

**Mémoire de fin d'études : "D'une méthode marginale à un procédé low tech ?
L'enjeu actuel en Wallonie de la technique ancestrale du bois cordé. Approche
performancielle de cette mise en oeuvre par prototypage."**

Auteur : Fanielle, Tanguy

Promoteur(s) : Possoz, Jean-Philippe

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16476>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

D'une méthode marginale à un procédé low tech ?

L'enjeu actuel en Wallonie de la technique ancestrale du bois cordé.
Approche performancielle de cette mise en œuvre par prototypage.

Travail de fin d'études présenté par Tanguy FANIELLE,
en vue de l'obtention du grade de Master en Architecture

Sous la direction de Jean-Philippe POSSOZ, Architecte et Chef de Travaux à l'Université de
Liège

Année académique 2021-2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je souhaite remercier mon promoteur, Jean-Philippe Possoz, sans qui il aurait été inimaginable de réaliser cette recherche appliquée. Il m'a accordé du temps, des moyens et de l'énergie pour mettre en œuvre, dans les meilleures conditions, un mémoire un peu différent. C'est un réel plaisir d'avoir pu collaborer et travailler avec lui.

J'aimerais également remercier l'équipe du *BEMS* de la faculté d'Arlon, tout particulièrement Philippe André, Elisabeth Davin, Laurent Collard, Jonas Lambert et Stéphane Monfils pour leur confiance, la mise à disposition de matériel et d'un local pour réaliser mes tests ainsi que leur soutien et précieux conseils tout au long de ce travail.

Je tiens tout autant à remercier l'architecte Jean-Marie Delhayé qui m'a permis de mieux comprendre la technique de mise en œuvre du bois cordé, de la documenter par des photos de ses chantiers et de rencontrer des autoconstructeurs : Gilles Prion, Georges Lengellé, Jean-Paul Meurens et Madame Lannoy, que je remercie également pour leur accueil et leurs réponses à mes questions. Une pensée particulière à Monsieur Meurens qui m'a fourni du mélèze conditionné pour réaliser mon prototype.

La réalisation du prototype a été possible grâce aux conseils et échanges avec Nicolas Félix, de l'entreprise *La Patte du Mammouth*, à propos du béton de chanvre et du rejointoyage à la chaux mais aussi au don de matériaux (chênevotte et mélange ProKalk) de l'entreprise *IsoHemp* de Fernelmont. Merci également au menuisier Pascal Lejeune pour la sciure utilisée pour l'isolation de la paroi et à mon frère Rémy Fanielle, et son entreprise *Au Grand'Terre*, pour le prêt d'une camionnette et de matériel.

Pour leur aide dans la recherche de documentation, je remercie Alessandra Bruno ainsi que le *bureau d'Architecture 4D* et l'entreprise *Delporte matériaux* pour le chiffrage du coût et du temps de réalisation d'une paroi traditionnelle utilisé pour situer la mise en œuvre d'une paroi en bois cordé.

Pour leurs réponses aux questions techniques sur l'étanchéité à l'air, les procédures de test et l'accès à certaines données, je remercie l'équipe du *CSTC*. Merci également à l'Université de Liège pour sa confiance et son aide financière.

Enfin, je remercie mes parents, ma compagne, ma belle-sœur, ma marraine et Etienne Paulet pour leur soutien, leurs relectures et leurs conseils d'écriture.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	1
CHAPITRE I – INTRODUCTION	3
1.1 PROBLÉMATIQUE	3
1.2 STRUCTURE GÉNÉRALE DU TRAVAIL	5
CHAPITRE II – ÉTAT DE L'ART	7
2.1 LE BOIS CORDÉ : CIRCONSCRIRE LES CONTOURS D'UNE TECHNIQUE	7
2.1.1 DÉFINITION D'UNE TECHNIQUE DE CONSTRUCTION	7
2.1.2 HISTOIRE DU BOIS CORDÉ DANS LE MONDE	9
2.1.3 ÉMERGENCE DU BOIS CORDÉ EN WALLONIE	12
2.2 LE BOIS CORDÉ : MATERIAUX ET COMPOSITION	13
2.2.1 LE MATÉRIAU BOIS	13
2.2.2 LE MORTIER	16
2.3 LE BOIS CORDÉ : UNE MÉTHODE DE CONSTRUCTION DÉPASSÉE ?	18
2.3.1 ATOUTS ET FAIBLESSES DE LA TECHNIQUE	18
2.3.2 PERFORMANCE STRUCTURELLE : EXPÉRIMENTATION RÉCENTE	19
2.3.3 PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE ET ENVIRONNEMENTALE	20
2.3.4 PERFORMANCE SOCIOÉCONOMIQUE : UNE ALTERNATIVE LOW TECH ?	23
CHAPITRE III - ENQUÊTES	24
3.1 AVANT-PROPOS	24
3.2 MÉTHODOLOGIE	24
3.3 CAS D'ÉTUDE	27
3.3.1 MAISON À MOHIVILLE	27
3.3.2 MAISON AU THIER-À-LIÈGE	30
3.3.3 MAISON À DAVE	33
3.3.4 MAISON À OLNÉ	36
3.4 ANALYSE CROISÉE	39

CHAPITRE IV – EXPÉRIMENTATION	41
4.1 LE PROTOTYPAGE COMME MÉTHODE DE RECHERCHE	41
4.2 PROCESSUS D’EXPÉRIMENTATION	42
4.2.1 ÉQUIPE ET LIEU D’EXPÉRIMENTATION	42
4.2.2 CONCEPTION ET CONSTRUCTION D’UN CAISSON ÉTANCHE ET RÉEMPLOYABLE	43
4.2.3 MISES EN ŒUVRE	45
4.2.4 PROCÉDURE DE TEST D’ÉTANCHÉITÉ À L’AIR	51
4.3 RÉSULTATS DE L’EXPÉRIMENTATION	53
4.3.1 PERFORMANCE THERMIQUE	53
4.3.2 TEMPS DE TRAVAIL ET COÛT	54
4.3.3 ÉTANCHÉITÉ À L’AIR	55
CHAPITRE V – CONCLUSIONS	59
TABLE DES ILLUSTRATIONS	63
BIBLIOGRAPHIE	67
ANNEXES	71
ANNEXE 1 : ENTRETIEN AVEC JEAN-MARIE DELHAYE	71
ANNEXE 2 : FICHES COMPARATIVES	77
FICHE 1 : VISITE DU 11 OCTOBRE 2021	77
FICHE 2 : VISITE DU 14 OCTOBRE 2021	80
FICHE 3 : VISITE DU 16 OCTOBRE 2021	83
FICHE 4 : VISITE DU 3 NOVEMBRE 2021	86
ANNEXE 3 : FICHES PRÉPARATOIRES DU PROTOTYPE	89
FICHE 1 : CONSTRUCTION DU CAISSON ET PROPOSITION DE MISE EN ŒUVRE	89
FICHE 2 : PROTOCOLE DE MISE EN ŒUVRE	92
FICHE 3 : PREMIERS RÉSULTATS ET REJOINTOYAGE	95
ANNEXE 4 : TABLEURS EXCEL	97
TABLEUR 1 : MÉTHODES DE CALCUL VALEURS U SUIVANT LES POURCENTAGES ET CALCULS DES PROPORTIONS/QUANTITÉS POUR LA MISE EN ŒUVRE	97
TABLEUR 2 : VALEURS RÉCOLTÉES, VALEURS EXTRAPOLÉES ET GRAPHIQUES DES RÉSULTATS	98

Avant-propos

Depuis mon plus jeune âge, je porte un grand intérêt pour le matériau bois, une passion et un savoir-faire qui m'ont tout d'abord été transmis par un de mes oncles, lorsque je l'accompagnais dans son atelier. Impressionné par la polyvalence de ce matériau, j'ai donc réalisé, dans un premier temps, mes études secondaires en Technique de Qualification en Industrie du Bois où j'ai principalement pratiqué l'ébénisterie. Après cette première formation en menuiserie, j'avais envie de découvrir d'autres matériaux de construction et de concevoir à plus grande échelle. C'est donc tout naturellement que j'ai orienté mes études supérieures vers un Bachelier puis un Master en architecture, études durant lesquelles mon intérêt pour le bois a continué de se manifester au travers de mes différents projets. Ce travail de recherche s'inscrit donc dans la continuité de ma formation et va également me permettre de découvrir une technique qui m'était inconnue jusqu'il y a peu. Je compte finaliser mon parcours l'année prochaine avec un master complémentaire en Architecture Bois Construction à l'ENSTIB, en France.

Ma première rencontre avec la technique du bois cordé a eu lieu par l'intermédiaire de l'ouvrage « Habiter le bois en Wallonie » (Butil, P. et Lozet, B., 1998). Je découvre la première fois, sans explication, le mot « bois cordé » dans l'introduction du chapitre 1 de cet ouvrage et j'en apprend davantage quelques pages plus loin avec ces mots peu engageants : « La construction en bois cordé reste à citer, comme une technique d'origine canadienne, peu représentée il est vrai chez nous. Il s'agit de maçonner des bûches refendues, à plat et perpendiculairement à la surface du mur, à l'aide d'un mortier composé de sciure, sable, ciment et chaux. » (Butil et Lozet, 1998, p.54). Cette description est par ailleurs accompagnée d'une illustration d'un projet de l'architecte Christina Dewart à Ovifat (Illustration 1), mettant assez peu en évidence les potentiels sensibles de cette technique marginale. Néanmoins, intéressé depuis longtemps par des techniques alternatives et plus respectueuses de l'environnement, cette mise en œuvre a directement attisé mon intérêt, au point de devenir l'objet central de mon travail de fin d'études.



Illustration 1 : Maison Dethier à Ovifat, réalisée par l'architecte Chritina Dewart en 1991

Chapitre I – Introduction

1.1 Problématique

Depuis plusieurs dizaines d'années, l'homme est mis en garde par rapport à son empreinte écologique mondiale qui dépasse désormais la capacité biologique de la Terre (Muytjens, 2018). Le tout récent rapport du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), datant de mars 2022, montre que les risques climatiques apparaissent plus tôt et plus sévèrement que ce qui avait été estimé. Il remet une nouvelle fois le doigt sur l'impact que l'homme a sur l'environnement : épuisement des ressources naturelles, perte de la biodiversité, dégradation des écosystèmes et des sols. Les experts constatent également depuis quelques années que l'action humaine est la cause de 90% de l'augmentation des gaz à effet de serre (Chapiron, 2021).

Le secteur de la construction est un des gros acteurs de ces bouleversements. A l'échelle mondiale, il est responsable de 50% de l'épuisement des ressources naturelles et représente 40% des déchets présents sur cette terre. A l'échelle plus locale de la Wallonie, ce même secteur ne pèse pas moins de 35% de la consommation d'énergie et génère environ 17 millions de tonnes de déchets par an, ce qui représente 10 fois plus que le volume d'ordures ménagères (Cluster Eco Construction, 2019).

Aujourd'hui, il semble donc nécessaire, voire urgent, de développer des dispositifs permettant de consommer et de construire autrement, avec des techniques simples et réversibles mobilisant des matériaux pauvres en énergie grise afin de minimiser notre impact sur l'environnement. Cette crise environnementale demande d'innover davantage pour repenser notre mode de fonctionnement au sein d'un écosystème fragile dont nous sommes dépendants. Cette trajectoire de recherche doit mobiliser tous les acteurs du secteur, du fabricant de matériau à l'habitant. L'architecte doit, lui aussi, endosser sa part de responsabilité et prendre appui sur l'architecture comme moyen d'expérimenter de nouveaux matériaux comme de nouvelles mises en œuvre (Bertier, 2017).

Dans cette perspective, le bois cordé possède des atouts qui pourraient participer à des formes de réponse au contexte de crise environnementale qui est le nôtre. Cette technique qui consiste à empiler des bûches de bois, liées entre elles à l'aide de mortier afin de créer une paroi verticale (Snell, 2006) est connue pour ses nombreux avantages économiques, environnementaux et esthétiques (Tétreault, 2004).

En effet, cette technique ancestrale se base sur des ressources faiblement transformées et est relativement simple à mettre en œuvre du fait de sa faible technicité. Elle est donc accessible à tous et offre de larges possibilités d'auto-construction (Utovie, 2017). Ces critères rendent cette technique « conviviale » selon le concept du philosophe et penseur de l'écologie politique Ivan Illich, dans son livre « La convivialité » de 1973. Il nomme « conviviale » une société où l'homme a la possibilité d'exercer une action autonome et créative, sans spécialiste, et à l'aide d'outils moins contrôlables par l'industrie (Illich, 1973). Nous pouvons donc nous questionner sur la manière dont cette technique s'est transmise et d'où viennent ses fondements.

Si l'étude du bois cordé face aux enjeux climatiques et aux normes actuels semble pertinente par son faible impact en énergie grise, pourquoi est-elle si peu répandue alors qu'elle possède de nombreux avantages ? Est-elle en mesure de répondre aux normes actuelles ? Si elle n'y répond pas, quelles sont les variantes à envisager pour qu'elle puisse les respecter ? Est-il possible d'augmenter ses performances énergétiques tout en gardant des matériaux avec un faible impact sur l'environnement ? Aujourd'hui, sa valeur « R », résistance relative au transfert thermique d'un matériau, est relativement compliquée à déterminer (Snell, 2006). Pourquoi la récolte de ces données est-elle si complexe et quels facteurs les influencent ?

Le présent travail tente d'explorer ces quelques questions de façon pratique. En effet, tester la mise en œuvre d'une structure de bois cordé et réaliser une analyse technique pourraient permettre de comprendre au mieux ses limites actuelles dans le climat tempéré océanique Wallon. Mes préférences d'apprentissage passant le plus souvent par des étapes d'expérimentation concrètes et actives, façonner quelque chose de mes mains et sentir la matière étaient inévitables pour comprendre et ajuster la technique choisie, tout en me basant sur les données récoltées.

« L'homme ne se nourrit pas seulement de biens et de services, mais de la liberté de façonner les objets qui l'entourent, de leur donner forme à son goût, de s'en servir avec et pour les autres ».

Ivan Illich, 1973, p.27

1.2 Structure générale du travail

Dans un premier temps, en prenant appui sur différentes sources issues de la littérature, nous tenterons de définir la technique du bois cordé dans son essence, sa diversité, sa géographie et son histoire. Nous rendrons compte des caractéristiques de ses différentes composantes, de ses variantes et son évolution dans le temps. Nous mettrons ensuite cette technique face à l'évolution progressive des normes d'aujourd'hui.

Dans un second temps, le travail s'appuiera sur une étude de cas. Celle-ci a été nourrie par la rencontre avec l'architecte Jean-Marie Delhayé¹. L'échange avec cet acteur a permis d'en apprendre davantage sur la technique et son usage en région Wallonne, de recueillir le point de vue d'un praticien sur ses atouts et limites pour tenter de comprendre pourquoi le bois cordé semble décliner aujourd'hui. Par le biais de cet architecte, nous avons eu l'opportunité d'aller sur le terrain et d'être accueilli par des auto-constructeurs sur quatre projets en bois cordé réalisés entre 1997 et 2012 dans les arrondissements de Namur et de Liège. Nous avons pu les analyser, les étudier et les comparer entre eux.

Cette approche par étude de cas a permis de mettre en évidence un état des pratiques en région Wallonne. Nous en avons déduit une série de typologies constructives, des données ont été récoltées sur les matériaux et mises en œuvre et, sur base de celles-ci, des performances ont été calculées et comparées aux valeurs normatives actuelles. Cette étape a permis de mieux identifier les limites et faiblesses de ces différentes typologies constructives pratiquées. C'est sur cette base qu'il nous a été possible d'imaginer des pistes d'amélioration et d'établir une hypothèse de travail en vue d'une recherche appliquée.

Ainsi, dans un troisième temps, en s'appuyant sur une forme de recherche par expérimentation et afin de proposer des pistes d'amélioration de la technique du bois cordé, nous avons mis en œuvre un prototype à l'échelle 1/1 d'une portion de mur d'enveloppe représentant une alternative possible aux mises en œuvre traditionnelles. En plus de vérifier les conditions de mise en œuvre et d'en découvrir les limites de faisabilité, nous avons saisi l'occasion pour réaliser une série de tests sur ce prototype permettant de vérifier certaines valeurs performanciennes. Le but de cette démarche étant de déterminer si cette méthode de construction a toujours un sens et du potentiel aujourd'hui dans la perspective d'une construction capable de répondre aux enjeux environnementaux mais aussi sociaux et économiques qui sont les nôtres.

¹ Jean-Marie Delhayé est membre fondateur du groupe ARTerre ainsi que du Cluster Eco Construction de la Région Wallonne. Il est l'auteur, avec des clients auto-constructeurs, de plusieurs réalisations mobilisant la technique du bois cordé.

« L'emplacement de la maison étant décidé, de quoi doit-elle être construite ? Les cabanes en rondins, bruts ou équarris à l'herminette, étaient la construction courante de l'époque et de la région, comme partout le long de toutes nos frontières avant l'érection de scieries sur les sites naturels de la force hydraulique. Mais David Williams n'avait pas l'intention d'envisager de se loger, lui et sa famille, présente et future, dans une cabane comme celles qui parsèment les clairières du sud-est du Wisconsin. Il souhaitait construire quelque chose de plus permanent, qui résisterait aux tempêtes de l'hiver et à la chaleur de l'été, et qui ressemblerait aux confortables fermes de la région de l'État de New York d'où il venait. Les composants simples du mortier étaient, bien sûr, abondants, mais il n'y avait pas de pierre de construction dans le voisinage, sauf les plus gros cailloux du gravier de surface local, dont un pionnier occasionnel a progressivement accumulé assez pour se construire une maison en pierre, à la suite de sa première cabane. De briques il n'y avait point.

