de l'Éco-construction en Normandie



Toutes les infos sur <http://arpe-normandie.com/>

Travail piloté par Arthur Hellouin de Menibus* (en tant que chercheur indépendant)
En collaboration avec Samuel Courgey, expert en éco-construction, association Arcanne
et avec Lyra Herten, Gregory Boulon, François Glaizot et Aurèle Tesson de l'ARPE Normandie

* Contact : arthur.hdm@zacyl.net

Ce document sera référencé ainsi : « *BIOBAT : analyse des besoins en recherche participative sur les écomatériaux locaux Normands*, Arthur Hellouin de Menibus, Samuel Courgey, ARPE, juin 2019. »

Les analyses présentées dans ce document ont été produites avec les connaissances perfectibles des auteurs complétées par celles de certains contributeurs et d'autres experts qui ont été sollicités. Votre expérience ou de nouvelles connaissances pourraient compléter ces analyses. Ainsi, n'hésitez pas à nous faire de vos remarques, et l'utilisation de ces résultats ne saurait engager la responsabilité des auteurs et des contributeurs et experts cités.

Le projet BIOBAT est réalisé avec le soutien de la Fondation de France



Ce travail a été rendu possible par les contributions de professionnels normands de l'éco-construction qui ont pris le temps de partager leurs questionnements, leurs expériences ou de contribuer à certaines analyses produites. Nous les en remercions chaleureusement.

	Artisans	Architectes / Maître d'oeuvre / Bureau d'étude	Distributeur
Calvados (14)	Lawrence Brown Jamet Lyon-Richard Jerôme Chapelle Nicolas Maze Julien Lucas	Antoine Courtois Sophie Demichelis Elise Lambert Ségolène Gogo Aurélié Lepape Jean Hourany Nicolas Knapp Sophie Popot Vincent Doussinault	Jérôme Zucconi
Eure (27)	Dominique Lemire	Paul Bernard Mylène Gajic Pascal Séjourné	-
Manche (50)	Laurent Bouyer Nicolas Duclos Philippe Falaise Benoît Lecardonnel Yohann letouzé Vincent Rosselin Sebastien Ruel	Gregoire Boucé Patrice Croci Michel Frémont Lydie Mouchel François Streiff Romain Travert	Lemière Gilles
Orne (61)	Anthony Stephan Dimitri Bonnafous Yann Delalande Anne Lequertier Laurent Gaillard	Mehdi Cherief Sebastien Blanchet	Emmanuel Cavelier
Seine Maritime (76)	Boris Bourget Guillaume Charrier Camille Deveaud Harold Duschene Laurent Guillot Jan Minn	Frédéric Denise Valérie Parrington	-

Nous remercions également tous les experts qui ont été consultés.

SOMMAIRE

I .	Présentation du projet BIOBAT.....	6
II .	Méthodologie de collecte des besoins de recherche.....	11
III .	Questions collectées et analyses.....	13
1 .	BOIS.....	14
– B1 :	Quelle est la compatibilité de bois locaux et non traités avec des isolants biosourcés ?.....	14
– B2 :	Quelle est la contribution structurelle de parois en torchis ?.....	16
– B3 :	Comment exploiter le bois de haie en éco-construction ?.....	17
– B4 :	Est-ce qu'il existe des référentiels récents sur les charpentes à la Philibert Delorme ?.....	20
– B5 :	Quel bois peut-être mis en paroi verticale en ERP et en quelle épaisseur ?.....	22
– B6 :	Il est difficile de trouver du bois local ou des artisans utilisant ces matériaux.....	24
2 .	MAÇONNERIE.....	25
– M1 :	Quelle est la perméabilité à la vapeur d'eau* du mortier GREB ?.....	25
– M2 :	Peut-on faire du pisé avec du béton concassé et de la terre crue normande ?.....	27
– M3 :	Peut-on étudier les performances de mélanges de papier et de terre crue ?.....	29
– M4 :	Comment démontrer l'écran thermique constitué par les enduits terre ?.....	31
– M5 :	Comment s'assurer qu'un enduit terre ne fissure pas sur un poêle de masse ?.....	33
– M6 :	Peut-on réaliser des recherches sur les dalles en terre crue ?.....	34
– M7 :	Est-ce que le jus d'ensilage augmente la résistance des enduits terre ?.....	36
– M8 :	Quel est l'impact de changer l'agroressource dans les bétons de terre allégée ?.....	38
– M9 :	Quelles sont les performances d'un enduit correcteur thermique terre/végétal ?.....	42
– M10 :	Peut-on classer la performance thermique des enduits chaux-chanvre en fonction de leurs dosages et de la technique de mise en œuvre ?.....	43
– M11 :	Quelles sont les caractéristiques des briques de chaux-chanvre ? Quelles sont les différences entre terre chanvre et chaux chanvre ?.....	45
– M12 :	Peut-on avoir des règles professionnelles ou un DTU sur les dalles en chaux-liège ?.....	46
– M13 :	Que devient le plâtre en fin de vie ?.....	48
– M14 :	Quel est le bilan carbone d'un enduit plâtre comparé à un enduit chaux-sable ?.....	51
– M15 :	Comment peut-être gérée la fin de vie de mélanges terre-plâtre ?.....	55
– M16 :	Quel support d'enduit terre sur un mur de refend porteur de maison paille ?.....	56
– M17 :	Quelle est l'étanchéité à l'air réelle que l'on peut atteindre avec des enduits ?.....	57
– M18 :	Est-il nécessaire de tramer les enduits chaux extérieurs ?.....	59
– M19 :	Quel est l'état des connaissances et les documents techniques applicables pour une pose directe de carrelage sur chape maigre, sans isolant ni dalle supplémentaire ?.....	60
– M20 :	Quelles sont les propriétés thermiques des enduits terre ?.....	62
– M21 :	Quelle technique terre crue est la plus adaptée pour faire une banquette ou une seconde peau de poêle de masse ?.....	63
– M22 :	Comment développer des compétences sur la terre crue ?.....	64
3 .	ISOLATION.....	65
– I1 :	Peut-on développer un isolant souple en éco-matériaux normand ?.....	65
– I2 :	Quelle est la résistance thermique réelle de la paille ?.....	66
– I3 :	Peut-on comparer les isolants du marché sur la base de leur rapport prix/performance,	

durée de vie, résilience* et énergie grise ?.....	68
– I4 : Quelle est l'incidence d'une végétalisation sur une toiture plate dite en toiture chaude sur la migration de la vapeur d'eau ?.....	69
– I5 : Est-ce qu'il peut y avoir des migrations des pesticides dans le bâtiment si l'on utilise des bottes de paille de blé cultivé en conventionnel ?.....	70
– I6 : Quelle est la fin de vie des liants pétrosourcés présents dans les panneaux de chanvre ?.....	75
– I7 : Est ce que les conditions d'une maison risquent de dégrader les éco-matériaux ?.....	76
– I8 : Peut-on définir un étalon à réaliser sur chantier pour valider les performances des bétons biosourcés ?.....	77
– I9 : Peut-on avoir une conductivité thermique reconnue officiellement sur les étoupes de lin ?.	78
– I10 : Où trouver une botteleuse pour faire de petites bottes ?.....	79
– I11 : Quels sont les isolants locaux disposant d'une performance thermique reconnue officiellement ?.....	80
– I12 : Quels éco-matériaux locaux se prêtent bien à l'Isolation Thermique par l'Extérieur ?.....	81
– I13 : Quels matériaux naturels permettent l'isolation de parties enterrées ou d'un terre plein ?	82
– I14 : Peut-on avoir un récapitulatif des alternatives pour l'isolation de sous-toiture ?.....	83
– I15 : Des recherches spécifiques ou partages de savoir-faire peuvent-ils être menés sur tous les aspects liés à la préfabrication en atelier de murs en paille ou en bétons de chanvre ?.....	84
– I16 : Pourrait-il y avoir une structure / personne pour répondre à des questions techniques et scientifiques que l'on rencontre sur chantier ?.....	85
4 . QUESTION D'ORDRE GÉNÉRAL.....	86
– G1 : Peut-on développer un catalogue sur les ponts thermiques dans l'habitat ancien ?.....	86
– G2 : Quelle est la migration réelle de vapeur d'eau au travers de parois avec des enduits ou des membranes ?.....	87
– G3 : Quelle est l'impact de la régulation d'humidité sur la performance globale des parois ?.....	88
– G4 : Peut-on développer des mesures <i>in situ</i> du confort ?.....	89
– G5 : Peut-on réaliser une étude générale pour évaluer si les matériaux biosourcés et les matériaux minéraux ont des impacts environnementaux fondamentalement différents ?.....	90
– G6 : Quel est le bilan carbone des matériaux locaux ?.....	91
– G7 : Peut-on produire une ACV comparée des menuiseries PVC face aux autres menuiseries ?..	92
– G8 : Quelle est la composition du plastique des menuiseries PVC ?.....	93
– G9 : Comment sont recyclées en fin de vie des menuiseries PVC ?.....	94
– G10 : Comment être assuré en chantier participatif en tant que professionnel ?.....	95
– G11 : Comment être assuré en utilisant des matériaux locaux ?.....	96
IV . Bilan.....	97
V . Précisions sur les sujets nécessitant des travaux de R&D.....	100
VI . Glossaire.....	103

I Présentation du projet BIOBAT

Le point de départ du projet BIOBAT est un échange début 2018 entre Aurélie Lepape (décoratrice d'intérieur) et Sophie Popot (architecte), toutes deux administratrices de l'ARPE, et Arthur Hellouin de Menibus. Ils ont notamment soulevé qu'il est difficile de résoudre les questions scientifiques et techniques soulevées par la réalisation du Guide de Bonnes Pratiques sur la construction en Torchis^a et plus généralement sur des éco-matériaux locaux.

Les anciens construisaient avec des matériaux locaux (bois, terre, paille...). Ces matériaux ont été remplacés depuis 1850 par des matériaux issus des industries fortement carbonées. La prise de conscience des limites environnementales et sanitaires de ces matériaux s'est accentuée avec le dérèglement climatique, orientant de plus en plus de citoyens et de professionnels vers l'éco-construction. Pour diverses raisons (réglementaires, normatives, assurantielles, de facilité d'approvisionnement, de perte de savoir-faire...) les éco-matériaux majoritairement utilisés sur chantiers de nos jours sont issus de filières longues. Or, redévelopper une éco-construction adaptée à nos besoins contemporains, avec des matériaux locaux, est un enjeu pour la transition écologique : réduction des émissions carbone, développement économique local, enjeu culturel et patrimonial...

Mais peu de recherches scientifiques sont effectuées sur ces matériaux locaux, qui sont généralement vus comme peu innovants. Avant, les artisans étaient les connaisseurs des matériaux, puisqu'ils les identifiaient et les façonnaient sur le site ou proximité du chantier. De nos jours, des entreprises ou des filières produisent des matériaux qui sont ensuite mis en œuvre par des artisans. Le système de démonstration de performance s'est adapté et les exigences de caractérisation sont désormais fixées au regard de ce que peuvent fournir les entreprises productrices de matériaux ou de filières. Pour les professionnels du bâtiment souhaitant travailler avec des matériaux locaux, ce cadre de démonstration de performance est difficilement atteignable. D'une part les études sont rendues complexes pour couvrir la variabilité des ressources disponibles localement. D'autre part, comment financer ces travaux en absence de producteur ou de filière pouvant répercuter ses dépenses de R&D sur une production ?

Si des travaux de recherche doivent être menés, il est essentiel que ces travaux de recherche soient co-définis et co-réalisés par les professionnels expérimentés et qui mettent en œuvre ces matériaux. En effet, d'une part ce sont eux qui sont sur le terrain et qui seront capables de déployer la solution proposée, pour faire que la recherche produite ait un impact réel sur le monde. D'autre part, ils peuvent intégrer des facettes de la problématique qui échappent au seul questionnement scientifique, notamment concernant l'approvisionnement et la faisabilité technique ou économique, qui sont essentielles pour définir en amont si une solution potentielle est pertinente dans sa globalité. De plus, les performances des modes constructifs avec des matériaux locaux peuvent dépendre du savoir-faire des professionnels qui le mettent en œuvre. Enfin, la méthodologie d'application des résultats sur le terrain doit être conçue avec les professionnels, afin de définir des protocoles ou des exigences qui n'ont pas pour effet de dénaturer les savoir-faire ou de standardiser les matériaux.

L'Homme a aujourd'hui le plus de connaissances scientifiques qu'il n'ait jamais eu, mais pour autant nous n'avons jamais été aussi près de faire disparaître l'espèce humaine. Ainsi, il ne suffit pas de financer des

a Ce guide sur le torchis est réalisé en parallèle de 5 autres guides sur des techniques de construction en terre crue : enduits, terre-allégée, pisé, bauge et briques. Ce travail financé par la DHUP (Direction de l'Habitat de l'Urbanisme et des Paysages) vise à rassembler des personnes expérimentées pour produire des guides techniques. L'objectif est de diffuser ces savoir-faire et de faciliter la reconnaissance de ces modes constructifs. La réalisation du guide Torchis a été confiée à l'ARPE et ce guide a été publié en avril 2019.

recherches pour que des laboratoires travaillent sur les matériaux locaux. La démarche de BIOBAT vise à suivre une autre manière d'acquérir de nouvelles connaissances par la recherche participative. Cela vise à mettre au même niveau le savoir-faire de terrain et l'expertise de chercheurs professionnels pour créer des connaissances nouvelles.

Le point de départ de BIOBAT est d'identifier si le besoin est réel, c'est-à-dire de collecter les questions des professionnels normands sur les éco-matériaux locaux. Puis, Arthur Hellouin de Menibus, chercheur indépendant, et Samuel Courgey, expert indépendant, ont analysé les questions posées, en sollicitant d'autres experts ponctuellement. L'analyse visait à identifier les questions pour lesquelles une réponse semble exister avec les connaissances actuelles, et les questions qui nécessitent un travail de R&D. Ces analyses ont été envoyées à tous ceux ayant posées les questions. Leurs retours ont été collectés pour compléter les analyses. Enfin, un panel de 7 experts régionaux se sont prononcés sur le niveau de priorité des recherches à menées.

BIOBAT se conclut avec :

- une liste de questions posées par des professionnels normands de l'éco-construction avec des matériaux locaux.
- l'analyse consolidée de ces questions, qui a vocation à être communiquée largement.
- l'identification des questions méritant un travail de R&D participative.

Le projet BIOBAT a été écrit par Arthur Hellouin de Menibus, Gregory Boulen et Sophie Popot. Le projet a été porté par l'ARPE, fort de son réseau de professionnels de l'éco-construction Normands. Il a été présenté à la Fondation de France en mars 2018, qui a décidé de soutenir le projet. Un logo et un flyer du projet ont été créés, ils sont placés ci-après.

Ils sont intervenus dans la réalisation de BIOBAT



Gregory Boulen
ARPE
Montage, stratégie et suivi admin.



Samuel Courgey
Association Arcanne
Relecture et compléter les analyses produites



François Glaizot
ARPE
Co-pilotage de BIOBAT



Arthur Hellouin de Menibus
Chercheur indépendant
Pilotage opérationnel de BIOBAT



Lyra Herten
ARPE
Communication (flyer, logo, diffusion)



Aurele Tesson
ARPE
Participation à la collecte de question

Participez au projet

BIO-BAT



*Projet de recherche participative
sur les matériaux locaux **BIO**-sourcés
dans les **BAT**iments*



Qu'est ce que le projet **BIO-BAT** ?

Dans un contexte d'urgence climatique, le développement de l'éco-construction est un enjeu primordial. L'utilisation des matériaux bio-sourcés locaux répond aux besoins contemporains tout en œuvrant pour la transition écologique.

Cependant, les matériaux biosourcés locaux peuvent présenter des variabilités liées à leur source d'approvisionnement et il manque parfois des éléments de connaissances sur leurs performances.

Ces matériaux n'ayant pas de producteur puissant, et étant surtout utilisés par des professionnels indépendants, ils font l'objet de peu de travaux de recherches.

L'ARPE Normandie a monté le projet Bio-Bat afin d'impulser des projets de recherche participatives sur les matériaux normands pour l'éco-construction.

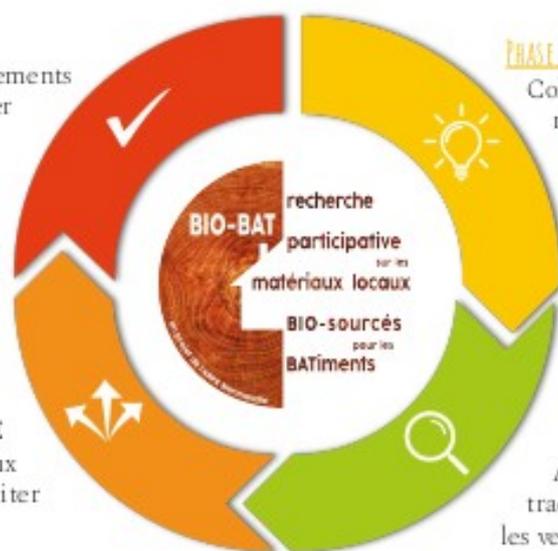
La recherche participative vise à associer des compétences scientifiques (chercheurs) à des experts de métier (artisan, architecte, bureaux d'études...) afin de co-construire des connaissances nouvelles et utiles pour la transition écologique.

PHASE 1 : MONTAGE DE PROJET

Élaborer des pistes de financements pour les sujets et accompagner leur montage et réalisation.

PHASE 3 : CONCERTATION

Présentation des thématiques de recherches à des membres actifs de l'ARPE et experts en biosourcés locaux pour déterminer comment traiter les sujets d'étude identifiés.



PHASE 1 : IDENTIFIER LES BESOINS DE RECHERCHE

Collecte des besoins de recherches auprès de professionnels Normands.

PHASE 2 : ANALYSE DES SUJETS DE RECHERCHE PROPOSÉS

Analyse des besoins et traduction en sujets de recherche, les verrous scientifiques identifiés.

II Méthodologie de collecte des besoins de recherche

La collecte des besoins a été réalisée de décembre 2018 à avril 2019, auprès des adhérents professionnels de l'ARPE à jour ou non d'adhésion, par contact mail d'abord puis téléphonique. Le flyer a été distribué sur internet et en version papier, notamment lors du Club Régionale de l'Economie Circulaire en février 2019. Il mentionne un lien internet permettant de compléter un sondage en ligne. Par ailleurs, plusieurs réseaux ont été ciblés pour élargir le nombre de sondés : la Fédération Française du Bâtiment (FFB), la Confédération de l'artisanat et des petites entreprises du bâtiment (CAPEB) Professions Bois Normandie, la Coopérative d'Activité et d'emploi des Chantiers de Demain, l'Association Pierre et masse, le réseau des rénovateurs BBC de Normandie, les associations Maisons Paysannes de l'Eure, du Calvados, de l'Orne et de la Manche, L'Agence Locale de l'Energie et du Climat de l'Eure (ALEC) 27 et le Centre d'Initiation aux Énergies Renouvelables (CIER)¹⁴.

Au total, 91 personnes ont été sollicitées :

- 29 architectes, bureaux d'études ou distributeurs : 13 très intéressés, 13 sont intéressés et 3 ne sont pas intéressés par le projet ;
- 26 maçons, charpentiers, isolateurs, électricien/plombiers : 7 sont très intéressés, 16 sont intéressés et 3 ne sont pas intéressés par le projet ;
- 36 n'ont pas donné de réponses.

Les 91 sondés et les 49 personnes ayant déclaré être intéressés par le projet couvrent bien le territoire normand (illustration 1).

Cela représente 90 % de retours positifs pour ceux qui ont répondu. Il y a près de 40 % de non-réponse, que l'on peut attribuer à un désintérêt pour le projet ou pour certains acteurs que nous connaissons par ailleurs, de la difficulté à libérer du temps pour ce sujet ou de la priorisation d'autres problématiques.

La majorité des retours ont été obtenus par téléphone (75) et le reste par sondage (16). Il semble qu'aucun retour ne proviennent directement de membres des structures syndicales du bâtiment (FFB, CAPEB) ou du réseau des rénovateurs BBC normands, sauf pour ceux par ailleurs adhérents de l'ARPE. Une seule personne non membre de l'ARPE a répondu.

Il n'est pas simple d'avoir des retours des professionnels sur ce type de projet, très probablement du fait de la charge de travail des acteurs du bâtiment. Le contact téléphonique est le moyen le plus efficace de mobiliser ce public.

Les personnes intéressées ont posé entre 0 et 4 questions.



*Illustration 1 : bilan de la collecte des besoins de recherche.
 En bleu les architectes, bureau d'étude et distributeurs intéressés,
 en vert les artisans intéressés,
 en rouge les personnes non intéressées
 et en cercle gris les non-réponses.*

III Questions collectées et analyses

Premièrement, certaines questions ont été clarifiées pour faire ressortir clairement la problématique, et les questions similaires ont été rassemblées. Une fois rassemblé, 55 questions sont à traiter. Elles ont été anonymisées pour qu'elles puissent être diffusées.

Elles ont été séparées en 4 grandes catégories :

- 6 questions sur le bois,
- 22 questions sur la maçonnerie (bétons biosourcés inclus),
- 16 questions sur l'isolation,
- 11 questions d'ordre général.

Certaines questions sont transverses, elles ont été classifiées dans une seule des catégories pour éviter les répétitions.

Ces questions ont été présentées une première fois lors de l'assemblée générale de l'ARPE le 27 avril 2019, à l'aide du document « BIOBAT : bilan de la collecte des besoins en recherche participative sur les éco-matériaux locaux normands, Arthur Hellouin de Menibus, ARPE, mai 2019. ».



Illustration 2: Assemblée générale de l'ARPE en 2018

Les questions ont ensuite été analysées par Arthur Hellouin de Menibus, puis par Samuel Courgey. Les analyses ont été transmises à ceux ayant posé les questions. Leurs retours ont permis de consolider les analyses produites.

Un glossaire est situé en fin de rapport pour détailler certains termes techniques identifiés par un astérisque *.

1 Bois

Question	B1 : Quelle est la compatibilité de bois locaux et non traités avec des isolants biosourcés ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Les classes d'emploi du bois sont définies ainsi :

- Classe 1 (humidité toujours inférieure à 20 %) ;
- Classe 2 (humidité ponctuellement supérieure à 20 %) ;
- Classe 3 (Bois soumis à des alternances d'humidité supérieure à 20 % et de sécheresse - divisée en deux sous catégories 3.1 et 3.2) ;
- Classe 4 (humidité toujours supérieure à 20 %) ;
- Classe 5 (Bois en contact permanent avec l'eau de mer).

Une humidité de 20 % en masse dans un bois correspond à une humidité relative dans l'air de l'ordre de 90 %.

Le DTU 31.2^a indique que les montants d'ossature protégés des intempéries ou un solivage intérieur, un bois classe 2 ou mieux est adapté, hors contact direct avec le sol ou local humide. Une ossature exposées aux intempéries (pour un torchis par exemple) serait classe 3.1 ou 3.2 selon la massivité des bois, leurs défauts et les conditions climatiques affectant la paroi et la lisse basse peut être de classe 4^b.

Un bois peut être naturellement durable ou à durabilité conférée par traitement (en autoclave, par trempage ou par aspersion). La durabilité est liée à la résistance à la dégradation du bois liée à l'humidité, aux insectes xylophages, termites et champignons. La classe des bois sans traitement est indiquée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : classe d'emploi des bois sans traitement

Classe des bois sans traitement	Essence
1	Tilleul
2	Bouleau, Chêne rouge, Hêtre, Frêne, Orme, Erable, Noyer...
3.1	Peuplier, Douglas, Pin maritime, Pin sylvestre...
3.2	Mélèze, Cèdre, Western red cedar
4	Châtaigner, Chêne, Robinier

Les isolants biosourcés secs, telle que la ouate de cellulose, la chènevotte, la laine de chanvre ou la laine

a Le DTU 31.2 est cité ici car c'est une référence technique récente sur l'utilisation de bois en construction. Néanmoins, il indique dans son domaine d'application qu'il ne « vise pas les constructions à pan de bois comportant des remplissages (maçonnerie, torchis, paille, etc.). » dans sa version 2011, et la nouvelle version de 2019 n'évoque pas les isolants biosourcés.

b Information donnée par le charpentier J.L Le Roux co-rédacteur du **guide de bonnes pratiques*** du torchis.

de bois, ont une **sorption*** similaire. Ils atteignent un taux d'humidité de 7 à 10 % en masse lorsque l'air est à 50 % d'humidité relative. Dans ce cas, si elle n'est pas apparente, une ossature classe 2 est satisfaisante, à partir du moment où l'ensemble des matériaux entre isolant et air extérieur est très ouvert à la vapeur. Si le contreventement se fait coté extérieur on évitera les OSB pour des panneaux ayant un Sd de l'ordre de 0.20 à 0.30.

Dans le cas de bétons biosourcés (chaux-chanvre, terre-chanvre, terre-paille) et du torchis, des montants bois peuvent-être enrobés dans le mélange et subir la phase de séchage. Les règles professionnelles Construire en Chanvre version 2012 recommandent un bois classe 2 si l'ossature est noyée et classe 3 si elle est exposée aux intempéries sur une face. Le guide de bonne pratique torchis recommande également des bois de classe 2, 3.1 ou 3.2 selon la massivité des bois, la conception de la paroi et du bâtiment ou encore les conditions climatiques extérieures.

Pour les bétons de terre allégée (terre-paille, terre-chanvre), la classe des bois peut être liée au séchage si l'ossature est noyée. Le terre-paille banché à 250 ou 450 kg/m³ de 30 à 40 cm peut présenter un niveau d'humidité relative supérieure à 90 % à cœur pendant 5 mois ou plus^{1, 2, 3}. La cinétique de séchage dépend de la masse volumique du mélange, de la méthode de mise en œuvre (banchage manuel ou projection mécanisée), de la conception de la paroi ou encore du climat. Néanmoins, en l'état des connaissances, si l'ossature est noyée à cœur d'un mélange terre-allégée, un bois classe 3.1 semble avisée. Le comité de pilotage du Guide de Bonnes Pratiques terre-allégée travaille pour affiner cette réponse.

Concernant la construction paille, nous serons dans la situation « isolant biosourcé sec » ci-avant mentionnée, excepté dans la technique du GREB, qui, principalement pour son ossature externe, pourrait nécessiter un bois de classe 3.1 selon la zone géographique, le type de finition et l'exposition de la façade.

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	Il serait intéressant d'étudier la cinétique de séchage de béton de terre-allégée dans différentes configurations.			

Question	B2 : Quelle est la contribution structurelle de parois en torchis ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Cette question a émergée dans le Guide de Bonnes Pratiques* du torchis. Le torchis pourrait contribuer au contreventement et à la résistance au flambement. La reconnaissance de l'apport structurel du torchis pourrait permettre de réduire les sections de bois. Aucune donnée n'est disponible à ce jour sur cette thématique, et la question est rendue complexe par deux aspects :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la diversité de pratiques torchis recensés, tant dans les mélanges terre - fibres que dans les types de supports bois pour recevoir le torchis (deux exemples sont illustrés ci-dessous) ; • la difficulté à faire officialiser d'éventuels résultats de recherche pour pouvoir réellement pouvoir intégrer la contribution mécanique du torchis au contreventement. <p>Un scientifique à l'Université de Lorient à commencer à travailler sur ce sujet en lien avec le charpentier J.L. Le Roux.</p>				
				
<p><i>Illustration 3: support bois de type « clayonnage »</i></p>		<p><i>Illustration 4: support bois de type « barreaudage » (rentré en force)</i></p>		
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D Labo
	<ul style="list-style-type: none"> • L'artisan intéressé par cette question sera mis en lien avec l'Université de Lorient. • Un bilan de l'observation du patrimoine bâti relatif à l'éventuelle réduction des sections de bois par rapport aux pratiques actuelles serait intéressant. 			

Question	B3 : Comment exploiter le bois de haie en éco-construction ?			
Précisions	La question est posée deux fois : <ul style="list-style-type: none"> • Valoriser le petit bois (<7 cm). • Valoriser le bois de grande section : cloisons, garde-corps, claire voies, etc. 			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Bois de petite section

Le petit bois est laissé sur place après collecte des grands bois. Ces branchages peuvent être passés au broyeur à marteaux pour donner du copeau, ou au broyeur à fléaux pour donner des fibres qui ont une certaine souplesse. Ces deux matériaux pèsent environ 270 kg/m³ une fois séché en conditions ambiantes. La valorisation est faite pour du paillage entre 30 et 65 €/m³.



Illustration 5: copeaux issus d'un broyage aux marteaux



Illustration 6: fibres issues d'un broyage aux fléaux

La masse volumique des copeaux ou des fibres est de l'ordre de 270 kg/m³, contre environ 100 kg/m³ pour la chènevotte, les anas de lin ou le roseau.

Cela se traduit par deux désavantages :

- la conductivité thermique des copeaux ou des fibres estimée entre 0,06 et 0,08 W/m.K, contre 0,045 – 0,050 W/m.K pour la chènevotte ;
- Le déplacement de l'isolant vers le chantier ou sur chantier et rendu plus pénible du fait de la masse volumique plus importante.

Un béton biosourcé associant ces copeaux ou fibres avec de la terre crue par exemple, donnera un mélange plus lourd que si les autres granulats cités ci-dessus étaient utilisés, ce qui pénalisera la performance isolante.

Ainsi, il n'y a pas d'intérêt particulier à utiliser des copeaux ou des fibres issues du bois de haie en isolant sec ou en mélange de terre allégée pour isoler thermiquement.

Par contre, le petit bois de haie peut être utilisé en remplissage de cloisons et de plancher sur lambourdes. En effet, dans des cloisons de type plaque - isolant - plaque, l'important pour réduire la transmission phonique est de ne pas laisser vide la cavité entre les deux plaques (ou entre lambourdes pour un plancher) et la remplir par un matériau léger et souple. Le fait que la masse volumique des copeaux ou fibres soit plus élevée (270 kg/m^3) que d'autres isolants ne pénalisera pas la performance de transmission phonique mais n'apportera pas d'avantage non plus.