Il n'y avait qu'un seul matériau et c'était le bois. Il n'y en avait littéralement pas de fin, la quantité disponible ne dépendant que du labeur de celui qui maniait la hache et la scie. Il fallait donc du bois, mais du bois préparé de cette façon, avec un tel labeur et un tel travail, et ainsi "mis en réserve" (comme on l'appelait localement), comme peu de ses voisins en avaient jamais vu ; et, en fait, comme peu de gens aujourd'hui en ont même entendu parler. »

Paul Burrill Jenkins, 1923, a « Stove-wood » house, p.190

(traduction personnelle)

Chapitre II – État de l’art

2.1 Le bois cordé : circonscrire les contours d’une technique

2.1.1 Définition d’une technique de construction

« Corder le bois, c’est l’empiler sous la forme d’un parallélépipède de dimensions variables. Anciennement, les bois de chauffage se vendaient à la corde. Les dimensions et le volume de la corde variaient avec les localités mais assez généralement, on entendait par corde ordinaire un parallélépipède rectangle ayant 8 pieds de couche, 4 pieds d’élévation et 4 pieds de profondeur. La corde comprenait donc 128 pieds cubes. » (Nanquette, 1859, p.18)

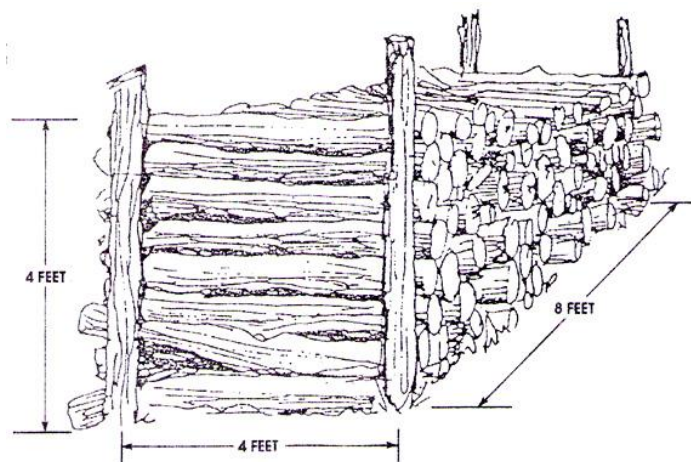


Illustration 2 : Estimation du volume de bois de chauffage (« Cordwood ») donnant son nom à la technique de bois cordé (« Imperial cord graphic »)

Ainsi, l’étymologie de l’appellation « bois cordé » vient de l’unité de mesure associée, bien avant l’invention du système métrique, à l’estimation d’un volume de bois de chauffage (Illustration 2) : la corde (Snell, 2006). Cette étymologie nous montre à quel point cette technique constructive n’est pas tant liée au bois en tant que matériau de construction, ou à un mode d’assemblage, qu’à la bûche elle-même en tant qu’élément détourné de sa fonction première. Ce lien se confirme si l’on considère qu’en langue anglaise, le terme « Stovewood » (littéralement bois de foyer) semble aussi largement usité que celui de « Cordwood ».

La construction en bois cordé s’est développée dans les régions où les matières premières (bois de chauffage, sable, chaux, ciment, terre, ...) étaient à priori abondantes et relativement bon marché. Elle s’est déclinée sous plusieurs formes et en différentes techniques de mise en œuvre selon l’essence de bois utilisée, le format des bûches ainsi que leur mode de préparation et d’appareillage, ou encore les composants du mortier (Illustration 3).

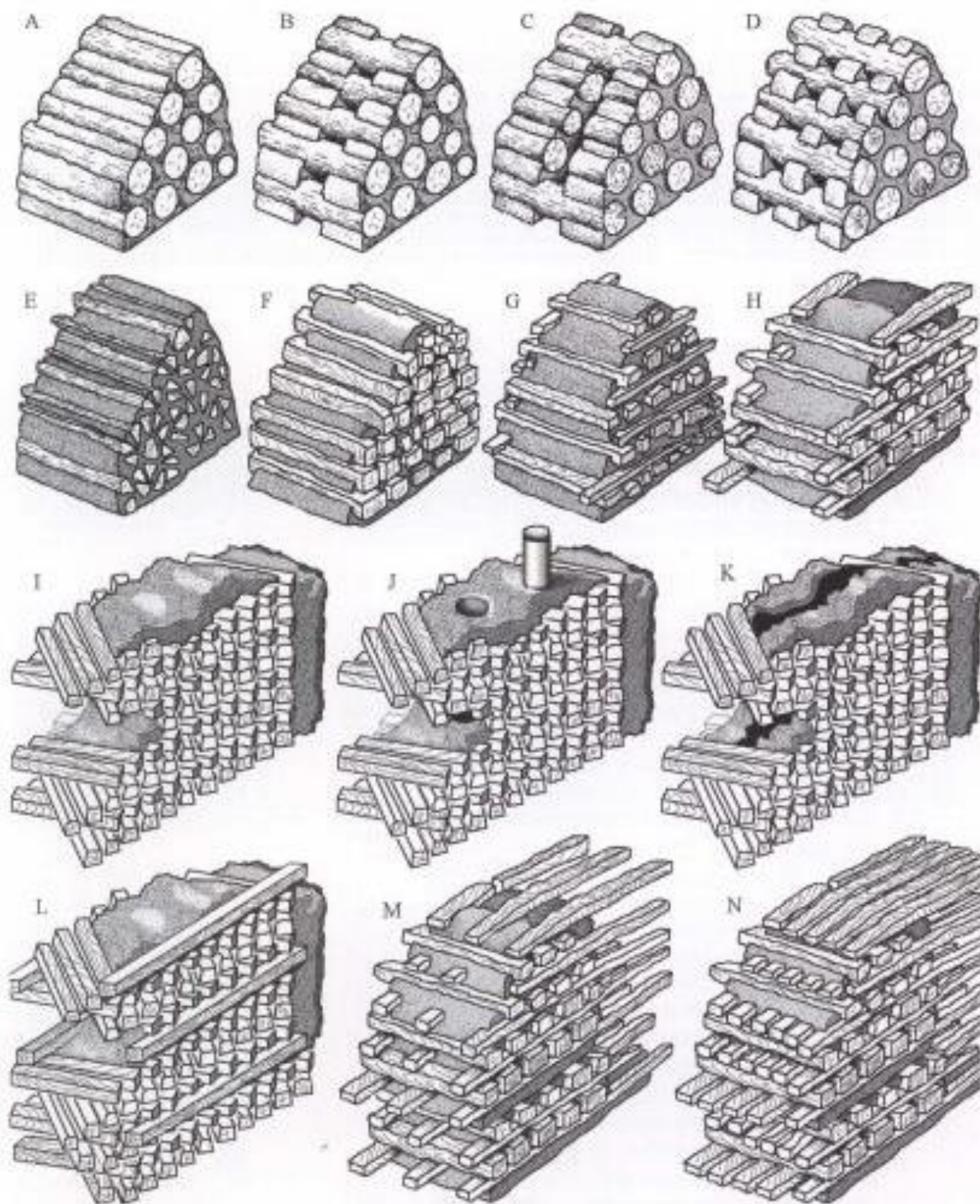


Illustration 3 : Déclinaisons structurelles du bois cordé

Cette diversité est due à la dispersion géographique de la pratique et au fait qu'elle n'a jamais été soumise à l'industrialisation. On retrouve néanmoins une certaine constance : les bûches sont, la plupart du temps, positionnées dans le sens perpendiculaire à la paroi, traversant la maçonnerie. Elles sont ensuite empilées les unes sur les autres et solidarisées avec un mortier (Hagman, 2012 ; Szewczyk, 2007). Aujourd'hui, cette technique a évolué et consiste à empiler des bûches fendues et écorcées, sur deux rangées de mortier. L'espace entre celles-ci est rempli avec de l'isolant en vrac (Illustration 4). Cette technique est utilisée, soit comme élément porteur, soit comme simple élément de remplissage (Snell, 2006) et a une épaisseur qui varie entre 20 et 60 cm suivant l'usage et les performances souhaitées (ARDHEIA, 2007). Nous verrons en quoi cette évolution est induite par la mise en place de systèmes normatifs qui vont s'imposer progressivement à toute construction.

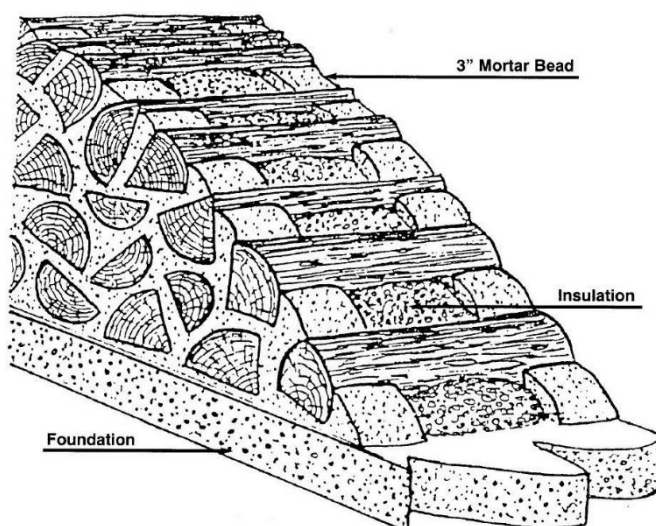


Illustration 4 : Détails d'un mur en bois cordé

2.1.2 Histoire du bois cordé dans le monde

Les origines du bois cordé sont difficilement traçables mais plusieurs études menées sur ce patrimoine spécifique, tant dans le nord de l'Amérique qu'en Europe continentale, nous donnent quelques indications. La technique est probablement apparue indépendamment à différents endroits et sous différentes formes un peu partout dans le monde (Hagman, 2012). « Des habitats en bois cordé érigés il y a mille ans tiennent encore debout en Sibérie et au nord de la Grèce et il s'en construit en Amérique du Nord depuis 1850 » (Tétreault, 2004, p.9). Comme l'explique Olle Hagman (2012) dans son travail « A Technology in Permanent Transition : 200 Years of Cordwood Building with Consumers as Producers », construire un abri ou une maison en bois cordé nécessite des outils comme une scie et elle ne fut donc abordable et efficace qu'à partir de 1840. Jusque-là, la technique du bois cordé concurrençait peu les constructions traditionnelles en rondins, pour lesquelles

une bonne hache suffisait. Des bâtiments de ce type ont également été retrouvés en Scandinavie, en Pologne et en Europe centrale. Ces constructions ont été réalisées entre la deuxième moitié du 19^{ème} siècle et la première moitié du 20^{ème} siècle. Elles étaient généralement construites avec du bois réutilisé, enduites sur une face et étaient destinées à des fonctions agricoles pour accueillir des animaux.

Cette technique peu répandue se trouve aussi bien dans les villes que dans les campagnes. En Pologne, à Białystok, 8 bâtiments en bois cordé, construits en 1930 existent encore. L'architecte polonais Jarosław Szewczyk (2007), estime qu'auparavant, il en existait entre 20 et 40 dans cette ville et qu'à Bransk et Białowieża, d'autres ont été construits dans les années 60. Avant la seconde guerre mondiale, la population polonaise était multiculturelle. Ces vieilles maisons vernaculaires (Illustration 5) sont donc les traces d'un contexte urbain indigène créé par les communautés pauvres polonaises multi-ethniques. Dans ces villes, les murs en bois cordé sont maçonnerés avec des pièces de bois dégauchies et enduits des deux côtés afin de protéger les parois des intempéries. Cela suggère que toute ancienne bâtisse au système constructif non apparent pourrait cacher une construction en bois cordé.



Illustration 5 : Maison délabrée en bois cordé construite dans les années 1930 à Białystok

En Suède, deux périodes d'utilisation du bois cordé se sont succédé. La première s'étend de 1850 à 1910 où une centaine de maisons situées dans et autour de Stockholm ont été répertoriées.

Ensuite, des années 20 aux années 40, une seconde vague de construction touche le centre-ouest de la Suède où cette fois, une quarantaine de maisons ont été bâties avec du bois fraîchement coupé et fendu. Après cette seconde période, la technique disparaît complètement dans ce pays pendant près d'un demi-siècle (Hagman, 2012).

Il est vraisemblable de penser que le bouillonnement culturel et politique général, qui voit le jour aux Etats-Unis d'Amérique comme en Europe au sortir des années 1960, donne un nouvel élan à l'expérimentation en architecture (Maniaque, 2014). C'est à cette époque qu'est publié le rapport Meadows (1972), commandé par le Club de Rome, et intitulé *The Limits to Growth* (traduit en français sous le titre « Les limites à la croissance »). En 1973, le monde découvre avec stupeur sa dépendance au pétrole au travers d'une crise qui va marquer les esprits de toute une génération. En 1976, en Amérique du Nord, une construction en bois cordé est exposée à la conférence des Nations Unies sur l'habitat à Vancouver et, un an après cette apparition, trois livres sont publiés sur cette technique : « Building the Cordwood Home » par Jack Henstridge, « How to build log end house » de Rob Roy et « Stackwall : How to build it » de Al Landsdown et Kris Dick. Henstridge, Landsdown et Dick défendent une technique autoportante alors que Roy utilise cette pratique comme élément de remplissage. Tous les auteurs ont expérimenté plusieurs mortiers et ont dressé des recettes suivant leur utilisation et les performances souhaitées. Ils ont ensuite publié une série d'articles et organisé des conférences (Hagman, 2012). Cet enchaînement d'événements a ainsi donné un souffle nouveau et redynamisé la technique du bois cordé. Au Québec, cette pratique fût expérimentée par Michel Bergeron et François Tanguay, du groupe Archibio et est enseignée ensuite à la Earthwood Building School par Rob Roy, l'un des pionniers de cette pratique (Tétreault, 2004). L'envie de diminuer le coût de construction, d'avoir un style de vie plus écologique et de construire de ses propres mains sont les racines qui lient tous les adeptes et représentants américains du bois cordé (Hagman, 2012).

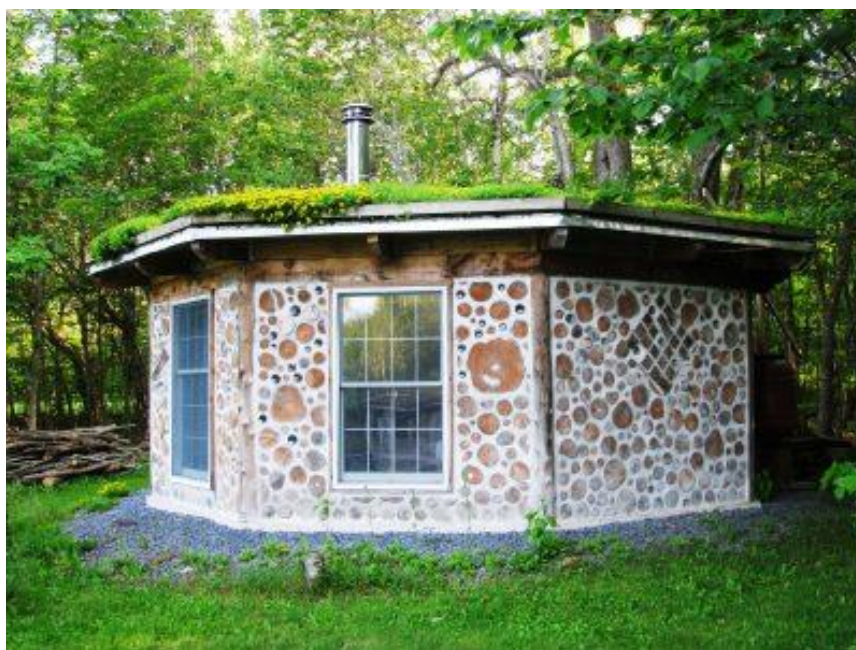


Illustration 6 : Maison octogonale en bois cordé

2.1.3 Émergence du bois cordé en Wallonie

En Belgique, la recherche de nouveaux procédés moins coûteux et plus écologiques donne naissance aux premières réalisations en bois cordé dans les années 80 (Higuet, 1996). Plus précisément en Wallonie, des architectes tels que Christina Dewart, Bernard Chambon et Jean-Marie Delhayé mettent en œuvre cette technique. A nouveau, l'implantation de la technique passe par l'échange de savoir-faire. C'est singulièrement le cas, avec Monsieur Delhayé, architecte ayant le plus pratiqué cette mise en œuvre ancestrale dans notre région et pionnier de l'« écobioconstruction »² accessible à tous.

C'est au début des années 1990 en Bourgogne (France), que ce dernier découvre la technique du bois cordé lors de sa rencontre avec l'auteur François Tanguay, bâtisseur et militant écologiste. Il a alors l'occasion de visiter des chantiers où il utilise du mortier à base de ciment, de chaux, de sciure de bois et de sable.