Néanmoins, le matériau est plus lourd, attention à la charge apportée en planchers, et encore une fois : cela rendra plus pénible le déplacement des matériaux.

Pour conclure, le petit bois de haie n'a pas de fort potentiel de valorisation en éco-construction compte tenu des biosourcés déjà disponibles (anas de lin, chènevottes, fibres végétales), qui sont plus légers et isolants.

Si du bois est disponible sur un terrain, il peut toutefois être utilisé « en remplissage » pour des travaux dans une démarche de valorisation des ressources locales et puisqu'il est moins cher que les granulats (à titre de comparaison, la chènevotte est vendue $\sim 70 \text{ €HT/m}^3$).

Ce petit bois peut également servir en bois énergie (le prix indiqué étant inférieur ou similaire au prix d'un stère de bois de chauffage) et rappelons-le : en paillage.

Bois de plus grande section

Le rapport « produire du bois d'œuvre dans le bocage », Chambre d'agriculture d'Ille-et-Vilaine 2015 est intéressant à ce sujet. Il montre des exemples de réalisations et donne des indicatifs de coûts et de rentabilité de valorisation du bois de haie. Les bois peuvent être abattus ($15\text{-}20 \text{ €/m}^3$ de grume), puis travaillés à la scie mobile ($70\text{-}90 \text{ €HT/m}^3$ grume). La valeur sur pied d'un chêne ou châtaigner de bonne qualité sur pied est de 90 à 180 €/m^3 . Un bois de moins bonne qualité mais utilisable en construction vaut sur pied entre 60 et 90 €/m^3 .

L'expérimentation à Bréteil (Ille-et-Vilaine) « Valorisation des haies bocagères en bois d'œuvre pour les projets d'aménagements » est documentée par l'association bretonne BRUDED. Le bois a servi pour réaliser des aménagements d'un parc avec des jeux pour enfants et un pont. D'autres exemples bretons sont recensés dans un autre rapport⁴.

Ces exemples montrent qu'il est possible de valoriser le bois de haie, mais peu de constructeurs s'intéressent désormais aux bois courbés, qui nécessitent parfois d'adapter les projets à la ressource disponible. Cependant, les bois courbes peuvent permettre d'obtenir d'excellentes pièces de charpente, tel que les jambes de forces où la fibre du bois suit la courbure de la pièce de bois (exemple ci-contre).

Sessions rectilignes en bois rond

Lorsque des bois de section suffisante sont présents, il serait pertinent d'un point de vue mécanique d'utiliser des bois ronds



Illustration 7: pièce de charpente naturellement courbée au niveau de sa pénétration dans un mur en bauge dans une bâtisse d'Ille et Villaine

pour la structure bois noyée dans un béton biosourcé, plutôt que des bois à section carrée ou rectangulaire.				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Des expérimentations de chantier ont-elles déjà eu lieu en Normandie ? Si oui, il serait utile d'en faire le retour d'expérience et le récit.			

Question	B4 : Est-ce qu'il existe des référentiels récents sur les charpentes à la Philibert Delorme ?			
Précisions	Recherche notamment des éléments sur le dimensionnement.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Les charpentes à la Philibert Delorme consiste à utiliser des bois de petite section, assemblés les uns aux autres, pour franchir de grandes portées dans une forme circulaire.

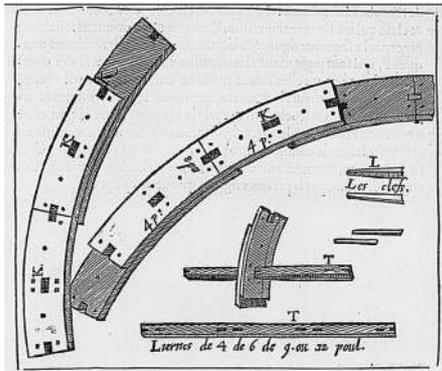


Illustration 8: détail d'assemblage
(source : livre original de Philibert Delorme)

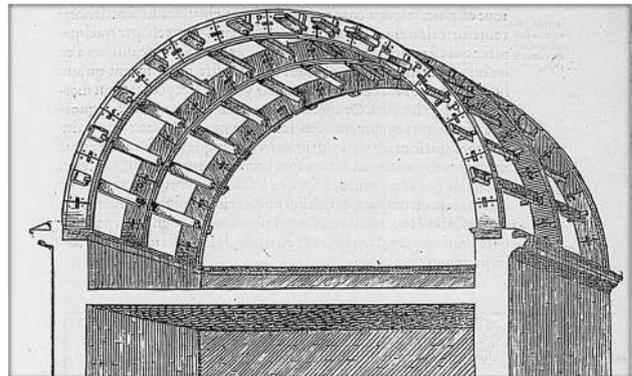


Illustration 9: charpente à la Philibert Delorme (source :
livre original de Philibert Delorme)



Illustration 10 : charpente à la Philibert Delorme du château de Courceriers en
Mayenne. Crédits : Simon de l'Ouest

L'article « Nouvelles inventions : l'interchangeabilité et le génie national » de Gøegory K.Dreioer, 1992, édition du Centre de recherche sur la culture technique, dresse un panorama intéressant de la construction en petites sections.

Le bureau d'étude Gaujard Technologies indique que les documents suivants sont disponibles :

- Le livre original de Philibert Delorme «Le premier livre des inventions pour bien bâtir à petits frais » (1561) est disponible à cette adresse : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k85634s.image>
- Une transcription de cet ouvrage en français moderne est disponible à cette adresse : <http://architectura.cesr.univ-tours.fr/Traite/Textes/Masson643.pdf>. (Pour les gravures et image se référer à l'œuvre originale)
- Un point de vue légèrement plus récent est le Nouveau traité de charpente ou Vignole de 1849 : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5432014f/f2.item.r=delorme>

Par ailleurs, la revue « Monumental 2016-1 - Charpentes et couvertures » aux éditions du Patrimoine détaille plusieurs opérations, dont la restauration du Manège de Fontainebleau en 2016.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	B5 : Quel bois peut-être mis en paroi verticale en ERP et en quelle épaisseur ?			
Précisions	ERP : Établissement Recevant du Public			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
On peut distinguer deux cas d'utilisation du bois en ERP, en intérieur ou en extérieur.				
<u>Bois en parement intérieur</u>				
Des parements bois sont utilisables en intérieur en prenant en compte 1 contrainte de réaction au feu* et 2 contraintes de résistance au feu* :				
<ul style="list-style-type: none"> le parement doit avoir une réaction au feu suffisante pour éviter le démarrage et/ou l'embrasement des éléments non porteurs surfaciques. Les exigences sont indiquées dans l'Arrêté du 24 septembre 2009, et très clairement explicitées dans un document du programme PACTE⁵. Les bois que l'on peut utiliser doivent être classés C-s3-d0 au minimum (ancien classement M2). Il est possible d'utiliser un bardage D-s2, d0 (M3 ou M4) selon la nature du plafond et cela conditionne la nature de l'isolant situé derrière qui sera classé A2. L'arrêté du 21 novembre 2002 relatif à la réaction au feu des produits de construction et d'aménagement indique que les bois massifs sont M3 ou M4 (donc classement européen de lettre D) selon leur épaisseur. Le chêne et le châtaigner sont également classés D-s1-d0⁶. Un rapport⁷ indique que seul le mélèze et dans certaines conditions le douglas peuvent atteindre un classement C. Irabois a publié en octobre 2019 le PV d'essai permettant de justifier un classement C pour le bardage en mélèze, et liste un certain nombre de contraintes à respecter, notamment le fait d'utiliser derrière le bardage un matériau type plaque de plâtre ou plaque de bois type OSB ; l'utilisation d'un isolant dit combustible en ERP implique l'emploi d'un écran thermique 1/2h⁸. Si un parement bois est utilisé sans autre écran supplémentaire, alors le parement bois doit répondre à certains critères pour être considéré comme un écran thermique suffisant. En bois massif, l'épaisseur minimum doit être de 14 mm si la masse volumique est supérieure à 600 kg/m³ (c'est le cas du mélèze) ou 18 mm sinon. Des solutions sont également possibles en OSB 18 mm, contreplaqué ou panneau de particules. D'autres écrans sont possibles si la justification de leur performance est apportée ; des performances de résistance au feu de paroi sont attendues pour ralentir la propagation du feu entre pièces adjacentes, ou pour s'assurer que les parois porteuses conserveront une résistance mécanique suffisante pendant une durée donnée. Les exigences de résistance au feu selon la catégorie d'ERP et sa hauteur sont données dans les articles CO de l'arrêté du 25 juin 1980. Un document liste différentes configurations de parois à ossature bois pour lesquelles la résistance au feu est connue, mais aucune n'inclue de matériau biosourcé⁹. Cependant, un travail de 2012¹⁰ du CSTB montre que la résistance au feu de parois verticales et horizontales dépend pas ou peu de la nature de l'isolant parmi ceux testés (ouate, laine de chanvre, laine de verre, laine de mouton, fibre de bois entre 15 et 50 kg/m³ selon les matériaux). 				
<u>Bois en bardage extérieur</u>				
Est-il possible de mettre un isolant biosourcé sous un bardage bois extérieur en ERP ?				
Des dispositions s'appliquent pour limiter la propagation de feu de façade (articles CO 19 à 22 et IT 249).				

Un rapport de 2017¹¹ traite spécifiquement du cas de la propagation de feu façade bardées en bois qui a valeur d'appréciation de laboratoire. Le rapport¹² montre clairement différentes dispositions, entre autres :

- la règle de C+D liée à la distance entre ouverture et la présence d'éléments en saillie pour éviter la propagation des flammes vers les étages supérieurs ;
- la pose d'un écran thermique entre l'isolant et la lame d'air sous le bardage ;
- la pose de déflecteurs métalliques pour éviter que les flammes ne se propagent facilement par « effet cheminée » dans la lame d'air ;
- l'obturation de la lame d'air avec un matériau qui gonfle en cas d'incendie ;
- la gestion du nez de dalle pour éviter la propagation de l'incendie des étages inférieurs vers les étages supérieurs.

L'IT 249 s'applique aux ERP à partir de R+2 et de catégorie 1,2,3 ou 4. Pour un ERP de catégorie 1 à 4, Le rapport¹¹ indique que l'on peut placer un isolant bio-sourcés derrière un écran thermique a minima A2-s3, d0 et à condition que le revêtement du bardage ventilé ai une performance de réaction au feu à minima B-s3, d0, ce qui implique d'utiliser un bardage bois ignifugé ou d'utiliser un autre matériau que le bois.

Pour un ERP de catégorie 5, l'article CO20 exige d'utiliser un bardage classé M3 ou D-s3, d0, atteignable pour de nombreux type de bardage et essences de bois, sauf si la règle C+D n'est pas appliquée à toute la façade, et dans ce cas un bardage M2 ou C-s3, d0 est exigé, atteignable pour un bardage en mélèze ou en douglas dans certaines configurations. Les situations pour lesquelles la règle C+D s'appliquent sont définies dans l'article CO21 alinéa 3 (locaux réservé au sommeil au-dessus du 1er étage, plancher bas du dernier niveau au-dessus de 8 m etc.). **Pour un ERP de catégorie 5, il n'y a pas exigence d'écran thermique entre la lame d'air sous le bardage extérieur et l'isolant combustible, et il n'y a pas d'exigence non plus sur la réaction au feu de l'isolant combustible.** Par contre, l'isolant combustible doit être protégé du côté intérieur afin de répondre aux exigences de résistance au feu vis-à-vis d'un incendie se développant à l'intérieur du bâtiment.

Pour utiliser une configuration non couverte par ces dispositions, un essai de propagation de feu de façade de type LEPIR est réalisable. Ce type d'essai a été réalisé en 2009 par le CSTB et GAUJARD TECHNOLOGIE SCOP, pour un bâtiment neuf isolé en paille avec côté extérieur un bardage en douglas de 20 mm (classé M3), une lame d'air et panneau AGEPAN 16 mm, puis l'isolant en paille, et côté intérieur un panneau OSB 12 mm, une lame d'air et un parement de finition en Fermacell 12,5 mm. Le résultat de l'essai a été jugé recevable pour justifier la réalisation d'un R+2, un groupe scolaire à Issy les Moulineaux.

Dérogation

Il est possible de déroger à la réglementation incendie. Dans ce cas, un dossier est constitué par l'architecte, qui comporte pour chaque point dérogatoire : les règles auxquelles il est demandé de déroger, la justification des demandes, les mesures compensatoires proposées. Ce dossier est soumis à la commission de sécurité.

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	L'analyse ci-dessus ne saurait remplacer l'évaluation d'un contrôleur technique en fonction de chaque projet.			

Question	B6 : Il est difficile de trouver du bois local ou des artisans utilisant ces matériaux			
Précisions	<p>La question est posée 3 fois :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Où trouver du Douglas sec local ? • Problème de qualité pour avoir du bois local purgé d'aubier. • Difficultés à trouver des artisans qui mettent en œuvre du bois local. 			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

L'information a été passée à Profession Bois Normandie. L'ARPE a publié une cartographie des professionnels Normands en éco-construction sur son site internet, c'est une piste pour identifier des professionnels susceptibles d'utiliser des matériaux locaux.

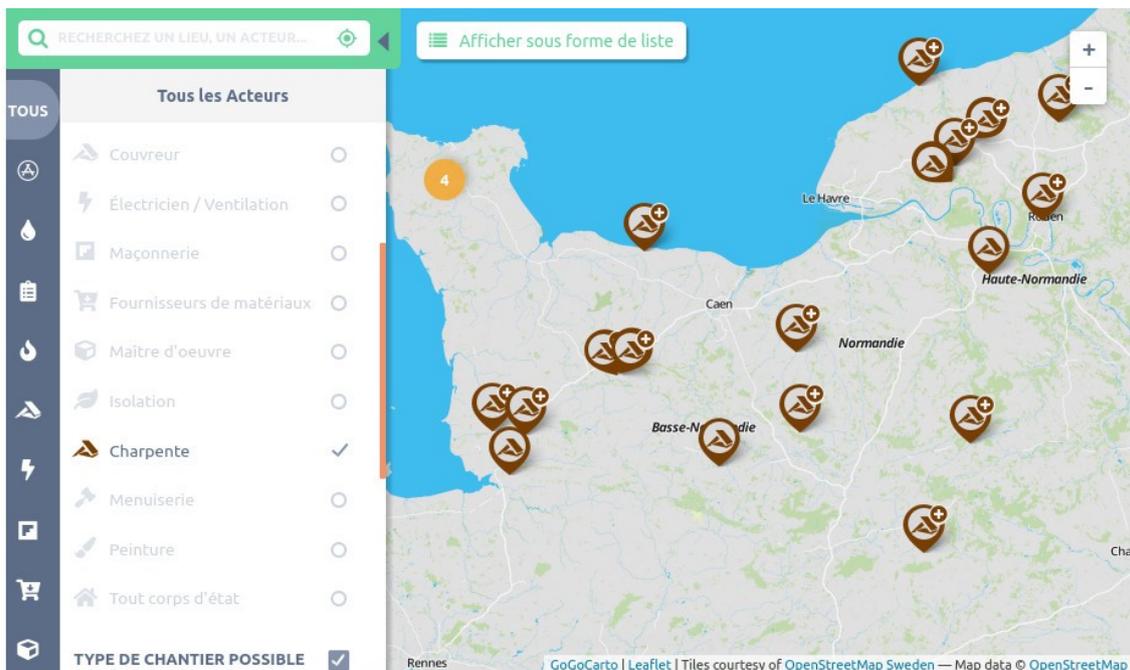


Illustration 11: Charpentiers recensés sur la cartographie de l'ARPE en 2019

Par ailleurs, il existe une initiative à vocation inter-régionale, mise en place en Bretagne, de mise en lien pour s'approvisionner en bois local (<http://www.comptoirdesboislocaux.fr/>). La mise en place d'un groupe local nécessite de nommer un référent pour modérer les annonces postées. Cette plateforme est concurrencée par « Le bon coin ».

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

2 Maçonnerie

Question	M1 : Quelle est la perméabilité à la vapeur d'eau* du mortier GREB ?			
Précisions	La recette typique du mortier GREB est 1 vol de chaux, 1 vol de ciment, 3 vol de sable, 4 vol de sciure. Il est souvent décrit comme étant peu perspirant principalement à cause de la présence de ciment.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Le « mortier GREB » est utilisé dans la technique de construction paille du GREB. Cette technique consiste à placer des bottes de paille dans une ossature double de montants de faible section. Le mortier GREB recouvre les bottes et sert de protection et de contreventement (voir photo ci-dessous).



Illustration 12: Paroi en GREB. On voit en partie basse le mortier GREB, de couleur grise, qui recouvre la botte de paille Crédits : Approche Paille

Le site internet du RFCP référence un essai de mesure de la **perméabilité à la vapeur d'eau*** du mortier GREB, dont le résultat est un μ (sec) = 8,5, une valeur typique pour un enduit chaux. Le matériau aurait été plus ouvert à la vapeur d'eau en absence de ciment d'après une étude scientifique¹³.

La seconde propriété hydrique importante pour estimer la pertinence de ce mélange est la capacité de transport de l'eau en phase liquide par **capillarité***. Aucune information n'a été trouvée à ce sujet pour le mortier GREB.

Cette question est l'occasion de mentionner la question de l'évolution des caractéristiques hygroscopiques des mortiers et des enduits en fonction de leurs constituants. Pour commencer, quelle est la différence de **capillarité*** et de **perméabilité à la vapeur d'eau*** d'un enduit à la chaux aérienne et d'un enduit à la chaux hydraulique 3,5 ? Est-ce plutôt une différence de perméabilité ou de capillarité ? St Astier avait été sollicité en 2016 à ce sujet, et avait indiqué que l'**hydraulicité*** affecte un peu la **perméabilité à la vapeur**

d'eau* mais de manière plus importante **la capillarité***. Une étude montre en effet que plus l'hydraulicité du liant est élevé, plus la capillarité est réduite¹⁴. Mais que se passe-t-il si l'on mélange deux ou trois liants différents, obtient-on des performances proportionnelles au dosage utilisé ? La capillarité, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'élasticité sont des paramètres importants pour déterminer l'adéquation d'un enduit sur un support. N'oublions pas que la capillarité et la perméabilité peuvent également être fortement modifiées par les adjuvants utilisés.

Les relations entre **hydraulicité*** et performances hygroscopique des liants hydrauliques a déjà fait l'objet de plusieurs études scientifiques, mais sur quelques matériaux uniquement à chaque fois et les résultats sont difficilement comparables. La difficulté est que d'autres paramètres interviennent, tel le réseau de pores, le type de sable utilisé, ou la présence d'autres éléments interagissant avec l'eau telle que la sciure dans le cas du GREB.

Ce travail serait intéressant car cela aiderait à comprendre le fonctionnement de nombreux produits préformulés basés sur des adjuvantations et/ou mélanges de liants.

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	<ul style="list-style-type: none"> Des essais de capillarité* sur le mortier GREB seraient bienvenus. Une étude bibliographique sur l'évolution de la perméabilité* et de la capillarité* de différents mortiers seraient utile, car de nombreux travaux ont déjà été entrepris. 			

Question	M2 : Peut-on faire du pisé avec du béton concassé et de la terre crue normande ?			
Précisions	La terre crue normande généralement argilo-limoneuse et peut manquer d'éléments grossiers.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Le pisé se fait préférentiellement avec certains types de terre, dont un des paramètres est d'avoir des éléments grossiers dans la granulométrie. L'idée serait d'utiliser du béton concassé pour compléter la granulométrie d'une terre trop fine.

Un pisé à base de béton concassé a fait l'objet de deux études scientifiques notamment^{15,16}. Ces deux études ont incorporées de l'ordre de 5 à 10 % de ciment dans le mélange, ce qui pénalise de manière significative l'impact environnemental du matériau.

Par ailleurs, l'analyse de parois en « Tapia Valenciana » (pisé Valencien) a montré un exemple plus ancien de réemploi dans une terre à pisé. Le pisé Valencien associe du pisé de terre crue et des briques de terre cuite entière (illustration ci-dessous).

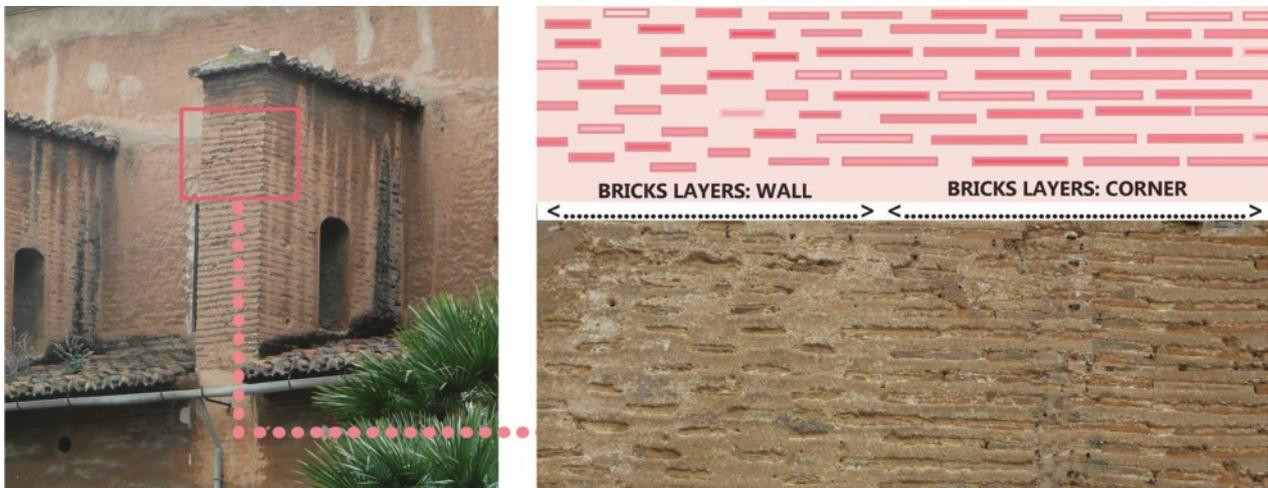


Illustration 13: Détail constructif d'un mur en tapia valenciana Crédits : Cristini/Ruiz (avec leur aimable autorisation)

L'étude¹⁷ montre que des briques cassées ou pilées grossièrement sont retrouvées au sein même du pisé (illustrations ci-dessous).

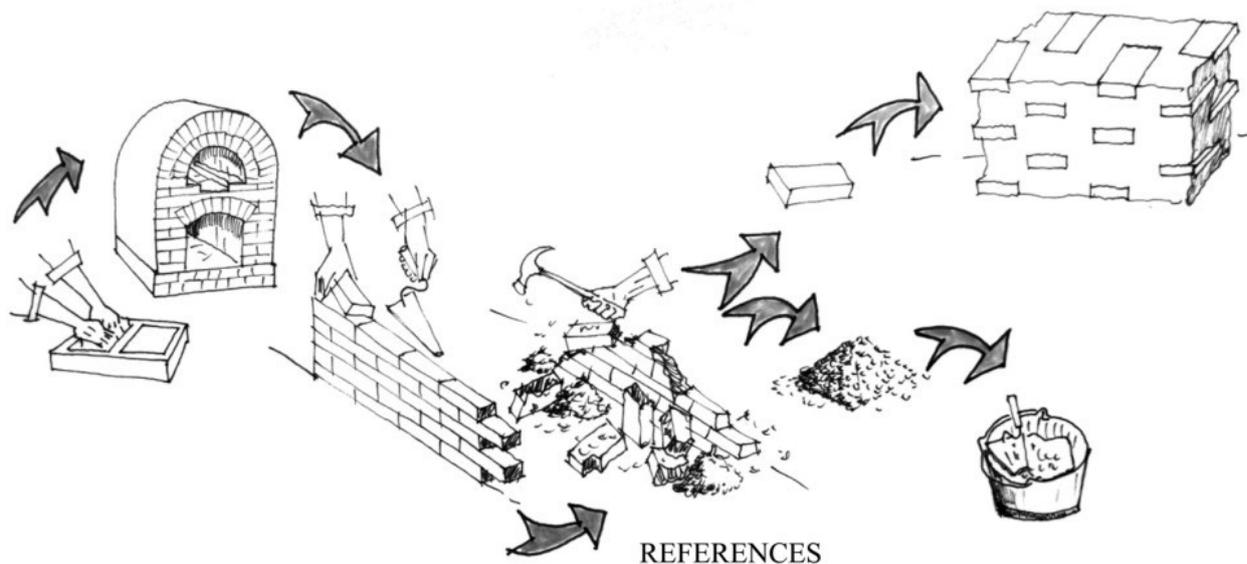


Illustration 14: Scénario de réemploi de briques de terre crue supposé. Crédits : Cristini/Ruiz (avec leur aimable autorisation)

L'intérêt de travailler avec une terre locale déjà adaptée au pisé est de s'épargner la phase d'homogénéisation de la ressource (le mélange de la terre avec le béton concassé), dont il faut estimer le coût et le temps de mise en œuvre. Une vidéo de malaxage à sec de différents composants pour recréer une terre adaptée au pisé est disponible sur internet en cherchant « Lehm Ton Erde, rammed earth construction specialist ». Par contre, l'intérêt d'utiliser du béton concassé serait de réduire/valoriser les déchets de chantier.

Les différences suivantes entre pisé fait à partir d'une terre à pisé et pisé à base de concassé sont pressenties :

- la partie grossière de la granulométrie d'une terre naturelle (graviers, cailloux...) n'a ni la forme ni la résistance mécanique des morceaux de béton concassé. Les morceaux de béton concassé auront des arêtes vives, ce qui favorise la localisation des contraintes et le développement de fissures dans la matrice terre ;
- le béton concassé absorbera potentiellement plus d'eau que la partie grossière d'une terre naturelle adaptée au pisé.

Ces deux phénomènes peuvent affecter la résistance mécanique. Par ailleurs, la quantité de poussière incorporée avec le béton concassé devra être contrôlée, car elle va affecter le mélange, en plus d'éventuellement dégrader les conditions de travail des travailleurs.

La méthode de validation du pisé à base de terre normande et de concassé pourra s'inspirer de celle définie dans le **guide de bonnes pratiques sur le pisé***, qui recommande la réalisation de murets test dans la même configuration que le chantier, pour s'assurer que la performance souhaitée est atteinte.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	La première étape pourrait être de réaliser des murets pour valider la technique.			

Question	M3 : Peut-on étudier les performances de mélanges de papier et de terre crue ?			
Précisions	<p>Est-il intéressant d'ajouter de la chaux dans le mélange terre papier ?</p> <p>L'application d'isolant non porteur est recherchée, mais il doit être possible de faire tenir un plancher simple sur ces murs.</p> <p>On peut également utiliser du carton au lieu du papier, en laissant tremper du carton dans de l'eau et en l'ajoutant au mélange terre dans la bétonnière.</p>			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Le papercrete est un mélange inventé en 1928, initialement associant du ciment, du papier et parfois du sable. Le papier est généralement découpé en bandelettes ou en morceaux avant d'être trempé quelques jours puis mélangé au liant.



Illustration 15: Le papier est laissé quelques jours dans de l'eau avant d'être mélangé.
Crédits : Appropedia.org



Illustration 16: Maison en briques de papercrete. Crédits : Arbolitspb

Un article¹⁸ liste plusieurs autres études sur le papercrete. Des mélanges utilisant de la terre crue adjuvantée ou non au ciment ont déjà été testés^{19, 20, 21}. Une étude scientifique²² indique que l'on atteint typiquement :

- 400 kg/m³ avec une proportion en masse de papier/ciment de 1/1. A titre de comparaison avec un autre béton allégé, le terre-chanvre, ce type de dosage devrait aboutir à une masse volumique de l'ordre de 200 kg/m³. Cette masse volumique plus basse atteinte avec la chènevotte est liée à la porosité de sa microstructure (illustration ci-dessous).
- 600 kg/m³ avec une proportion en masse de papier/ciment de 1/2.
- 800 kg/m³ avec une proportion en masse de papier/ciment de 1/3.

Le papier ou le carton n'allègent pas autant le mélange que des agroressources telles que la chènevotte ou la paille. Le béton de terre-papier pourrait donc éventuellement être complété par une agroressource. Mais avant toute optimisation de formulation, il faudra définir quels sont les buts recherchés.

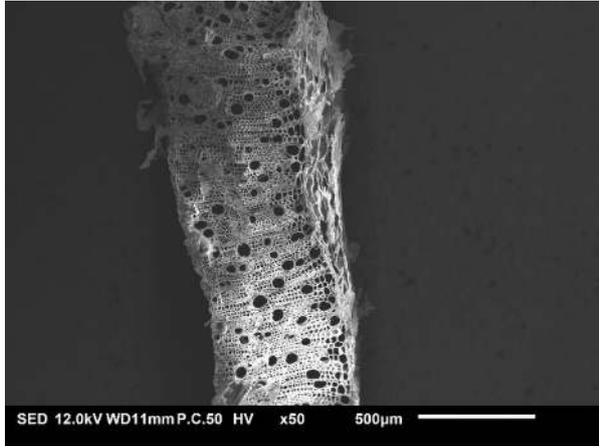


Illustration 17: Microstructure d'une chènevotte vue au microscope. Crédits : Santiago Arufe Vilas et Hélène Lenormand, Unilasalle Rouen

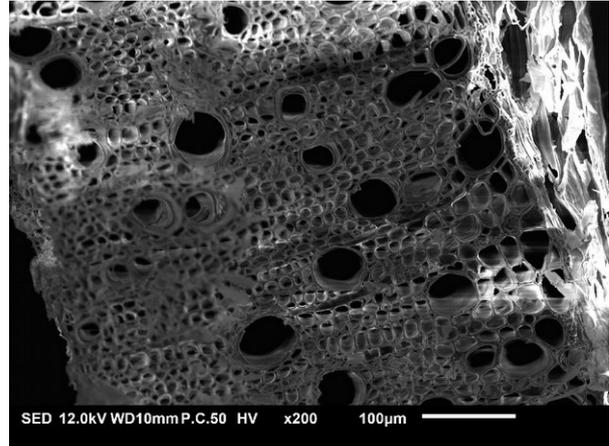


Illustration 18: Zoom sur la structure poreuse d'une chènevotte. Crédits : Santiago Arufe Vilas et Hélène Lenormand, Unilasalle Rouen

Le béton de terre papier pourrait trouver sa place pour un usage en intérieur où l'isolation thermique n'est généralement pas la priorité. On pourra accepter un mélange un peu plus lourd qui apportera de l'inertie.

La solution d'enduire un béton de terre papier léger demandera de valider que cela ne pose pas de difficultés d'avoir un enduit plus rigide que le support (c'est ce qu'il se passe quand un enduit est appliqué sur un béton biosourcé mais ceux-ci présentent une bonne accroche mécanique).

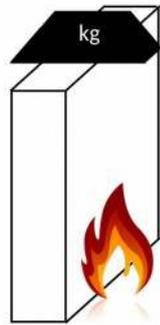
Le papier peut également servir pour dégraisser et fibrer une terre trop cohésive pour réaliser des enduits terre, en économisant ainsi l'emploi de sable, tel que pratiqué au Japon²³. Le fait de laisser le papier macérer dans l'eau est une pratique similaire à celle utilisant des jus de fibres végétales macérées comme eau de gâchage d'enduits terre.

Enfin, l'ajout de chaux n'est pas nécessaire et pénalise l'impact carbone. La chaux risque de mobiliser les argiles et fragiliser le mélange si elle est utilisée en faible proportion (<5 % en masse). Si elle est utilisée en plus forte proportion, le mélange aura un pH basique. Certaines études indiquent que cela évite le développement de moisissures, et d'autres que cela n'a aucun effet sur cet aspect. En conclusion, il n'est pas clair qu'un pH basique empêche pas le développement de moisissures. Puis le pH diminue au cours du temps puisque la chaux carbonate. Un inconvénient est que le pH basique rendra la mise en œuvre plus pénible pour les travailleurs.

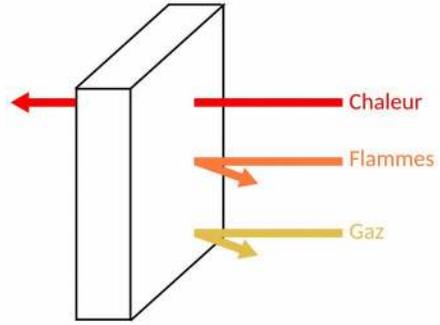
	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	<p>Le premier travail consiste à définir les buts recherchés pour estimer la pertinence d'explorer telle ou telle piste. Le second travail, de « preuve de concept », consiste à confirmer la gamme de masse volumique qui peuvent atteintes selon les dosages et la technique de mise en œuvre, puis vérifier que la résistance mécanique atteinte suffit pour l'usage ciblé. La connaissance de la formulation et la mesure de la masse volumique sèche des échantillons permettra d'avoir un ordre de grandeur de la performance thermique et hygrométrique atteinte.</p> <p>Cette étape orientera les éventuels futurs essais plus précis à réaliser en laboratoire.</p>			

Question	M4 : Comment démontrer l'écran thermique constitué par les enduits terre ?			
Précisions	La notion d'écran thermique est liée à la résistance au feu			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Un écran thermique est un élément de construction (paroi, plancher, plafond, porte...) qui maintient suffisamment ses performances durant un certain temps lors un incendie pour remplir une ou plusieurs exigences :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stable au feu (SF) : l'élément conserve des capacités de portance et d'auto-portance suffisantes ; • Pare-Flammes (PF) : l'élément évite l'avancée des flammes ; • Coupe-Feu (CF) : l'élément est pare-flammes et évite la propagation des gaz de combustion et des fumées ainsi que de la chaleur de l'autre côté de la paroi. Le caractère coupe-feu est défini comme étant la durée durant laquelle la face non exposée à l'incendie reste sous 180 °C localement et 140 °C en moyenne sur l'ensemble de la surface. <p>On associe l'exigence à une durée, par exemple, « CF 1/2h » pour « coupe-feu une demi-heure ». Ces exigences sont illustrées ci-dessous et l'on donne également l'équivalence en classement de résistance au feu européen REI pour Résistance - Etanchéité - Isolation (illustration ci-dessous).</p> <p>Le document AM8 (arrêté du 6 octobre 2004) indique plusieurs coupe-feu 1/2h reconnus quelque-soit le matériau combustible sous-jacent. On y retrouve des plaques de plâtre ou du plâtre projeté sur trame métallique (type Nergalto par exemple), mais aussi des solutions de parement bois.</p> <p>Pour ce qui concerne la terre crue, la réglementation française considère que les enduits terre sont incombustibles tant qu'ils sont composés à moins de 1 % en masse ou en volume de matière combustible (fibres végétales par exemple). Cela est très peu puisqu'à titre de comparaison, les enduits terre-paille sur botte de paille testés par le RFCP contiennent typiquement 30 % de paille en volume, ce qui les classe comme matériau combustible. Le torchis est également classé comme matériau combustible.</p> <p>Cependant, que les enduits terre soit considérés comme combustible ou non, leur rôle d'écran thermique n'est aujourd'hui pas reconnu. En effet, le caractère incombustible ne suffit pas pour démontrer le rôle d'écran thermique, car il faut également évaluer le maintien mécanique de l'écran, autrement dit, évaluer si l'enduit ne se décrochera pas et qu'il ne se fissurera pas significativement durant un incendie.</p> <p>La diversité des supports et des types d'enduits rend ce type de démonstration complexe.</p> <p>Plus largement, et même si les retours terrain sont probants, le rôle d'écran thermique n'est aujourd'hui pas démontré pour les enduits minéraux (terre, chaux...), avec ou sans végétal, placé directement sur la botte de paille ou un béton biosourcé sans trame métallique (type Nergalto).</p>				

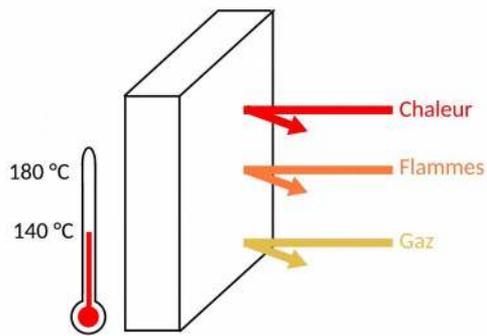
STABLE AU FEU (SF) = R



PARE-FLAMME (PF) = E



COUPE-FEU (CF) = EI



STABLE AU FEU ET COUPE-FEU = REI

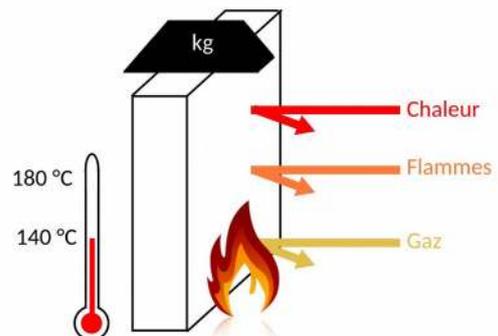


Illustration 19: Les différentes exigences de résistance au feu

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	Cette question est complexe et nécessite une approche avec des essais officiels pour que les résultats soient utilisables.			

Question	M5 : Comment s'assurer qu'un enduit terre ne fissure pas sur un poêle de masse ?			
Précisions	Température max ~ 100°C.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>On peut ajouter une trame dans l'enduit terre, par exemple en fibres de verre. L'enduit est réalisé avec une première passe (10 mm) sur laquelle la trame est placée frais dans frais (la trame est noyée par ~ 5 mm d'enduit). Après séchage complet, la couche de finition peut être posée (5 mm).</p> <p>L'utilisation de trames ou fibres naturelles est possible mais leur composition chimique peut évoluer selon la température (les premiers composants des végétaux se dégradent autour de 120°C).</p> <p>Enfin, une autre solution est de réduire la capacité de retrait du mélange en ajoutant du plâtre. Richard Lacortiglia (formateur au Gabion) indique que l'ajout de plâtre à hauteur de 20 % en volume est extrêmement agréable pour la mise en œuvre. Un retardateur peut être utilisé pour faciliter la mise en œuvre. L'entreprise Plâtre Vieujot est expérimentée sur les mélanges plâtre-terre. L'inconvénient est qu'au-delà d'une certaine proportion de plâtre, la terre stabilisée perdra sa réemployabilité*. Mais une solution mixte, qui nous permettra d'avoir un enduit aisément réparable, est de réserver le terre-plâtre au corps d'enduit, puis d'appliquer une couche de finition sans stabilisation.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Un travail de collecte de retour d'expérience auprès de fumistes serait intéressant pour compléter l'analyse.			

Question	M6 : Peut-on réaliser des recherches sur les dalles en terre crue ?			
Précisions	<p>Cela remplacera avantagement le plancher en béton de ciment, qui est coûteux financièrement et dont l'impact environnemental est élevé. Par exemple :</p> <ul style="list-style-type: none"> • plancher terre avec carrelage scellé ; • terre + isolant (liège 80 mm) + chape et carrelage scellé ; • hérisson compacté + isolant (liège 80 mm) + terre et carrelage scellé. <p>Quelles sont les épaisseurs minimales atteignables pour le complexe de dalle ? Peut-on réaliser ces dalles en s'appuyant sur des documents techniques officiels ?</p>			

Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
------------------	------------	----------------	--------------	---------

Analyse

Plusieurs expériences sont documentées sur le site d'ARESO, le rapport de stage d'Anne Lemarquis²⁴ ou le livre « Les sols en terre »²⁵. Deux techniques sont documentées : dalle tirée à l'état frais ou dalle damée à l'état de plasticité similaire à celui du pisé.



Illustration 20: Dalle de terre crue tirée. Crédits : ARESO



Illustration 21: Dalle de terre crue damée. Crédits : ARESO

La terre peut-être stabilisée, mais à un coût environnemental à évaluer, sachant qu'elle perdra alors sa **réemployabilité***.

L'étude d'A. Lemarquis a montré que le plâtre limite le retrait. Par exemple, au Gabion, des enduits extérieurs ont été fait en terre-plâtre, à raison d'environ 20 % en volume de plâtre. Alors que l'on aurait pu s'attendre à avoir un retrait fonction de la quantité de plâtre, ils ont observé que le plâtre semble « bloquer » le retrait. Par ailleurs, le plâtre pourrait améliorer le comportement mécanique de la dalle²⁶.

Les techniques dites de terre coulées (rendre la terre liquide tout en limitant la quantité d'eau) visent à réduire la quantité d'eau utilisée dans le mélange ce qui faciliterait le séchage. Une solution consiste à utiliser des dispersants, dont la composition chimique est généralement inconnue lorsqu'il s'agit de produits commercialisés.

Le développement de bétons de terre par activation alcaline (brevet américain datant de 1980 - 1985 sur ces techniques, actuellement reprises dans le ciment HP2A d'ARGIWEST) pourrait permettre d'atteindre de plus hautes performances mécaniques. Néanmoins, l'efficacité de ce type stabilisation dépend de la nature de la terre, ce qui favorise le développement de terres issues d'un gisement caractérisé une fois pour toute, plutôt que de valoriser les terres présentes sur chaque chantier.

Le maçon Samuel Dugelay considère que « la meilleure voie en terme de résistance est la voie plastique

(bauge/adobes) car c'est celle qui donne la meilleure cohésion pour le minimum de retrait. Les autres techniques se développent uniquement par soucis de rapidité de mise en œuvre. Le réglage de la planéité et la cohésion laisse trop à désirer lorsque la terre est tassée. Donc ça marche si, on met une finition mais quid de la régularité de surface. L'augmentation de la fluidité pour pouvoir couler/étaler en fluidifiant artificiellement (disersant and co...), sans commentaires, que ce soit environnementaux ou en retours d'expériences. Fluidification à l'eau et ajout de cailloux pour compenser le retrait (Argilus...etc..). Pourquoi pas. Perte de cohésion mais si on met une finition ensuite, pourquoi pas. Mais quel intérêt ? »

Enfin, les dalles de terre peuvent être renforcées par l'utilisation de fibres ou de trames. La trame est placée dans la partie inférieure de l'épaisseur de la dalle pour travailler en traction. Le treillis métallique est inadapté du fait de la corrosion induite dans le matériau terre. Des trames en fibre de verre sont possibles, en favorisant les mailles de plus grande dimension pour favoriser la cohésion du matériau (on trouve par exemple des trames avec des mailles de 19 x 19 mm).

Enfin, notons que la faiblesse de dalles en terre crue au RDC est le risque d'inondation ou de dégâts des eaux et la difficulté de gestion du chantier car la dalle est massive et ne sèche que d'un côté.

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	Le sujet est vaste car les terres et les mises en œuvre sont diverses. Les actions qui pourraient être menées : collecter des retours d'expériences, identifier les professionnels intéressés, réaliser tests de chantier puis des caractérisations plus fine en laboratoire si besoin.			

Question	M7 : Est-ce que le jus d'ensilage augmente la résistance des enduits terre ?			
Précisions	-			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

La conservation des fourrages peut se faire en voie sèche (foin) ou en voie humide (ensilage). L'ensilage est un mode de conservation basé sur l'acidification par fermentation en milieu anaérobie du fourrage humide. L'acidité empêche le développement d'autres micro-organismes pouvant provoquer la putréfaction des produits ensilés. En fonction de la nature et de l'humidité des fourrages, on obtient une certaine proportion de jus d'ensilage, qui contient notamment des sucres et des glucides (amidon, cellulose, pectine) issus de la plante.



Illustration 22: Ensilage d'herbe au champ. Le végétal est haché pour faciliter la fermentation.



Illustration 23: Balles d'ensilage entourées d'une bâche plastique pour atteindre des conditions anaérobiques

Nous n'avons pas identifié de travaux ayant porté l'analyse de l'emploi de jus d'ensilage dans des enduits terre, néanmoins, des informations existent pour ce qui concerne l'emploi de jus macérés ^{23, 27, 28}.

Le rapport de l'association LESA²⁷ montre que des mélanges avec des végétaux fermentés ont quasi-systématiquement une meilleure résistance à l'abrasion et à l'érosion, mais l'ampleur de l'amélioration est variable. La macération doit être faite sur plusieurs jours (typiquement 10 jours) et si possible en présence de chaleur, ce qui permet une dégradation plus importante des végétaux.

Pourquoi les jus macérés renforcent les enduits terre ?

Aurélien Vissac²³ explique que la macération des végétaux induit la consommation des sucres par des bactéries puis la libération de pectine et d'amidon (colles naturelles) et de cellulose (fibres) issus des végétaux en cours de dégradation. La dégradation permet également de libérer les hémicelluloses, qui apportent du collant, car ils sont notamment utilisés dans la réalisation de gels, de revêtements adhésifs, de gélifiants, de stabilisants, ou d'additif augmentant la viscosité²⁹. On ne sait pas lequel de ces éléments est le plus influent sur la stabilisation des enduits terre. La lignine par contre n'est pas un élément qui se dégrade facilement.

Tous les jus macérés n'ont pas les mêmes caractéristiques selon les végétaux utilisés dans la macération. A titre d'exemple, une étude réalisée sur l'emploi d'eau orgée pour lutter contre le développement d'algues en eau douce³⁰ indique que la macération d'orge est plus efficace que celle d'autres pailles (riz, blé) sans qu'une explication définitive ne soit avancée. Ou encore, les purins végétaux utilisés en agriculture

biologique ne semblent pas tous égaux. En général, plus le taux de sucre et d'hémicellulose est élevée, plus la ressource est facilement dégradable, et plus le taux de cellulose et de lignine est élevé, plus la dégradation est difficile³¹.

Est-ce que le jus d'ensilage aura le même effet de stabilisation sur les enduits les jus de végétaux macérés ?

Les jus d'ensilage sont considérés comme ayant un « pouvoir polluant très élevé »³² notamment du fait de leur pH acide. En fin de fermentation le pH se situe en dessous de 4,5. Le jus de macération dans de l'eau liquide aura également un pH acide³³. La plus grande acidité du jus d'ensilage peut contribuer à dégrader davantage les végétaux et donc de produire un liquide plus chargé, qui aura peut-être un effet stabilisant plus prononcé. L'acidité peut contribuer à défloculer les argiles, il faudra alors moins d'eau pour atteindre un certain niveau de plasticité. Mais l'acidité peut constituer un risque pour les travailleurs.

Pour conclure : les jus macérés semblent pouvoir renforcer généralement les enduits terre, mais on ne connaît pas l'impact du changement du type de jus utilisé. Attention toutefois aux manipulations avec le jus d'ensilage qui est acide.

Le maçon Saueil Dugelay précise que « la voie de la stabilisation des enduits par du vegetal (fibres, fibres fermentees, jus d'ensilage...) me parait vraiment pertinente pour les enduits extérieurs et je me suis mis a remplacer la chaux par des fibres en extérieur. Pas mal d'artisans le pratique avec des degres varies de fermentation. Une question revient souvent : fermentation versus putrefaction. Comment etre sûre que l'on ne va pas creer des noirceurs voir la putrefaction quand le support est vegetal (bottes de paille, chanvre...)? Je pense que si une ou des reponses sont apportees dans ce domaine, elles doivent permettre de s'adapter aux ressources disponibles et donc eviter que l'ensilage soit au top et la fermentation des fibres disponibles dangereuses, ce qui conduirait a ne plus utiliser les fibres disponibles localement. »

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	<p>Les gains induits par le jus d'ensilage et les jus macérés sont complexes à démontrer car il y a des nombreux paramètres potentiellement influents (type de fibre, type de terre, type de jus, dosage, mise en œuvre...).</p> <p>D'un point de vue applicatif, un test de chantier est suffisant pour que l'artisan sache si son enduit rempli la fonction voulue. Mais pour aller plus loin dans la compréhension de la stabilisation naturelle, il serait intéressant de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • faire une étude scientifique et de terrain sur la composition de différents jus macérés ; • développer des essais de controle (permettant d'eviter d'etre dans de la putrefaction ou autre phenomene dommageable au resultat final) ; • réaliser des essais de mise au point (dosage, temps...) pour valider certains aspects liés à l'augmentation de la résistance par les jus macérés ; • définir un protocole de réalisation d'échantillons d'enduits sur chantier, puis d'inciter des artisans à les réaliser lorsqu'ils ont un chantier. D'ici quelques années, il sera possible de mener une étude de R&D de terrain et de labo pour mieux comprendre l'effet de stabilisations naturelles sur des terres différentes. 			

Question	M8 : Quel est l'impact de changer l'agroressource dans les bétons de terre allégée ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur des mélanges de terre allégée, sur le terre-chanvre^{34, 35}, le terre-paille³⁶, le terre-roseau^{37, 38, 39}, ou le terre-tournesol ou colza⁴⁰.



Illustration 24: Terre-chanvre. Crédits : Eco-Pertica



Illustration 25: Terre-colza. Crédits : Yoann Brouard



Illustration 26: Terre-paille. Crédit : Sophie Popot



Illustration 27: Terre-roseau. Crédits : Etienne Samin

Propriétés thermique

On peut penser que changer l'agroressource affecte la conductivité thermique du terre allégée. Par exemple, la paille de blé n'a pas la structure poreuse de la chènevotte, les mesures officielles disponibles à ce jour semblent montrer que le terre-chanvre est légèrement plus isolant que le terre-paille à masse volumique identique. Cette comparaison est à nuancer par le faible nombre de mesures réalisées. Par ailleurs, des travaux scientifiques^{41, 42} montrent que pour de nombreuses agroressources (copeaux de bois, chanvre, tournesol, paille), la conductivité thermique sur matériau sec est au premier ordre définie par la masse volumique du mélange, indépendamment de l'agroressource utilisée. Cette approche est assez grossière, des corrélations plus physiques pourraient être identifiées à l'avenir, cependant cela montre que la différence induite par le choix de l'agroressource est de l'ordre des incertitudes ou écarts de mesure entre différentes études. Les mesures de conductivité thermique sur matériau biosourcé séché sont particulièrement sensibles au protocole de mesure, ce qui ne facilite pas la comparaison entre études réalisées par différentes équipes de recherche.

Par contre, à même quantité de liant, utiliser une agroressource plus légère permet d'atteindre une masse volumique de béton biosourcé plus légère. La moelle de tournesol est légère, avec une masse volumique de 30 à 40 kg/m³. L'effet peut être contrebalancé par le fait qu'une ressource plus légère peut nécessiter

plus de liant pour que le comportement mécanique soit suffisant pour pouvoir enduire par exemple.

Changer l'agroressource peut changer la capacité du matériau à absorber de l'humidité issue de l'air ambiant (la courbe de **sorption***), et l'humidité affecte la conductivité thermique. Cependant, les différentes agroressources étudiées en France actuellement pour le terre allégée (chanvre, lin, bois, roseau, paille) ont des courbes de **sorption*** relativement proches jusqu'à des humidités relatives de 80%, donc cet effet est secondaire.

Enfin, changer l'agroressource peut induire une modification de la microstructure du mélange puisque les particules n'ont pas la même forme. Le choix de la technique de mise en œuvre (projetée ou banchée) affectera également la microstructure du mélange (illustration ci-dessous). En particulier, les mélanges banchés manuellement présentent une **anisotropie*** de comportement thermique (les propriétés ne sont pas les mêmes dans toutes les directions)^{43, 44, 45}. La conductivité thermique est de l'ordre de 10 à 30 % moins bonne dans la direction de l'épaisseur d'un mur banché que dans la direction verticale. Or, on cherche généralement à optimiser la performance dans la direction de l'épaisseur du mur. Aucune mesure d'anisotropie de conductivité thermique n'a été réalisée à ce jour sur mélange projeté. Cependant, du fait du procédé de projection, il est probable que la situation soit inversée par rapport à un mélange banché : la performance devrait être meilleure dans le sens de l'épaisseur de la paroi. Le mélange projeté étant peu tassé, on peut s'attendre à une anisotropie moins marquée dans le cas de mélanges projetés que banchés.

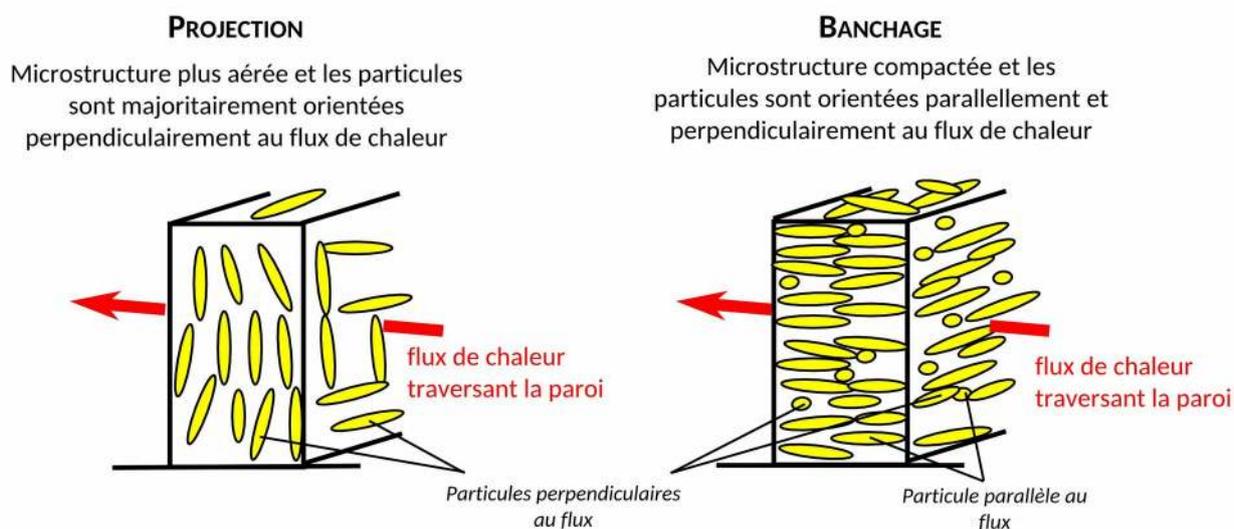


Illustration 28: Anisotropie liée à la méthode de mise en œuvre, banché ou projeté

Enfin, un autre paramètre important en thermique est la **chaleur spécifique***. Il a été montré que la chaleur spécifique d'un terre-chanvre peut être estimée par une loi des mélanges entre les composants⁴⁶ : Si l'on connaît la chaleur spécifique du liant, celle de l'agroressource et le dosage, alors on peut estimer la chaleur spécifique du mélange. La chaleur spécifique anhydre des différentes agroressources listées ci-dessous sont proches, entre 1200 et 1500 J/kg/K.

Pour conclure, d'un point de vue thermique, changer l'agroressource peut avoir un effet sur la performance du mélange, mais la connaissance de la proportion en masse des éléments dans le mélange donne une bonne idée de la performance atteinte.

Hygroscopicité et régulation d'humidité

Si l'on utilise de la terre avec des charges végétales en forte proportion, pour atteindre une masse volumique de 200 à 400 kg/m³, alors les mélanges sont ouverts à la vapeur d'eau, avec une perméabilité à la vapeur d'eau μ mesurée humide comprise entre 2 et 4⁴⁷.

Nous avons indiqué ci-dessus que la sorption des agroressources citées est similaire dans la plage hygroscopique jusqu'à 80 % d'humidité^{48, 49}. Par contre, à plus haute humidité, lorsque les transferts par capillarité interviennent, des différences existent selon l'agroressource utilisée car leur structure de porosité diffère⁵⁰. Cette différence entre agroressources affecte également la cinétique et la quantité maximum d'eau liquide absorbée, ce qui a un effet sur le comportement du mélange lors de la mise en œuvre. Par exemple, la quantité maximum d'eau absorbée par le roseau est deux fois inférieure à celle absorbée par la chènevotte.

Cependant, changer l'agroressource d'un terre allégée ne modifiera pas significativement la capacité des murs à contribuer à la régulation d'humidité dans un logement, qui se mesure avec le **MBV***. Cela est d'une part lié au fait que la courbe de sorption et la perméabilité à la vapeur d'eau sont similaires dans la plage hygroscopique quelle que soit l'agroressource utilisée. Par ailleurs, la régulation d'humidité effective dans un logement dépend au premier ordre du parement de finition qui sera utilisé (enduit, plaque, lambris ...). Donc deux bétons de terre allégée avec des agroressources différentes, mais avec le même enduit de finition, contribueront de manière similaire à la régulation d'humidité du logement.

Mécanique

L'exigence mécanique pour un béton biosourcé non porteur est que le matériau se tienne, que sa rigidité soit suffisante pour pouvoir enduire et que l'enduit ne se décroche pas. La balle de riz, les anas de lin, la chènevotte ou la paille de blé n'ont pas la même géométrie et ne fibrent donc pas le mélange de la même manière. La présence de particules courtes uniquement (chènevotte fine, balle de riz) est peu favorable pour résister au cisaillement, mieux vaut avoir un fibrage mixte, avec des fibres courtes et longues. Pierre Delot (Bâtir en Balles) recommande d'ailleurs de compléter la balle de riz de paille de riz pour assurer un renfort mécanique.

Pour les mélanges légers intégrant une grande proportion de matière végétale (inférieurs à 400 kg/m³ typiquement), changer l'agroressource changera potentiellement le comportement mécanique du terre allégée.

Acoustique

L'absorption phonique dépend notamment de la perméabilité à l'air et de la porosité ouverte des mélanges. Le comportement acoustique des bétons de terre-chanvre et chaux-chanvre a été étudié en détail⁵¹. Le comportement est globalement plutôt absorbant autour de 1000 Hz jusqu'à 400 kg/m³, puis de moins en moins absorbant à mesure que la masse volumique augmente. Un comportement similaire a été observé sur du terre-colza et du terre-tournesol sur quelques échantillons³⁹. Des essais complémentaires sont requis pour élargir l'analyse, mais il semble que le fonctionnement acoustique de terre allégée est similaire quelque soit l'agroressource utilisée.

Durabilité

Toutes les agroressources n'ont pas la même résistance à la dégradation lorsqu'elles sont exposées à des conditions d'humidité extrêmes. Cependant, ces conditions d'humidité extrêmes doivent être évitées par le choix de modes constructifs adaptés. Ainsi, en conditions d'utilisation réelles, changer l'agroressource ne devrait pas induire de différence de durabilité à l'échelle de la paroi.

Réaction et résistance au feu

Les agroressources ne brûlent pas de la même manière. Cependant, il n'existe pas à ce jour de données permettant de savoir si ces différences sont significatives une fois que l'agroressource est enrobée par le liant terre crue.

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	Il serait utile de mener un travail bibliographique des caractéristiques typiques des différents bétons biosourcés, puis si besoin, pour chaque aspect, réalisé <u>une seule étude réalisée une fois pour toute pour s'affranchir des incertitudes et écarts de répétabilité entre différents laboratoires</u> , suivi de mesures officielle pour différents mélanges de terre-allégée. Cette étude devra intégrer les mises en œuvre banché et projeté.			