À la suite de ces échanges et après une première expérimentation en 1997, J-M. Delhayé arrive à la conclusion que cette recette de mortier est trop rigide pour le bois et pas assez aboutie. Ce n'est que quelques années plus tard, lorsque qu'il découvre le béton de chanvre, qu'il remobilise cette technique en expérimentant une variante où il l'utilise à la place du mortier. Le béton de chanvre lui est plus « familier » et il considère qu'il est plus flexible et, en plus d'être isolant, il est particulièrement adapté à notre climat Wallon.³

Il met en œuvre cette technique comme élément de remplissage pour de nouvelles constructions mais aussi en rénovation avec des orientations et expositions différentes. Les éléments associés à cette technique, tels que les soubassements et débordants de toiture, varient en fonction des projets. Il n'hésite pas non plus à combiner cette mise en œuvre à d'autres. C'est le cas dans le dernier agrandissement qu'il conçoit à Olne, où il réalise la façade sud en bois cordé et la façade nord en ossature bois et isolation paille.

Malgré la simplicité de cette technique et son aspect séduisant qui s'apparente à une maçonnerie en moellons, elle nécessite, selon lui, beaucoup de temps et de main d'œuvre. De plus, l'évolution des exigences performanciennes du bâtiment la décrédibilise de plus en plus. Depuis 2012, le groupe ARTerre, agence d'architecture gérée par Jean-Marie Delhayé, remplace ainsi cette technique par d'autres telle que l'ossature bois.⁴

² Suivant la définition propre à l'association Nature et Progrès, il s'agit d'une construction qui est à la fois respectueuse de l'environnement et saine pour la santé. Elle adopte des choix techniques qui prennent en compte la provenance et l'énergie de production des matériaux, la disponibilité des ressources, les émissions gazeuses, l'impact sur la santé et la recyclabilité.

³ Entretien personnel avec Jean-Marie Delhayé réalisé le 14 octobre 2021

⁴ Entretien personnel avec Jean-Marie Delhayé réalisé le 14 octobre 2021

2.2 Le bois cordé : matériaux et composition

2.2.1 Le matériau bois

La construction en bois cordé mobilise plusieurs essences de bois qui ont chacune leurs caractéristiques propres. La composition chimique, les propriétés mécaniques et la structure du bois varient selon l'espèce. On les classe communément en deux grands groupes : les feuillus et les résineux. Par exemple, les résineux comme le Sapin, le Pin ou l'Epicéa auront tendance à être moins denses et moins conducteurs de chaleur tandis que les feuillus comme le Hêtre, le Châtaigner ou l'Iroko, qui ont une masse volumique plus élevée, seront plus denses et plus conducteurs (Fuchs & Mussier, 2019). De plus, comme l'explique François Tanguay (1983) dans le « Petit manuel de l'auto-construction », il est primordial d'utiliser une essence de bois disponible abondamment dans la région où l'on construit. En Amérique du Nord, c'est plutôt des feuillus tel que le Chêne, le Cèdre blanc ou le Bouleau. En Europe en revanche on utilise plutôt des conifères tels que le Sapin blanc, le Douglas ou le Mélèze. Cependant, au-delà de ces différences entre essences et de leur disponibilité, il est important de comprendre le bois en tant que matériau vivant.

2.2.1.1 Composition et structure de la matière

Le bois se génère tout d'abord entre l'aubier et l'écorce (Illustration 7). L'écorce est la couche protectrice du tronc et l'aubier est le bois jeune et vivant qui va petit à petit se transformer en duramen, qui est le bois « parfait » utilisé en menuiserie (Sudre, 2016 ; Fuchs & Mussier, 2019).

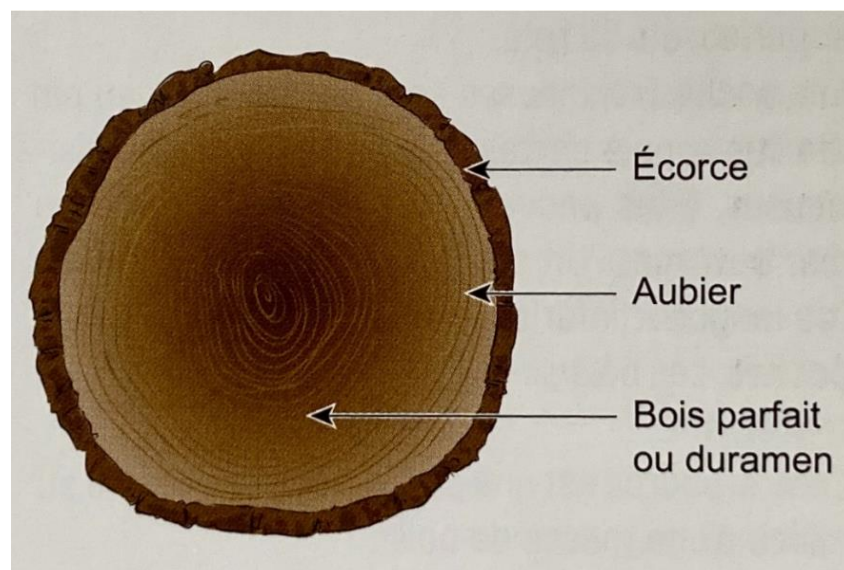


Illustration 3 : Composition du bois

Le bois est composé de 40 à 50% de cellulose, de 20 à 30% d'hémicellulose, de 20 à 35% de lignine et de 10% de matière extraite. Ces composantes constituent les cellules creuses présentes dans le bois (Illustration 8). Elles sont de forme allongée et mesurent entre 0,8 et 2,3 mm (Sudres, 2016). La cellulose et l'hémicellulose constituent les parois cellulaires. La lignine, quant à elle, fournit une cohésion entre chaque cellule. La texture et la structure des parois de celles-ci varient selon les essences et influencent les propriétés physiques et mécaniques de ce matériau (Steiger, 2013).

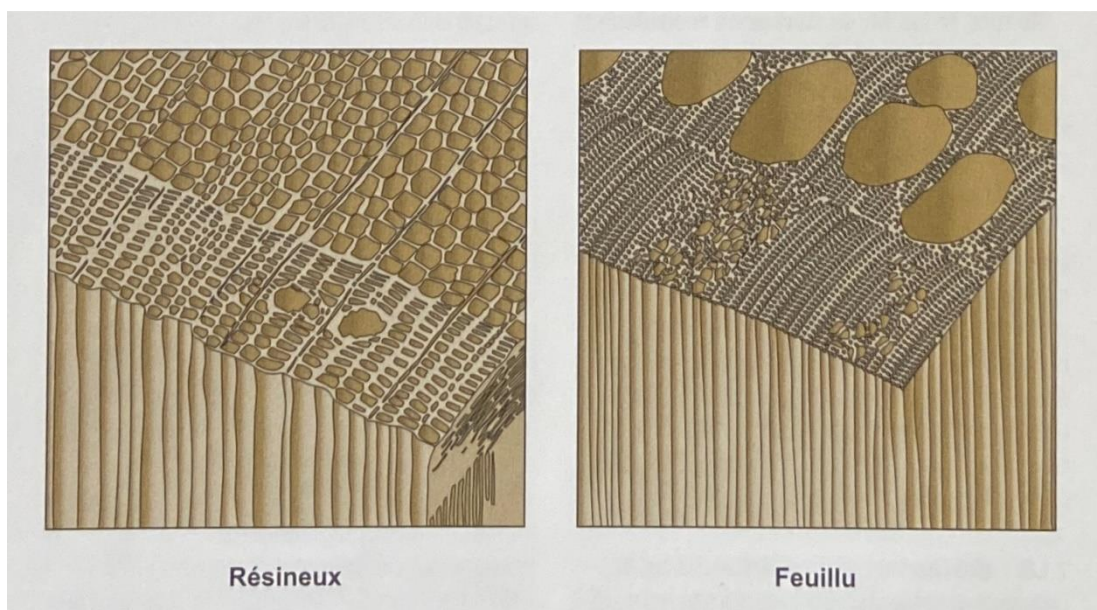


Illustration 4 : Vue microscopique d'un feuillu et d'un résineux

2.2.1.2 Principales caractéristiques physiques

Le bois est un matériau anisotrope, c'est-à-dire qu'il est composé de fibres orientées qui déterminent ses résistances en traction et en compression. Ce matériau se fend aisément dans le sens radial et est performant et résistant dans le sens longitudinal. Ses propriétés mécaniques sont aussi liées à sa densité, qui varie selon l'essence. Moins un bois est dense, moins il sera robuste (Sudres, 2016).

Le bois est aussi un matériau hygroscopique : il absorbe et rejette l'humidité relative de l'air (Fuchs & Mussier, 2019). Sa stabilité dimensionnelle et sa résistance à la déformation sont largement influencées par cette caractéristique (Steiger, 2013) qui se résume à un retrait ou gonflement du bois dû à la quantité d'eau contenue dans ses cellules et ses espaces vides (Fuchs & Mussier, 2019). Comme l'abordent les deux architectes, Julien Mussier et Matthieu Fuchs dans leur livre « Construire avec le bois » (2019), cette variation volumétrique ne se manifeste qu'entre 0 et 30% d'humidité contenue dans le bois. Cette instabilité

dimensionnelle est classée suivant le coefficient de rétractabilité : plus il est élevé et plus le bois est « nerveux ». En plus d'influencer ses dimensions, l'eau est également un facteur de dégradation physique du bois : lorsque son degré d'humidité varie entre 22 et 30%, il est beaucoup plus vulnérable aux attaques d'insectes et aux champignons. L'utilisation d'un bois sec avec un taux d'humidité relatif à son usage lui permet d'être plus stable, d'améliorer ses caractéristiques mécaniques, son adhérence et de prévenir certaines altérations biologiques (Steiger, 2013).

Le bois est également un matériau poreux, il a donc de bonnes propriétés thermiques (Bohnke, 1993). Dans le sens perpendiculaire aux fibres, il a une grande capacité isolante. « La conductivité thermique du chêne est 10 fois plus faible que celle du béton et 250 fois plus faible que l'acier » (Fuchs et Mussier, 2019, p.31). Dans le sens des fibres, il faut multiplier son λ , qui représente la conductivité thermique du matériau, par 2 voire 2,5, ce qui le rend nettement moins performant. Par ailleurs, sa faible dilatation et conduction thermique lui permettent d'avoir une très grande résistance au feu (Bohnke, 1993).

Au niveau de l'acoustique, le bois a de très bonnes performances d'absorption grâce à ses cellules ouvertes mais démontre un faible affaiblissement phonique (Steiger, 2013).

Comme expliqué dans le ProfilWood de 2018 « Le bois local, guide des usages », l'utilisation du bois nécessite beaucoup d'attention et de bonnes pratiques. Les propriétés du bois, sa méthode de mise en œuvre et son exposition ne sont en aucun cas à ignorer dans l'élaboration d'un projet. Les essences de bois indigènes offrent un réel potentiel mais sont parfois mal exploitées pour s'accorder à tout type d'utilisation. Chaque essence de bois a des caractéristiques propres et un usage bien précis. C'est pour cela qu'il est nécessaire d'avoir une réflexion appropriée afin de réaliser une mise en œuvre optimale et éviter au maximum la détérioration du matériau.

2.2.1.3 Spécificité de la ressource

Outre ses caractéristiques techniques, le bois est un matériau potentiellement renouvelable à l'infini. L'élément clé pour une exploitation durable de la ressource bois est la bonne gestion des forêts. « Elle est guidée par la disponibilité des ressources en amont, et par la commercialisation du bois en aval. » (Sudres, 2016, p.11). La sylviculture, en tant que pratique visant l'exploitation de la ressource forestière, joue donc un rôle considérable. En effet, si la récolte est gérée correctement, il est possible de produire plus de bois et de meilleure qualité. La replantation permet de diversifier et redynamiser les forêts et ainsi d'augmenter leur capacité de stockage en carbone. De plus, la demande de bois dans

certain pays a des effets positifs et contribue à une gestion forestière plus réfléchie et durable (Hout info bois, 2012).

En Belgique, la superficie forestière a augmenté de 59% en 140 ans, ce qui équivaut à une croissance annuelle de 0,4% (Hout info bois, 2012). La forêt wallonne s'étend sur 563 000 ha, soit 33% de son territoire et, pourtant, la part de construction en bois en 2021 reste très faible (environ 10%) (OEWB, 2021). Seulement un cinquième du volume de bois récolté annuellement est valorisé en Wallonie, le reste est exporté (PofilWood, 2012). Ce constat permet de mettre le doigt sur la nécessité de construire en bois dans notre région et de contribuer au commerce de bois local. De plus, la réduction de la pollution liée à son transport permettrait de diminuer davantage l'énergie intrinsèque de ce matériau. (ProfilWood, 2018).

Le bois contribue au développement durable : il stocke du carbone tout au long de sa vie et exige peu d'énergie pour sa production (Hout info bois, 2012; ProfilWood, 2018). Dans le travail de Elias Hurmekoski (2017) « Comment la construction en bois peut-elle contribuer à réduire la dégradation de l'environnement ? », il explique que remplacer une tonne de ciment *Portland* par du bois permet d'économiser deux tonnes d'émission de CO₂. Sa légèreté permet d'avoir des structures deux fois plus économes en matière. En effet, le bois est un matériau économe puisqu'il se recycle et se reconditionne, tout comme ses déchets, ce qui prolonge sa durée de vie et son stockage en CO₂ (Hout info bois, 2012).

2.2.2 Le mortier

2.2.2.1 Composition et caractéristiques

Le mortier est un agent qui solidarise des matériaux de construction (Snell, 2006). Le dosage et la nature des différents composants de ce matériau influencent ses différentes propriétés (Mouterde, Morel, Martinet & Sallet, 2011). Le mortier mobilisé dans la construction en bois cordé est un mortier dit « bâtard », composé généralement de sable, de ciment, de chaux hydratée et d'eau (Snell, 2006). Contrairement au mortier de ciment, le mortier bâtard a une faculté d'auto-réparation grâce à la chaux contenue dans son mélange. Celle-ci se calcifie lorsqu'une fissure apparaît (Utovie, 2017).

Dans le bois cordé, de la sciure, de la perlite ou de la vermiculite humidifiées sont généralement ajoutées au mélange du mortier. En effet, ces adjuvants permettent de rendre ce matériau, présent en grande quantité dans un mur en bois cordé, plus isolant tout en augmentant son temps de prise afin de minimiser le risque de fissuration lors du séchage (Snell, 2006). L'addition de ces agrégats réduit tout de même sa résistance mécanique mais

lui permet de mieux supporter les grosses déformations (Mouterde, Morel, Martinet & Sallet, 2011). En construction écologique, le mortier peut également désigner un autre type de liant comme l'argile utilisé dans la technique du torchis (Snell, 2006).

2.2.2.2 Le béton de chanvre comme mortier

Étant donné l'énergie grise relativement élevée du ciment (Snell, 2006), la possibilité offerte par la technique du béton de chanvre, qui le remplace complètement par de la chaux, constitue une alternative intéressante. Le béton de chanvre se compose de chènevotte de chanvre, de chaux hydraulique et d'eau et sa mise en œuvre est similaire à celle du mortier. Ce type de béton sollicite un matériau renouvelable, la chènevotte, qui est la partie ligneuse du chanvre qui subsiste après qu'on ait enlevé la filasse (Larousse, 2022), mais également la chaux, dont la matière première, la pierre calcaire, ne l'est pas. Cependant, la chaux contenue dans un mur peut être recyclée pour un usage similaire, contrairement au ciment qui ne peut être réutilisé que pour des remblais ou des couches stabilisantes (Lecompte, 2020). De plus, l'industrie cimentière est une des principales productrices de gaz à effet de serre (environ 850kg de CO₂ par tonne de ciment produit). Le béton de chanvre, lorsqu'il est lié à la chaux, a donc un bilan environnemental positif puisqu'il stocke le gaz carbonique au lieu d'en émettre (Nguyen, 2014). Ce béton a un comportement hydrophile et une très bonne stabilité (Courgey & Oliva, 2010). L'apport en chaux est inévitable car c'est cette addition qui renforce le mélange et augmente sa résistance (Mouterde, Morel, Martinet & Sallet, 2011). Le ciment, quant à lui, suivant les expérimentations réalisées par Nguyen (2014), est perturbé par l'absorption de l'eau par la chènevotte ce qui le rend plus fragile, moins élastique et peut entraîner des déformations et une plus faible accroche aux fibres. C'est donc du béton de chanvre lié à la chaux qui, suivant les conseils des spécialistes que j'ai pu rencontrer, sera mobilisé par la suite dans le cadre de notre expérimentation.

2.3 Le bois cordé : une méthode de construction dépassée ?

2.3.1 Atouts et faiblesses de la technique

Comme développé dans le « Manuel de construction écologique » de Clarke Snell et Tim Callahan (2006), la technique du bois cordé offre de nombreux avantages. Elle est peu coûteuse, adaptable à souhait et très accessible dans les régions où la ressource bois est abondante. Elle apporte un côté très esthétique, ne demande que peu d'efforts et aucune formation lourde pour sa mise en œuvre. Ayant de bonnes propriétés hygroscopiques et ne contenant aucun matériau polluant, cette technique contribue à la qualité de l'air sain et garantit l'absence de composant toxique.