Question	M9 : Quelles sont les performances d'un enduit correcteur thermique terre/végétal ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Un enduit dit correcteur thermique désigne les mélanges gras appliqués à la truelle dont la masse volumique est comprise entre 600 et 1000 kg/m³. Le mélange est fortement dosé en liant et l'air est chassé du mélange par la pression appliquée avec l'outil.</p>				
Thermique				
<p>La conductivité thermique des correcteurs thermique est comprise entre 0,15 et 0,20 W/m.K. Ces enduits sont 2 à 3 fois moins isolants que les bétons allégés mis en œuvre par banchage manuel ou projection (0,06 et 0,10 W/m.K.) et 3 à 7 fois moins isolants que les enduits isolants prêts à l'emploi proposés par l'industrie.</p>				
Mécanique				
<p>Une des performances mécaniques essentielles d'un béton biosourcé est sa rigidité. La thèse d'A. Youssef⁵² et les travaux de T. Vincelas³⁴ montrent que les valeurs suivantes de module d'élasticité sont atteintes :</p>				
<ul style="list-style-type: none"> • 10 MPa autour de 300 kg/m³ (terre-chanvre et chaux-chanvre banché) ; • 40 MPa autour de 600 kg/m³ (chaux-chanvre banché) ; • 80 MPa autour de 850 kg/m³ (chaux-chanvre banché). 				
				
<p><i>Illustration 29: Le mélange chaux-chanvre doit être gras pour être appliqué à la truelle</i></p>				
<p>De fait, ils peuvent faire office de couche de finition, et c'est bien là leur intérêt car ils permettent ainsi un parement de faible effusivité, et viennent donc, si l'aspect esthétique séduit, en alternative aux parements bois, tissu ou papier. Mais comme ces derniers, ils seront utilisés comme finition, et non pas pour réaliser le volume isolant, qui sera fait, lui, avec un mélange plus léger.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	M10 : Peut-on classer la performance thermique des enduits chaux-chanvre en fonction de leurs dosages et de la technique de mise en œuvre ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Il existe quatre méthodes de mise en œuvre des conglomérats à base de chènevotte :

- stabilisé et mis en œuvre par déversement (150 – 250 kg/m³),
- banché ou placé (200 – 500 kg/m³),
- projeté (200 – 500 kg/m³),
- mélange dense mis en œuvre en correction thermique à la truelle (600 à 1000 kg/m³).



Illustration 30: Enduits à la truelle



Illustration 31: terre-chanvre banché. Crédits : Marie Meunier



Illustration 32: terre-chanvre projeté. Crédits : Eco-Pertica



Illustration 33: granulats stabilisés

La conductivité thermique varie selon plusieurs facteurs, notamment du fait de la masse volumique ou de de l'orientation des particules végétales (voir question M8). Néanmoins, les valeurs suivantes peuvent être retenues en première approche (mesures à 10°C sec) :

- 200 kg/m³ : 0,06 W/m.K
- 300 kg/m³ : 0,07 – 0,09 W/m.K
- 600 kg/m³ : 0,10 – 0,13 W/m.K
- 900 kg/m³ : 0,20 – 0,30 W/m.K

Notons la commercialisation de l'enduit prêt à l'emploi Parnature®, développé par PAREX LANKO, basé sur

un liant chaux mélangé à de la chènevotte. La conductivité thermique communiquée est de $\lambda = 0,066$ W/m.K (à 23°C et 50% HR).

Il n'existe pas d'étude claire de comparaison de l'impact sur la conductivité thermique entre une mise en œuvre banchée ou projetée. Ces deux techniques permettent d'atteindre la même masse volumique. En banchage, le mélange est tassé mais on peut utiliser moins de liant, alors qu'en projection le mélange est plus aéré mais nécessite d'utiliser plus de liant.

	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	Il serait utile que la filière communique plus clairement sur les performances de différents mélanges selon les constituants, le dosage et la mise en œuvre.			

Question	M11 : Quelles sont les caractéristiques des briques de chaux-chanvre ? Quelles sont les différences entre terre chanvre et chaux chanvre ?			
Précisions	-			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Les briques chaux-chanvre sont plutôt légères avec une masse volumique autour de 300 kg/m³, ce qui correspond à une conductivité thermique entre 0,07 et 0,09 W/m.K (nous n'avons pas connaissance de caractérisations sur briques terre-chanvre). Les briques ne sont pas nécessairement plus légères qu'un mélange banché sur site.

L'avantage des briques est que le séchage est géré en amont du chantier. Sur chantier, le joint de mortier sèche rapidement. Un avantage par rapport à une mise en œuvre banchée manuellement est que les briques sont pressées à plat, donc une fois la brique maçonnée les chènervottes sont majoritairement orientées perpendiculairement au flux de chaleur ce qui est favorable (voir question M8). Le gain est de l'ordre de 10 à 30 % sur la conductivité thermique, en faveur des briques.



Illustration 34: Construction neuve en briques de chaux-chanvre. Crédits : Olivier Duport



Illustration 35: Brique de chanvre à rainure languette pour limiter le pont thermique lié au joint, et permettre des montages à sec. Crédits : Sauvageot

Le terre-chanvre ou le chaux-chanvre diffèrent par l'impact écologique, la **réemployabilité*** permise par la terre et la disponibilité locale des ressources. Seules deux chaux naturelles commercialisées par LAFARGE sont utilisables de nos jours pour réaliser un mélange chaux-chanvre conforme aux couples validés par Construire en Chanvre. Travailler avec de la terre crue permet de connaître parfaitement la composition du mélange (présence d'adjuvants...). D'un point de vue mécanique, les performances du terre-chanvre sont supérieures, similaires ou légèrement inférieures à celles du chaux-chanvre selon le liant utilisé et la mise en œuvre. Le chaux-chanvre est couvert par des règles professionnelles, le terre-chanvre par le guide de bonnes pratiques de la terre allégée. Enfin, actuellement, le nombre de professionnels formés au chaux-chanvre et plus important que ceux proposant du terre-chanvre, mais de plus en plus de professionnels se forment au terre-chanvre.

Des productions de briques de terre-chanvre ont fait l'objet de diverses expérimentations passées et en cours, mais à ce jour, aucune commercialisation organisée de briques de terre-chanvre n'est connue.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
-----------------------	-------------------------------------	--	-----------------------	--------------------

Question	M12 : Peut-on avoir des règles professionnelles ou un DTU sur les dalles en chaux-liège ?			
Précisions	-			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

L'utilisation de liège en dalle est intéressante car c'est le seul matériau biosourcé imputrescible.



Illustration 36: Dalle chaux-liège en cours de réalisation sur un hérisson ventilé. Crédits : Guêpes Maçonnes



Illustration 37: Dalle chaux-liège terminée. Crédits : Guêpes Maçonnes

Le Document Technique Unifié applicable aux dalles et chapes (DTU 26.2) ne renseigne que des solutions à base de ciment. Les dalles à base de chaux ne sont aujourd'hui pas couvertes par un document de référence. Par contre, les « formes »^a chaux-chanvre sont couvertes par les règles professionnelles de Construire en Chanvre. Un DTU n'est pas un document d'application obligatoire. Par contre, l'absence de DTU suscite généralement des questions de la part du bureau de contrôle et des assureurs. En matière de solidité des ouvrages, ce qui concerne notamment les dalles chaux-liège, le contrôleur évalue la proposition technique du fait de ses connaissances ou de son expérience ainsi que des éléments apportés par le maître d'œuvre (voir la réponse apportée à la question M19).

L'entreprise ALIECOR (spécialiste du liège) met à disposition une fiche technique de réalisation de dalle chaux-liège, mais elle indique qu'elle n'a pas connaissance de documents techniques validés par la profession ou de règles de l'art sur cette technique. Le liège résiste mieux à l'humidité que le chanvre. Par contre, la géométrie élancée de la chènevotte permet probablement un meilleur renfort mécanique. Enfin, une vidéo réalisée dans le cadre du programme REBAT Bio présente la réalisation d'une forme chaux-liège. Lien : <https://www.youtube.com/watch?v=SpIOlyfuTk8>. Sur un mélange proche, Saint Astier met à disposition une fiche technique sur les dalles chaux – billes d'argiles.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Il serait utile de collecter le retour d'expérience de chantiers, puis d'identifier des acteurs intéressés pour porter la démarche, entre autres les producteurs de chaux.			

a Le terme « Forme » est préféré au terme « dalle » ou « chape » par Construire en Chanvre.

Question	M13 : Que devient le plâtre en fin de vie ?			
Précisions	Sa dégradation semble libérer du soufre.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Le plâtre est issu d'une roche, le gypse, déshydratée par cuisson. Lorsque le plâtre est mélangé à de l'eau, il se réhydrate pour durcir en reconstituant du gypse.

Les stocks de gypse exploitables sont évalués à 350 Millions de tonnes, dont 70 % en région parisienne (voir illustration ci-dessous)⁵³. Les stocks de gypse sont plus importants, mais ils sont en partie inexploitable du fait de l'urbanisation. Par exemple, seul 10 % des stocks sont mobilisables en région parisienne⁵³. La consommation est de 5,3 millions de tonnes en 2006⁵⁴, ce qui représente un peu plus de 66 ans de capacité d'exploitation avant rupture d'approvisionnement si l'on omet le plâtre issu de productions industrielles (cf remarque en fin de réponse) et le recyclage. Le plâtre est utilisé à 80 % directement pour le bâtiment, 15 % en cimenterie et 5 % pour l'amendement agricole⁵³. Donc au total 95 % du plâtre sert au BTP.

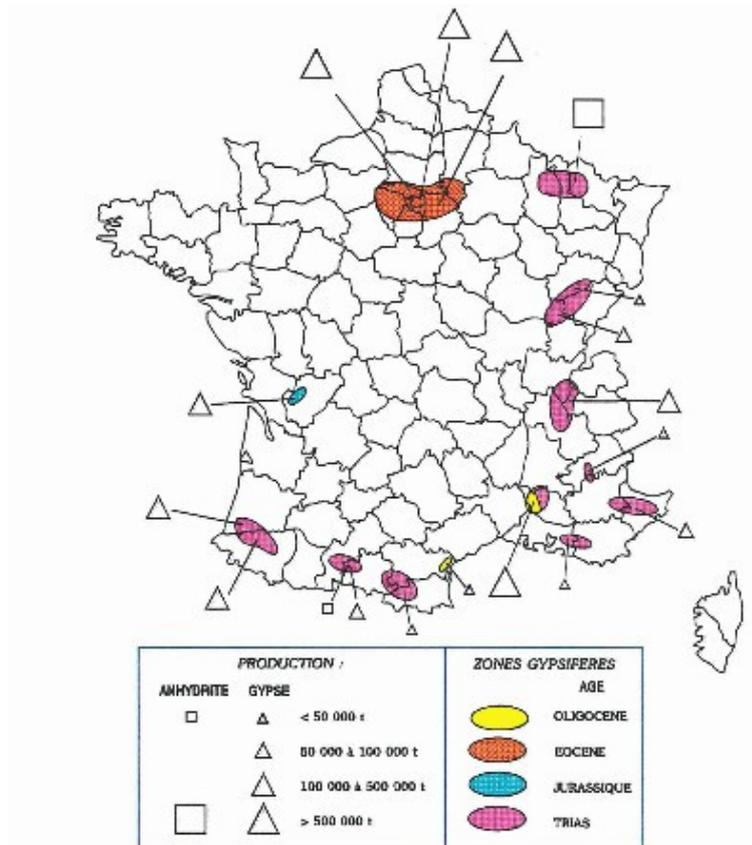


Illustration 38: Zones et volumes de production de gypse en 1991⁵⁵

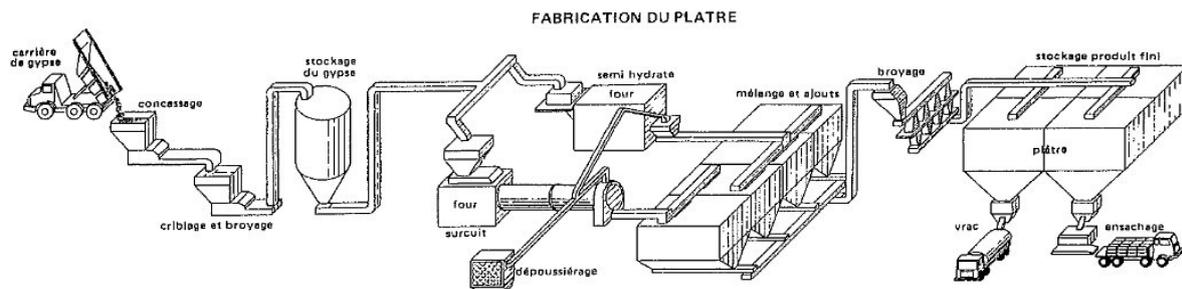


Illustration 39: Processus de fabrication du plâtre à partir du gypse

Deux rapports du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) donnent des éléments sur la gestion de fin de vie du plâtre^{54, 56}.

Les décharges sont classées en trois catégories :

- classe 1 pour les déchets dangereux ;
- classe 2 pour les déchets dits "non dangereux" ;
- classe 3 pour les déchets inertes (qui contient la quasi-totalité des gravats du BTP).

La décharge classe 2 est basée sur une gestion des flux dont les lixiviats^a, alors que la décharge classe 3 s'appuie sur le principe d'atténuation naturelle des flux qui ne sont pas collectés car ils sont considérés comme faibles en raison de la nature non soluble des déchets stockés. La mise en décharge classe 3 est moins onéreuse.

Lorsque le déchet contient moins de 10 % de plâtre ou qu'il s'agit d'un support inerte avec une faible quantité de plâtre, alors le plâtre peut être mis en décharge classe 3. Si les déchets contiennent plus de 10 % de plâtre, ou qu'il s'agit de plâtre exclusivement ou de déchets contenant du plâtre sur des supports non inertes, alors il est orienté vers une décharge classe 2.

Un des risques liés au plâtre lors de sa mise en décharge est sa solubilisation dans l'eau et des réactions en contact de matières organiques. La conséquence potentielle est la pollution des eaux souterraines. Le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est soluble dans l'eau et libère des ions calcium Ca^{2+} et sulfate SO_4^{2-} . L'ion sulfate n'est pas particulièrement toxique semble-t-il, mais un seuil à 250 mg/L d'eau est défini par la réglementation française compte-tenu d'effets gastro-intestinaux (laxatifs). Par contre, l'ion sulfate peut se transformer en sulfure d'hydrogène (H_2S) en milieu acide (pH inférieur à 7), qui est un gaz à l'odeur d'œuf pourri, qui est toxique et qui peut irriter les yeux, le nez et la gorge. L'eau peut être acide en présence de matière organique dégradées. La matière organique provient de l'eau, du mélange à base de plâtre placé en décharge ou d'autres déchets. La présence d' H_2S rend l'eau impropre à la consommation de par son odeur.

Le BRGM indique que les décharges de classe 3 peuvent placer les déchets de plâtre dans des casiers spécifiques (qui fonctionnent comme des décharges de classe 2), si la quantité de matière organique est inférieure à 3 % en masse, ou 5 % s'il n'y a pas que du plâtre.

Les cas au-dessus de ce seuil sont par exemple le lattis bois - plâtre (~ 25 à 50 % de bois) et les cloisons alvéolaires avec deux plaques de plâtre et du carton (~ 8 %). Les plaques de plâtre sont limitées (~ 4 % avec

a Le lixiviat est le liquide résiduel qui provient de la percolation de l'eau à travers un matériau dont une fraction est soluble

le carton).

Un autre risque en centre de gestion des déchets est « l'effondrement de cavité gypseuse ». Le plâtre, s'il est placé en quantité à un endroit dans un site d'enfouissement, peut progressivement se dissoudre, laissant ainsi un vide pouvant créer un effondrement.

Le plâtre est recyclable à l'infini s'il est propre, non mélangé et collecté. En 2017, les industriels du plâtre ont recyclé 91 000 t de plâtre pour 400 000 t de déchets produits⁵⁷. La quantification réelle de déchets produits est difficile à réaliser, une étude du BRGM de 2009 estime qu'elle est plus importante et de l'ordre de 1 à 4 Mt/an ⁵⁴. Le site <https://collecteurs.lesindustriesduplatre.org/> proposée par le SNIP (Syndicat National de l'Industrie du Plâtre) montre les efforts de la filière pour améliorer le taux de recyclage notamment en référençant les points de collecte du plâtre. Le plâtre collecté est ensuite envoyé vers l'un des 3 sites français de recyclage : Chambéry (73), Vaujourns (93) ou Cognac (16). A ce jour, le plâtre recyclé constitue de l'ordre de 15 à 25 % des plaques de BA13.

Remarque : le plâtre peut également être obtenu en tant que déchets de productions industrielles, par exemple comme produit issu de la purification par desulfuration des gaz de fumées de centrales électriques au charbon. Le plâtre peut aussi être obtenu comme sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique et des engrais phosphatés. Ces plâtre de synthèse peuvent présenter des nuances par rapports aux propriétés des plâtres naturels.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	M14 : Quel est le bilan carbone d'un enduit plâtre comparé à un enduit chaux-sable ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
<p>Analyse</p> <p>Nous avons comparé enduit ciment, chaux et plâtre. Tout d'abord nous rappelons les procédés de production pour expliquer d'où proviennent les émissions carbone, notamment pour clarifier le mécanisme de carbonatation.</p> <p><u>Production du ciment et de la chaux</u></p> <p>La production de ciment et de chaux émet du carbone du fait de la cuisson de la matière première jusqu'à 900 °C - 1350°C pour la chaux et jusqu'à 1450 °C pour le ciment portland. Par ailleurs, lors de ce chauffage, du CO₂ est émis du fait de la transformation du carbonate de calcium (CaCO₃) en chaux vive (CaO) et en CO₂ :</p> $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2.$ <p>Pour la chaux, l'étape de fabrication s'arrête ici, mais pour le ciment, d'autres éléments sont produits à plus haute température. Lors de la carbonatation du ciment, la portlandite (Ca(OH)₂) réagit en « capturant du CO₂ » :</p> $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ <p>Pour estimer la quantité de carbone que la chaux ou le ciment a émis du fait de sa transformation chimique et va pouvoir reprendre par carbonatation, il est nécessaire de connaître la quantité d'ions calcium initialement présents. Cela est donné par la proportion massique de chaux vive (CaO), comprise entre 60 et 67 %⁵⁸ pour les ciments et de l'ordre de 70 % pour une chaux hydraulique⁶³.</p> <p>Dans le cas de la chaux, on supposera que 100 % de la chaux vive carbonate. Dans le cas du ciment, on considérera un taux de 86 %⁶³. <u>Un taux de carbonatation de 100 % ne signifie pas que la production est neutre en carbone, car il aura de toute façon fallu dépenser de l'énergie et donc émettre du carbone pour assurer la cuisson de la matière première.</u></p> <p>La décarbonatation et carbonatation en rapport massique par tonne de liant est de 77 % d'un enduit chaux aérienne, 55 % pour la chaux hydraulique de et de 50 % pour la décarbonatation d'un enduit ciment et de 44 % pour sa carbonatation. On peut penser que la chaux aérienne sera nécessairement plus écologique car son taux de carbonatation est plus élevé. Cet argument est incorrect car la carbonatation n'est que la récupération du carbone émis à la production. Par contre, une chaux aérienne est cuite à plus basse température, autour de 900°C, qu'une chaux hydraulique cuite jusqu'à 1350°C. De ce fait, la chaux aérienne est effectivement plus écologique qu'une chaux hydraulique (nous le démontrons plus loin).</p> <p>Remarque : la carbonatation du ciment est souhaitable d'un point de vue réchauffement climatique, mais génère des pathologies car elle est associée à une réduction du pH et donc à la fin de la protection à la corrosion des armatures métalliques du béton armé, ce qui génère des fissuration et écaillages par gonflement des armatures.</p>				

Production du plâtre

La production du plâtre se fait par déshydratation partielle du gypse, sans dégagement de CO₂ supplémentaire, entre 150 et 400°C.

Impact carbone d'un enduit à base de ciment

L'impact carbone du ciment artificiel type CEM I est de 838 kg CO₂ eq/ t de liant⁵⁹, ce qui inclut la production (50%) et la décarbonatation (50%). En enduit, pour 35 kg de ciment, il faut compter 140 kg de sable, de masse volumique de 1700 kg/m³ et dont l'impact est de l'ordre de 11 kgCO₂ eq/t⁶¹. Soit 176 kgCO₂ eq/t d'enduit. La masse volumique de l'enduit est de l'ordre de 1800 kg/m³, soit 3,2 kg CO₂ eq / m² / cm d'enduit. Ce résultat est très proche de celui de la FDES collective⁶⁰ « enduit minéral » sur la base INIES qui n'inclut pas la carbonatation et indique 4,96 kgCO₂ eq/m² d'enduit de 15 à 18 mm d'épaisseur, soit 3 kgCO₂ eq/m². La carbonatation permet une reprise de 44 %. **On atteint alors 1,8 kg CO₂ eq / m² / cm.**

Impact carbone d'un enduit à base de chaux hydraulique

L'impact de la chaux hydraulique est de 776 kg CO₂ eq/ t de liant⁶¹. La chaux en poudre à une masse volumique de l'ordre de 650 kg/m³. Elle est associée à du sable à raison de 1 vol de chaux pour 3 vol de sable. Cela revient à 3,8 kg de chaux pour 30 kg de sable. La masse volumique est de l'ordre de 1600 kg/m³. Soit au bilan 97 kgCO₂ eq / t d'enduit soit 1,6 kg CO₂ eq / m² / cm d'enduit. La carbonatation permet une reprise de 55% du carbone émis par le liant. **On atteint alors 0,8 kg CO₂ eq / m² / cm.**

Impact carbone d'un enduit à base de chaux aérienne

L'impact de la chaux hydraulique est de 689 kg CO₂ eq/ t de liant⁶¹. La chaux en poudre à une masse volumique de l'ordre de 650 kg/m³. Elle est associée à du sable à raison de 1 vol de chaux pour 3 vol de sable. Cela revient à 3,8 kg de chaux pour 30 kg de sable. La masse volumique est de l'ordre de 1600 kg/m³. Soit au bilan 87 kgCO₂ eq / t d'enduit soit 1,4 kg CO₂ eq / m² / cm d'enduit. La carbonatation permet une reprise de 77% du carbone émis par le liant. **On atteint alors 0,4 kg CO₂ eq / m² / cm.**

Impact carbone d'un enduit à base de plâtre, chaux aérienne et sable

L'impact du plâtre a été calculé dans une étude scientifique tchèque⁶². L'impact est de 140 kg CO₂ eq / t de gypse d'origine naturelle. Plusieurs recettes de dosage d'un enduit plâtre existent, mais la couche la plus épaisse de dégrossis peut être réalisée avec 4 volumes de plâtre pour 1 volume de chaux aérienne et 1 volume de sable⁶³. La masse volumique du plâtre en poudre est de 650 kg/m³. Le dosage correspond à 26 kg de plâtre, 6,5 kg de chaux et 17 kg de sable. L'impact est de 168 kg CO₂ eq / t. On atteint alors 1,7 kg CO₂ eq / m² / cm sans prendre en compte la carbonatation **et 1 kg CO₂ eq / m² / cm avec la carbonatation.** Cela est bien inférieur à la valeur par défaut disponible sur la base INIES⁶⁴, qui indique un impact de l'ordre de 2,2 kg CO₂/ m² / cm^a.

Conclusion

L'impact des enduits étudiés est synthétisé dans le tableau ci-dessous.

a Conversion de la données en supposant que la FDES est obtenue pour un enduit de 1000 kg/m³

Liant de l'enduit	Impact en prenant en compte la carbonatation (kg CO2eq / m ² / cm)
Ciment	1,8
Chaux hydraulique	0,8
Chaux aérienne	0,4
Plâtre (avec 1 vol de chaux aérienne pour 4 vol de plâtre)	1

Tableau 2: Impact carbone des enduits minéraux

Il est surprenant de voir l'enduit plâtre émettre plus de carbone qu'un enduit à la chaux car la cuisson du plâtre est réalisée à plus basse température. Cela est le fruit du très faible impact carbone du sable, matériau présent en plus grande quantité dans l'enduit à base de ciment ou de chaux que dans celui à base de plâtre. Cependant, le sable est accompagné d'autres problématiques notamment d'épuisement des ressources. Le tableau ci-dessous montre que si l'on regarde l'impact des liants purs, le plâtre génère moins de carbone que la chaux à court terme et à long terme.

Matériau	Impact à la production (kgCO2/t)	Impact à long terme (kgCO2/t)
Ciment	838	469
Chaux hydraulique	776	349
Chaux aérienne	689	158
Plâtre	140	140
Sable	3	3

Tableau 3: Impact carbone des liants et du sable

L'impact du ciment a été largement étudié, mais peu de références ont été trouvées sur le plâtre et les chaux. Nous avons donc cherché à évaluer grossièrement si l'impact carbone des liants est cohérent. La publication sur le plâtre⁶² indique que la répartition de l'impact du plâtre est de 80 kg CO₂ eq/t pour la cuisson et de 60 kgCO₂ eq/t pour toutes les autres opérations (forage, collecte, broyage...). Nous avons considéré que ces autres opérations pèsent pour 60 kgCO₂ eq/t quel que soit le liant, puis en connaissant le taux de décarbonatation, d'estimer l'impact carbone de la cuisson.

Liant	Température de cuisson indicative (°C)	Impact extraction, broyage... (kgCO2/t)	Impact cuisson (kgCO2/t)	Décarbonatation (kgCO2/t)	Impact total à la production (kgCO2/t)
Plâtre	180	60	80	0	140
Chaux aérienne	900	60	98	531	689
Chaux hydraulique	1200	60	289	427	776
Ciment	1450	60	359	419	838

Tableau 4: Evolution du mix énergétique pour produire du clinker

L'impact de l'étape de cuisson est cohérent, il est d'autant plus grand que la température élevée. Mais l'impact de la cuisson de la chaux aérienne est peu différent de celui du plâtre malgré des températures de traitement fort différentes. En réalité, on ne peut corréliser directement la valeur obtenue à la température de cuisson, puisque les rendements peuvent différer et les sources d'énergie également. Le mix énergétique de la cuisson du clinker évolue ces dernières années, notamment en s'orientant vers l'électricité et la combustion de déchets et de biomasse, ce qui se traduit par une baisse d'émission carbone par tonne de clinker produit (tableau ci-dessous).

	Charbon (%)	Coke (%)	Pétrole (%)	Gaz (%)	Électricité (%)	Déchets, biomasse (%)
2006 ⁶⁵	43	28	6	12	0	11
2010 ⁶⁶	45	19	7	17	0	12
2012 ⁶⁷	39	21	7	18	0	15
2018 ⁶⁸	43 (répartition non connue)				13	43

Tableau 5: Evolution du mix énergétique pour produire du clinker LAFARGE

Un autre indicateur important est la consommation d'énergie, et dans ce cas les résultats devraient montrer un impact beaucoup plus faible du plâtre comparé aux autres liants compte tenu de la température de cuisson plus basse.

Pour conclure la réponse à la question posée de l'impact carbone d'un enduit plâtre comparé à celui d'un enduit chaux-sable :

- l'enduit à base de chaux aérienne est le moins impactant.
- Les enduits à base de plâtre ou de chaux hydraulique sont équivalents et deux fois plus émetteurs de gaz à effet de serre qu'un enduit à la chaux aérienne. Ils sont par contre deux fois moins polluants que des enduits à base de ciment.
- Pour autant, le liant plâtre est bien un liant moins émetteur de carbone que le liant chaux.

Remarques :

- Samuel Courgey mentionne le site allemand www.baubook.info comme une source possible pour obtenir des informations complémentaires sur les impacts environnementaux des matériaux.
- Les calculs réalisés ci-dessus en kgCO₂ eq, en intégrant la carbonatation négligent deux aspects :
 - si l'on veut estimer l'impact sur le réchauffement climatique, il n'est pas correct de sommer des émissions (production du liant) et stockage carbone (carbonatation) intervenant à différents instants. Cependant, si l'on retient un taux de carbonatation des enduits de 2 mm/an, la carbonatation des enduits étudiés ci-dessus sera terminée en 5 à 10 ans. L'erreur induite ici en sommant émission et stockage n'est donc pas élevée.
 - raisonner en kgCO₂eq induit un biais si l'on estime l'impact sur le réchauffement climatique à long terme. Il faut alors raisonner en forçage radiatif absolu.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Il serait utile de consolider certaines données ci-dessus, notamment l'impact carbone à la production de différents types de chaux et de plâtres.			

Question	M15 : Comment peut-être gérée la fin de vie de mélanges terre-plâtre ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>En deçà de 10 % en masse de terre, le mélange déposé doit être géré en déchet inerte (décharge classe 3), au-delà de 10 % de terre en tant que déchet non dangereux (décharge classe 2).</p> <p>Le réemploi de terre crue stabilisée au plâtre n'a pas fait l'objet de travaux à notre connaissance. Il est néanmoins fort probable qu'au delà d'une faible quantité de plâtre, la ré-employabilité directe par immersion dans l'eau sera difficile voir impossible.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	M16 : Quel support d'enduit terre sur un mur de refend porteur de maison paille ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Les enduits terre intérieur sont esthétiques (images ci-dessous) et contribuent au confort intérieur, notamment par l'apport d'inertie et la possibilité de contribuer à la régulation ponctuelle d'humidité (capturer de la vapeur d'eau lorsqu'il en est produit en excès, la relarguer quand l'air est plus sec).



Illustration 40: Divers colories d'enduits terre intérieurs. Crédits : Vincent Corbart

La solution de support d'enduit terre dépend de la nature du mur de refend. Le mode constructif du mur de refend peut être choisi pour être compatible avec un enduit (mur en pisé, bauge, béton biosourcé, briques de terre cuite...).

Plusieurs documents de références renseignent de la mise en œuvre des enduits terre, particulièrement le guide de bonne pratique des enduits terre⁶⁹ et également les règles professionnelles des enduits sur support en terre crue⁷⁰. Les règles professionnelles de la construction en paille⁷¹ mentionnent le cas des enduits terre sur botte de paille.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Contacter l'ARPE pour identifier un artisan proche du chantier qui pourra vous aiguiller.			

Question	M17 : Quelle est l'étanchéité à l'air réelle que l'on peut atteindre avec des enduits ?			
Précisions	Dans la pratique il est difficile de traiter les points singuliers : jonction poutre/murs, menuiseries... Par ailleurs en partie courante, la fissuration éventuelle de l'enduit intérieur garantit-elle la pérennité de l'étanchéité à l'air ? Dans le bâti ancien, le film frein-vapeur est-il plus efficace que des enduits pour assurer l'étanchéité à l'air ?			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Les enduits minéraux sont à même d'assurer une étanchéité à l'air suffisante, mais leurs éventuelles imperfections (fissures...), la gestion de leurs interfaces (avec plancher, plafond, traversées de poutres, entourages de baies...), et les installations électriques les traversant peuvent dégrader leur potentiel. Mais ce fait n'est pas obligé, car une utilisation judicieuse d'adhésifs avec trame, de joints souples et de boîtes électriques étanches peut permettre d'atteindre une réelle performance.</p> <p>Dans le cas d'une isolation par l'extérieur, c'est d'abord le mur de maçonnerie qui assure l'étanchéité à l'air. C'est alors principalement l'interface enduit intérieur/ menuiserie qui correspond au point à traiter avec soin. Cependant, la performance de l'isolant est maximisée lorsque l'étanchéité à l'air est assurée des deux côtés. Il convient donc d'assurer également un soin à l'étanchéité à l'air au niveau du parement de finition placé sur l'isolant et surtout d'éviter qu'un flux d'air soit possible entre le mur support et l'isolant.</p> <p>Si les enduits sont appliqués sur une isolation intérieure en béton biosourcé, en plus de l'utilisation de trame ou de joints souples aux interfaces, notons deux options qui permettent de limiter les risques de défaut d'étanchéité :</p> <ul style="list-style-type: none"> • la mise en œuvre d'enduit en pourtour des boîtes électriques (illustration ci-dessous), voire également dans l'idéal des tubes et autres canalisations ; • la pose de liteaux courants sur les parois de pourtour (sur plafond, plancher ou murs contigus) afin de stopper la fissure traversante / d'imposer une chicane aux éventuels flux d'air. 				
				
<i>Illustration 41 : gestion de l'étanchéité à l'air au niveau des boîtiers électriques</i>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus	Solliciter d'autres	Besoin de R&D	Besoin de R&D labo

	semble suffisante	experts techniques	terrain	
	<p>Il serait intéressant de collecter les retours d'expériences de bureaux d'études thermiques, de sociétés réalisant des tests d'étanchéité à l'air et de filières (terre, paille, chanvre...) sur les défauts observés et corrections apportées lors des tests à la porte soufflante réalisés sur des bâtiments enduits.</p> <p>Il serait également très intéressant de pouvoir réaliser, et pas seulement sur ce type de projet, ces mêmes tests après 1, 5 et 10 ans afin de réaliser la tenue de cette étanchéité à l'air dans le temps.</p>			

Question	M18 : Est-il nécessaire de tramer les enduits chaux extérieurs ?			
Précisions	Lors d'un chantier d'une maison en botte de paille, cela n'a pas empêché des microfissurations nombreuses. Quelle évolution dans le temps, l'étanchéité à l'eau sera bien assurée ?			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Utiliser une trame permet d'armer l'enduit et d'éviter, si ce n'est l'apparition de microfissures, au moins tout risque de fissure traversante.

Plusieurs pratiques sont relevées pour des enduits sur botte de paille (voir paragraphe 6.1.6.2 des Règles professionnelles de la construction en paille⁷¹). D'après un membre du RFCP, les constructeurs semblent favoriser un tramage systématique avant enduit de toute la surface, pas seulement des zones technique, car cela sécurise face au risque de fissuration. Des trames de sols sont préférées, avec des mailles de 2 cm, au lieu des trames fines (mailles de ~ 1 cm), car cela permet une bonne cohésion entre la botte et l'enduit. Compte tenu du fait que les bottes sont aujourd'hui disposées avec la partie lisse apparente, pour obtenir la meilleure performance thermique possible, le besoin de tramer est plus fort que lorsque les bottes étaient placées avec les brins perpendiculaires à la surface.

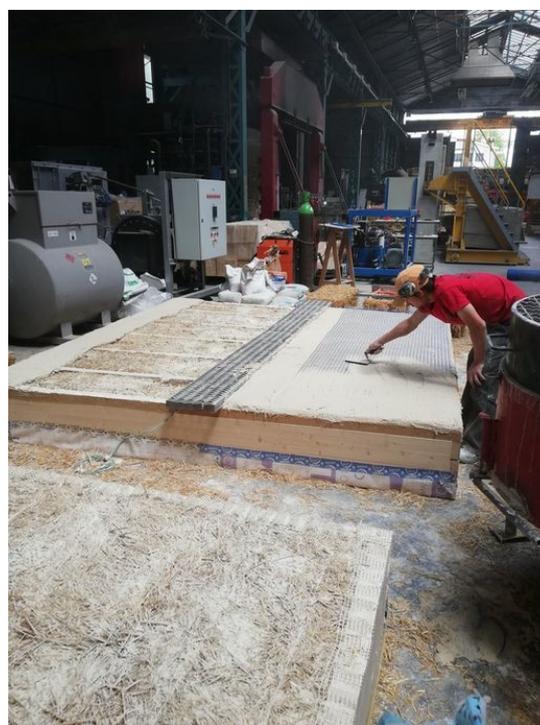


Illustration 42: Enduit terre sur botte de paille avec trame avant des essais de résistance au feu.

Crédits : entreprise Calyclay

Mais les pratiques ne sont pas uniformes, un formateur à l'éco-construction indique que « Sur support botte de paille, il est important d'appliquer un corps d'enduit de l'ordre de 3 cm en terre-paille ou chaux-paille pour avoir une bonne planéité avant d'appliquer l'enduit de finition de 5 à 8 mm en chaux sable, et dans ce cas il n'y pas besoin de tramer. La trame ne sert que pour le risque de fissuration en cas de support avec des matériaux différents. ».

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
-----------------------	-------------------------------------	--	-----------------------	--------------------

Question	M19 : Quel est l'état des connaissances et les documents techniques applicables pour une pose directe de carrelage sur chape maigre, sans isolant ni dalle supplémentaire ?			
Précisions	Historiquement les carrelages étaient posés ainsi, mais les artisans ne veulent plus faire ça et cela semble compliqué réglementairement.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Une chape maigre correspond à un dosage de liant divisé par environ deux par rapport à une chape standard, de l'ordre de 6 volumes de sable pour 1 de liant, en chaux ou ciment, ce qui correspond à un maximum de 150 kg/m³ de liant.



Illustration 43: Sol en terre battue avant réalisation de la chape maigre. Crédits : P. Séjourné



Illustration 44: Chape maigre. Crédits : P. Séjourné



Illustration 45: Carrelage posé directement sur chape maigre



Illustration 46: Autre exemple de finition avec une pose de tomettes de terre cuite sur une chape maigre. Crédits : P. Séjourné

Le DTU 26.2 concerne les dalles ciments. Il spécifie que le dosage minimum est de 300 kg/m³ pour les locaux d'habitation, ce qui correspond aux dalles classiques. Le DTU 52.1 régie les chapes maigres pour poser du carrelage, mais posés nécessairement sur un support à base de ciment.

Ainsi, il semble aujourd'hui n'exister aucun document de référence sur lequel s'appuyer pour réaliser une

chape maigre à la chaux.

Quatre contrôleurs techniques ont été sollicités. Il en ressort que le contrôleur technique fait une distinction entre, par exemple, une mission Sécurité incendie dans laquelle il ne peut rien être admis qui ne soit pas décrit dans le règlement, et une mission relative à la solidité des ouvrages pour laquelle le contrôleur évalue la situation avec ses connaissances et son expérience. Pour autant, l'absence de document technique reconnu induit qu'il n'y a pas de règle de construction générale définie, et donc que les situations doivent être étudiées au cas par cas. De ce fait, deux contrôleurs consultés ont indiqué qu'il est possible de réaliser de tels sols dans certaines configurations, l'un citant même plusieurs opérations déjà réalisées, alors que deux contrôleurs ont indiqué qu'il ne semble pas possible d'obtenir la garantie décennale sur ce type d'ouvrage.

En l'absence de référentiel technique, l'acceptation d'une pose directe de carrelage sur chape maigre dépend du contexte et de l'appréciation du risque par le bureau de contrôle.

Néanmoins, il est à rappeler que l'expression « selon les Règles de l'art » fait référence aux savoir-faire partagés, qu'ils donnent lieu ou non à des textes de référence spécifiques. Poser un carrelage sur chape maigre en respectant une technique ancienne est donc conforme aux « Règles de l'art », soit la référence souvent mise en avant pour garantir l'assurabilité professionnelle.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

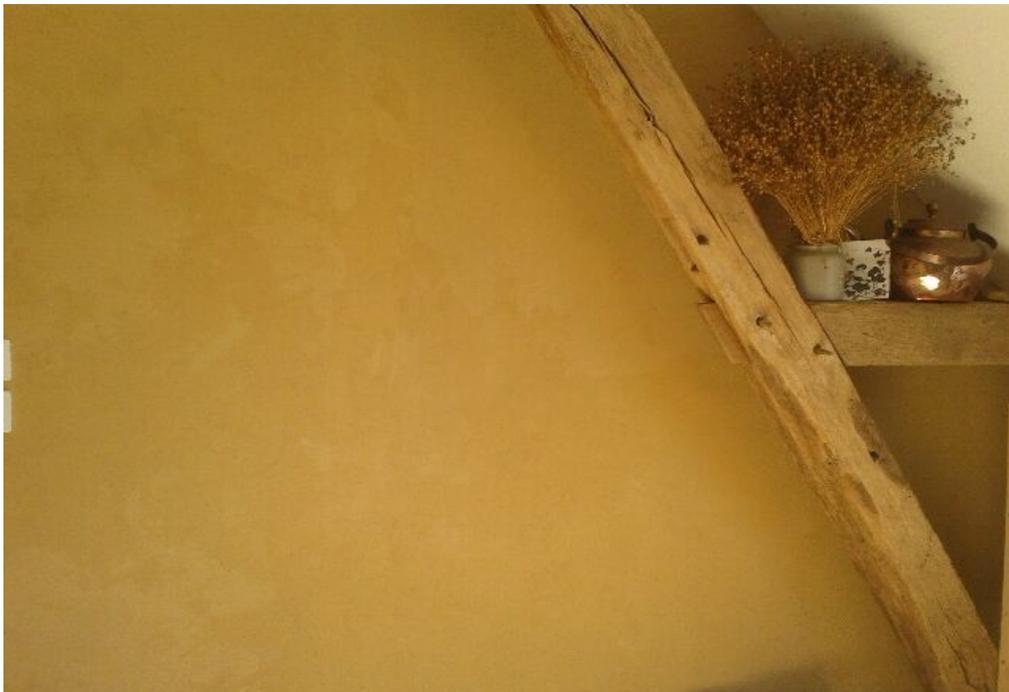
Question	M20 : Quelles sont les propriétés thermiques des enduits terre ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Pour les enduits terre non fibrés :

- Conductivité thermique : 0,8 à 0,9 W/m.K ;
- Masse volumique : 1600 – 1800 kg/m³ (si terre-sable uniquement, sans fibres) ;
- Chaleur spécifique : 1 kJ/kg.K.

Ils sont de fait adaptés pour apporter de l'inertie intérieure aux espaces de vie dans lesquels ils sont mis en œuvre. Les enduits terre apportent par ailleurs un certain confort hygrothermique puisqu'ils contribuent à réguler l'humidité dans les pièces.



*illustration 47: Les enduits terre apporte une finition esthétique, de l'inertie et contribue à réguler l'humidité.
Crédits : Valérie Seyller*

Les enduits fibrés apportent un peu moins d'inertie, cependant, ils sont légèrement plus isolant et donc ont une **effusivité*** plus faible (ils semblent plus chaud au touché).

Cependant, un calcul thermique approximatif permet de bien montrer qu'un enduit terre, même fibré, n'est pas isolant. La configuration est une maison de 80 m² de plein pied, en pierre et correctement isolée au niveau des combles. L'exercice est de regarder la consommation énergétique de la maison pour garder une température ressentie par les habitants de 19°C. Le fait de rajouter un enduit fibré ne change pas significativement la situation par rapport à l'état initial. Il faut nécessairement apporter de l'isolation pour réduire les déperditions thermiques et augmenter la température de surface des parois, ce qui réduit le

besoin de chauffage, puisque les habitants ressentent une température de l'ordre de la moyenne entre la température de paroi et la température de l'air.

Mode constructif			Température de l'air intérieur pour avoir une température ressentie de 19 °C lorsqu'il fait 0°C dehors	Résistance thermique de la paroi (m ² .K/W)	Consommation d'énergie (kWh/m ²) pour un logement situé en Normandie
Mur de base	Isolant	Finition			
Mur de pierre 40 cm	Aucun	Aucune	21,1°C	0,7	294
	Aucun	1,5 cm enduit terre	21°C	0,7	292
	Aucun	1,5 cm enduit terre fibrée	21°C	0,7	292
	3 cm de terre-chaux appliqué à la truelle	1,5 cm enduit terre	20,6°C	0,8	257
	3 cm de terre-chaux projeté		20,1°C	1,2	188
	6 cm de terre-chaux projeté		19,8°C	1,7	150
	12 cm de terre-chaux projeté		19,5°C	2,7	117

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Un tableau comparatif pourrait être fait afin de renseigner chaque fois les caractéristiques et spécificités des très nombreux types d'enduits terre possibles. Cela ne nécessite pas de connaissances scientifiques supplémentaires a priori.			

Question	M21 : Quelle technique terre crue est la plus adaptée pour faire une banquette ou une seconde peau de poêle de masse ?			
Précisions	Pisé, bauge, terre coulée ?			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

La technique pisé ou banché dépend de la terre disponible. Une autre solution, pour s'épargner un long séchage sur chantier est d'utiliser des briques types BTC (Brique de terre comprimée) ou des adobes (fabrication manuelle) qui peuvent être préparées en amont.



Illustration 48: Adobe de terre-paille



Illustration 49: Mur en BTC

La terre coulée est une méthode qui a fait l'objet de recherches, mais qui reste à notre connaissance exploratoire dans la mesure où peu de retours d'expériences existent sur cette technique. L'enjeu est de pouvoir couler la terre tout en obtenant rapidement une certaine résistance mécanique. Plusieurs techniques existent pour faire de la terre coulée. Le plâtre doit pouvoir être utilisé. Le plâtre gonfle à la prise, ce qui réduit la fissuration. L'inconvénient est que les retardateurs traditionnels du plâtre flocculent les argiles (il faut alors apporter plus d'eau pour avoir une même fluidité). Des silicates ou carbonates de soude (et d'autres défloculants commerciaux dont la composition n'est généralement pas renseignée) peuvent-être ajoutée pour disperser l'argile et ainsi pouvoir utiliser moins d'eau et réduire le risque de fissuration. Sinon, des recherches montrent l'intérêt d'alginate (glucides obtenus à partir de sucre issus d'algues), qui permettent un premier durcissement avant que le mélange ne soit complètement sec. L'impact environnemental de ces solutions reste à évaluer.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Il serait intéressant de collecter des retours d'expériences de fumistes.			

Question	M22 : Comment développer des compétences sur la terre crue ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Il y a plusieurs pôles de compétences en région Normandie:</p> <ul style="list-style-type: none"> • le PNR des Marais du Bessin et du Cotentin, avec François Streiff, qui organise plutôt des formations longues. • Enerterre, une filière terre de la Manche qui organise des chantiers participatifs, ce qui permet d'apprendre en situations réelles. • Eco-Pertica dans l'Orne, spécialisé dans le terre-allégée projeté, a déjà organisé des formations au terre-chanvre projeté. <p>En dehors de la Normandie, de nombreux centre de formation organisent des formations intégrant les mises en œuvre des techniques terre : Fédération Eco-construire, le Gabion, De la matière à l'ouvrage, Aplomb... ou AMACO plus orienté architecte.</p> <p>Pour s'acculturer sur le sujet, plusieurs ouvrages existent, entre autres :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les guides de bonnes pratiques de la construction en terre⁷², qui forment la référence technique en France validée par la profession ; • le traité de construction en terre de H. Houben, H. Guillaud⁷³ ; • les Règles professionnelles des enduits sur supports composés de terre crue⁷⁰. • Construire en terre allégée de F. Volhard⁷⁴. 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

3 Isolation

Question	I1 : Peut-on développer un isolant souple en éco-matériaux normand ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Le marché des isolants souples est difficile d'accès car les investissements industriels sont de l'ordre de plusieurs millions d'euros. Une usine produit les rouleaux de laine de chanvre / lin etc. en Vendée et la ligne représente 6,5 M€ pour 300 000 m³ d'isolants produits par an (donnée journalistique de 2008 non vérifiée). Une ligne de teillage d'une coopérative linière coûte environ 4 M€. Une usine commence à produire des panneaux à base de paille de riz en Provence-Alpes-Côte d'Azur pour 2 M€ d'investissement hors bâtiment en vue de produire 4000 t soit environ 80 000 m³ d'isolants (donnée journalistique de 2019 non vérifiée). Une ligne de production de fibre de Polystyrène expansé ou laine de roche supplémentaire dans l'usine Knauf en Bourgogne Franche-Comté représente 5 M€ pour de l'ordre de 500 000 m³ de production (donnée journalistique de 2017 non vérifiée). L'usine Pavatex (60 M€ pour une production de 50 000 t soit environ 1 M de m³ d'isolants – donnée de 2017 non vérifiée).</p> <p>La concurrence entre rouleaux biosourcés est difficile avec la fibre de bois qui produit des panneaux 20 % moins chers que les panneaux à base de chanvre/lin (prix public).</p> <p>Une étude menée en 2019 en Nouvelle-Aquitaine sur la structuration de la filière chanvre a conclu que la mise en place d'une unité de fabrication d'isolant souple est trop coûteuse pour leur projet de territoire.</p> <p>Il est possible de développer un isolant souple Normand si la filière peut mobiliser un tel investissement. En Normandie, la filière lin semble la plus solide pour s'engager sur un tel projet. Une part importante des fibres de lin est aujourd'hui exportée en Chine et pourrait ainsi rester en région. Mais compte tenu des débouchés et de la valorisation actuelle des fibres de lin pour des applications techniques (composites...), ce projet n'est pas prioritaire pour cette filière.</p> <p>Un acteur de la filière lin Normande précise que :</p> <ul style="list-style-type: none"> • les fibres les moins chères susceptibles d'être utilisées pour la fabrication de panneau souples sont toutes achetées par Ecotechnilin qui produit des non tissés pour l'automobile. Le volume disponible étant insuffisant, des étoupes de chanvre et du jute sont mélangés au lin ; • l'investissement est important, la matière première est chère (comparée au bois), il faut vendre beaucoup pour amortir l'investissement, tout en faisant de plus petites marges que les concurrents ; • l'aspect réglementaire est contraignant (long et coûteux) ; • le marché n'est pas forcément prêt à absorber le volume nécessaire à l'amortissement des lignes. 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I2 : Quelle est la résistance thermique réelle de la paille ?			
Précisions	Suivant l'épaisseur et densité des bottes.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

La résistance thermique des isolants reconnue en France doit être mesurée en laboratoire, selon la méthode de la plaque chaude gardée ou une mesure fluxmétrique. Ces appareils sont généralement conçus pour caractériser des matériaux de 10 cm d'épaisseur au plus, ce qui pose des difficultés sur la botte de paille. D'autres méthodes existent, mais les résultats peuvent différer selon les méthodes et ce d'autant plus que la conductivité thermique dépend de l'humidité dans l'échantillon, et donc de la précision du conditionnement réalisé en laboratoire.

Un article rapporte des mesures réalisées avec une plaque chaude gardée spécifiquement développée pour des échantillons de grande dimension⁷⁶, à différentes masses volumiques. L'auteur indique que la conductivité augmente avec la masse volumique, mais la dispersion des résultats est forte (voir graphique ci-après). L'effet peu marqué de la masse volumique est cohérent car la conductivité thermique sature généralement d'un optimum⁷⁵ autour de 100 kg/m³, même si cette masse volumique optimum peut varier légèrement d'un matériau à l'autre.

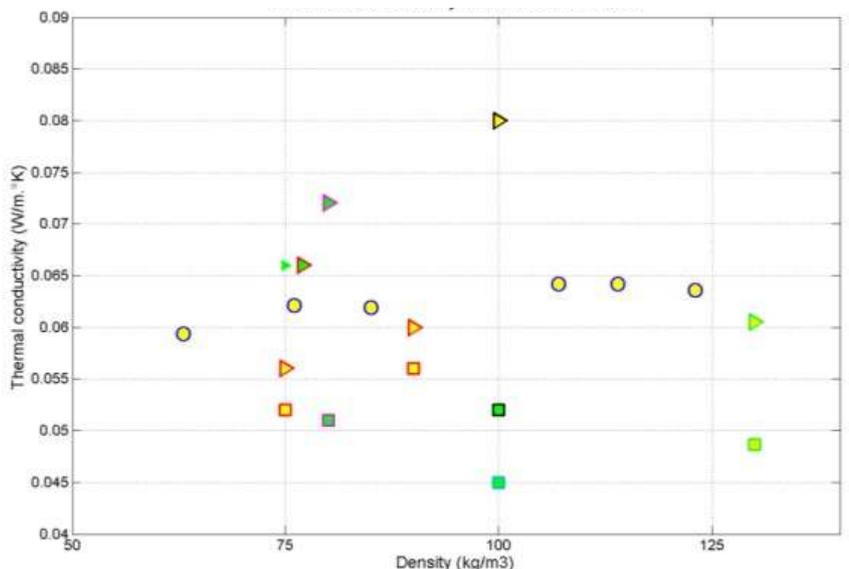


Illustration 50: Effet de la masse volumique sur la conductivité thermique de la paille d'après plusieurs études. Les carrés correspondent à des mesures perpendiculaires aux fibres, les triangles à des mesures parallèles aux fibres et les ronds à des mesures avec les fibres dans toutes les directions ⁷⁶.

La paille est plus isolante lorsque les fibres sont perpendiculaires au flux. Le **RFCP*** indique en référence les conductivités thermiques utiles de l'Arrêté du 26 octobre 2010 (annexe RT 2012), avec 0,052 W/m.K dans le sens transverse et 0,080 W/m.K dans le sens long, lorsque la masse volumique de la botte est comprise entre 80 et 120 kg/m³.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Des questions émergent depuis longtemps sur la manière de mesurer la performance			

	<p>réelle des isolants. Est-ce que la seule mesure de la conductivité thermique en laboratoire suffit ? Un projet, appelé BIP pour Building Isulation Performance, est mené par le CF2B*, l'AICB* et KARIBATI pour développer un protocole de mesure de la performance réelle d'isolants.</p>
--	---

Question	I3 : Peut-on comparer les isolants du marché sur la base de leur rapport prix/performance, durée de vie, résilience* et énergie grise ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Il serait très utile de faire ce travail, mais le sujet est complexe car :</p> <ul style="list-style-type: none"> le prix dépend fortement du type de mise en œuvre, c'est donc les coûts « fourniture et pose » qui sont à comparer. Pour aller plus loin, une analyse en coût global sur tout le cycle de vie est intéressante. Le CD2E par exemple a produit une étude en coût global comparant le béton de chaux-chanvre à la laine de verre⁷⁷. La performance n'est peut-être pas correctement estimée avec la seule conductivité thermique. Un projet appelé BIP pour Building Insulation Performance est mené par le CF2B*, l'AICB* et KARIBATI sur ce sujet. L'objectif est de développer un protocole de mesure pour évaluer la performance globale d'un isolant, biosourcé ou non. la durée de vie des isolants est aujourd'hui estimée à 50 ans. Est-ce que cette estimation est correcte, sachant que la durée de vie d'une isolation dépend au premier ordre de la bonne conception initiale des parois et de l'entretien du bâti ? la résilience est un sujet essentiel car aujourd'hui les performances des isolants sont mesurées dans des conditions optimales, qui ne sont pas toujours retrouvées sur chantier. Or, quelle est la capacité de l'isolant à maintenir ses performances en cas de situations imprévues (passage de rongeurs, dégâts des eaux...) ? Quelle est la performance moyenne sur 50 ans ? Cela reste un sujet inexploré à ce jour, mais comment le traiter ? Une simple approche de bon sens permet de répondre à certaines questions, mais une collecte massive de retour d'expériences pourrait apporter des éléments factuels, d'autant plus que nous avons à présent des exemples d'éco-constructions de plus de 30 ans, et qui pourraient être comparées à des constructions conventionnelles d'âge équivalent. l'énergie grise et le bilan carbone représentent d'intéressants critères de comparaison, mais la pertinence de ce travail dépendra de la justesse et de la représentativité statistique de la base de données utilisée. Pour ce qui est de la base française (INIES, qui regroupe les « FDES », pour « Fiche de Déclaration Environnementales et Sanitaire »), des améliorations sont en cours, mais le système de déclaration producteur à producteur plutôt que matériau à matériau rend difficile l'identification des différences majeurs entre plusieurs familles de matériaux. La comparaison avec d'autres sources d'information (Baudbook, Ecoinvent, données scientifiques) permet de conforter une analyse. <p>Enfin, notons que les ouvrages « L'isolation thermique écologique »⁷⁸ et « Isolation thermique durable des bâtiments existants »⁷⁹ tentent cette approche exhaustive des isolants thermiques.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Voir question G5 sur les impacts environnementaux des matériaux biosourcés et minéraux.				

Question	I4 : Quelle est l'incidence d'une végétalisation sur une toiture plate dite en toiture chaude sur la migration de la vapeur d'eau ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Une toiture terrasse dite « chaude » est une toiture sans espace d'air entre le complexe d'étanchéité et l'isolant. Un mode constructif possible serait, depuis l'intérieur : plafond, membrane pare-vapeur, isolant, matériau(x) d'interface, membrane d'étanchéité type EPDM et éventuel lestage (gravier, dalles sur plots, toiture végétalisée...).</p> <p>À l'inverse, une toiture terrasse est dite « froide » lorsque un espace d'air ventilé existe entre l'isolant et le complexe d'étanchéité. Le mode constructif serait : plafond, membrane pare-vapeur, isolant, panneaux pare-pluie, <u>espace ventilé</u>, panneau et membrane d'étanchéité type EPDM.</p> <p>Les toitures terrasses font l'objet du DTU 43.4. Le document suivant est intéressant sur la conception de ces toitures : « Isolation des toitures terrasses en bois » de J. Lamoulié, FCBA, 4e Forum International Bois Construction 2014.</p> <p>La membrane EPDM étant extrêmement fermée à la vapeur, une toiture terrasse chaude est par définition non perspirante. Le fait d'avoir une toiture végétalisée va néanmoins légèrement modifier son comportement :</p> <ul style="list-style-type: none"> • si le choix est fait d'avoir coté intérieur un pare-vapeur extrêmement fermé (solution proposée par le DTU), on peut penser que, du fait de la terre, la sous-face de l'EPDM sera moins froide en hiver. De fait cela limitera les risques de condensation, déjà très faibles, dans l'isolant. C'est donc là une incidence positive ; • si le choix est fait d'avoir coté intérieur une membrane hygrovariable en complément d'un isolant hygroscopique, le fait d'avoir une toiture végétalisée limitera en été la température de l'isolant, et donc l'évaporation de la condensation qui s'y sera réalisée en hiver. C'est là une incidence négative. D'ailleurs les fabricants de membranes qui proposent cette solution réalisent chaque fois, avant de s'engager sur le projet, une simulation de la paroi, qui tient compte du fait qu'elle soit lestée, végétalisée, ombragée... 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Info. Compl.				

Question	I5 : Est-ce qu'il peut y avoir des migrations des pesticides dans le bâtiment si l'on utilise des bottes de paille de blé cultivé en conventionnel ?			
Précisions	Des traces auraient été retrouvées sur des enduits terre réalisés sur des bottes de paille cultivées en agriculture conventionnelle.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Cette question a été posée pour la paille mais tous les biosourcés pouvant faire l'objet de traitements phytosanitaires au champ sont concernés. Le bureau d'étude spécialisé en santé du bâtiment MEDIECO (Suzanne Déoux) a indiqué que cette question n'avait pas de réponse à cette date.

Le **RFCP*** a fait tester les émissions de Composés Organiques Volatiles (COV)⁸⁰ de la botte de paille : la note est A+. Le protocole de mesure des COV⁸¹ consiste à placer le matériau dans une chambre d'émission étanche et de mesurer la quantité totale de COV et la quantité de COV cancérigènes à 3 jours (représentatifs des dégagements dès la mise en place du matériau) et à 28 jours (représentatif de la phase d'utilisation). Les substances quantifiées n'incluent pas les pesticides⁸².

Quelle est la nature et la teneur en pesticide qui se retrouvent dans la paille ?

Greenpeace indique « que le blé est la 4e culture la plus consommatrice de pesticides (loin derrière la pomme de terre mais proche du colza et de la betterave sucrière). »⁸³

Le blé cultivé en conventionnel reçoit une quantité de produits phytosanitaire qui dépend de différentes facteurs, dont la pratique agricole, la qualité du sol ou encore le climat. En moyenne, les régions du Nord utilisent davantage de produits phytosanitaires (illustration ci-dessous).