Cependant, le bois cordé est très gourmand en mortier : environ 40% de la surface d'un mur d'après Rob Roy (2003). Cela rend cette pratique, habituellement classée comme pauvre en énergie intrinsèque, plus énergivore en énergie grise, surtout si le mortier est composé de ciment. L'utilisation de mortier à base d'argile (torchis) serait une alternative mais nécessite une mise en œuvre plus complexe et un entretien plus régulier, ce qui la rend donc moins durable dans le temps (Snell, 2006).

Il faut également considérer que le bois et le mortier sont deux matériaux ayant des comportements et des caractéristiques très différentes et ils peuvent être en conflit lorsqu'on les met en œuvre dans un même mur. « Le bois est dynamique et flexible et le mortier dur et constant » (Snell, 2006, p.148). Cette contradiction entraîne généralement des fissures et donc des problèmes d'étanchéité (Snell, 2006).

La formation de brèches causées par le retrait ou le gonflement du bois ou une mauvaise composition du mortier peut également causer des problèmes structurels ou d'infiltration d'eau. Afin de pallier ces problèmes, il est primordial que le choix et la sélection de ces deux matériaux, ainsi que l'exposition et la conception des murs soient étudiés avec beaucoup d'attention.

Ces faiblesses mettent en avant trois enjeux. Tout d'abord, la participation de cette technique par rapport aux performances structurelles et mécaniques du bâtiment. Ensuite, la contribution du bois cordé face aux performances énergétiques et environnementales du bâtiment. Enfin, le potentiel de cette technique a évolué afin de garantir ces performances sans perdre sa dimension « conviviale » au sens de Illich.

2.3.2 Performance structurelle : expérimentation récente

En 2010, un groupe de chercheurs du laboratoire d'analyse des formes de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Lyon et un ingénieur, Rémy Mouterde, de l'Université de Lyon, réalisent des expérimentations sur les performances mécaniques du bois cordé. L'objectif principal de ces recherches est de tester ce matériau composite et de comparer sa résistance à celle de matériaux conventionnels. Plusieurs études en Amérique du Nord avaient déjà mis en avant la faible résistance à la compression de cette technique lorsqu'elle est utilisée comme élément porteur. Ils l'expliquaient par le manque de cohésion entre le bois et le mortier (Dick & Zubriski, 2005; Flatau, 2009 ; Lansdown & Dick, 1994, 1995 ; Roy, 2003 ; Shockey, 2006 ; Stankevitz, Flatau, Roy & Dick, 2005).

Tout d'abord, les chercheurs commencent par tester les composants séparément pour quantifier le comportement des différentes essences de bois et compositions de mortier avec différents taux d'humidité. Ils obtiennent plus de résultats sur les échantillons de mortier que sur le bois et constatent que l'enjeu se fonde plutôt sur la composition du mortier. Leurs résultats (Illustration 9) démontrent que l'apport de chaux augmente la résistance du mortier et que l'ajout de sciure ou de copeaux de bois lui permet de supporter des déformations plus importantes et d'avoir une meilleure cohésion. Le mortier à base de sable est, quant à lui, beaucoup plus rigide et cassant. La réalisation de tests avec ces deux matériaux ensemble a confirmé les précédents résultats. Le mortier agrémenté de copeaux et de sciure a une résistance deux fois plus grande et le point de rupture à 1,5 MPA est 10 fois supérieur à la descente de charge d'une petite maison.

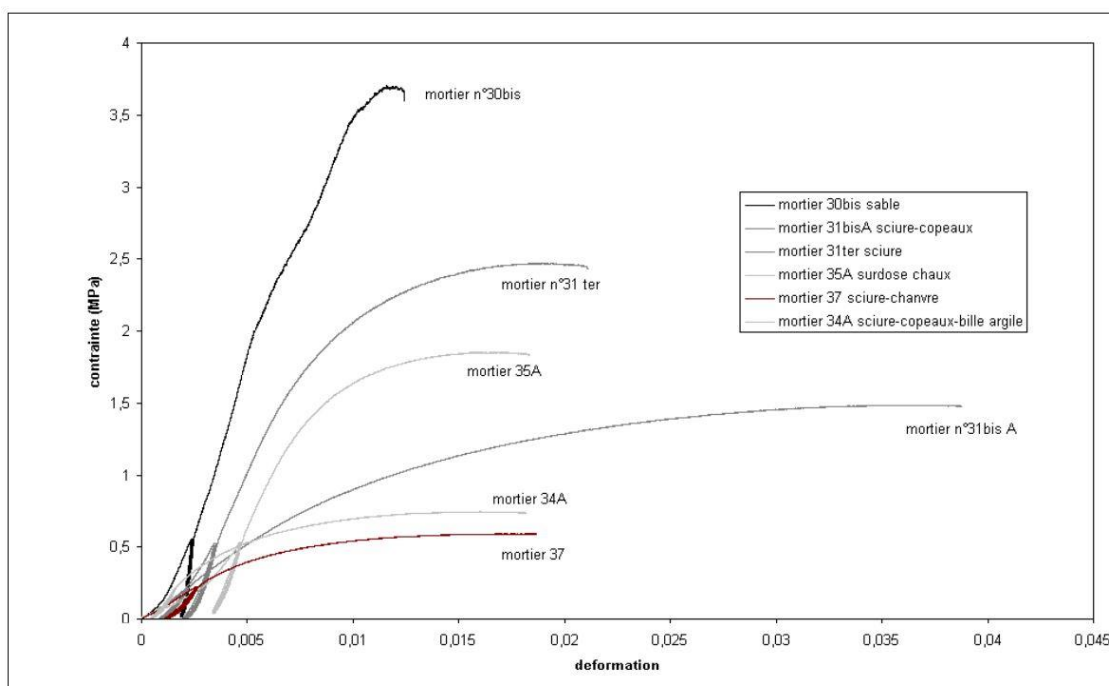


Illustration 5 : Essais de compression simple des mortiers

Ensuite, ils testent 5 variantes avec deux types d'appareillage (Illustration 10) : un système orthogonal et un autre en oblique. Pour chaque échantillon, la composition de mortier est la même et le pourcentage de bois est situé entre 60 et 64% avec un taux d'humidité supérieur à 30%. L'utilisation d'un bois trop sec risque d'absorber l'eau du mortier. Un bois plus humide, avec un taux au-delà de 30%, permet de restituer son eau au mortier, de prolonger son temps de séchage et de donner une meilleure cohésion à ces deux matériaux. Ils constatent que l'appareillage influence très peu la résistance.

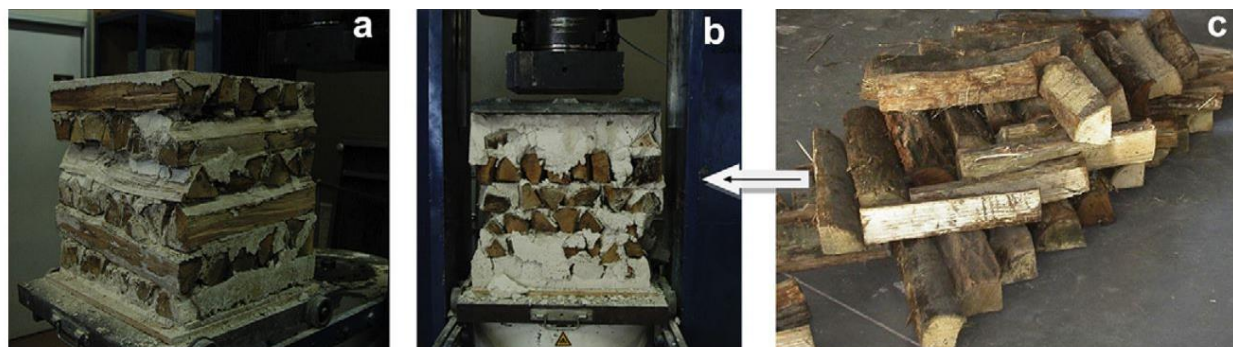


Illustration 6 : Deux types d'appareillage du bois : système orthogonal (a, b) et système oblique (c)

Les résultats de ces expérimentations mettent en évidence, en plus de confirmer le rôle essentiel du mortier et de sa composition, que le bois cordé a un module d'élasticité presque 200 fois supérieur à celui d'une maison réalisée avec des ballots de paille porteurs. Étant donné que cette technique peut atteindre des déplacements en tassement de l'ordre du centimètre, des dispositifs spéciaux pour les menuiseries doivent donc être envisagés. La technique semble tout de même appropriée pour la construction de petites maisons avec deux étages au maximum.

2.3.3 Performance énergétique et environnementale

L'émergence des préoccupations environnementales dans le secteur de la construction peut être située autour des années 1970. C'est à cette époque qu'apparaissent en Europe les premières réglementations thermiques visant, notamment, à réduire la consommation en chauffage des bâtiments. Progressivement, ces réglementations vont mettre en place des méthodes de calculs, des valeurs seuils et élargir leur portée tant sur le type d'opération (construction neuve, rénovation, ...) que sur les indicateurs mobilisés. Ces indicateurs et le « durcissement » progressif de leurs valeurs seuils vont forcer les acteurs du secteur à évoluer et à considérablement orienter la mutation des pratiques et mises en œuvre, condamnant de cette façon certaines techniques, dites traditionnelles, à l'obsolescence.

Les premiers efforts portent sur l'isolation thermique de l'enveloppe, contribuant ainsi à l'économie d'énergie nécessaire à l'obtention d'un niveau de confort dans l'utilisation du bâtiment. En effet, l'enveloppe extérieure doit, en été, protéger des radiations solaires et, en hiver, éviter les pertes de chaleur. Depuis le 1^{er} Janvier 2017, les exigences de Performance Énergétique des Bâtiments (PEB) imposent, pour les parois délimitant un volume chauffé, un coefficient de transmission thermique (valeur U) de maximum 0,24 W/m²K (SPW, 2017). Nous l'avons vu, le durcissement de cette valeur semble avoir freiné le développement du bois cordé en Belgique.

Une seconde exigence relative à la performance de l'enveloppe, permettant d'obtenir un confort thermique avec la plus faible consommation d'énergie, porte sur la maîtrise du flux d'air entre l'intérieur et l'extérieur de l'enveloppe. « Les infiltrations naturelles de l'air dans un bâtiment sont dues à des différences de pression entre l'extérieur et l'intérieur ; celles-ci sont engendrées par le vent et/ou par l'écart de température de part et d'autre de l'enveloppe extérieure. » (Hauglustaine & Simon, 2018, p.28). Ce constat nous amène à nous intéresser à l'étanchéité à l'air du bâtiment. Comme l'explique Séverine Gillet lors de son séminaire à Bruxelles le 26 avril 2016, l'étanchéité à l'air ou la perméabilité d'un mur est un mouvement d'air qui influence plusieurs facteurs et notamment les pertes thermiques d'une paroi par renouvellement d'air. Cette étanchéité est quantifiée de manière empirique par l'exécution d'une mesure par pressurisation via un test « Blower-door » et permet de déterminer le débit de fuite d'une paroi ou d'une pièce (Gillet, 2016). Ces résultats d'étanchéité à l'air sont obtenus avec une différence de pression de référence de 50 Pascals entre le coté intérieur et extérieur de la paroi (CSTC, 2015) et sont représentés par :

- la valeur **V₅₀**, qui représente le débit d'air qui s'échappent de l'enveloppe en m³/h, qui est la valeur « brute » et qui ne prend pas en compte d'unité de surface ;
- la valeur **n₅₀**, qui exprime le taux de renouvellement d'air par heure, elle s'exprime en vol/h (h⁻¹) et s'obtient en divisant le **V₅₀** par le volume intérieur de l'enveloppe ;
- la valeur **v₅₀** ou **q₅₀**, qui représente le débit de fuite entre l'intérieur et l'extérieur par unité de surface, elle s'exprime en m³/h.m² et s'obtient en divisant le **V₅₀** par l'aire de l'ensemble des surfaces extérieures de l'enveloppe testée.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V_{int}}$$

$$\dot{v}_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{A_{test}}$$

Le **v50** est utilisé pour la méthode de calcul PEB et le **n50** est consacré pour la labellisation des maisons passives qui doivent avoir un taux de renouvellement d'air inférieur ou égal à 0,6 vol/h (h^{-1}) (SPW, 2016 ; CSTC 2015).

Aujourd'hui, la réglementation PEB n'impose pas de valeur d'étanchéité à l'air (**v50**) mais incite les auteurs de projet à la tester en fin de chantier. Pour avoir un ordre de grandeur (Illustration 11), la PEB utilise par défaut la valeur de $12\text{m}^3/\text{h.m}^2$, ce qui représente des pertes relativement importantes. Les bâtiments récents, voire passifs, ont des valeurs d'étanchéité proches de $1\text{m}^3/\text{h.m}^2$ (Hauglustaine & Simon, 2018 ; SPW, 2016 ; CSTC 2015).

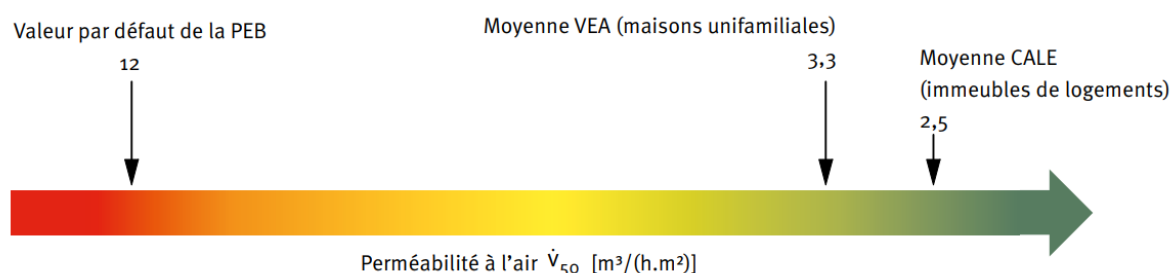


Illustration 7 : Valeur de référence de la perméabilité à l'air v_{50} et statistiques disponibles au sujet de la performance du parc de bâtiments.

A l'heure actuelle, aucune expérimentation sur les performances thermiques et d'étanchéité à l'air n'ont été réalisées sur la technique du bois cordé. Il est donc difficile de la situer face aux exigences d'aujourd'hui.

Une troisième exigence relative à l'enveloppe porte cette fois sur la performance environnementale. Celle-ci est liée, entre autres critères, à l'énergie mobilisée par les matériaux utilisés dans la construction. Suivant la seconde édition du « guide pratique pour les architectes » sous la direction Jean-Marie Hauglustaine et Francys Simon (2018), le développement durable dans la construction doit considérer l'ensemble du cycle de vie des matériaux, favoriser l'utilisation d'énergies et de matières premières renouvelables et diminuer l'énergie et les quantités de matière dépensée lors de l'extraction, l'utilisation et le recyclage du matériaux. Ce concept doit « répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs » (WCED, 1987, p.14).

Si ces exigences gagnent en importance par des méthodes de calcul aujourd'hui mises en place et largement diffusées dans le secteur, elles ne font pas encore l'objet d'une réglementation fixant des valeurs seuils. Cependant la technique du bois cordé qui, nous l'avons vu, mobilise des matériaux peu transformés et pauvres en énergie grise, semble participer à une meilleure performance environnementale du bâtiment.

2.3.4 Performance socioéconomique : une alternative low tech ?

A l'heure actuelle, face à la crise environnementale, de nombreuses technologies « vertes », dites « high tech », émergent pour tenter de retarder la destruction de notre écosystème. Cependant, elles sont généralement réalisées à partir de ressources non renouvelables, rares et compliquées à recycler (Bongartz, 2019). Qu'allons-nous faire de ces batteries, de ces panneaux photovoltaïques ou de ces isolants ultra performants issus de la pétrochimie lorsqu'ils seront en fin de vie ? Ces technologies sont de plus en plus compliquées et rendent l'homme moins autonome et maître de ses outils. Ces questionnements camouflés par le « greenwashing » nous laissent dans une impasse (Bihouix, 2021).

Dans l'édition de mars 2021 de l'ouvrage « L'Age des low tech », Philippe Bihouix, ingénieur en quête de revenir vers une consommation plus raisonnable, se questionne lui aussi au sujet de ces technologies et développe le concept du « *low tech* ». L'idée est de faire du plus durable avec moins, comme il l'explique : « Il n'y a donc pas de produit ou de service plus écologique, économe en ressource, recyclable, que celui que l'on n'utilise pas » (2021, p. 96). L'auteur met en avant l'économie des ressources plutôt que le recyclage et privilégie les techniques douces, locales et moins complexes que de hautes technologies. L'idée du « *low tech* » rejoint également le concept de convivialité d'Ivan Illich, déjà développé précédemment dans ce travail. En effet, ces deux concepts qui tendent vers une économie circulaire, luttent contre l'obsolescence programmée et la dépendance à des systèmes spécialisés et complexes (Bihouix, 2021).

Contrairement à d'autres principes constructifs, la technique du bois cordé n'a jamais été normalisée en une pratique exemplaire et n'a jamais cessé de diverger (Hagman, 2012). C'est pour ces raisons que, selon nous, cette technique s'apparente à une alternative low tech. Chaque construction est unique et laisse la liberté aux adeptes d'expérimenter et de s'exprimer. Ce n'est pas parce qu'une technique est low tech qu'elle n'évolue pas (Bihouix, 2021 ; Bongartz, 2019). Chaque variante, transmise au fil du temps, est aussi largement influencée par le contexte économique, écologique, social et culturel des constructeurs. Un auto-constructeur d'aujourd'hui ne construira pas un mur en bois cordé de la même manière qu'un bâtisseur d'autrefois (Hagman, 2012). L'idée est de revenir à des techniques plus douces, dans une logique décroissante et conciliable avec les limites de notre terre sans revenir à l'Age de pierre (Bihouix, 2021).