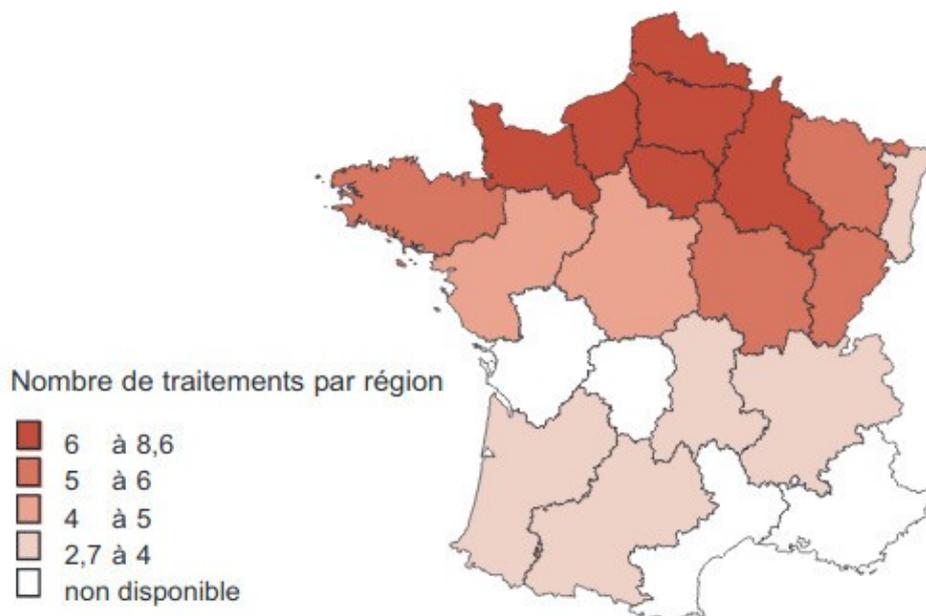


Illustration 51: Nombre de traitements par région sur le blé tendre, enquête pratiques culturelles 2011⁸⁴

Alors que les surfaces cultivées en agriculture biologique augmentent (+17 % de 2017 à 2018), la consommation de pesticides augmente également (+ 21 % de la quantité de substances actives vendues en 2018 par rapport à 2017). Cela signifie que la production conventionnelle est de plus en plus traitée.

Les céréales reçoivent différents traitements (tableau ci-dessous) :

- Les herbicides sont utilisés pour détruire les adventices ;
- les insecticides pour lutter contre les insectes, les acariens et les nématodes ;
- les fongicides pour lutter contre les bactéries et les maladies dues aux champignons microscopiques ;
- les « autres » comprennent notamment les régulateurs de croissance, les molluscicides, les rodenticides et les virucides.

Deux indicateurs sont utilisés pour quantifier l'intensité du traitement effectué d'après ⁸⁵: « Le nombre de traitements et les IFT (Indicateur de Fréquence de Traitement) sont des indicateurs complémentaires pour mesurer l'utilisation des produits phytopharmaceutiques. ». Ils expliquent que « l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) est le ratio entre la dose employée et la dose de référence du produit utilisé. ». Puis que « L'indicateur du nombre de traitements est fonction du nombre de produits appliqués et du nombre de passages pour chacun des produits. L'IFT mesure le nombre moyen de doses de référence appliquées à une culture pendant une campagne. Le calcul de cet indicateur prend donc en compte à la fois le nombre de traitements et, pour chaque traitement, la part de la surface traitée et la dose appliquée sur cette surface. »

	Blé tendre	Blé dur	Orge	Triticale
Nombre de traitements en moyenne nationale en 2017				
Total hors adjuvants	6,9	4,9	6	2,8
Herbicides	2,9	2,2	2,5	1,6
Insecticides	0,3	0,2	0,2	0,0
Fongicides	2,9	2,2	2,3	0,9
Autres	0,9	0,4	1,1	0,2
IFT en moyenne nationale en 2017				
Total hors traitement semence	4,2	3,3	3,5	1,9
Herbicides	1,8	1,4	1,7	1,2
Insecticides	0,2	0,1	0,1	0
Fongicides	1,6	1,4	1,1	0,6
Autres	0,6	0,3	0,5	0,1

Tableau 6: Nombre de traitements et IFT sur différentes variétés de céréales en 2017⁸⁵. Les valeurs au-dessus de 1 sont indiquées en rouge.

Nous retiendrons donc que les céréales étudiées subissent en particulier des traitements herbicides et fongicides. Ajoutons à cela l'emploi de semences traitées, qui incluent généralement des insecticides.

L'index de l'ACTA (Association de Coordination Technique Agricole) publie chaque année la liste des principaux produits autorisés et commercialisés⁸⁶. En 2012, il existait 106 substances actives autorisées en herbicides, 91 fongicides, 59 insecticides et 84 pour d'autres usages⁸⁸. Deux études en particulier

permettent d'avoir un panorama des différentes familles de molécules utilisées et de leurs impacts sur la santé^{87, 88}. Une base de donnée de l'INERIS existe rassemblant près de 640 substances utilisées par le passé ou actuellement et leurs caractéristiques⁸⁹. Le tonnage de consommation de certaines molécules est estimé⁸⁷, mais il n'est pas connu par type de culture, ce qui ne nous permet pas d'identifier les molécules utilisées spécifiquement sur les céréales. Rappelons que la grande diversité de pratiques selon les régions et les parcelles concernées rend quoi qu'il en soit peu précise une analyse avec des moyennes nationales. Globalement, la base de donnée de l'INERIS (L'Institut national de l'environnement industriel et des risques)⁸⁹ indique que la demi-vie des molécules est inférieure à 100 jours pour 80 % des substances pour laquelle cette donnée est indiquée, ce qui signifie qu'elles ne présenteraient pas de risque pour les habitants d'une maison en paille et probablement peu pour les travailleurs en supposant qu'il y a 100 jours entre le dernier traitement et l'utilisation des bottes. Mais certaines substances ont des demi-vies plus longues, jusqu'à 10 000 ans, et l'on retrouve dans ce cas tout type de molécules.

Une étude a été menée par l'association Générations Futures sur les pesticides présents dans des céréales de petit déjeuner non bio⁹⁰. Il s'agit de mueslis contenant des céréales et pour certains des fruits secs. Sur 15 marques testées, 30 molécules ont été retrouvées. La concentration de chaque molécule retrouvée n'est pas indiquée, mais une moyenne de résidus de 0,177 mg/kg est annoncée, avec une plage de variation de 0,045 à 0,350 mg/kg. Le tableau ci-dessous indique les molécules retrouvées. La majorité des molécules provient de traitement après récolte, avec des molécules à faible demi-vie, appliquées sur les fruits et/ou les grains de céréales (le traitement des grains est détaillé dans une étude⁹¹). Cela ne concerne donc pas la paille de blé dont la valorisation économique ne justifie pas l'emploi de traitements phytosanitaires après récolte. Les molécules dont la demi-vie est supérieure à 100 jours sont surlignées en rouge. Nous ne pouvons pas trancher sur leur provenance dans les mueslis, viennent-elles des fruits ou des céréales ? Cependant, nous avons identifié des produits commercialisés pour les céréales contenant ces molécules, ainsi ils peuvent tous potentiellement être issus de traitement sur les céréales.

Les deux produits à la vie la plus longue sont le Boscalid (200 j) et le tricyclazole (300 j).

Le Boscalid n'est a priori pas un perturbateur endocrinien et n'est pas cancérigène⁹⁰. Cependant, ce fongicide fait l'objet d'une controverse actuellement, avec plusieurs scientifiques réclamant l'arrêt de l'utilisation de cette molécule de type SDHI, «pour sa dangerosité mais aussi parce qu'elle est une des molécules que l'on retrouve le plus dans nos assiettes »⁹². L'article indique par ailleurs qu'«ils sont depuis omniprésents dans le traitement des récoltes, parfois utilisés en enrobage directement sur les semences. Jusqu'à 80 % des champs de blé sont traités avec des SDHI. ».

Le tricyclazole est interdit en Europe depuis 2016 compte tenu de son potentiel génotoxique et cancérigène et c'est un potentiel perturbateur endocrinien⁹⁰.

Molécule	Demi-vie au champ (j)	Rôle
Pyriméthanol	34	fongicide
Boscalid	200	fongicide
Azoxystrobine	21	fongicide
Chlorpyrifos-éthyl	18,7	insecticide
Cyprodinyl	44,7	fongicide
Iprodione	84	fongicide
Metalaxyl et metalaxyl-M	38,7	fongicide

Pipéronyl-butoxyde	13	insecticide
Fluopyram	162	fongicide
Indoxacarb	19,5	insecticide
Méthoxyfénoside	86	insecticide
Pirimiphos-méthyl	18	insecticide
Myclobutanil	35	fongicide
Cyhalothrine	23	insecticide
Cyperméthrine	106	insecticide
Fenhexamide	<1	fongicide
Penconazole	86	fongicide
Tebuconazole	31	fongicide
Trifloxystrobin	8	fongicide
Acetamipride	3	insecticide
Bifenthrine	34	insecticide
Chlorpropham	25	herbicide
Deltaméthrine	21	insecticide
Difeconazole	85	fongicide
Fenvalérate	40	Insecticide, Acaricide
Fludioxonil	19	fongicide
Imidaclopride	174	insecticide
Propargite	16	acaricide
Pyraclostrobin	31	fongicide
Tricyclazole	130 - 300	fongicide

Tableau 7: Molécules retrouvées dans les mueslis

Est-ce que le Boscalid et le Tricyclazole peuvent migrer de la paille vers l'habitat ?

Les données de l'INERIS et de l'EFSA⁹³ indiquent que le boscalid et le tricyclazole sont peu volatiles et « très stable » en termes de décomposition chimique dans de l'eau à pH7. C'est aussi le cas des deux autres molécules dont la demi-vie est supérieure à 100 j (cyperméthrine et imidaclopride). Autrement dit, ces pesticides ne vont pas migrer de la botte de paille vers l'habitat et dans le cas d'application de terre-paille ou d'enduits terre sur paille, apportant de l'humidité, ils tarderont à se dégrader. Compte tenu de leur demi-vie, ils ne semblent pas présenter de risque particulier pour les habitants.

Est-ce que les pesticides identifiés sont susceptibles d'affecter les constructeurs paille ?

Les constructeurs paille manipulent manuellement des bottes de paille quotidiennement, ils sont donc potentiellement plus exposés que des agriculteurs ou des éleveurs. Le caractère stable et peu volatile des pesticides limite les risques pour les travailleurs. Le principe de précaution serait, en cas d'utilisation de bottes de paille issues d'une agriculture intensive et utilisées sans délais après récolte, d'utiliser des gants, masques et de se rincer les mains après le chantier.

Conclusion

Les traitements sur la paille en agriculture conventionnelle varient selon les territoires et les pratiques des agriculteurs. Les molécules se dégradent assez rapidement et ne présentent pas de risques d'exposition à long terme pour les habitants. Les molécules retrouvées ont une demi-vie pouvant aller jusqu'à 300 jours,

ce qui pourrait se traduire par deux préconisations à titre de précaution :

- favoriser une période de carence de stockage des bottes avant utilisation,
- si les bottes sont issues d'une agriculture conventionnelle intensive et que les bottes sont utilisées après récolte, les travailleurs en contact avec la paille pourront porter des gants, un masque et se rincer les mains après le chantier.

Mais au final, cette dernière précaution n'est-elle pas nécessaire pour tout(e) professionnel(e) mettant en place des isolants ? Car avec ou sans présence de résidus de traitement, les professionnel(le)s sont régulièrement en contact avec la poussière qui accompagnent la manipulation de la majorité de ces matériaux.

Cette question avait initialement été posée suite à l'observation de taches sur des enduits de finition sur botte de paille. C'est une problématique rencontrée à diverses reprises, et les explications peuvent être nombreuses, mais il semble peu probable que ce soit lié à des résidus de pesticides présents dans la paille.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I6 : Quelle est la fin de vie des liants pétrosourcés présents dans les panneaux de laine de chanvre ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Les panneaux de laine de chanvre contiennent de l'ordre de 8 % en masse de liant polyester pour lier les fibres entre elles⁹⁴. Ce liant a un impact environnemental non négligeable : la production du liant émet de l'ordre de 8 fois plus de carbone que la production de la laine de chanvre⁹⁵. Par ailleurs, cela empêche le compostage en fin de vie. Les trois exutoires des plastiques sont l'enfouissement, l'incinération ou le recyclage. La fin de vie probable des panneaux est un enfouissement (c'est d'ailleurs le scénario retenu sur la FDES en vigueur des panneaux BIOFIB TRIO). La durée de vie du polyester dépend des conditions du milieu, mais des durées comprises entre 95 et 4300 ans sont évoquées lorsque le polyester est enfoui dans du remblai⁹⁷. Une étude⁹⁶ témoigne de « la bonne stabilité chimique des fibres » de polyester noyées dans du remblai pendant 20 ans, une situation représentative d'une fin de vie par enfouissement. Une autre étude similaire fait le même constat après 28 ans⁹⁷. L'avantage du fait de l'extrême pérennité de la fillasse de chanvre (ou d'autres fibres résistantes comme le lin) et du polyester est la possibilité d'envisager le ré-emploi.</p> <p>La présence de liant (fibre polyester ou autre) permet de structurer la matière et améliore ainsi la conductivité thermique. À 30 - 35 kg/m³, un rouleau de laine de chanvre a une conductivité thermique de 0,039 W/m.K, contre 0,051 W/m.K pour la laine en vrac à la même densité. Plus la masse volumique de la laine de chanvre vrac est élevée, plus sa conductivité thermique se rapproche de celle du panneau lié. Pour le vrac, il faut donc privilégier les hautes masses volumiques (50 kg/m³ à 80 kg/m³). L'intérêt du vrac est de permettre un développement en filière locale avec des unités de production low-tech, alors que la production de panneaux nécessite des unités de relevant d'investissements industriels. Mais, à faible masse volumique, le coût environnemental du liant et de la fabrication du panneau est peut-être contrebalancé par les économies d'énergie par rapport à du vrac.</p> <p>D'autres liants sont utilisés, tels que la paraffine et la colle PMDI (Polymeric diphenylmethane diisocyanate – la colle qui sert pour les panneaux OSB) pour les panneaux de fibre de bois Pavatherm⁹⁸. Les laines minérales étaient liées majoritairement par des liants phénoliques^{99, 100}, mais des liants sans formaldéhydes sont aujourd'hui utilisés par plusieurs producteurs¹⁰¹. Certains panneaux sont liés à l'amidon, ce qui permet la dégradabilité par compostage du panneau, et le réemploi du panneau est peut-être possible sous une forme vrac si le liant amidon n'a pas la durabilité requise pour une seconde vie.</p>				



Illustration 52: Laine de chanvre en vrac en caisson. Crédits : Eco-Pertica

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I7 : Est ce que les conditions d'une maison risquent de dégrader les éco-matériaux ?			
Précisions	Car si un matériau biodégradable, on peut craindre qu'il se dégrade. Exemple du cas d'un éco-matériaux en ITI derrière un frein vapeur.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Excepté le liège expansé, les matériaux biosourcés sont dégradables s'ils sont soumis à de forts niveaux d'humidité et de température. La clé de la durabilité réside dans les dispositions constructives : par exemple la durabilité en ITE dépend au premier ordre de la durabilité du bardage bois. Les situations à risques (dégâts des eaux, remontées capillaires...) doivent être anticipées, que les matériaux soient biosourcés ou non.</p> <p>Pour ce qui est d'un critère de durabilité, le CSTB et le FCBA¹⁰² indiquent que la limite pour éviter la dégradation des matériaux biosourcés est de 8 semaines par an, pas forcément consécutives au-delà de 23 % d'humidité en masse dans le matériau, en ne comptant pas les durées d'exposition inférieures à 1 semaine. Ce critère suscite trois questions :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Il pourrait être complété d'une condition supplémentaire sur la température (supérieure à 5°C), qui stimule le développement fongique. • Il ne distingue pas les matériaux biosourcés, or tous les biosourcés ne sont pas tous égaux en termes de facilité à moisir¹⁰³, mais aucun tableau exhaustif de classement du comportement des différents biosourcés n'a été identifié. Notons que les matériaux inertes (béton de ciment, laine minérale...) peuvent eux aussi être support de moisissures, mais ils sont globalement plus résistant au développement fongique que les biosourcés¹⁰⁴. • Enfin, ce critère est basé sur la connaissance de la courbe de sorption* à fort taux d'humidité, une zone où elle peut présenter de fortes variabilité d'une étude à l'autre. <p>L'intérêt d'avoir un critère serait de pouvoir estimer par simulation le risque de dégradation. Cependant, il faudrait s'assurer que le critère choisit correspond à la réalité de ce qui se passe en conditions réelles.</p> <p>Néanmoins, les situations où la pose d'un isolant sensible à l'eau est à appréhender avec la plus grande attention sont déjà connues :</p> <ul style="list-style-type: none"> • bas de murs sujets à remontées capillaires ; • ITI d'un mur exposé à la pluie qui ne serait pas totalement imperméable à l'eau ; • murs enterrés ; • ITI, particulièrement pour le bâtiment souffrant d'un manque de renouvellement d'air et/ou si le choix de l'étanchéité à l'air n'est pas approprié ; • sols avec risques d'inondations ou de dégâts des eaux. 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Il serait pertinent de suivre les analyses scientifiques qui seront produites à l'avenir sur ce sujet et de le valider à l'aide d'un suivi d'isolation en œuvre.			

Question	I8 : Peut-on définir un étalon à réaliser sur chantier pour valider les performances des bétons biosourcés ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Oui, c'est possible, sachant qu'il est parfois difficile de mesurer des paramètres extrêmement précisément sur chantier. Toutefois, la pratique des tests de formulation des artisans mettant en oeuvre des enduits en terre crue montre que cette précision peut tout fait être suffisante. Par ailleurs, si un travail en amont a été réalisé pour définir l'essai de chantier pertinent à réaliser, alors cela devient intéressant car on peut valider un certain nombre de caractéristiques pour le matériau utilisé pour un chantier en particulier : résistance mécanique, masse volumique.</p> <p>Les guides de bonnes pratiques de la construction en terre crue indiquent plusieurs de tests de chantier⁷².</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Info. Compl.	Il serait utile de disposer d'un tableau renseignant les tests potentiellement pertinents pour divers bétons biosourcés / types d'utilisations. Le besoin de R&D est peu compliqué, mais il faudrait formaliser le test à réaliser et indiquer les valeurs des propriétés qui découlent du résultat.			

Question	I9 : Peut-on avoir une conductivité thermique reconnue officiellement sur les étoupes de lin ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Oui. Une étude de R&D peut permettre d'analyser la variabilité des performances hygro-thermiques de la fibre. Compte tenu de la valorisation actuelle de l'étope, la filière lin ne semble pas particulièrement active sur le développement des débouchés de cette partie de la plante. Par contre elle pourrait souhaiter valoriser les anas (Illustrations ci-dessous)</p>				
				
Illustration 53: Fibres de lin		Illustration 54: Anas de lin		
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
La première étape serait de solliciter la filière lin pour identifier la variabilité du gisement, et étudier avec elle les intérêts à valoriser telle ou telle partie de la plante.				

Question	I10 : Où trouver une botteleuse pour faire de petites bottes ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>L'Association Régionale de Promotion de l'Eco-construction peut aiguiller les professionnels normands en tant que correspondante locale du RFCP (Réseau Français de la Construction Paille). Par ailleurs, l'ARPE travaille au développement d'une filière paille sur le territoire du Cingal-Suisse normande. Enfin, elle dispose d'une cartographie des éco-constructeurs sur son site internet, qui peut être une manière pour trouver des professionnels proches du chantier. Sinon, vous pouvez poser la question aux CUMA du territoire pour trouver une petite botteleuse, voire aux paysans, en activité ou en retraite, car certains ont gardé ce type de botteleuse en état de fonctionnement.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I11 : Quels sont les isolants locaux disposant d'une performance thermique reconnue officiellement ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
L'annexe IX de l'arrêté du 26 octobre 2010X (RT2012) :				
<ul style="list-style-type: none"> • Botte de paille = 0,052 ou 0,080 W/m.K selon la direction ; • chanvre et lin en vrac = 0,056 W/m.K 				
Des mesures ont été réalisées dans des laboratoires accrédités COFRAC :				
<ul style="list-style-type: none"> • Chènevotte standard = 0,045 W/m.K (10°C sec) ; • chènevotte grossière = 0,050 W/m.K (10°C sec) ; • laine de chanvre 35 kg/m³ = 0,051 W/m.K (10°C sec) ; • laine de chanvre 50 kg/m³ = 0,046 W/m.K (10°C sec) ; • terre-chanvre = 0,090 W/m.K (10°C sec à 319 kg/m³) ; • terre-paille = 0,079 W/m.K (10°C matériau humide à 212 kg/m³) ; • terre-paille = 0,099 W/m.K (10°C matériau sec à 332 kg/m³). 				
Remarque :				
<ul style="list-style-type: none"> • pour le terre-chanvre et le terre-paille, on pourra se référer au guide de bonnes pratiques terre allégée ; • pour le chanvre et le terre-chanvre, des mesures humides sont également disponibles auprès de l'Association des Chanvriers en Circuits Courts. 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I12 : Quels éco-matériaux locaux se prêtent bien à l'Isolation Thermique par l'Extérieur ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>L'Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) en éco-matériaux est possible sur un mur sain et pour les parties non sujettes à des remontées capillaires. L'isolant doit être protégé de la pluie, et placé sur un soubassement imputrescible (bloc ponce, liège...), avec en interface une rupture capillaire radicale, qui de plus sera placée au-dessus de la zone de rejaillissement, usuellement entre 15 et 25 cm. Les solutions possibles en matériaux locaux :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Botte de paille : forte épaisseur et mise en œuvre non encore intégrée dans les règles professionnelles de la construction en paille. Des formations à cette mise en œuvre existent déjà (contact : Coralie Garcia - coralie.garcia@rfcp.fr) Une filière de petites bottes est en montage avec l'ARPE. • Laine de chanvre en vrac ou en botte : épaisseur plus petite que les bottes de paille pour une même performance thermique, sachant que cette dernière, dépend également de la masse volumique. Mise en œuvre en caissons. Solution non encore référencée dans les règles de l'art. • Étoupes de lin, anas de lin ou chènevotte : mise en œuvre en vrac en caisson, solutions non encore référencée dans les règles de l'art. • Béton biosourcé / terre-chanvre, terre-paille : des résultats de mesures de performance thermique et de réaction au feu officiels existent et des caractérisations acoustiques ont été effectuées. Ces mise en œuvre sont couverts par le guide de bonnes pratiques de la construction en terre allégée¹⁰⁵. • Béton biosourcé / chaux-chanvre : cette famille de matériaux est couverte par des règles professionnelles¹⁰⁶. 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I13 : Quels matériaux naturels permettent l'isolation de parties enterrées ou d'un terre-plein ?			
Précisions	Autre que le liège			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Les matériaux en contact avec le sol ou un mur enterré sont soumis potentiellement à une humidité élevée prolongée, ce qui ne se prête pas à l'utilisation de matériaux biosourcés, hormis le liège qui est imputrescible. Attention toutefois avec les plaques de liège, qui sont peu capillaires et peu perméables à la vapeur d'eau.</p> <p>En cas d'utilisation de liège expansé, adapter sa mise en œuvre au fait qu'il n'est pas capillaire, et dans sa version « panneau », moins ouvert à la diffusion de vapeur d'eau que la majorité des isolants biosourcés.</p> <p>Des matériaux non biosourcés sont possibles : verre cellulaire, bloc de pierre ponce - ciment, schiste expansé. Du schiste est produit en Mayenne (granulex.fr) et il peut être mélangé à de la chaux pour la réalisation de dalles. Pour l'isolation du sol au rez-de-chaussée en biosourcé, hormis le liège, seule la dalle chaux-chanvre est pratiquée par certains professionnels en s'appuyant sur les règles professionnelles de Construire en Chanvre. Certains professionnels ne recommandent pas cette pratique compte tenu des risques de dégradation liés à l'eau inhérents au rez-de-chaussée (dégât des eaux, inondations, présence prolongée d'humidité) et des temps de séchage prolongés.</p> <p>En revanche pour l'isolation de murs enterrés, l'ensemble des biosourcés utilisables en remplissage de structures bois ou métal sont possibles dans le cas de la mise en œuvre d'une cloison de doublage. Ce système constructif, présenté dans le DTU 20.1 (Maçonnerie de petits éléments) correspond à la réalisation d'une cloison intérieure séparée du mur qu'elle double par un vide d'air ventilé sur l'extérieur. (Autres exigences de mise en œuvre accessibles dans le DTU)</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I14 : Peut-on avoir un récapitulatif des alternatives pour l'isolation de sous-toiture ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>En matériaux locaux, les principales possibilités sont les bottes de paille, la laine de chanvre en vrac ou en botte, et les étoupes de lin. Pour limiter le pont thermique lié aux éléments en bois, on peut utiliser des poutres en I, ou réaliser le caisson en deux montants bois croisés. Pour couper le pont thermique, un isolant en fibre de bois peut être rajouté par-dessus.</p> <p>Des solutions vrac sont possibles : balle de riz, épeautre ou sarrasin, ouate de cellulose, anas de lin, chènevotte stabilisée ou non à la chaux ou à la terre. L'utilisation de granulat seul (balle, chènevotte) demande une mise en œuvre spécifique en paroi inclinée du risque de tassement.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	I15 : Des recherches spécifiques ou partages de savoir-faire peuvent-ils être menés sur tous les aspects liés à la préfabrication en atelier de murs en paille ou en bétons de chanvre ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
Oui				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	<p>Une entreprise belge est spécialiste de la préfabrication en paille (PailleTech). Plusieurs entreprises en France sont sur le créneau : LB ECO Habitat (chaux-chanvre), Echopaille (botte de paille)... En Normandie, plusieurs entreprises sont concernées :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Duchesne, Seine Maritime ; • AMAND SARL, Manche ; • Chanu HD, Calvados ; • Poulingue, Eure ; • Abbei, Seine Maritime ; • Maugy, Eure ; • Paroielle, Seine Maritime ; • Cuiller frères, Seine Maritime. <p>Une entreprise est située sur un territoire limitrophe, ISOPAILLE, en Sarthe. Le développement de la filière paille sur le territoire du Cingal, accompagné par l'ARPE, ouvrira probablement des possibilités.</p>			
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Organiser des réunions de travail et des voyages d'étude seraient potentiellement utile.			

Question	I16 : Pourrait-il y avoir une structure / personne pour répondre à des questions techniques et scientifiques que l'on rencontre sur chantier ?			
Précisions	Par exemple en récupérant des échantillons, en les analysant et en les conservant pour d'éventuelles futures analyses.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
En région, il y a le réseau des ambassadeurs des biosourcés, mais aucune communication n'est faite sur les membres de ce réseau à ce jour. L'acteur en Normandie pour cela, c'est l'ARPE, qui peut collecter les questions, et tenter d'identifier un professionnel capable d'apporter une réponse.				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

4 Question d'ordre général

Question	G1 : Peut-on développer un catalogue sur les ponts thermiques dans l'habitat ancien ?			
Précisions	Il n'y a pas de données précises avec des matériaux multiples, le problème des murs de refends, etc.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Sur le bâti ancien, des données existent dans plusieurs ouvrages, principalement le guide ABC « Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs construits de 1850 à 1974 »¹⁰⁷.</p> <p>A titre d'exemple, un travail a été réalisé par le Réseau Français de la Construction Paille pour la construction neuve (projet belge APROPAILLE¹⁰⁸).</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	<p>La première étape serait une analyse bibliographique des documentations existantes, en différentes langues (anglais, allemand, français a minima) et en s'appuyant sur les documents dont pourraient disposer différents BE thermique à l'échelle nationale.</p> <p>La seconde étape pourrait être de consulter les BE thermique intéressés par cette thématique en leur demandant de faire remonter les schémas des modes constructifs rencontrés et leurs variations (épaisseurs, types de matériaux...). Puis ce sujet peut faire l'objet d'un stage ingénieur co-encadré par les BE thermique. Le livrable serait un catalogue de ponts thermiques dans l'existant.</p>			

Question	G2 : Quelle est la migration réelle de vapeur d'eau au travers de parois avec des enduits ou des membranes ?			
Précisions	Besoin de données objectives et de modélisations.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
<p>Analyse</p> <p>Les discussions sur la migration de vapeur d'eau sont généralement limitées à la perméabilité à la vapeur d'eau* (μ) et la résistance à la diffusion de vapeur d'eau* (Sd). Un pare-vapeur a un Sd généralement supérieur à 10 à 20 m. Un frein vapeur hygrovariable Intello Proclima a un Sd variant entre 0,25 à 25 m. Les enduits terres ou chaux-sable d'un cm d'épaisseur ont un Sd de l'ordre de 0,1 à 0,15 m, soit de l'ordre de 2 fois plus ouvert qu'une membrane hygrovariable dans sa plus grande ouverture possible.</p> <p>La régulation hygroscopique permise par différents matériaux a été mesurée dans plusieurs études à l'aide du MBV (Moisture Buffer Value) ou valeur de tampon hydrique*. La mesure de cette variable est basée sur l'application de cycles d'humidification - séchage en laboratoire, et l'on mesure la masse d'eau que le matériau absorbe durant ces cycles. Le MBV dépend de la vitesse à laquelle le matériau absorbe et diffuse la vapeur d'eau. Cela dépend de la sorption*, qui représente l'eau que peut stocker le matériau lorsqu'il est exposé à une humidité relative donnée et de la perméabilité à la vapeur d'eau.</p> <p>Les enduits terre peuvent capturer de l'ordre de 60 g/m² en 8 h à 12 h ¹⁰⁹. Considérant une maison de 6 m de large et 12 m de long avec des murs de 2,5 m de hauteur et 20 % d'ouvertures, la surface de parois verticales est de 72 m². La régulation sur 12 h maximale est de 60 g/m² x 72 m² = 4,3 kg. Une famille de deux personnes émet 2 kg d'eau en 12 h. Ainsi, les enduits terres peuvent à eux seuls de réguler cette production de vapeur. Les enduits terre permettent typiquement de réguler la vapeur d'eau 2 fois plus que les enduits chaux et 5 fois plus que les enduits au plâtre d'après cette étude. Attention toutefois, si l'enduit absorbe de l'eau, il est nécessaire que la paroi puisse « gérer » cette humidité sans que cela ne crée de pathologies. En particulier, la continuité de capillarité* dans la paroi est essentielle. Dans le cas d'une situation potentiellement à risque, par exemple dans le cas d'une isolation par l'intérieur sur un support peu perméable et capillaire (briques cuites relativement imperméables, mur maçonné en pierres durs...), où l'humidité ne peut passer que par les joints, alors un enduit chaux ou plâtre peut être plus judicieux qu'un enduit terre.</p> <p>La contribution d'une solution enduite à la régulation d'humidité dépend de nombreux paramètres du bâti, notamment le climat extérieur, les conditions thermo-hygrométriques intérieurs et la ventilation du logement. Une partie de l'humidité est également évacuée par la ventilation naturelle ou mécanique, qui est nécessaire pour extraire l'air vicié. En présence d'enduits terre, le fait d'avoir une régulation d'humidité par les parois peut induire une ventilation insuffisante en cas d'utilisation d'une VMC hygrovariable. Dans ce cas, il est judicieux de commander le débit de la VMC par un capteur de dioxyde de carbone.</p> <p>Les résultats disponibles à ce jour ¹¹⁰ indiquent que les parois à membranes contribuent peu à la régulation hygrothermiques, l'effet est globalement limité au parement. Par contre les parois enduites permettent réellement une régulation d'humidité. C'est d'ailleurs tout l'intérêt des solutions bétons biosourcés complétés par un enduit.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	G3 : Quelle est l'impact de la régulation d'humidité sur la performance globale des parois ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Au préalable, précisons qu'une présence sur des périodes longues d'une quantité importante d'eau met à mal la plupart des parois des bâtiments, particulièrement si elles comportent des matériaux putrescibles, oxydables, gélifs, ou de la terre crue en rôle structurel. Mais respecter les mises en œuvre permettant des parois pérennes est une des base des « Règles de l'art » ou « Règles de mise en œuvre ». Leur objectif vis-à-vis de l'humidité est assez simple : tout faire pour limiter l'humidification des parois, et lorsque ces dernières comportent de l'humidité : leur permettre un assèchement aisé. On peut donc en déduire que la situation « normale » correspond à une paroi pérenne vis-à-vis de l'eau, c'est-à-dire entre autres une paroi jamais réellement humide parce qu'elle sait gérer les flux de vapeur ainsi que la présence d'eau en son sein.</p> <p>Concernant spécifiquement une paroi isolée avec des matériaux biosourcés dont la mise en œuvre permet sa pérennité :</p> <ul style="list-style-type: none"> • l'eau pénalise la conductivité thermique puisqu'un matériau sec est plus isolant qu'un matériau humide. Ce point est intégré dans les calculs thermiques car pour les matériaux hygroscopiques, ce qui est le cas des isolants biosourcés, on utilise le « lambda utile » et non le « lambda sec » ; • l'eau peut changer de phase, ce qui libère ou capture de l'énergie. Cela fonctionne à l'instar d'une bouilloire. Lorsque l'eau bout, alors l'énergie apportée ne se traduit pas par une élévation de température de l'eau mais par la production de vapeur d'eau. Dans un logement, si le soleil chauffe un mur, une partie de l'eau qu'il contient pourra se transformer en vapeur en consommant des calories, ce qui limite l'augmentation de température du logement. C'est un avantage en été et un inconvénient en hiver. Mais la nuit ou lors de journées froides nous aurons l'effet inverse, avec une partie potentiellement importante de vapeur d'eau condensant dans les parois de nos bâtiments. Ce phénomène va libérer des calories et donc limiter la déperdition des parois, ce qui en l'occurrence est en ces moments précis plutôt bienvenu. (En fait, cette capacité à fixer de la vapeur d'eau en eau, ou à la restituer en vapeur augmente l'aspect inertiel des matériaux). Ce comportement des matériaux hygroscopiques (capables de fixer en eau une partie de la vapeur d'eau qu'ils contiennent) permet également d'écarter les périodes où l'air serait particulièrement chargé ou pauvre en vapeur d'eau. On parle alors d'inertie hydrique. 				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Le CF2B* et l' AICB* travaillent actuellement avec KARIBATI au montage d'un projet dont l'objectif est d'évaluer l'impact de l'humidité sur la performance des parois biosourcés.			

Question	G4 : Peut-on développer des mesures <i>in situ</i> du confort ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Le confort n'est pas seulement lié au bâti, mais aussi aux habitants. Fanger¹¹¹, définit le confort comme étant un état d'esprit exprimant la satisfaction de son environnement.</p> <p>Le confort peut être évalué de différentes manières. L'INSEE se base sur les critères suivants : surface par habitant, type de chauffage, être propriétaire ou non de son logement, l'équipement sanitaire. L'OMS utilise également des critères « globaux » de ce type. Ces critères sont définis par des évaluateurs externes sans recueil de l'avis de l'habitant, et ne sont pas particulièrement liés aux matériaux et à la conception du bâti.</p> <p>La norme 15251 définit quatre variables essentielles dans le confort d'un habitant : confort thermique, acoustique, lumineux et qualité de l'air. La notion de confort est une perception globale, dont il n'est pas toujours clairement possible de distinguer la raison.</p> <p>L'acoustique, le confort lumineux ou le confort en termes de qualité de l'air (lié au renouvellement de l'air) peuvent tout trois être satisfaisants avec des éco-matériaux ou des matériaux conventionnels. Le confort thermique (ou par extension thermo-hygrique) peut par contre différer. La seule mesure de la température de l'air n'est pas suffisante, puisque cela omet les effets de paroi froides, les courants d'air ou les gradients de température, l'humidité ou l'habillement des habitants, qui sont autant d'éléments impactant le confort thermique (voir norme NF EN ISO 7730). Deux méthodes de mesures de confort thermique « objectives » existent (méthode de Fanger et température au thermomètre-globe mouillé), et une méthode « subjective » (méthode dite de Humphreys et Nicol), basée sur une analyse pays par pays des attentes des occupants pour se sentir confortable. L'approche subjective permet de prendre en compte des facteurs psychologiques qui dépendent de la culture.</p> <p>La mesure de la température et de l'humidité en un point est facilement réalisable avec un capteur. Mais est-ce suffisant pour mesurer le confort des habitants ? Le résultat dépend de la position des capteurs, qui ne sont pas situés au même endroit que l'habitant, et cela ne donne pas la température ressentie qui dépend de la température de l'air et du rayonnement des parois. Pour mesurer la température ressentie, un thermomètre au globe noir est nécessaire. L'analyse de bâtiments instrumentés est chronophage, et il manque parfois des informations complémentaires : occupation du logement, climat extérieur, efficacité de la ventilation, comportement des habitants... Ainsi, positionner un ou deux capteurs dans des logements ne sera pas suffisant pour mesurer le confort thermique ressenti. Cette approche n'est pas assez fine pour enregistrer la potentielle plus-value de confort apportée par les éco-matériaux.</p> <p>Cependant, mettre en place un programme dédié d'instrumentation de bâtiments peut apporter des éléments intéressants, notamment si l'analyse se base sur une approche statistique intégrant de nombreux bâtiments.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Une idée pourrait être de compléter la base de rénovation écologique de l'ARPE par la performance du logement et un questionnaire de confort soumis aux habitants. Des méthodologies existent. Ce travail nécessite que quelqu'un se charge de recueillir et			

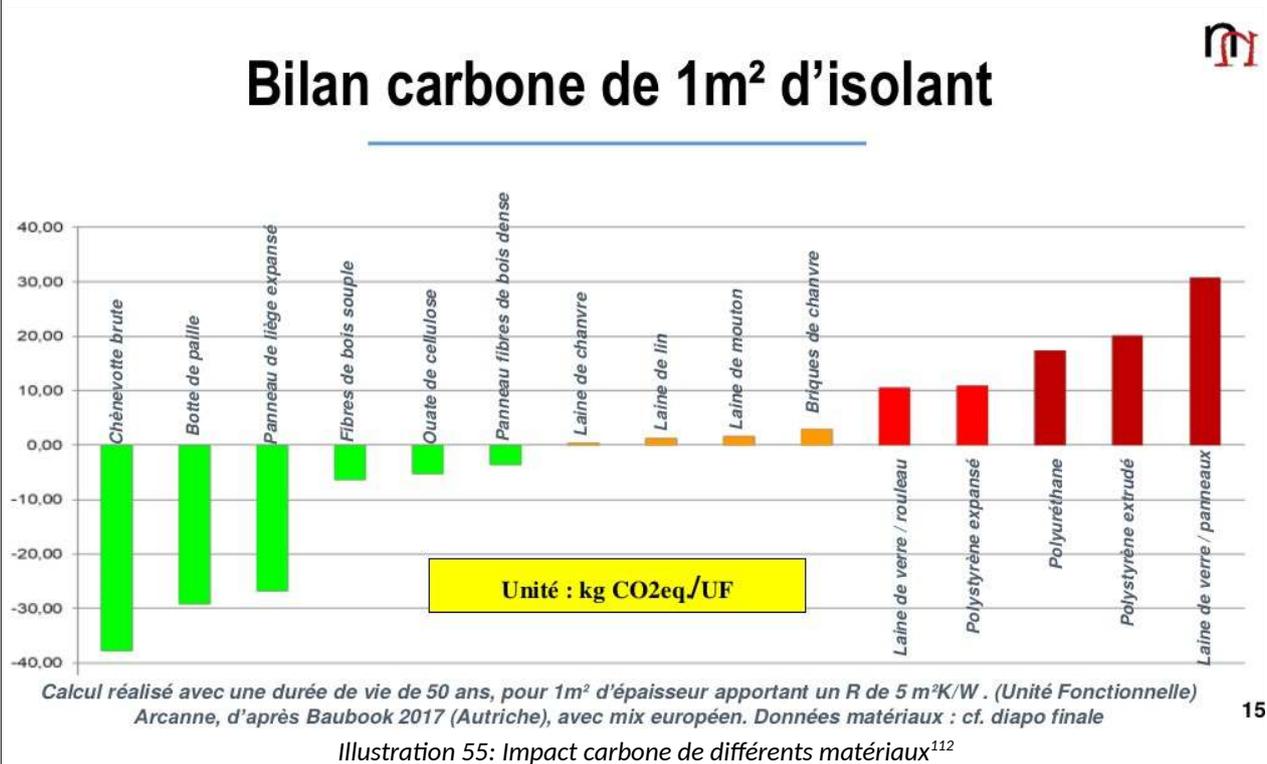
	d'analyser les données. Une instrumentation légère peut compléter l'analyse.
--	--

Question	G5 : Peut-on réaliser une étude générale pour évaluer si les matériaux biosourcés et les matériaux minéraux ont des impacts environnementaux fondamentalement différents ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan

Analyse

Il est difficile pour un non-spécialiste de se saisir des analyses environnementales des matériaux de construction réalisées à ce jour, car il faut potentiellement chaque fois analyser l'objectivité et la robustesse des approches méthodologiques utilisées en amont. Par exemple, de nombreuses critiques accompagnent les FDES particulièrement du fait de la norme qu'elles prennent en référence, parce qu'elles sont réalisées par les entreprises ou des BET qu'elles ont missionnées, qu'elles renseignent les produits et non les matériaux.

Concernant les isolants thermiques Samuel Courgey a réalisé les comparatifs ci-dessous.



Ici nous remarquons l'extrême pertinence des biosourcés peu transformés quant à leur coût énergétique, mais également que les 8 isolants les mieux placés sont des biosourcés.

Remarque : Samuel Courgey mentionne le site autrichien www.baubook.info comme une source particulièrement complète et pertinente pour obtenir des informations sur les impacts environnementaux de matériaux.

Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Il serait utile de mener un travail de fond de comparaison des FDES disponibles sur la base INIES pour s'assurer que les méthodologies suivies sont similaires pour tous les matériaux, afin que la comparaison entre matériaux soit possible et équitable. Et parallèlement réaliser un comparatif avec au minimum 2 bases de données étrangères			

	reconnues pour leur objectivité. Cela permettrait de dresser un panorama fiable des impacts des matériaux de construction en général, et ce selon leur nature et non plus seulement producteur à producteur.
--	--

Question	G6 : Quel est le bilan carbone des matériaux locaux ?			
Précisions	Question posée 2 fois, en intégrant le bois local.			
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Les éco-matériaux locaux normands facilement disponibles sont la paille, le bois, la terre crue, le chanvre, le lin et par endroits le roseau (vallée de la seine, marais du Bessin notamment).</p> <p>Les matériaux biosourcés peu transformés sont les isolants les plus performants en termes d'impact carbone (cf question G5).</p> <p>À ce jour, la botte de paille a une FDES (Fiche de déclaration Environnementale et Sanitaire). Pour le bois, hors lamellé-collé, il y a des FDES pour des charpentes en résineux (qui incluent des éléments de fixations en plus du bois), une FDES pour le bois d'ossature en douglas sans traitement et une FDES sur le bois d'ossature traité. Eco-Pertica travaille sur une FDES sur le terre-chanvre avec des matériaux locaux, ainsi que sur la chènevotte et la laine de chanvre. L'ARPE et la CCTC* travaille à la réalisation d'une FDES sur le torchis.</p> <p>Même si une filière locale réduit les besoins de déplacer la matière, si elle est peu structurée, elle peut avoir recours à des schémas de distributions peu optimisés (transport de matériaux en petit véhicule), ce qui induit un impact carbone par kg de matériau élevé. Ainsi, on ne peut pas s'épargner le calcul carbone pour s'assurer qu'une filière locale est vertueuse d'un point de vue carbone. Néanmoins, une filière locale n'est pas qu'une affaire de carbone mais a d'autres avantages : dynamique de territoire, investissement dans l'économie et les savoir-faire locaux, ainsi que dans l'aspect résilient des territoires, lien entre acteurs, connaissance du producteur et ses pratiques...</p> <p>Nous n'avons pas connaissance de bilan carbone comparé de différents bois locaux. Une étude avait été menée sur le bois des Alpes¹¹³, sur les bois de charpente en résineux, les ossatures en résineux et le bardage en douglas. Un point essentiel est l'efficacité énergétique des séchoirs des scieries. Même si des différences peuvent exister entre essences, elles seront probablement faibles par rapport à l'ordre de grandeur des différences entre la production du béton (émission entre 250 et 450 kgCO₂ eq/m³) et celle de bois (stockage de l'ordre d'1t CO₂/m³).</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Pour faire un bilan carbone des autres matériaux (bois locaux, lin...), il est nécessaire de collecter au préalable des informations de terrain. Ce travail nécessite le concours des producteurs ou connaisseurs des matériaux.			

Question	G7 : Peut-on produire une ACV comparée des menuiseries PVC face aux autres menuiseries ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>En France, les FDES de la base INIES sont difficiles à comparer car les scénarios choisis ne partagent pas tous les mêmes paramètres (vitrages, quincaillerie...).</p> <p>D'après les FDES disponibles, une fenêtre double vitrage en chêne possède un bilan carbone de 53 kgCO2 eq/ m² de vitrage¹¹⁴, contre 61 – 86 kgCO2 eq/ m² pour des châssis PVC^{115,116,117,118}, soit près de 30 % à 60 % de plus. Les données environnementales par défaut de la base INIES donnent 92 kgCO2 eq/ m² pour les menuiseries bois contre 137 kgCO2 eq/ m² pour les menuiseries PVC (soit près de 50 % de plus).</p> <p>On pourra garder à l'esprit que globalement une fenêtre PVC induit une émission carbone de l'ordre de 40 à 50 % de plus qu'un châssis bois.</p> <p>La différence n'est pas plus grande car le châssis ne représente qu'une part des impacts. Une partie du carbone provient de la production du verre et de l'usinage et assemblage de la fenêtre.</p>				
	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
Suite à donner	<p>Une étude ACV permettant une comparaison fiable selon le type de menuiserie est tout à fait possible. Mais pour qu'elle s'impose en référence, l'Acéviste qui la réalisera devra l'accompagner d'un explicatif clair et inattaquable sur la méthodologie qu'il a employée. De plus il faudra sans doute parallèlement être capable de démonter les études similaires qu'un tel travail pourra générer de la part de filière insatisfaites. Tout ceci a un coût.</p>			

Question	G8 : Quelle est la composition du plastique des menuiseries PVC ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Le PVC (polychlorure de vinyle) est constitué de pétrole et de sel (NaCl, dont on extrait le chlore). Il est pétrosourcé donc composé de carbone et d'hydrogène, complété par du chlore. Différents additifs¹¹⁹ sont utilisés, pour améliorer la tenue au feu, des plastifiants ou encore des pigments.</p> <p>Même si les fenêtres PVC obtiennent des bonnes notes de classements de qualité de l'air (COV), des questions suscitent la méfiance de certains acteurs:</p> <ul style="list-style-type: none"> • des pratiques antérieures ont été finalement interdites, et l'Europe a fixé la date de 2010 pour une réduction de 50 % des stabilisants au plomb et 2015 pour un PVC produit 100 % sans plomb ; • aujourd'hui, la question se pose sur les phtalates utilisés comme plastifiant, dont l'usage a été réglementé en Europe pour les objets en contact avec les enfants¹²⁰. <p>L'histoire montre qu'un inconvénient de matériaux issus de la chimie est que le produit est déclaré sans effet sur l'homme à la lumière des connaissances actuelles. Face à cela, à chacun de se positionner, en acceptant l'analyse d'innocuité, ou de se forger une expertise suffisante, de solliciter des experts pour juger ou d'appliquer le principe de précaution en cas de doute.</p> <p>Une question se pose également en cas d'incendie, où le PVC fondu pourrait, en plus de dégager des gaz toxiques, empêcher l'ouverture des fenêtres utiles à l'évacuation d'urgence.</p>				
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>				
<p><i>Illustration 56: Fenêtre à châssis PVC ou bois. Le choix des matériaux a un impact sur le rendu architectural. Crédits fenêtre PVC : Janneau Menuiserie</i></p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

Question	G9 : Comment sont recyclées en fin de vie des menuiseries PVC ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Trois projets de recyclage de fenêtre PVC ont été identifiés en France : le projet REVALO avec le recycleur VEKA à partir de 2013¹²⁴. Un autre projet porté par le recycleur PAPREC, en lien avec Saint-Gobain et Lapeyre¹²¹ à partir de 2013 également, et la plateforme COVANORD¹²² à partir de 2018. Un article¹²³ de 2019 rapporte que le groupe WEKA, impliqué dans le projet REVALO, « déplore que le marché ne soit pas encore assez mature et structuré, constatant le manque de menuiseries PVC en fin de vie à recycler ». Ainsi, la collecte semble faire défaut à ce jour.</p> <p>Le processus de recyclage vise à séparer le verre du PVC. Récupérer le verre est un enjeu du recyclage puisque qu'une tonne de verre recyclé évite l'extraction de 1,2t de silice et 0,315t de CO₂ non émis par le four¹²⁴. Le recyclage mécanique consiste à broyer la menuiserie PVC en morceaux après avoir retiré la quincaillerie métallique^a. Le PVC est purifié, puis extrudé en granulés ou micronisé en granulométrie fine. Il peut ensuite être réutilisé. Le gain en termes de CO₂ lié au recyclage par rapport à l'utilisation de PVC neuf, de l'ordre d'un facteur 5 d'après¹²⁵ et jusqu'à un facteur 17 d'après le recycleur VEKA¹²⁶.</p>				
				
<p><i>Illustration 57 : 5,5Mt de PVC sont produites en Europe en 2017, dont 26 % pour des profilés de menuiserie. Le flux de déchet est de 2,5Mt, dont 0,64 Mt ont été recyclées, soit 25%¹²⁷. Crédits : Kitson Windows</i></p>				
<p>Une problématique est liée au fait que « du PVC contenant des stabilisants à base de cadmium et de plomb se retrouve à présent dans les circuits de recyclage alors que ces substances historiques sont interdites maintenant »¹²⁸. En effet, la Directive 91/338/EEC fixe à 0,01 % la teneur maximale en cadmium de produits fabriqués à partir de matériaux plastiques colorés ou stabilisés par des substances contenant du cadmium¹²⁸. Ce rapport indique par ailleurs « en théorie, il est possible de fabriquer des fenêtres composées de 100 % de PVC recyclé. Toutefois, la qualité de surface médiocre et la couleur grise des produits obtenus limitent considérablement les débouchés et incitent les recycleurs à utiliser le recyclé pour le « cœur » (co-extrusion) avec une teneur maximale de 60 - 70 % »¹²⁸.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

a Un processus de recyclage chimique est également possible¹²⁷

Question	G10 : Comment être assuré en chantier participatif en tant que professionnel ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
L'ARPE propose une assurance. Plus d'information sur leur site internet https://arpenormandie.org/ .				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo
	Travail de collecte d'information en cours, cette réponse reste à affiner.			

Question	G11 : Comment être assuré en utilisant des matériaux locaux ?			
Précisions				
Posée par	Architecte	Bureau d'étude	Distributeur	Artisan
Analyse				
<p>Il n'est pas nécessaire qu'un mode constructif soit couvert par des règles professionnelles ou un DTU pour pouvoir être assuré. En absence de ces références, l'assureur juge le risque qu'il prend selon sa connaissance de la technique et de son client, puis la prime est calculée en conséquence. L'assureur peut refuser l'assurance décennale, et dans ce cas, il est possible de passer par le BCT (Bureau Central de Tarification) qui va obliger un assureur à vous assurer.</p> <p>Pour les isolants secs (laine de chanvre, chènevotte), Eco-Pertica n'a pas connaissance d'artisans ayant des difficultés à obtenir l'assurabilité.</p> <p>Pour les isolants de types terre-allégée, Eco-Pertica est couvert par une garantie décennale, et peut transmettre les coordonnées de son assureur.</p> <p>Pour les bottes de pailles, des règles professionnelles couvrent un mode constructif.</p> <p>Pour le bois, deux charpentiers ont été sollicités (Jean-Luc Le Roux et Nicolas Maze). Du moment que l'artisan est assuré en décennale, et qu'il utilise des techniques courantes, il est assuré quel que soit le bois utilisé : l'artisan est responsable du bois qu'il choisit. En revanche, un marché peut spécifier l'obligation de se conformer à des textes de référence (DTU, normes, règles professionnelles...). Cela rend de fait plus complexe l'utilisation de matériaux non renseignés dans ces textes, tel que parfois les bois locaux. A l'inverse, un marché peut très bien définir qu'un lot soit accessible aux bois locaux, mais il lui faudra être vigilant quant à la façon dont il site le respect documents de référence sur lesquels il s'appuie. Plusieurs documents existent sur l'utilisation de bois local dans des constructions publiques^{129, 130, 131, 132}.</p>				
Suite à donner	Réponse ci-dessus semble suffisante	Solliciter d'autres experts techniques	Besoin de R&D terrain	Besoin de R&D labo

IV Bilan

Questions	Réponse OK	Besoin		
		Experts techni.	R&D terrain	R&D labo
BOIS				
B1 : Quelle est la compatibilité de bois locaux et non traités avec des isolants biosourcés ?				
B2 : Quelle est la contribution structurelle de parois en torchis ?				
B3 : Comment exploiter le bois de haie en éco-construction ?				
B4 : Est-ce qu'il y a des référentiels récents sur les charpentes à la Philibert Delorme ?				
B5 : Quel bois peut-être mis en paroi verticale en ERP et en quelle épaisseur ?				
B6 : Il est difficile de trouver du bois local ou des artisans utilisant ces matériaux.				
MAÇONNERIE				
M1 : Quelle est la perméabilité à la vapeur d'eau du mortier en construction GREB ?				
M2 : Peut-on faire du pisé avec du béton concassé et de la terre crue normande ?				
M3 : Peut-on étudier les performances de mélanges de papier et de terre crue ?				
M4 : Comment démontrer l'écran thermique constitué par les enduits terre ?				
M5 : Comment s'assurer qu'un enduit terre ne fissure pas sur un poêle de masse ?				
M6 : Peut-on réaliser des recherches sur les dalles en terre crue ?				
M7 : Est-ce que le jus d'ensilage augmente la résistance des enduits terre ?				
M8 : Quel est l'impact de changer l'agroressource dans les bétons de terre allégée ?				
M9 : Quelles sont les performances d'un enduit correcteur thermique terre/végétal ?				
M10 : Peut-on classier la performance thermique des enduits chaux-chanvre en fonction de leurs dosages et de la technique de mise en œuvre ?				
M11 : Quelles sont les caractéristiques des briques de chaux-chanvre ? Quelles sont les différences entre terre chanvre et chaux chanvre ?				
M12 : Peut-on avoir des règles professionnelles ou un DTU sur les dalles en chaux-liège ?				
M13 : Que devient le plâtre en fin de vie ?.				
M14 : Quel est le bilan carbone d'un enduit plâtre comparé à un enduit chaux-sable ?				

Questions	Réponse OK	Besoin		
		Experts techni.	R&D terrain	R&D labo
M15 : Comment peut-être gérée la fin de vie de mélanges terre-plâtre ?				
M16 : Quel support d'enduit terre sur un mur de refend porteur de maison paille ?				
M17 : Quelle est l'étanchéité à l'air réelle que l'on peut atteindre avec des enduits ?				
M18 : Est-il nécessaire de tramer les enduits chaux extérieurs ?				
M19 : Quel est l'état des connaissances et les documents techniques applicables pour une pose directe de carrelage sur chape maigre, sans isolant ni dalle supplémentaire ?				
M20 : Quelles sont les propriétés thermiques des enduits terre ?				
M21 : Quelle technique terre crue est la plus adaptée pour faire une banquette ou une seconde peau de poêle de masse ?				
M22 : Comment développer des compétences sur la terre crue ?				
ISOLATION				
I1 : Peut-on développer un isolant souple en éco-matériaux normand ?				
I2 : Quelle est la résistance thermique réelle de la paille ?				
I3 : Peut-on comparer les isolants du marché sur la base de leur rapport prix/performance, durée de vie, résilience* et énergie grise ?				
I4 : Quelle est l'incidence d'une végétalisation sur une toiture plate dite en toiture chaude sur la migration de la vapeur d'eau ?				
I5 : Est-ce qu'il peut y avoir des migrations des pesticides dans le bâtiment si l'on utilise des bottes de paille de blé cultivé en conventionnel ?				
I6 : Quelle est la fin de vie des liants pétrosourcés présents dans les panneaux de chanvre ?				
I7 : Est ce que les conditions d'une maison risquent de dégrader les éco-matériaux ?				
I8 : Peut-on définir un étalon à réaliser sur chantier pour valider les performances des bétons biosourcés ?				
I9 : Peut-on avoir une conductivité thermique reconnue officiellement sur les étoupes de lin ?				
I10 : Où trouver une botteleuse pour faire de petites bottes ?				
I11 : Quels sont les isolants locaux disposant d'une performance thermique reconnue officiellement ?				
I12 : Quels éco-matériaux locaux se prêtent bien à l'Isolation Thermique par l'Extérieur ?				
I13 : Quels matériaux naturels permettent l'isolation de parties enterrées ou d'un terre plein ?				
I14 : Peut-on avoir un récapitulatif des alternatives pour l'isolation de sous-toiture ?				

Questions	Réponse OK	Besoin		
		Experts techni.	R&D terrain	R&D labo
I15 : Des recherches spécifiques ou partages de savoir-faire peuvent-ils être menés sur tous les aspects liés à la préfabrication en atelier de murs en paille ou en bétons de chanvre ?				
I16 : Pourrait-il y avoir une structure / personne pour répondre à des questions techniques et scientifiques que l'on rencontre sur chantier ?				
QUESTIONS D'ORDRE GENERAL				
G1 : Peut-on développer un catalogue sur les ponts thermiques dans l'habitat ancien ?				
G2 : Quelle est la migration réelle de vapeur d'eau au travers de parois avec des enduits ou des membranes ?				
G3 : Quelle est l'impact de la régulation d'humidité sur la performance globale des parois ?				
G4 : Peut-on développer des mesures in situ du confort ?				
G5 : Peut-on réaliser une étude générale pour évaluer si les matériaux biosourcés et les matériaux minéraux ont des impacts environnementaux fondamentalement différents ?				
G6 : Quel est le bilan carbone des matériaux locaux ?				
G7 : Peut-on produire une ACV comparée des menuiseries PVC face aux autres menuiseries ?				
G8 : Quelle est la composition du plastique des menuiseries PVC ?				
G9 : Comment sont recyclées en fin de vie des menuiseries PVC ?				
G10 : Comment être assuré en chantier participatif en tant que professionnel ?				
G11 : Comment être assuré en utilisant des matériaux locaux ?				