Chapitre III - Enquêtes

3.1 Avant-propos

A travers l'état de l'art, nous avons tenté de mettre en tension une technique constructive ancestrale et située avec l'évolution des cadres normatifs qui réglementent le secteur aujourd'hui.

D'une part, le bois cordé est une technique très ancienne, sans origine attestée et qui n'est pas propre à une culture donnée mais qui est plutôt mobilisée de manière diverse suivant les régions et leurs ressources disponibles. Elle est influencée par le contexte économique, social et culturel de ses praticiens. Aujourd'hui cette méthode est fortement liée à des pratiques d'auto-construction et d'écoconstruction qui oscillent entre transmission de savoir-faire et expérimentation.

D'autre part, sans dénigrer ses atouts, les faiblesses techniques de cette mise en œuvre semblent manifestes au regard des seuils performanciels actuellement imposés par la législation en matière de Performance Énergétique des Bâtiment (PEB). Cependant, force est de constater que ces faiblesses sont identifiées de manière empirique sans réelle objectivation.

Ces constats ont guidé et précisé notre question de recherche : **Le procédé technique de bois cordé, dont il existe des applications récentes en région wallonne, est-il en mesure de répondre aux exigences normatives actuelles ?** Ils ont également influencé les choix méthodologiques qui vont suivre.

3.2 Méthodologie

Afin de répondre à notre question de recherche, nous avons choisi de mobiliser, dans un premier temps, une étude de cas en la situant sur le territoire de la région wallonne. L'objectif poursuivi était de pouvoir faire état, sur une région donnée, des pratiques contemporaines du bois cordé, d'en identifier les spécificités (variants et invariants) et d'en objectiver certains paramètres pour les confronter aux normes performanciennes d'aujourd'hui.

Pour constituer notre échantillon, l'architecte que nous avons interviewé, J-M. Delhay, qui mobilise cette technique depuis les années 90, nous a proposé quatre de ses projets et nous a mis en contact avec les propriétaires qui en sont également les constructeurs. Ces contacts nous ont permis de planifier des rencontres et des visites. Cet échantillon ne se veut

pas représentatif de tous les cas d'utilisation du bois cordé en région wallonne. Le mode de sélection est biaisé par le fait qu'il est constitué des projets d'un seul architecte, en particulier ceux qu'il a souhaité mettre en avant. Il offre tout de même le potentiel de suivre le travail d'apprentissage et d'ajustement d'un professionnel sur une période de 15 années de pratique.

Nous avons ensuite élaboré un protocole d'étude. Lors de la visite de ces projets, nous avons dressé une fiche descriptive pour chacune de ces constructions. Elles reprennent les informations générales des projets, quelques photos du chantier pour comprendre comment ils sont construits, des observations et constats, une coupe dans la paroi pour connaître sa composition, une élévation partielle de la même paroi pour déterminer son ratio de bois et de mortier et un calcul théorique des performances thermiques.

Pour effectuer ces recherches, nous avons dû estimer les compositions de paroi sur base de photos, d'une unique visite sur place et d'échanges avec les auto-constructeurs. Certaines données restent donc approximatives car il n'a pas été aisé de récolter toutes les informations nécessaires, l'un des projets ayant été réalisé avant les années 2000 et l'un des auto-constructeurs étant décédé. De plus, le ratio bois/mortier, les mélanges et les épaisseurs peuvent être variables dans une seule et même paroi. Il en est de même pour les valeurs λ récoltées : nous nous sommes basés sur les valeurs de conductivité thermique les plus hautes (donc les plus défavorables), ne sachant pas toujours les proportions exactes des mélanges réalisés par les auto-constructeurs.

Nous nous sommes principalement basés sur la publication « L'isolation thermique écologique » de Jean-Pierre Oliva et Samuel Courgey (2010) pour les valeurs λ des différents matériaux de mise en œuvre, ainsi que l'ouvrage « Construire avec le bois » de Matthieu Fuchs et Julien Mussier (2019) pour les caractéristiques physiques du bois. Au niveau des formules utilisées, nous avons repris les calculs du cours « Équipement thermique 1 » d'Adolf Skok (2019), et les calculs de parois réalisés dans la dissertation « Contribution à l'amélioration de la technique du bois cordé par la construction d'un bâtiment agricole » de Vincent Higuët (1996).

Tableau 1 - Formules utilisées pour estimer les performances thermiques de paroi des études de cas.		
Résistance thermique	Coefficient de transmission thermique	Coefficient de transmission thermique de la paroi
$R = \frac{\text{Epaisseur (en M)}}{\lambda}$	$U = \frac{1}{R_{int.} + \sum R + R_{ext.}}$	$U_{parois} = (\%bois \times U_{bois}) + (\%isol+mortier \times U_{isol+mortier})$

Tableau 2 - Valeurs retenues pour réaliser les calculs des performances thermiques des études de cas			
Matériaux	Masse volumique Kg/m ³	Conductivité thermique W/m.K	Source
Béton chaux/chanvre	1450	0,12	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Béton de fibre végétale (Ciment/sable/copeaux/chaux)	1500	0,6	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Liège en vrac	80	0,045	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Vermiculite	60	0,045	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Mélèze ⊥ aux fibres	600	0,15	Fush & Mussier, 2019, p.31
Mélèze // aux fibres	600	0,375 ⁵	Bohnke, 2013, p.34
Enduit chaux/chanvre	850	0,2	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Enduit à l'argile (<i>Argilus</i>) ⁶	1700	0,95	Fiche technique Argilus : Enduit de finition, p.1
Enduit terre/paille	1500	0,5	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Enduit sable/chaux/ciment	1900	1	Oliva & Courgey, 2010, p.242
Enduit sable/chaux	1800	0,8	Oliva & Courgey, 2010, p.242

Pour calculer la proportion de bois et de mortier dans une paroi, nous avons redressé et remis à l'échelle un cliché en élévation réalisé sur site lors de la visite (Illustration 12). Ensuite, nous l'avons redessiné sur le logiciel *Autocad* et effectué un remplissage pour déterminer l'aire de la surface en bois ou en mortier sur ¼ de m² (Illustration 13). Pour avoir un ratio au m², nous avons multiplié cette aire par 4. Dans l'exemple ci-dessous, nous obtenons une aire pour le mortier de 1682 cm² pour 2500 cm². En la multipliant par 4, nous obtenons son pourcentage pour 1 m², c'est-à-dire 6728 cm² pour 10 000 cm² qui correspond donc à 67% de mortier.



Illustration 12 : Élévation en bois cordé

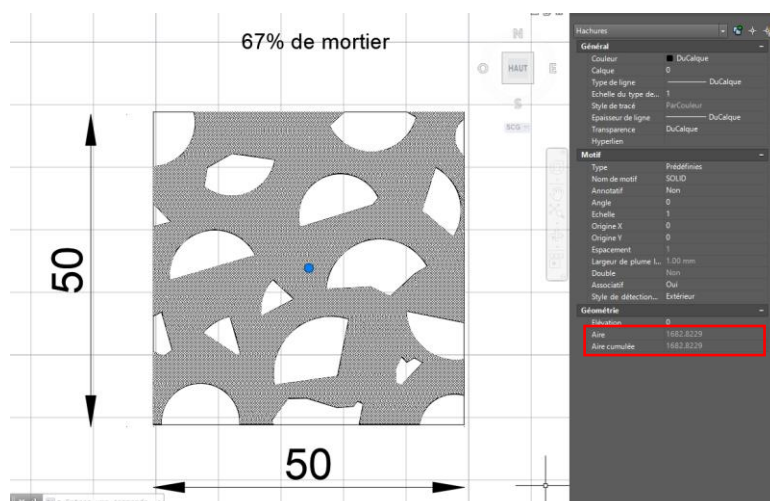


Illustration 13 : Élévation dessinée sur le logiciel "Autocad"

⁵ D'après l'étude expérimentale et théorique des traitements thermiques du bois réalisée par Isabelle Bohnke, la conductivité du bois dans le sens des fibres est 2 voire 2,5 fois plus élevée que dans le sens perpendiculaire à celles-ci. Elle se base elle-même sur l'ouvrage de Maku Tamaro de 1954 « Studies on the heat conduction in wood » de l'université de Kyoto. Nous avons donc multiplié le lambda du mélèze par 2,5 pour atteindre la valeur du tableau.

⁶ Enduit renseigné par un auto-constructeur.

3.3 Cas d'étude

3.3.1 Maison à Mohiville

3.3.1.1 Informations générales

Cette maison est l'une des premières réalisations en bois cordé de Monsieur Delhay. Elle date de 1997 et est réalisée à Mohiville dans la commune de Hamois. Le système constructif poteau-poutre de cette maison est composé de 4 portiques et les 2 pignons orientés Ouest et Est sont entièrement réalisés en bois cordé (Illustrations 14 à 17).



Illustration 14 : Fondations et soubassement



Illustration 15 : Mise en œuvre et pied de mur

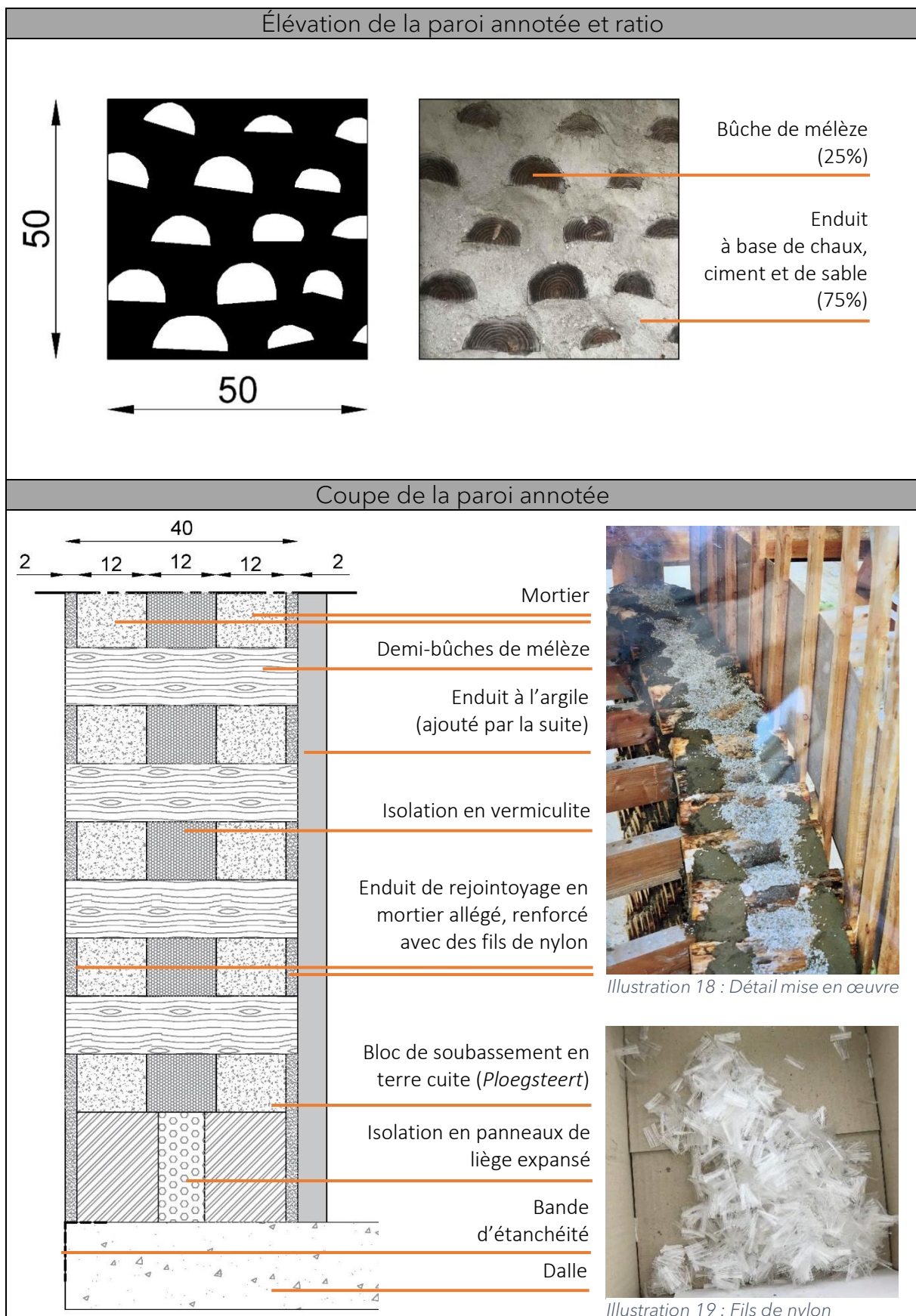


Illustration 16 : Mise en œuvre et raccord en toiture



Illustration 17 : Structure principale

3.3.1.2 Composition de paroi



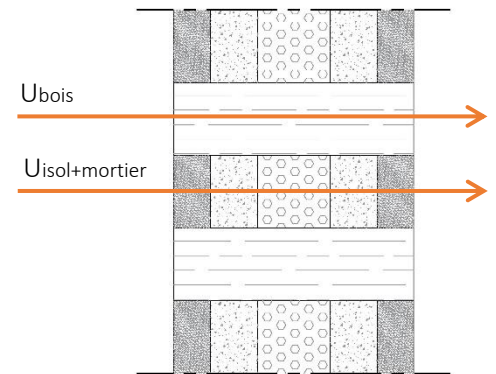
3.3.1.3 Calcul théorique du coefficient de transmission thermique de la paroi

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,4}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,04}{1} + \frac{0,24}{0,6} + \frac{0,12}{0,045} + \frac{1}{23}} = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,25 \times 0,81) + (0,75 \times 0,31) = 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

→ Sans prendre en compte les 5 cms d'argile ajoutés par la suite



3.3.1.4 Données récoltées

Dans ce projet, les murs en bois cordé sont réalisés avec un mortier composé de chaux, de ciment, de sable et de sciure avec une isolation en vermiculite. La façade la plus exposée, située à l'Ouest, est protégée par un large débord de toiture (Illustration 20). Dans ce projet, l'ingénieur a conseillé de placer toutes les bûches dans le même sens, ce qui donne une variante esthétique. Malgré un enduit de rejointoyage renforcé avec des fils de nylon, des fissures sont apparues dans les parois (Illustration 22). Le propriétaire a donc fait appel à l'entreprise EURECA pour réaliser un test blower-door. Ce test a confirmé les problèmes d'étanchéité à l'air dus aux brèches dans les parois en bois cordé. Ils ont donc ajouté un enduit à l'argile à l'intérieur pour réétanchéifier les murs et ajouter de l'inertie thermique à la construction.



Illustration 20 : Débordant de toiture



Illustration 21 : Façade principale en bois cordé



Illustration 22 : Fissures

3.3.2 Maison au Thier-à-Liège

3.3.2.1 Informations générales

Cet agrandissement géré partiellement en auto-construction par un bûcheron, décédé en 2017, est situé dans le quartier du Thier-à-Liège. Il a été réalisé en 2010 avec des murs en bois cordé comme élément de remplissage. La façade principale est orientée plein Ouest (Illustrations 23 à 26).



Illustration 23 : Structure principale avec couverture



Illustration 24 : Soubassement et structure principale

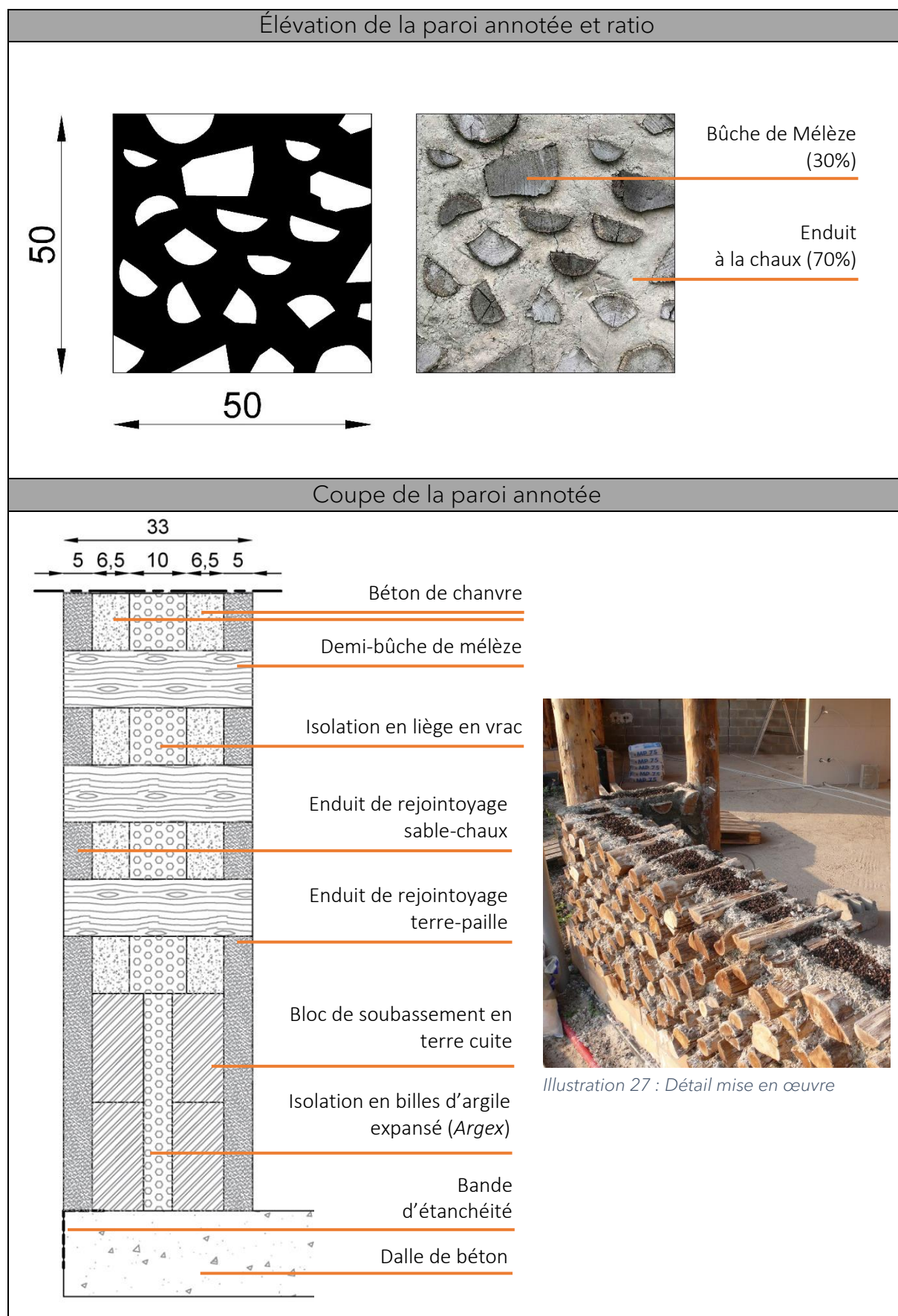


Illustration 25 : Mise en œuvre bois cordé et encadrement de baies



Illustration 26 : Mise en œuvre bois cordé, vue d'ensemble

3.3.2.2 Composition de paroi

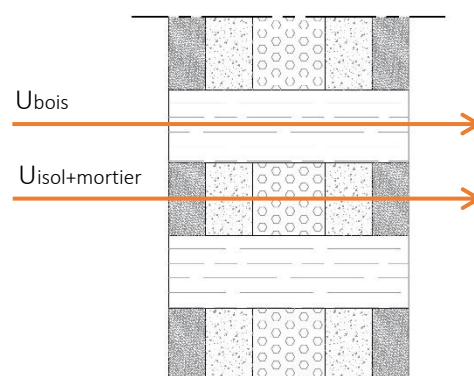


3.3.2.3 Calcul théorique du coefficient de transmission thermique de la paroi

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,33}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,13}{0,12} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{0,1}{0,045} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{1}{23}} = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,3 \times 0,95) + (0,7 \times 0,25) = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$$



3.3.2.4 Données récoltées

L'habitant a rapidement constaté d'importantes infiltrations d'eau et a fait poser, quelques années après la construction, un bardage extérieur avec un pare-pluie. (Illustration 29) La façade est exposée plein Ouest, face aux vents dominants et à la pluie battante. Malgré un soubassement assez haut, les débordants de toiture restent trop faibles et sont, par endroits, inexistantes. Beaucoup de brèches sont présentes dans les bûches de bois et l'enduit intérieur est fortement détérioré (Illustration 30). On remarque également dans ce projet que les murs en bois cordé sont plus étroits, réalisés avec du béton de chanvre et isolés avec du liège expansé. L'ajout de fils de nylon dans l'enduit de rejointoyage a été abandonné. L'emploi de ce matériaux issu de la pétrochimie n'était probablement pas en accord avec les valeurs écologiques véhiculées par la technique du bois cordé.



Illustration 28 : Façade avant la mise en place du bardage



Illustration 29 : Façade avec bardage



Illustration 30 : Traces d'infiltrations d'eau

3.3.3 Maison à Dave

3.3.3.1 Informations générales

Cette nouvelle construction familiale se situe à Dave, dans la commune de Namur. Son auto-construction a commencé en 2012 par le propriétaire et n'est pas encore terminée. Le principe structurel en portique est semblable à celui du projet situé à Mohiville et trois des murs extérieurs sont réalisés en bois cordé. Les deux façades principales sont orientées Est et Sud-Est (Illustrations 31 à 34).



Illustration 31 : Structure principale



Illustration 32 : Structure principale avec couverture

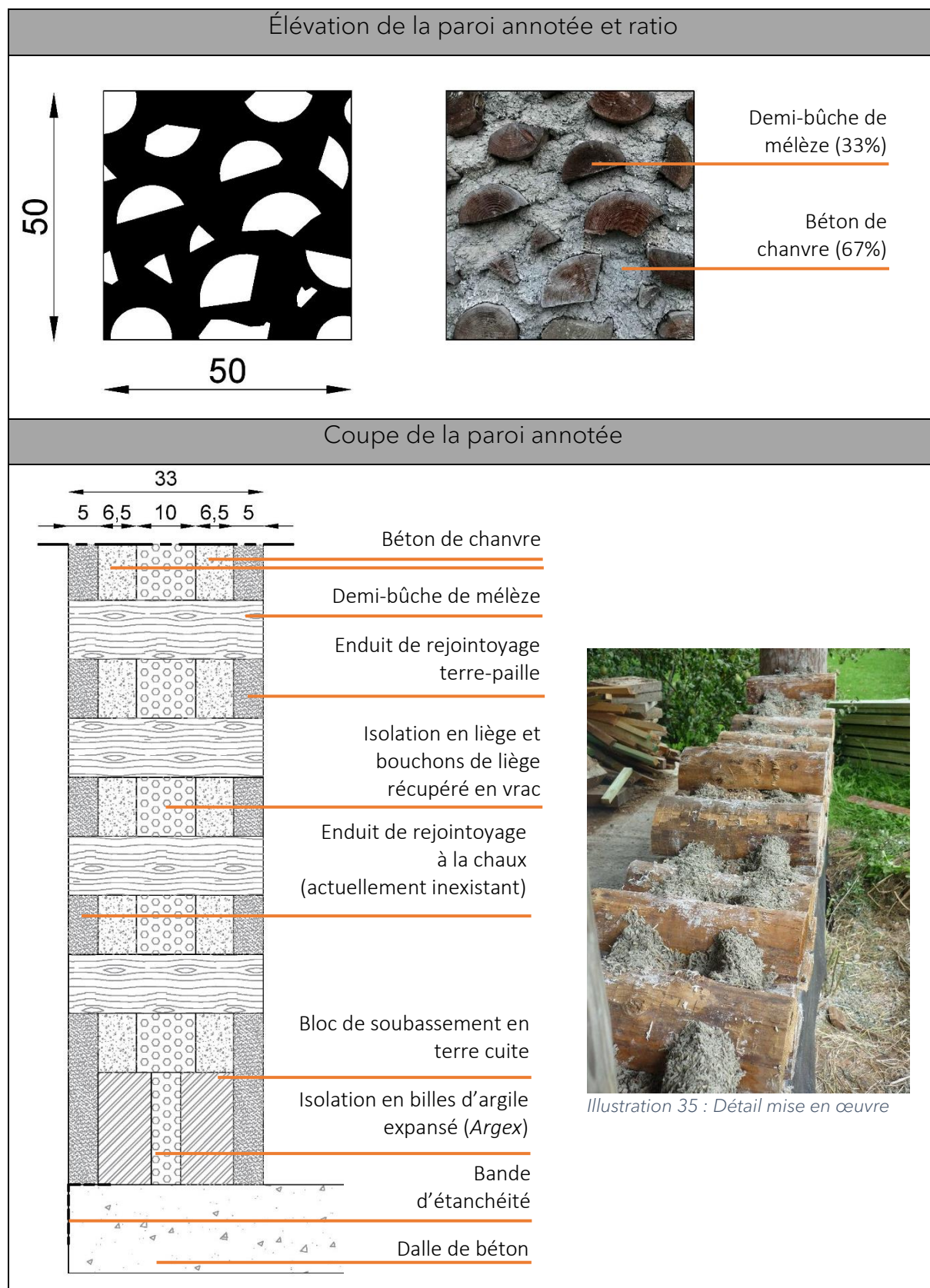


Illustration 33 : Mise en œuvre bois cordé



Illustration 34 : Raccord d'angle et encadrement de baies

3.3.3.2 Composition de paroi

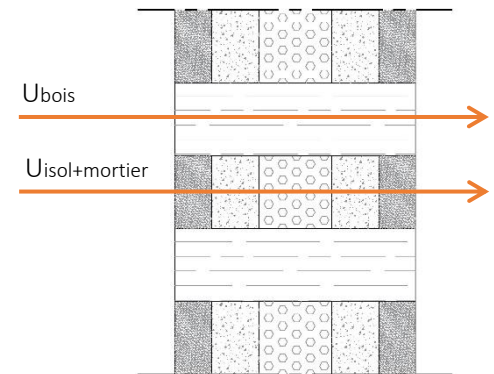


3.3.3.3 Calcul théorique du coefficient de transmission thermique de la paroi

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,33}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,13}{0,12} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{0,1}{0,045} + \frac{0,05}{0,5} + \frac{1}{23}} = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,33 \times 0,95) + (0,67 \times 0,26) = 0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$$



3.3.3.4 Données récoltées

D'après le propriétaire, les murs ont très peu d'inertie et sont très peu étanches à l'air. Lorsque le vent se lève, il ressent des courants d'air, ce qui crée également des problèmes acoustiques. Ces problèmes sont sûrement dus à l'absence de rejointoyage extérieur. Nous constatons la présence d'un grand débordant de toiture qui protège la plus grande façade en bois cordé (Illustration 36) et de légers retraits entre les bûches et les éléments de structure en bois (Illustration 37).



Illustration 36 : Façade principale en bois cordé et débordant de toiture

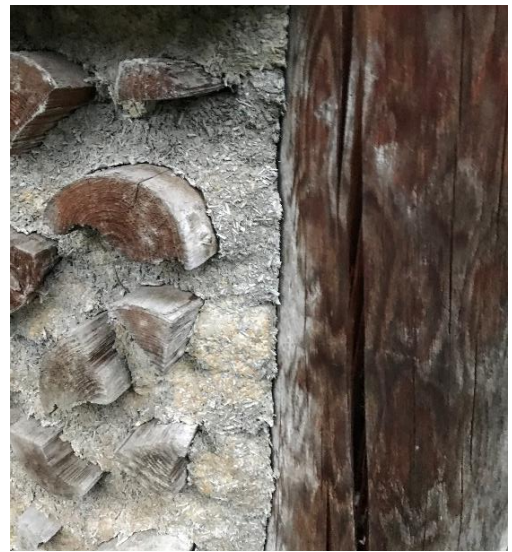


Illustration 37 : Retrait au niveau des bûches et des éléments de structure

3.3.4 Maison à Olne

3.3.4.1 Informations générales

Ce projet, réalisé partiellement en auto-construction par un couple de 2012 à 2020, se trouve sur les hauteurs de Olne. Il s'agit d'un agrandissement, en système poteau-poutre, d'une maison en pierre. Cette construction utilise deux principes de remplissage : la façade Nord est en ossature bois et isolée en paille alors que la façade Sud est réalisée en bois cordé. Le mélèze utilisé pour les murs en bois cordé a été récupéré du chantier précédent situé à Dave et c'est également cette matière première que nous avons utilisée pour confectionner notre prototype (Illustrations 38 à 41).



Illustration 38 : Soubassement et structure principale



Illustration 39 : Structure avec couverture et encadrement de baies

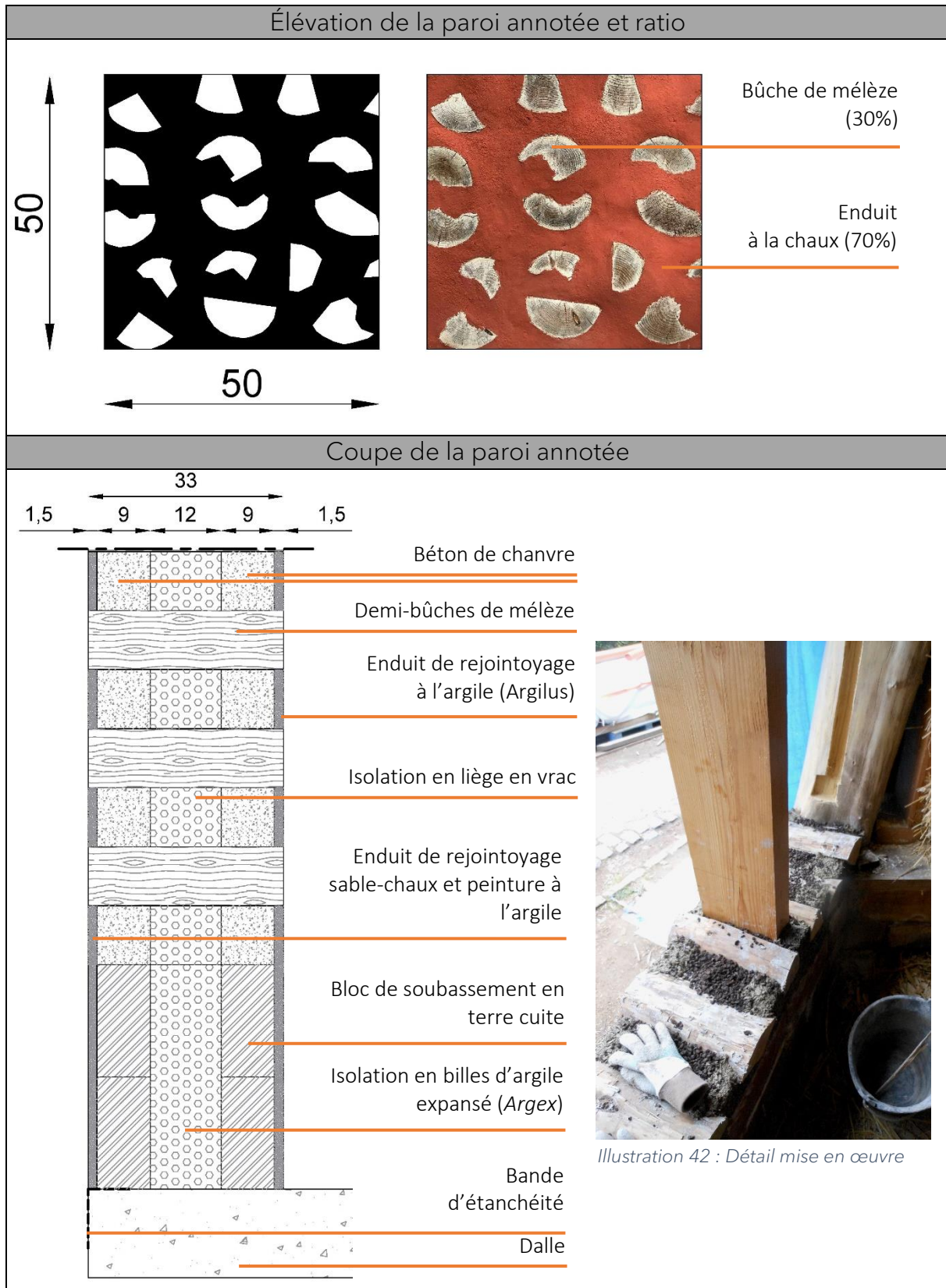


Illustration 40 : Mise en œuvre bois cordé, encadrement de baie et châssis



Illustration 41 : Raccord mur-toiture

3.3.4.2 Composition de paroi

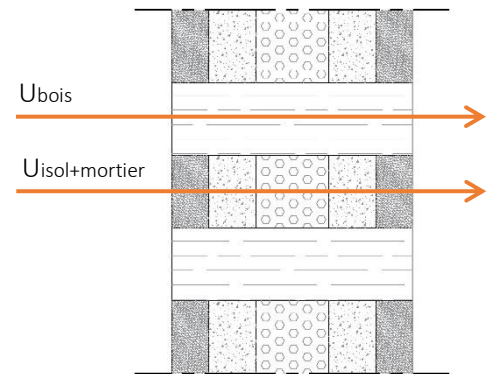


3.3.4.3 Calcul théorique du coefficient de transmission thermique de la paroi

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,33}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,18}{0,12} + \frac{0,015}{0,8} + \frac{0,015}{0,95} + \frac{0,12}{0,045} + \frac{1}{23}} = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,3 \times 0,95) + (0,7 \times 0,23) = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$



3.3.4.4 Données récoltées

La famille est très satisfaite de sa réalisation. Des débordants de toiture sont présents tout le long de la façade (Illustration 43). Les finitions des murs en bois cordé datent de 2020, il est donc peut-être un peu tôt pour déterminer la longévité dans le temps de la paroi mais nous remarquons tout de même que la mise à œuvre a été réalisée avec beaucoup de soin et d'attention. Au niveau de l'esthétique, les propriétaires ont remplacé certaines bûches par des bouteilles en verre et ont réalisé, par endroits, des dessins avec les bûches (Illustration 44). De plus, ils ont décidé de repeindre tout le rejointoyage avec une peinture à la chaux, ce qui rend ce projet organique encore plus atypique.