V Précisions sur les sujets nécessitant des travaux de R&D

Sujet	Application	Proposition de R&D
1) Étude de la cinétique de séchage des bétons de terre-allégée et torchis et lien avec le vieillissement des bois et matières végétales	Estimer le temps de séchage et avoir des éléments pour évaluer si cela pose problèmes sur chantier selon le mode constructif et les conditions climatiques.	Projet déjà monté avec l'ARPE et ARESO en collaboration avec des Universités. Financement à identifier.
2) Etude de la contribution au contreventement et au flambement du torchis	Réduire les sections des montants	Étude prévue à L'Université de Lorient, lien à faire avec professionnels en région.
3) Étude des performances hygroscopiques des enduits minéraux (chaux, ciment...)	Avoir une base de donnée claire des performances hygroscopiques de différents liants.	Pour débiter : 1) Tests de capillarité* sur mortier GREB 2) étude bibliographique Travail à réaliser en laboratoire de recherche
4) Faire du pisé avec du béton concassé	Réemployer des déchets (béton concassé) pour faire du pisé avec une terre limoneuse.	Sujet pris en main par le professionnel ayant posé la question.
5) Développement de bétons terre-papier	A définir selon les performances de ces mélanges, mais potentiellement en tant que renfort d'enduit terre ou de béton biosourcé.	Sujet pris en main par le professionnel ayant posé la question.
6) Écran thermique constitué par les enduits terre	Pouvoir faire valoir le caractère coupe feu des enduits minéraux.	Différentes structures travaillent sur ce sujet, un financement est à identifier.
7) Recherche sur les dalles de terre crue	Avoir des éléments techniques pour une utilisation en dalles de sol ou à l'étage. Quelles techniques ? Quel rendement ? Quelles précautions ?	1) Recherche bibliographique et de retour d'expériences. 2) Identifier les professionnels intéressés. 3) Réaliser tests de chantier. 4) R&D en laboratoire. (Laboratoire régional à identifier)
8) Effet de stabilisants naturels sur la résistance des enduits terre	Comprendre en quoi différents stabilisants naturels renforce les enduits terre	1) étude bibliographique 2) mettre en place un protocole de collecte d'échantillons de chantier avec des pros intéressés 3) réaliser plus tard une étude de R&D avec un laboratoire régional à identifier.
9) Performances de bétons de terre allégée	Avoir tous les éléments techniques pour utiliser ces matériaux sur chantier.	Plusieurs projets sont en cours sur la thématique avec des acteurs régionaux.
10) Préfabrication en atelier avec matériaux locaux	Développer une offre de bâtiments préfabriqués en matériaux locaux	Identifier les professionnels intéressés et mettre en place des partages d'expérience ?
11) Catalogue de ponts thermiques	Avoir un guide à destination de	Identifier les professionnels

dans la bâti ancien	concepteurs, professionnels et bureau d'étude pour estimer facilement l'impact de différentes configurations constructives sur les ponts thermiques.	intéressés puis voir si cela fait l'objet d'un stage avec un labo régional
12) Impact de l'humidité sur les performances globales du bâti	Prise en compte dans le calcul réglementaire du bénéfice ou de la détérioration des performances des isolants en fonction de leur caractère hygroscopique.	Un projet de recherche à l'échelle nationale est en cours, piloté par le CF2B (Collectif des Filières des Bâtiments Biosourcés) et l'AICB (Association des Industriels de la Construction Biosourcée).
Sujets identifiés comme relevant de la recherche tardivement et donc non jugé par les sachants		
13) Mesures in situ du confort	Evaluer si des solutions constructives différentes apportées des niveaux de confort différents à performance thermique égale. Identifier une manière différente de mesurer la qualité d'une construction par le confort.	Plusieurs scientifiques évoquent l'intérêt de travailler sur ce sujet, et des travaux sont en cours, mais le champ reste à investiguer.
14) Etude sur la différence d'impacts environnementaux entre biosourcés et matériaux minéraux	Avoir des éléments de communication clairs sur les impacts induits par différents modes constructifs, en n'évoquant pas seulement l'impact carbone.	À investiguer.
15) étude sur la durabilité	Evaluer si le critère de développement de moisissure proposé actuellement est adapté à la réalité, et évaluer si tous les matériaux présentent une résistance aux moisissures similaire ou différente	Travail conjoint entre laboratoire et retour d'expérience en conditions réelles
16) Etalons de chantier pour les bétons biosourcés	Mettre au point une procédure de validation sur chantier permettant de déduire certaines propriétés des bétons biosourcés	Eco-Pertica travaille sur ce sujet

De juillet à septembre 2019, nous avons sollicité différents sachants Normands sur les biosourcés pour avoir leur avis sur les 12 premiers sujets de recherche (les 4 derniers n'avaient pas été classés comme nécessitant de la recherche à ce moment là). Aucune grille d'évaluation n'était fournie, ainsi chacun a jugé avec ses éléments : est-ce que c'est plus utile pour mon activité, est-ce que c'est plus pertinent à l'échelle régional en termes de développement économique ? Nous avons calculé un score pour chaque sujet, avec 2 points lorsque le sujet intéresse, et 1 point quand il intéresse moyennement. Cette vue est partielle et un nombre plus important de professionnels devraient être consultés.

Cependant, nous observons qu'aucun sujet n'intéresse absolument personne et aucun sujet intéresse tout le monde. Les sujets identifiés semblent donc tous mériter une certaine attention. Deux sujets émergent : les dalles en terre crue et la cinétique de séchage des bétons de terre allégée et du torchis. Par ailleurs, les sujets développés dépendront des compétences régionales qui souhaiteront se mobiliser.

n°	Thème	Seb.	Pascal	Laurent	Jean	François	Gregory	François	Score
1	Étude de la cinétique de séchage des bétons de terre-allégée et torchis.	?	OUI	OUI	MOYEN	OUI	OUI	NON	9
2	Étude de la contribution au contreventement du torchis	NON	NON	NON	NON	OUI	MOYEN	NON	3
3	Étude des performances hygrosopiques des enduits minéraux (chaux, ciment...)	?	NON	OUI	NON	NON	MOYEN	OUI	5
4	Faire du pisé avec du béton concassé	MOYEN	NON	NON	NON	Déjà Étudié	OUI	NON	3
5	Développement de bétons terre-papier	MOYEN	NON	NON	NON	NON	MOYEN	NON	2
6	Caractérisation de l'Écran thermique constitué par les enduits terre	OUI	NON	OUI	?	NON	OUI	NON	6
7	Recherche sur les dalles de terre crue	MOYEN	OUI	OUI	MOYEN	MOYEN	OUI	NON	9
8	Effet de stabilisants naturels sur la résistance des enduits terre	?	NON	MOYEN	MOYEN	OUI	MOYEN	OUI	7
9	Étude des Performances de bétons de terre allégée	MOYEN	NON	OUI	?	MOYEN	OUI	NON	6
10	Préfabrication en atelier avec matériaux locaux	MOYEN	NON	NON	MOYEN	OUI	MOYEN	NON	5
11	Catalogue de ponts thermiques dans la bâti ancien constructives sur les ponts thermiques	OUI !	NON	NON	Pas R&D	NON	OUI	NON	4
12	Impact de l'humidité sur les performances globales du bâti hygrosopique	MOYEN	NON	MOYEN	OUI	NON	MOYEN	OUI	7
13	Mesures in situ du confort	Sujet qui navait pas été identifié comme nécessitant de la R&D avant les entretiens							
14	Etude sur la différence d'impacts environnementaux entre biosourcés et matériaux minéraux	Sujet qui navait pas été identifié comme nécessitant de la R&D avant les entretiens							

VI Glossaire

AICB	L'Association des Industriels de la Construction Biosourcée est une des deux associations qui représente les producteurs d'isolants biosourcés.
Anisotropie	L'anisotropie désigne le fait que des propriétés d'un matériau diffèrent selon la direction. Par exemple, un béton de ciment est anisotrope puisqu'il est beaucoup plus résistant en compression qu'en traction.
Capillarité	C'est le mécanisme qui explique que de l'eau remonte dans une éponge, ou du sol vers le haut des murs dans le bâti ancien, du fait de forces de tensions superficielles qui permettent à un liquide de remonter dans de petits canaux contre la gravité.
CCTC	La Confédération de la Construction en Terre Crue rassemble les professionnels français de la construction en terre.
CF2B	Le Collectif des Filières Biosourcées du Bâtiment est une des deux associations qui représente les producteurs d'isolants biosourcés.
Chaleur spécifique	La chaleur spécifique massique, noté généralement C_p , désigne la quantité d'énergie à apporter pour élever la température d'un kg de matière de 1 °C. C'est un paramètre qui intervient dans la diffusion de chaleur et l'inertie.
Effusivité	L'effusivité thermique désigne la vitesse à laquelle un matériau absorbe des calories. Par exemple, un lambris semblera plus chaud au toucher que des carreaux de faïence car la faïence absorbera plus vite la chaleur produite par notre main.
Guides de Bonnes Pratiques de la construction en terre crue	<p>Les « guides de bonnes pratiques de la construction en terre crue » sont des documents qui constituent les règles de l'art concernant les techniques suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none">• Bauge• Brique de terre crue (validé prochainement)• Enduit en terre• Pisé• Terre allégée• Torchis <p>Ces règles ont été publiées en 2019.</p>
Hydraulicité	<p>Le degré d'hydraulicité indique la masse d'argile par la masse de liant chaux. Une chaux aérienne à un faible degré d'hydraulicité alors qu'une chaux hydraulique pouvant contenir jusqu'à 20 % d'argile à un degré d'hydraulicité plus élevé.</p> <p>La perméabilité à la vapeur d'eau (δ) représente la quantité de vapeur d'eau traversant un matériau ayant un mètre d'épaisseur par unité de temps et de différence de pression de vapeur de part et d'autre du matériau. Ce paramètre est intrinsèque à un matériau.</p> <p>On considère généralement le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur d'eau (μ), rapport entre la perméabilité à la vapeur d'eau de l'air δ_{air} (= 187,5 ng/s·m·Pa) sur la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau $\delta_{matériau}$. Il s'agit donc d'une valeur sans dimension.</p> <p>Lorsque l'on regarde les performances techniques des matériaux, on s'intéresse généralement au « Sd » exprime l'épaisseur, en m, d'une couche d'air immobile ayant la même perméance que l'épaisseur spécifiée d'un matériau donné. Le « Sd » est calculé ainsi : $Sd = \mu \cdot E_{matériau}$ où $E_{matériau}$ est l'épaisseur.</p>
Perméabilité à la vapeur d'eau	<p>La réaction au feu caractérise comment un matériau se comporte comme combustible.</p> <p>La « résistance au feu » correspond à la durée durant laquelle un élément de construction maintient ses propriétés physiques et mécaniques. Un matériau peut avoir une bonne réaction au feu et une mauvaise résistance au feu. L'acier non traité est ininflammable, mais lorsque la température se situe aux environs 800 °C, il perd sa stabilité et de ce fait sa résistance au feu. À l'inverse, du bois</p>
Réaction au feu	
Résistance au feu	

massif aura une relativement mauvaise réaction au feu et une résistance au feu élevée.

Réemployabilité

Capacité d'un matériau à être réutilisé tel quel en fin de vie, ou un injectant un minimum d'énergie. La terre crue non stabilisée peut être mouillée puis réutilisée.

Résilience

Nous utilisons ici le sens suivant : la résilience d'un mode constructif défini sa capacité à assurer le mieux possible sa fonction après un incident ou une perturbation. Un mode constructif résilient a des chances de conserver son niveau de performance longtemps, et ce quelque soit les situations rencontrées. Les modes constructifs sont aujourd'hui définis lors des étapes de conception avec leurs performances optimales, sans aucune considération pour leur résilience.

RFCP

Réseau Français de la Construction paille

Sorption

La sorption est le processus d'adsorption des molécules d'eau par un matériau lorsque celui-ci est placé dans une atmosphère humide. La courbe de sorption représente la masse d'eau présente dans le matériau en fonction de l'humidité relative de l'air.

Valeur de tampon hydrique

La valeur de tampon hydrique représente la capacité d'un matériau à échanger de l'humidité avec son environnement.

Bibliographie

- [1] « Projet R&D Terre-paille – étude de la cinétique de séchage des mélanges de terre-paille », Emma Stéphan et al. Cerema Sud-Ouest, 2015.
- [2] « Cinétique de séchage d'un mélange terre-paille – comparaison entre modèle et mesures », Emma Stéphan, Cerema Sud-Ouest, 2016.
- [3] « Projet R&D Terre-paille – étude de la cinétique de séchage du terre-paille – effet de la mise en œuvre d'enduits », Emma Stéphan, Cerema Sud-Ouest, 2016.
- [4] « Réaliser des ouvrages publics en bois local avec les artisans du territoire », Parc Naturel Régional d'Armorique, 2019.
- [5] « Valorisation des solutions bois pour la réhabilitation des bâtiments Performances techniques Murs et plafonds intérieurs », Catalogue Bois Construction, 2017.
- [6] « Réaction au feu des bois massifs », FFB, Irabois, 2004.
- [7] « Réaction au feu de bois massifs en parement extérieur et intérieur », FCBA, 2011.
- [8] « Le guide d'emploi des isolants combustibles dans les établissements recevant du public annexé à l'arrêté du 6 octobre 2004 ».
- [9] « Règles de la sécurité incendie à l'usage du charpentier constructeur bois, résistance au feu & propagation au feu des façades. », FCBA, CSTB, CODIFAB, 2018.
- [10] « Etude du comportement au feu de parois et planchers constitués de structures bois », FCBA, CSTB, 2012.
- [11] « Bois construction et propagation du feu par les façades En application de l'Instruction Technique 249 version 2010 », CSTB, FCBA, 2017.
- [12] « Règles de la sécurité incendie à l'usage du charpentier constructeur bois, résistance au feu & propagation au feu des façades. », FCBA, CSTB, CODIFAB, 2018.
- [13] « Hydromechanical properties of some mortars used in some ecologic construction techniques », D. Hoxha et al., Advanced Materials Research 587:6-10, 2012
- [14] « Moisture transfer and thermal properties of hemp–lime concretes », P. Walker, Constr. Build. Mater. 64, 2014.
- [15] « Rammed Earth incorporating Recycled Concrete Aggregate: a sustainable, resistant and breathable construction solution », Alessandro Arrigoni et al., Resources, Conservation and Recycling, 137, 11-20, 2018.
- [16] « Using rammed earth mixed with recycled aggregate as a construction material », Ladan Taghiloha, Master of Civil Engineering, 2013.
- [17] « Recycling of bricks in rammed earth walls », de V. Cristini et al., Vernacular Heritage and Earthen Architecture: Contributions for Sustainable Development – Correia, Carlos & Rocha (Eds), 2014.
- [18] « Mechanical properties of papercrete – a review », de G.B. Ramesh kumar et al. International Journal of Pure and Applied Mathematics Volume 119 No. 17, 2018.
- [19] « Energy Optimum Building Wall From a Mixture of Papercrete and Local Soil in Tropical Humid Area » de Vincentius Totok Noerwasito, IOP Conf. Ser Sci. 213, 2018.
- [20] Site internet <http://www.greenhomebuilding.com/QandA/papercrete/ratio.html> visité le 26 décembre 2019.
- [21] Site internet http://sous-les-tilleuls.over-blog.com/pages/Papier_liant_fait_maison-601482.html visité le 26 décembre 2019.
- [22] « PaperCrete: A lightweight concrete », Yogesh D. Shermale et al., Conference: National conference on technical revolution, At Pune Maharashtra, Inde, 2016.
- [23] « Argiles & biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre », Aurélie Vissac et al., Craterre Edition, 2018
- [24] « Rapport de stage : étude sur les sols intérieurs en terre crue », Anne Lemarquis, 2008.
- [25] « Les sols en terre crue », Marie Milési - Johannes Riesterer, édition Terre Vivante, ISBN 9782360980802, 2012.
- [26] « The mechanical and physical properties of unfired earth bricks stabilized with gypsum and Elazig Ferrochrome

Bibliographie

- slag », I. Türkmen, International Journal of Sustainable Built Environment, 2017.
- [27] Rapport technique « Projet Terre », Association LESA 25 mars 2015.
- [28] « Les enduits terre intérieurs » de Pierre Delot, 2015.
- [29] « Structural Diversity and Application Potential of Hemicelluloses », Anna Ebringerová, Macromol. Symp, 2006.
- [30] « Efficacité de la paille d'orge pour le traitement des proliférations algales », Martin Laviale, 2009.
- [31] « Le compost, gestion de la matière organique », M. Mustin. F. Dubusc Eds., Paris, 1987.
- [32] « Bonnes pratiques de fabrication de l'ensilage pour une meilleure maîtrise des risques sanitaires », Agence Française de Sécurité des Aliments, 2004.
- [33] « Compostage des matières organiques d'origine animale : bilan environnemental », Paillat J.M., CIRAD, 2009.
- [34] « Caractérisation d'éco-matériaux terre-chanvre en prenant en compte la variabilité des ressources disponibles localement. », T. Vincelas, Université de Bretagne Sud, 2019.
- [35] « Valorisation des fines de lavage de granulats : application à la construction en terre crue », C. Flament, Université d'Artois, 2013.
- [36] « Le terre-paille », N. Oudhof, rapport d'apprentissage, Mines d'Alès, 2014.
- [37] « Contribution à la certification des bâtiments durables au Sénégal : cas d'étude des matériaux de construction biosourcés à base de Typha », I. Niang, Université de Reims, 2018.
- [38] « PROJET PNEEB / TYPHA. Production de matériaux d'isolation thermique à base de Typha. Session comprendre la matière », Etienne Samin, Craterre, 2018.
- [39] « Mise au point de nouveaux biocomposites verts innovants à base de roseau commun phragmite australis : application en platurige et eco-construction pour le bâtiment », M. Honoré, Université de Bretagne Sud, soutenance prévue en 2020.
- [40] « Caractérisation et optimisation d'un composite biosourcé pour l'habitat », Y. Brouard, Université de Tours, 2018.
- [41] « From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential » de Labat et al., Building and Environment 97:69-81, 2016.
- [42] « Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes » de Lagouin et al., Construction and Building Materials 222, 852-871, 2019.
- [43] « An iterative micromechanical modeling to estimate the thermal and mechanical properties of polydisperse composites with platy particles: Application to anisotropic hemp and lime concretes », S. Dartois, Construction and Building Materials, Volume 152, 2017.
- [44] « Thermally Modelling Bio-Composites With Respect To An Orientated Internal Structure », J. Williams et al., Sustainable Ecological Engineering Design, Selected Proceedings from the International Conference of Sustainable Ecological Engineering Design for Society (SEEDS), 2015.
- [45] « A novel anisotropic analytical model for effective thermal conductivity tensor of dry lime-hemp concrete with preferred spatial distributions », A.D. Tran Le et al., Energy and Buildings 182, 2018.
- [46] « Caractérisation hygrothermique des mélanges terre-chanvre : évaluation des incertitudes et conséquences », Vincelas et al., Journées de la Société Française de Thermique, 2018.
- [47] « Measurement of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures », N. Oudhof et al., conférence ICCBM, Clermont Ferrand, juin 2015.
- [48] « Characterization and comparison of hygric properties of rape straw concrete and hemp concrete », M. Rahim et al., Constr. Build. Mater. 102, 2016.
- [49] « Characterization of flax lime and hemp lime concretes: Hygric properties and moisture buffer capacity », M. Rahim, Energy Build. 88, 2015
- [50] « Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes » de Lagouin et al., Construction and Building Materials 222, 2019.

Bibliographie

- [51] « Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders », M. Degrave-Lemeurs, Construction and Building Materials 160, 2018.
- [52] « Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre », A. Youssef, Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2017.
- [53] Site internet www.placoplatre.fr consulté le 04 juin 2019.
- [54] « Analyse de la faisabilité de l'utilisation de déchets de plâtre pour remblayer des carrières de gypse », rapport RP-57684-FR, BRGM, 2009
- [55] « Mémento roches et minéraux industriels, Gypse et anhydrite », P. Marteau, Rapport R 37722, BRGM, 1993.
- [56] « Déchets de plâtre – Évaluation des risques semi-générique », BRGM, 2005.
- [57] « Réduire et recycler les déchets, une priorité pour Placoplatre », S. Obadia, Les cahiers techniques du bâtiment, <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/moins-de-dechets-by-placoplatre.36869>, consulté le 04/06/2019.
- [58] « Substantial global carbon uptake by cement carbonation », Fengming Xi et al., Nature Geoscience, 2016.
- [59] « Dynamic life cycle assessment: how temporary carbon storage in bio-based building materials can affect global warming » de V. Zieger soumise pour publication.
- [60] FDES « Mortier d'enduit minéral », Syndicat National des Mortiers Industriels, 2015.
- [61] « Bilan d'émissions de Gaz à Effet de Serrede Bouygues Travaux Publics Régions France », Bouygues Travaux publics, 2015.
- [62] « Carbon footprint analysis of calcined gypsum production in the Czech Republic », Fort et al., Journal of Cleaner Production, 177, 2018.
- [63] « Conseils pour la restauration / Enduits » Services territoriaux de l'architecture et du patrimoine (STAP), Direction régionale des affaires culturelles d'Île-de-France.
- [64] « Revêtement pour murs et plafonds en enduit plâtre - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT » FDES de la base INIES du 20/12/2019.
- [65] « Rapport de développement durable », Lafarge, 2006.
- [66] « Rapport de développement durable 2010 », Lafarge.
- [67] « Rapport de développement durable 2012 », Lafarge.
- [68] « Rapport de développement durable 2018 », Lafarge.
- [69] « Guide de bonnes pratiques des enduits terre », CCTC (en libre téléchargement), 2019.
- [70] « Règles professionnelles des enduits sur support en terre crue », édition le Moniteur, ouvrage collectif disponible auprès d'Ecobâtir, 2016.
- [71] « Règles professionnelles de construction en paille », RFCP, édition le Moniteur, 2018.
- [72] « Guide de bonnes pratiques de la construction en terre crue », CCTC (en libre téléchargement), 2019.
- [73] Livre « Traité de construction en terre », Hugo Houben, Hubert Guillaud, éditions Parenthèses, ISBN 978-2-86364-161-3, 2006.
- [74] Livre « Construire en terre allégée », Franz Volhard, éditions Actes Sud, ISBN 978-2-330-05050-4, 2016
- [75] « Propriétés hygrothermiques de la terre crue », D. Quenard, Journée Terre Crue, Limoges, 18 novembre 2010.
- [76] « Thermal Conductivity of Straw Bales : Full Size Measurements Considering the Direction of the Heat Flow », J.P. Costes et al., Buildings 7, 11, 2017.
- [77] « Etude Rénover en 2020 », Cd2E, Solener, GrdF, Maisons et cités, 24 janvier 2018.
- [78] Livre « L'isolation thermique écologique », Jean-Pierre Oliva, éditions Terre Vivante, ISBN 2-904082-90-5, 2001.
- [79] Livre « Isolation thermique durable des bâtiments existants », Jean-Pierre Moya, éditions Le Moniteur, ISBN 978-2-281-14294-5, 2018.

Bibliographie

- [80] « Les composés organiques volatils (COV). Etat des lieux : définition, sources d'émissions, exposition, effets sur la santé », Observatoire régional de santé d'Ile-de-France, 2007.
- [81] Série des NF EN ISO 16000. Parties 9, 10 et 11 pour le conditionnement des échantillons dans la chambre d'essai d'émission. Partie 6 et 3 pour les mesures des COV et d'autres composés carbonyles tels que les formaldéhydes.
- [82] Arrêté du 19 avril 2011 relatif à l'étiquetage des produits de construction ou de revêtement de mur ou de sol et des peintures et vernis sur leurs émissions de polluants volatils.
- [83] « Le blé, aussi populaire que toxique », Greenpeace, article du 3 mars 2017 disponible sur le site internet www.greenpeace.fr.
- [84] Magazine Agreste Bourgogne, n°155, novembre 2013.
- [85] « Pratiques culturales en grandes cultures 2017 », Agreste, n°2019-3, juin 2019.
- [86] « Approche de l'exposition professionnelle des travailleurs agricoles Exploitation de quelques résultats issus de la compilation des index phytosanitaires Acta de 1961 à 2014 », Johan Spinosi et al., Institut de veille sanitaire, mars 2016.
- [87] « Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux » Rapport d'Expertise scientifique collective, INRA et Cemagref, J.N. Aubertot et al., 2005.
- [88] « Pesticides : Effets sur la santé, Expertise collective, synthèse et recommandations », INSERM, ISBN 978-2-85598-906-X, 2013.
- [89] La base de donnée est disponible sur le site de l'INERIS : https://siris-pesticides.ineris.fr/bdd_siris_pesticides, complétée par : <https://substances.ineris.fr/> et <https://www.echemportal.org>
- [90] « Enquête EXPPERT 7 : des pesticides perturbateurs endocriniens dans des mueslis », Génération futures, octobre 2016.
- [91] « Devenir des résidus des traitements insecticides des grains jusqu'à l'aliment Un risque à gérer par la seule prévention? », F. Leurat-Lessard, journée-séminaire : Qualité sanitaire et contaminants des productions végétales de grande culture - Pau-Montardon 11 février 2010
- [92] « Les SDHI, ces pesticides qui inquiètent les scientifiques », Le parisien, 6 septembre 2019
- [93] « Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance tricyclazole », EFSA Journal, 13(2), 2015
- [94] « FDES BIOFIB TRIO Isolant à base de laine de chanvre de la Cavac », 2018.
- [95] « Life Cycle Assessment of Hemp Cultivation and Use of Hemp-Based Thermal Insulator Materials in Buildings », Luca Zampori, Giovanni Dotelli, and Valeria Vernelli, Environmental Science & Technology, 2013.
- [96] « Evolution des caractéristiques des fibres polyester d'un remblai en Texsol après 20 ans » de S. Lavaud et al en 2011.
- [97] « Life-time assessment of polyester based geosynthetics », P.J. Naughton et al., Geosynthetics, J. Kuwano & J. Koseki editors, ISBN 9059660447, 2006.
- [98] « FDES Pavatherm 120mm de SOPREMA », 2019.
- [99] « Mineral Wool Insulation Binders », Stefan Kowatsch, dans le livre « Phenolic Resins: A Century of Progress », éditeurs Springer-Verlag, pp.209-242, 2010.
- [100] « Mineral wools (glass, stone/slag, HT) Evaluation of health hazards and proposal of a health-based quality criterion for ambient air » Elsa Nielsen et al., The Danish Environmental Protection Agency, Environmental Project n°1515, 2013.
- [101] « Wood-based resins and other bio-based binders for the production of mineral wool », Arianna Lucia et al., Holzforschung, 2020.
- [102] « Étude hygrothermique de l'influence de plusieurs paramètres dans des parois à ossature bois », CSTB, FCBA, 2011.
- [103] « Mould resistance assessment of building materials - Material specific isopleth-systems for practical

Bibliographie

- application », W. Hofbauer et al., 2008, Indoor Air conference, Danemark.
- [104] « Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials », Tuomo Ojanen et al., actes du colloque Buildings XI Conference par ASHRAE, 2010.
- [105] « Guide de bonnes pratiques de la construction en terre allégée », CCTC (en libre téléchargement), 2019.
- [106] « Règles professionnelles d'exécution Construire en Chanvre », SEBTP, ISBN 978-2-35917-045-7, 2012.
- [107] « Amélioration thermique des Bâtiments Collectifs construits de 1850 à 1974 » Le guide ABC, A. Pouget et al., ISBN 978-2-86243-098-0, 2011.
- [108] « Recherche aPROpaille, Vers une reconnaissance de la paille, comme matériau isolant dans la construction », A. De Herde et al., 2016.
- [109] « Terre et confort intérieur - l'équilibre », C. Ziegert, Premières assises nationales de la construction en terre, Grenoble, 5 avril 2008.
- [110] « Étude hygrothermique de l'influence de plusieurs paramètres dans des parois à ossatures bois », Lamoulié et al., 2012.
- [111] « Thermal Confort », P.O. Fanger, McGraw-Hill Book Company, New-York, 1973.
- [112] « Journée matériaux de construction biosourcés » en Bourgogne Franche-Comté, Samuel Courgey, 22 février 2019.
- [113] « Ecoprofil des produits bois de Rhône-Alpes », CréaBois Isère, 2015.
- [114] FDES « Fenêtre ou porte-fenêtre, double vitrage, fabriquée en France, en chêne ou pin sylvestre européen (v.1.7) », FCBA, 2018.
- [115] FDES « Fenêtres et portes fenêtres PVC double vitrage - Teintes foncées (L< 0,82) UFME / SNEP (v.1.3) », Syndicat National de l'Extrusion Plastique, 2017.
- [116] FDES « Fenêtres et portes fenêtres PVC double vitrage - Teintes claires (L> 0,82) UFME / SNEP (v.1.3) » Syndicat National de l'Extrusion Plastique, 2017.
- [117] FDES « Fenêtres et portes fenêtres PVC teintées claires Lapeyre Industries (v.1.1) », Lapeyre industries, 2018.
- [118] FDES « Fenêtres et portes fenêtres PVC teintées foncées Lapeyre Industries (v.1.1) », Lapeyre industries, 2018.
- [119] « Base de données - Plastiques, risque et analyse thermique - Les additifs [1-3] » de l'INRS d'avril 2019.
- [120] « Les perturbateurs endocriniens empoisonnent aussi les logements », Ivan Fouquet, Reporterre, 1er mars 2017.
- [121] « Le recyclage des menuiseries prend de l'ampleur, » Le Moniteur, 22 février 2013.
- [122] « Déchets du BTP : Les fenêtres en fin de vie auront leur ligne de démantèlement dans le Nord », le Moniteur, 4 septembre 2017.
- [123] « Veka poursuit sa croissance et s'engage pour le recyclage du PVC Vie des sociétés », Batiweb, 10 avril 2019.
- [124] « Démarche REVALO -Fenêtre en fenêtreRecyclage en boucle fermée des menuiseries en fin de vie issues des chantiers de rénovation thermique et de réhabilitation lourde », GTM Bâtiment, rapport ADEME, 2014.
- [125] Site internet <http://www.bilans-ges.ademe.fr/> consulté le 27 décembre 2019.
- [126] « VEKA au coeur de l'économie circulaire », Batiweb, 12 juillet 2019.
- [127] « PVC waste treatment in the Nordic Countries », Nordic Concil of Minister, 2019.
- [128] « Identification des limitations techniques et environnementales du recyclage matière des déchets (hors BTP) », Record, rapport 08-0910/1A, 2010.
- [129] « Le bois dans la construction - Exemple d'utilisation du bois local dans la construction » de Gaujaurt Technologies.
- [130] « OSEZ le bois local Guide pour intégrer le bois local dans la commande publique » de l'interprofession forêt bois Limousin et l'Union Régionale des Communes forestières, 2015.
- [131] « La construction publique en bois local : une opportunité pour la transition énergétique et l'aménagement du

Bibliographie

territoire », plan de formation à destination des élus à Mazan du 27 février 2019.

[132] « Construire son bâtiment public en bois local » des communautés forestières de Franche-Comté et l'interprofession Filière Forêt Bois Franche-Comté, 2013.