Illustration 43 : Façade principale en bois cordé et débordant de toiture



Illustration 44 : Mur en bois cordé côté intérieur

3.4 Analyse croisée

Tableau 3 – Analyse croisée des études de cas				
Situation	Mohiville, Hamois	Thier-à-Liège	Dave, Namur	Olne
Année de construction	1997	2010	2012	2012
Orientation de la façade	Ouest	Ouest	Est / Sud-Est	Sud
Épaisseur de paroi	40 cm	33 cm	33 cm	33 cm
Essence de bois	Mélèze	Mélèze	Mélèze	Mélèze
Pourcentage de bois	25%	30%	33%	30%
Mortier	Mortier à base de ciment, de chaux, de sable et de sciure	Béton de chanvre	Béton de chanvre	Béton de chanvre
Rejointoyage	Mortier allégé avec fils de nylon intérieurs et extérieurs	- Enduit sable/chaux en extérieur - Enduit terre-paille en intérieur	- Enduit extérieur inexistant - Enduit terre-paille en intérieur	- Enduit sable/chaux et peinture à l'argile en extérieur - Enduit à l'argile
Isolation	Vermiculite	Liège expansé en vrac	Liège et bouchons de liège en vrac	Liège expansé en vrac
Lambda de la paroi	0,44 W/m²K	0,46 W/m²K	0,49 W/m²K	0,45 W/m²K
État	Bon : quelques brèches et fissures à certains endroits	Mauvais : Brèches et fissures, gros retrait des bûches et infiltrations	Moyen : Brèches et fissures, retrait modéré des bûches et mauvaise étanchéité	Très bon : Peu de brèches et fissures apparentes, bonne étanchéité à l'air
Remarques	- Bûches toutes positionnées dans le même sens - Débordement de toiture conséquent - Rajout d'un enduit d'argile coté intérieur	- Pas de débordement de toiture - Infiltrations d'eau	- Débordement de toiture - Peu d'inertie et très perméable à l'air	- Soubassement conséquent - Débordement de toiture - Variante esthétique

Cette analyse de cas met en évidence 3 types de constat.

Tout d'abord, à la suite de ces observations sur le terrain, on remarque l'enjeu de l'orientation et de l'exposition des façades en bois cordé. Le projet situé au Thier-à-Liège en est un bon exemple. En effet, l'orientation Ouest, face aux pluies battantes, et l'absence de débordants de toiture aggrave la dégradation de la paroi au point de la rendre perméable à l'eau. Il en est de même pour le projet à Mohiville. La partie du mur en bois cordé la plus exposée, située à l'Ouest est également pourvue de fissures et de retruits importants entre le bois et le mortier. Cela confirme que les larges débordants de toiture et une bonne orientation permettent aux parois de rester à l'abri de l'humidité et sont des atouts à ne pas négliger lors de l'élaboration d'un projet. Notons également que de hauts soubassements procurent une sécurité supplémentaire contre l'humidité ascensionnelle. Nous constatons

également la diversité esthétique qu'offre cette technique avec l'utilisation d'autre matériaux, comme des bouteilles en verre, et les variations de la disposition des bûches.

Ensuite, la démarche d'objectivation par calcul met en évidence les observations suivantes. Nous remarquons, d'une part, que l'utilisation du béton de chanvre permet de réaliser des parois plus étroites en conservant la même valeur U, et d'autre part, que la résistance thermique du bois est nettement supérieure à celle du mortier et de l'isolant. Cela nous démontre que le bois crée des ponts thermiques et est un point faible dans ce type de paroi. Nous comprenons ainsi pourquoi le taux de mortier est, dans tous les cas, supérieurs au taux de bois.

Enfin, suivant les témoignages des acteurs rencontrés, nous constatons que les habitants qui se plaignent d'une mauvaise isolation acoustique, de courants d'air ou d'infiltrations d'eau sont des auto-constructeurs qui ont des parois peu protégées et mal orientées ou un rejointoyage inexistant. Nous remarquons donc que l'enduit influence l'étanchéité de la paroi et surtout lorsque celle-ci est réalisée en béton de chanvre, qui est complètement perméable à l'air selon Jean-Baptiste De Mahieu, manager de l'entreprise IsoHemp⁷. La réalisation d'un rejointoyage n'est donc pas à négliger et contribue à l'amélioration de l'étanchéité de la paroi. De plus, selon l'architecte de ces projets, la réalisation de cet enduit doit se faire avec soin, lorsque la paroi est bien sèche et en plusieurs couches pour que celle-ci soit la plus performante et durable possible. Nous remarquons également que l'ajout de fils de nylon empêche moins la formation de brèches qu'il n'augmente l'énergie grise de la paroi.

Ces différents constats et réflexions ouvrent de nouvelles questions : **Comment faire face aux ponts thermiques venant du bois ? Comment atteindre une valeur U inférieure au seuil réglementaire tout en améliorant l'étanchéité à l'air sans perdre les qualités esthétiques, environnementales et conviviales de cette technique constructive ?** Afin de tenter de trouver réponse à ces questions, une variante de composition a été mise au point et testée par la mise en œuvre d'un prototype à l'échelle 1/1.

⁷ Échanges par email avec Jean-Baptiste De Mahieu le 17 janvier 2022

Chapitre IV – Expérimentation

4.1 Le prototypage comme méthode de recherche

Comme le dit Berthier (2018), dans son étude sur les modes constructifs en bois dans l'architecture de l'agence Parisienne Lipsky+Rollet, « la crise environnementale contemporaine appelle aussi à l'innovation pour repenser nos manières d'agir au sein d'écosystèmes fragilisés dont nous dépendons, sans que la motivation initiale soit à but lucratif ». Il insiste également sur le fait que le développement expérimental est générateur de connaissances et d'innovation (Fleury, 2018). En architecture, le prototypage est l'étape préliminaire des réflexions sur l'amélioration d'un système. L'expérimentation dans le métier d'architecte est un progrès nécessaire et le projet d'architecture doit être un outil qui participe à l'évolution des techniques de construction (Berthier, 2018). Développer et concevoir est insuffisant, il est important de mettre en pratique et de tester ce qui est questionné en gardant une vision globale sur le sujet et en prenant bien en compte que le processus tout autant que les résultats sont moteurs d'innovation (Fleury, 2018). Il est fondamental de passer par cette étape d'appropriation de la technique pour proposer une réponse créative et cohérente par rapport à son contexte, son usage et ses caractéristiques propres (Berthier 2018 ; Fleury, 2018). Mobiliser une approche par expérimentation pour tenter de faire évoluer cette technique face aux exigences actuelles, situe notre travail dans la suite logique des démarches entreprises par des générations successives d'architectes et d'auto-constructeurs. La seule différence est que, dans le cas présent, elle n'est pas insérée dans un chantier réel mais appliquée et observée en laboratoire.

L'idée, dans le cadre de ce travail, est d'établir dans un premier temps les causes les plus vraisemblables des faiblesses de la technique du bois cordé, via la littérature, les études de cas et la pratique, pour ensuite formuler des hypothèses et les vérifier par des tests.

D'une part, nous cherchons à comprendre s'il est possible d'atteindre les performances thermiques exigées par la PEB. Pour ce faire, nous avons imaginé une composition et une mise en œuvre alternative dont la valeur U , obtenue par calcul, est inférieure au U_{max} demandé par la réglementation.

D'autre part, nous cherchons à mettre en évidence le temps, les coûts et les besoins que demande cette technique ainsi que sa faisabilité constructive et sa dimension auto-constructible. Nous l'avons expérimenté en construisant le prototype.

Enfin, nous souhaitons vérifier si cette mise en œuvre peut atteindre une meilleure étanchéité à l'air. Nous avons alors réalisé une série de tests sur le prototype pour objectiver cette question.

4.2 Processus d'expérimentation

Le processus s'est déroulé en 3 phases principales. Nous avons d'abord réalisé les études de cas (entretien avec l'architecte, rencontres avec les interlocuteurs et visites des projets) qui nous ont permis d'affiner nos questions de recherche. Nous avons ensuite préparé et mis en œuvre notre expérimentation (conception du caisson et prototype, construction et assemblage). Nous avons enfin procédé à différentes phases de tests. L'expérimentation s'est déroulée entre les mois de janvier et juillet 2022. Cette fourchette de temps a permis d'étaler les phases de mise en œuvre et celles des tests en tenant compte, tant que faire se peut, des temps de séchage nécessaires.

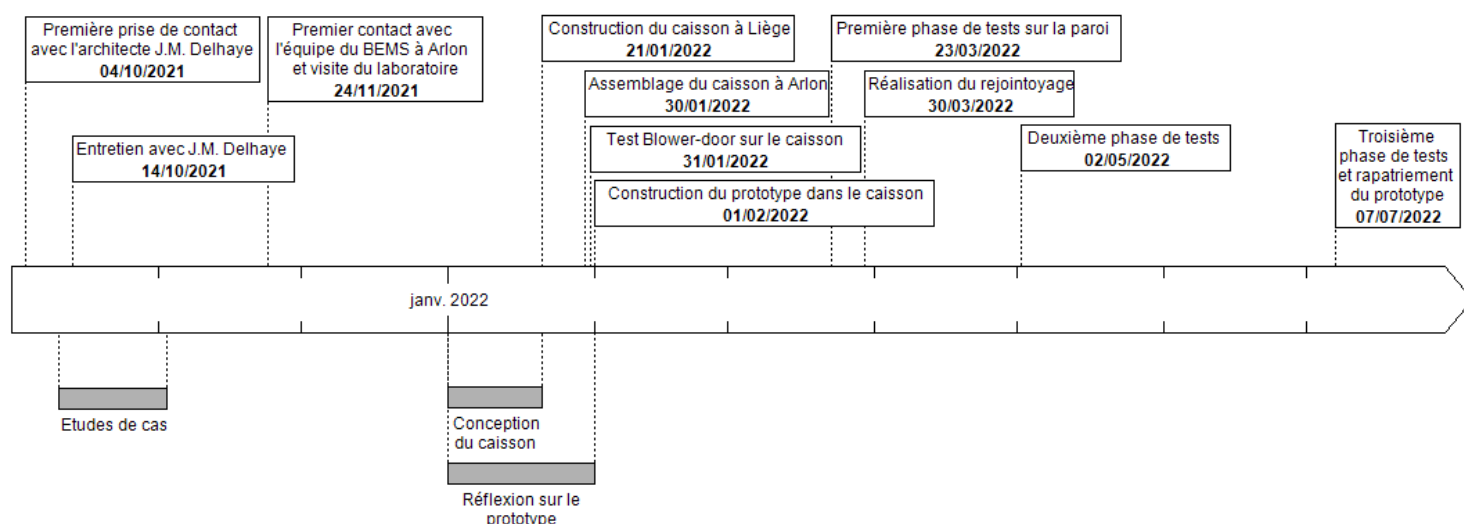


Illustration 45 : Chronologie du travail

4.2.1 Équipe et lieu d'expérimentation

Pour réaliser cette recherche appliquée et élaborer un prototype dans les meilleures conditions, nous avons reçu le soutien du professeur Philippe André et de l'équipe du BEMS (Building Energy Monitoring and Simulation) de l'Université de Liège située sur le campus d'Arlon. Ils ont mis à notre disposition l'annexe de leur bâtiment laboratoire Jacques Geelen afin de permettre le monitoring du prototype et ainsi faciliter la mise en place de différents tests. Par cet intermédiaire, nous avons également bénéficié de l'aide de deux chercheurs, Jonas Lambert et Stéphane Monfils, et d'un technicien, Laurent Collard, qui nous ont assisté, suivi et conseillé lors de cette phase de recherche appliquée.

4.2.2 Conception et construction d'un caisson étanche et réemployable

L'idée était de réaliser directement le prototype dans un caisson en bois étanche, solide et contreventé afin de pouvoir ramener le prototype à Liège une fois l'expérimentation menée et les phases de tests terminées. Pour être efficace, ce caisson devait répondre à plusieurs critères. Tout d'abord, il devait être démontable, pour qu'il soit déplaçable facilement et réutilisable pour d'autres tests. Ensuite, par soucis d'économie, il devait être réalisé suivant les ressources de réemploi mises à notre disposition par mon promoteur : des SLS 140x38 mm pour la structure et des panneaux multiplex 18 mm pour les faces. Sa taille devait correspondre aux dimensions d'une « porte soufflante » et être suffisamment grande pour pouvoir en tirer des informations et mettre en œuvre la technique aisément. Enfin, il devait être faiblement déformable afin de limiter la dégradation du prototype lors du transport.

Après avoir imaginé différentes propositions (Illustration 46), nous avons préfabriqué les quatre cadres de la boîte à Liège en prévoyant des renforts aux angles. Nous avons ensuite transporté ces cadres à Arlon et nous les avons assemblés sur place (Illustration 47). Afin de garantir l'étanchéité du caisson, une réétanchéification de chaque jonction intérieure et de chaque perforation de vis a été réalisée à l'aide de bande d'étanchéité adhésive.

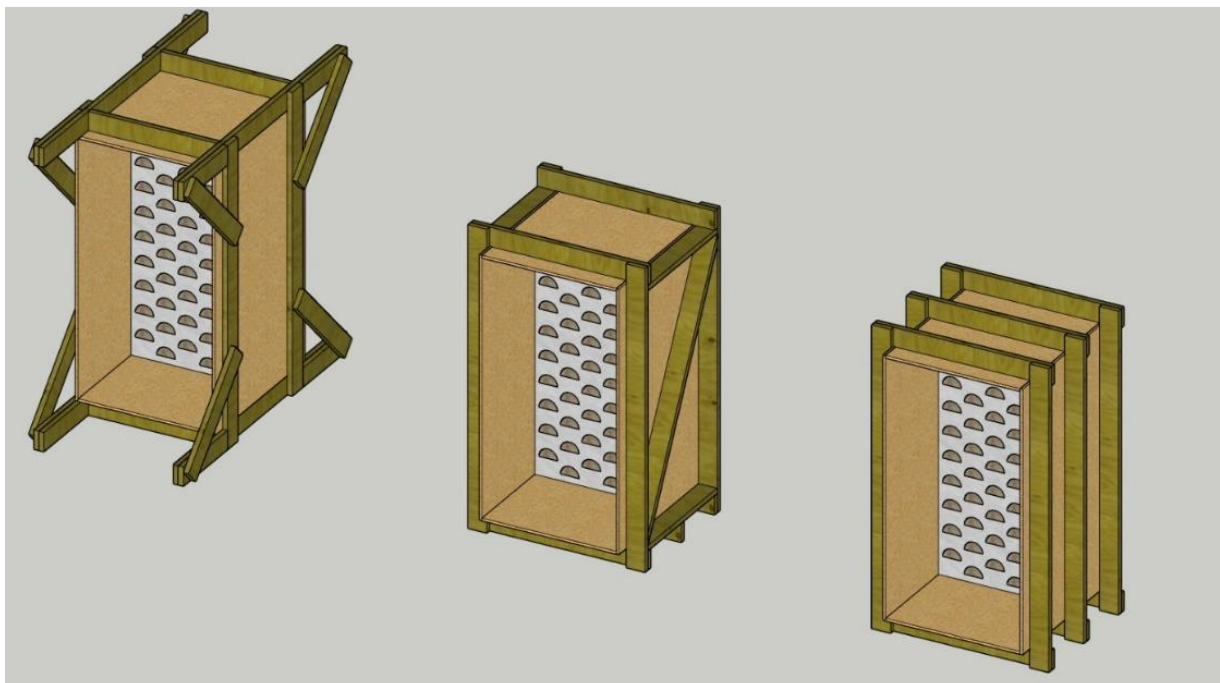


Illustration 46 : Modélisation 3D sur le logiciel "Sketchup" des propositions de caissons

Les dimensions intérieures du caisson sont de 216 cm de haut sur 86 cm de large. Il devait initialement faire 190 cm de haut sur 100 cm de large afin de respecter les dimensions imposées par la porte soufflante et pour passer aisément la porte sectionnelle de 2 m de haut du laboratoire d'Arlon. Les plus long SLS de réemplois mis à notre disposition étaient une dizaine de centimètres plus longs que la longueur des montants prévus initialement. Ne voulant pas gâcher de matière, lors de la préfabrication du cadre, nous avons fait le choix de ne pas recouper les montants et d'avoir un caisson légèrement plus haut. Ayant amené le caisson démonté dans le laboratoire, ce n'est que lorsque le prototype a été maçonné, que les phases de tests ont été terminées et qu'il a fallu le rapatrier, que nous nous sommes rendu compte qu'il ne passait plus la porte du laboratoire. Nous avons donc dû, avec les moyens du bord, incliner le prototype dont le poids est estimé à environ 700 kilogrammes, pour le faire passer horizontalement dans la porte sectionnelle.



Illustration 47 : Caisson définitif assemblé dans l'annexe du laboratoire BEMS à Arlon

En réalisant une simulation des deux propositions sur le logiciel « Therm », nous observons de meilleurs résultats avec la seconde proposition, une valeur U plus basse et un flux thermique plus constant.

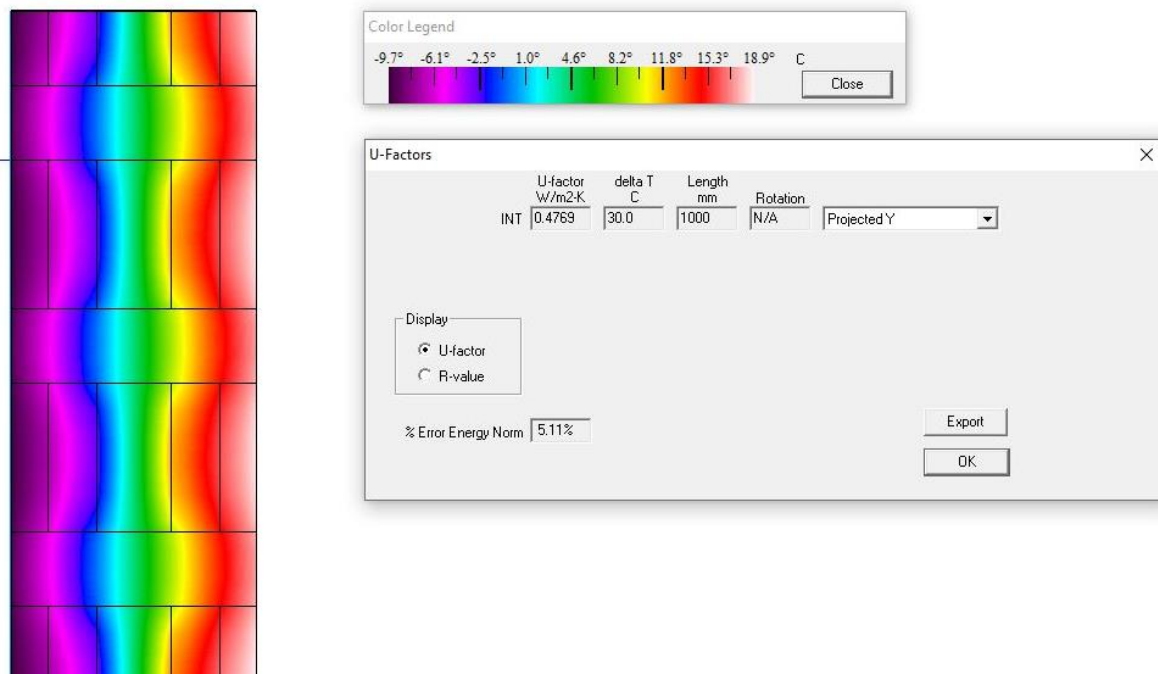


Illustration 48 : Simulation sur le logiciel "Therm" d'une paroi similaire aux études de cas.

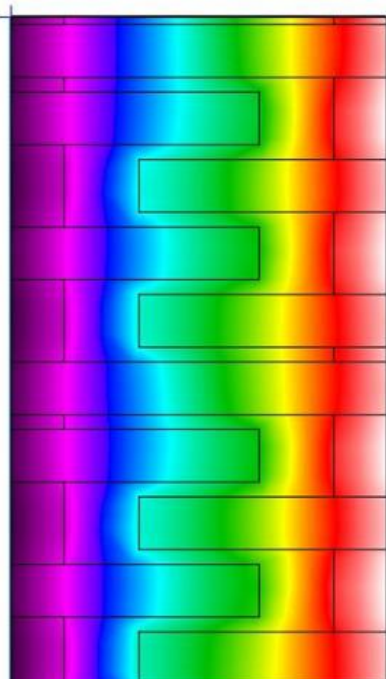


Illustration 49 : Simulation sur le logiciel "Therm" de la première proposition de mise en œuvre.

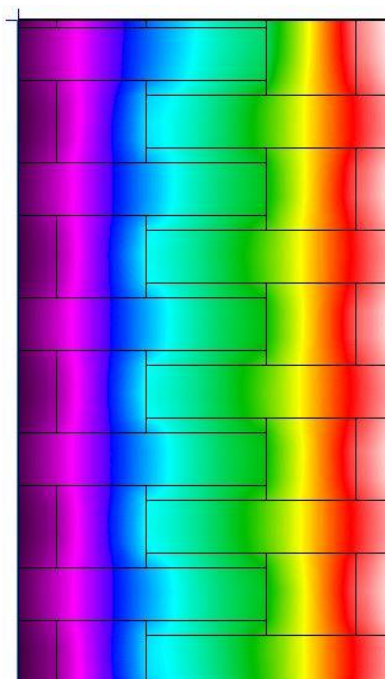


Illustration 50 : Simulation sur le logiciel "Therm" de la seconde proposition de mise en œuvre.

Pour calculer les pourcentages de bois et de mortier et pouvoir ajuster nos valeurs facilement pour qu'elles correspondent aux performances théoriques exigées, nous avons mis en place un outil Excel avec deux méthodes de calculs. La première consiste à calculer le coefficient de transmission thermique, la valeur U, par matériau et suivant deux flux traversants : un passant à travers le bois et un autre dans les autres couches de la paroi. Nous pouvons ainsi encoder un pourcentage de bois et voir s'il est trop élevé ou non en fonction de la valeur U souhaitée. La seconde, consiste à décomposer la paroi en couches des différents matériaux et à encoder le pourcentage de bois dans chacune d'entre elles pour voir, comme précédemment, si le pourcentage encodé correspond à la valeur U exigée. Par la suite, nous avons adapté ce tableur pour calculer les proportions et la quantité de chaque matériau.

Tableur Excel n°1.

Pour les matériaux, nous avons fait en sorte d'utiliser des matériaux locaux, peu coûteux, faciles à mettre en œuvre et pauvres en énergie grise.

Pour le bois, nous avons utilisé des bûches de mélèze, qui étaient un surplus du chantier de la maison en bois cordé à Olne. Ayant en notre possession du bois de chauffage d'essences variées et impropres pour notre expérimentation, nous avons pu faire un échange avec le propriétaire. En plus d'être une essence durable, dense et locale, ce bois était déjà conditionné et bien sec, ce qui nous a permis de réaliser un gain de temps considérable.

Pour l'isolation, nous avons fait le choix d'utiliser de la sciure de bois. Cet isolant en vrac permet de combler tous les interstices, a un bon λ de 0,045W/m²K et constitue généralement un « déchet » dans les entreprises (Oliva & Courgey, 2010). Nous avons donc pu nous en procurer gratuitement dans une menuiserie et la revaloriser.

Pour le mortier, en suivant les conseils de l'architecte J-M Delhayé du groupe ARTerre et de Nicolas Félix de l'entreprise « La patte du mammouth », nous avons décidé d'utiliser du béton de chanvre. Sa mise en œuvre et son mélange sont simples, il est bien adapté au climat de notre région et l'utilisation d'un béton allégé permet de rendre la paroi plus isolante et d'atteindre plus facilement le coefficient de transmission thermique exigé par la PEB de 0,24W/m²K (SPW, 2017). Pour nous procurer ces composants, nous avons pris contact avec l'entreprise IsoHemp située à Fernelmont, entre Huy et Namur. Cette entreprise est spécialisée dans le béton de chanvre et produit un mélange de chaux hydraulique et de chaux aérienne (Prokalk) prêt à l'emploi ainsi que de la chènevotte de provenance locale. Ils nous ont encouragé dans notre démarche et nous ont offert les quantités nécessaires en matériaux pour réaliser notre expérimentation.

Pour le rejointoyage, nous avons utilisé un enduit composé de sable et de chaux car il s'adapte relativement bien aux variations dimensionnelles, est facile à manipuler et a une résistance qui augmente au fur et à mesure de la carbonatation de la chaux. (Koenig, 2008).

4.2.3.4 Préparation des bûches

Bien que les bûches étaient déjà débitées en longueur, fendues en deux et écorcées, une étape de tri, d'assainissement et de séchage superficiel n'était pas à négliger. Nous les avons donc brossées, poncées et séchées avant leur mise en œuvre (Illustration 51).



Illustration 51 : Tri et assainissement des bûches

4.2.3.5 Proportion et mélange

Pour le béton de chanvre, dans un premier temps, nous avons utilisé les proportions recommandées par le guide de mise en œuvre fourni par la firme IsoHemp, c'est-à-dire 40 kilogrammes de chaux Prokalk pour 200 litres de chènevotte et 50 litres d'eau. N'ayant que 120 minutes avant la prise du béton et réalisant les mélanges à la main, nous avons divisé ces proportions par 4 pour réaliser le béton de chanvre en plus petite quantité et pour garder un béton frais. Pour cette mise en œuvre, nous avons constaté que le mélange était trop sec pour former des boudins et qu'il avait tendance à s'effriter. Nous avons donc légèrement ajusté ces proportions en ajoutant un peu plus d'eau. Nous avons réalisé les proportions suivantes : 10 kilogrammes de chaux Prokalk pour 50 litres de chènevotte et 17,5 litres d'eau. Pour réaliser le mélange, dans environ 80% de l'eau nécessaire, nous avons ajouté petit à petit la chaux Prokalk jusqu'à l'obtention d'une laitance. Nous avons ensuite incorporé le chanvre (Illustration 52) et nous nous sommes servis des 20% d'eau restant pour ajuster le mélange.



Illustration 52 : Préparation du béton de chanvre



Illustration 53 : Préparation de l'enduit à la chaux

Pour le rejointoyage en enduit à la chaux, nous avons utilisé les proportions conseillées par Nicolas Félix et celles recommandées par l'entreprise Lafarge, fournisseur de la chaux utilisée pour ce mélange, c'est-à-dire 2,5 parts de sable de Rhin pour 1 part de chaux hydraulique NHL 3.5 (Nathural). L'eau se dose à l'œil et la consistance du mélange doit être crémeuse (Illustration 53) Pour ajuster la consistance s'il y a trop d'eau, il est préférable de réaliser le mélange à sec et de l'ajouter à l'eau dans un autre récipient.

4.2.3.6 Étapes de mise en œuvre

Pour le montage de la paroi, nous avons commencé par étendre 3 boudins de mortier (deux extrémités et une âme centrale), 2 cm en retrait de part et d'autre de la paroi pour le rejointoyage, avec de l'isolant en vrac entre les boudins (Illustration 54). Nous avons ensuite placé les bûches (Illustration 55) et nous avons répété ces opérations en comblant les vides entre les bûches et en ajoutant l'isolant en vrac au fur et à mesure (Illustration 56). Nous avons vérifié régulièrement les aplombs à l'aide d'une grande latte métallique du côté extérieur et d'une ficelle du côté intérieur. Lorsque nous étions trois, nous effectuions le travail à la chaîne. Lorsque le mélange était prêt, une personne s'occupait de faire les boudins de mortier, une autre sélectionnait les bûches et les mettait en place, et la dernière versait l'isolant en vrac.



Illustration 54 : M-O départ



Illustration 55 : M-O premières bûches



Illustration 56 : M-O suite

Pour effectuer ce rejointoyage nous avons procédé par projection de matière (Illustration 57), nous avons ensuite lissé l'enduit à la spatule et à la langue de chat et passé un léger coup de brosse avant la prise pour atténuer les marques de spatule (Illustration 58). Nous avons réalisé deux variantes esthétiques : du côté intérieur, nous avons mis l'enduit à fleur des faces des bûches et, du côté extérieur, nous avons fait le choix de mettre moins de matière sur le bas des faces des bûches afin de donner un effet d'ombrage.



Illustration 57 : Rejointoyage



Illustration 58 : Finitions

4.2.3.7 Séchage

Suivant la documentation technique de chez Isohemp (2021), il faut compter une semaine de séchage par centimètre de béton de chanvre. Dans le cas de cette expérimentation, avec en moyenne 5 centimètres de béton aux extrémités, il fallait attendre minimum 5 semaines avant la réalisation du rejointoyage. Durant ces semaines de séchage, un technicien a réalisé des pré-tests sur la paroi et a oublié de retirer une plaque PVC qui colmatait l'autre côté du caisson. Le prototype n'était donc pas suffisamment ventilé et des champignons sont apparus sur la paroi (Illustration 59). Nous avons donc dû reporter le rejointoyage d'une semaine en mettant en place des ventilateurs et un déshumidificateur pour qu'un maximum d'humidité migre hors de la paroi avant le rejointoyage.



Illustration 59 : Apparition de champignons sur la paroi

4.2.4 Procédure de test d'étanchéité à l'air

Tout au long de cette expérimentation, trois phases de tests ont été réalisées. Pour les réaliser nous avons eu à disposition une porte soufflante « RETROTEC 5000 » (Illustration 60). Après avoir réalisé des tests à blanc sur le caisson, nous nous sommes rendus compte que le système ne parvenait pas à mettre le caisson sous une pression suffisante et à se stabiliser pour obtenir des résultats fiables. En effet, après un échange avec Christophe Delmotte du CSTC, nous avons réalisé que le ventilateur que nous avions à disposition n'était pas conçu pour réaliser des tests sur un si petit volume. Il nous a donc proposé de réaliser ces tests, soit avec un système pourvu d'un plus petit ventilateur, comme utilisé pour les conduits de ventilation et qui peut mettre sous pression de plus petits volumes, soit de mettre le volume sous pression avec de l'air comprimé et un débitmètre.



Illustration 60 : Blower-door test

Avec l'équipe du BEMS et le matériel dont ils disposaient, nous avons fait le choix de mettre le volume sous pression avec de l'air comprimé et un débitmètre à flotteur (Illustration 61). Pour la valeur du débit de fuite (V_{50}), le technicien a installé un transmetteur de pression relié à un « data logger » (Illustration 62) pour visualiser et, si nécessaire, enregistrer les données. Avec cet équipement de prise de mesure, selon le technicien, nous avons une marge d'erreur de l'ordre de 10%. Contrairement à un « Blowerdoor test » qui met sous pression puis sous dépression le volume pour faire une moyenne des deux résultats, cette procédure met uniquement le volume sous pression.



Transmetteur de pression

Entrée d'air comprimé

Débitmètre à flotteur

Illustration 61 : Équipement de prise de mesure définitif



Data logger

Illustration 62 : Équipement de prise de mesure, data logger

Pour obtenir le débit de fuite de la paroi seule, nous réalisons en premier lieu un test à blanc sur le caisson, sans prendre en compte le prototype, pour déterminer le débit de fuite du caisson et pouvoir le déduire ensuite. Pour ce faire, nous plaçons une bâche en plastique polyéthylène sur le côté intérieur de la paroi construite dans le caisson. La valeur du test à blanc est ensuite retirée aux valeurs « brutes » obtenues lors des tests suivants qui prennent en compte la paroi. Par ce biais, nous arrivons à isoler les valeurs **V₅₀**, exprimées en m²/h, afin d'obtenir, en divisant cette valeur isolée par le nombre de m² de la paroi, des valeurs **v₅₀** ou **q₅₀**, exprimées en m³/h.m² et pouvoir les comparer à d'autres données.

$$q_{50} \text{ de la paroi} = \frac{V_{50 \text{ test X}} - V_{50 \text{ test à blanc}}}{m^2 \text{ de paroi}}$$

Ayant très peu de documentation avec des résultats de tests d'étanchéité à l'air sur d'autres mises en œuvre, nous souhaitons au départ, réaliser d'autres tests sur d'autres techniques de construction avec la même procédure. Par manque de temps et de moyens, nous n'avons pas pu les réaliser. Mais pour tout de même avoir un point de comparaison, nous avons utilisé une valeur **q₅₀** reprise dans le travail réalisé par M. Prignon, S. Altomonte, F. Ossio, A. Dawans et G. Van Moeseke (2021) intitulé « On the applicability of meta-analysis to evaluate air tightness performance of building components » qui réalisent, avec de faibles débits de pression, des tests sur des composantes du bâtiment et notamment sur des fragments de paroi.

4.3 Résultats de l'expérimentation

4.3.1 Performance thermique

Comme observé dans l'analyse de cas, le ratio bois/mortier influence largement les performances thermiques de la paroi. En effet, étant donné que le bois est l'un des points faibles dans cette technique, plus son pourcentage est élevé, moins la paroi sera performante. Nous avons fait une estimation au préalable pour déterminer les quantités de matière utile pour façonner le mur, mais le ratio est difficilement gérable durant la mise en œuvre. Celui-ci varie en fonction des tailles de bûche, de leur forme et de leur position. Après la construction de la paroi, nous nous sommes rendu compte qu'il nous restait énormément de bois. Nous avons donc déterminé le taux de bois et de mortier après la mise en œuvre, de la même façon que dans les études de cas, c'est-à-dire en prenant un cliché parallèle à la paroi et en la redessinant sur le logiciel Autocad. Nous l'encodons ensuite dans l'outil Excel (voir tableur Excel n°1, p.47) pour obtenir la valeur U. Nous obtenons au final, une proportion

de 30% pour le bois et de 70% pour le mortier, ce qui nous donne une valeur U théorique de $0,17\text{W/m}^2\text{K}$.

4.3.2 Temps de travail et coût

Il nous a semblé utile de récolter des données économiques durant la mise en œuvre du prototypage afin de nourrir l'enjeu socio-économique de la recherche. Pour ce faire, nous avons calculé et évalué le coût d'achat des matériaux ainsi que le temps de mise en œuvre.

La mise en œuvre de la maçonnerie en bois cordé a duré une journée (4h30 à trois personnes et 5h seul). Cela équivaut à 18h30 de travail pour une personne seule pour réaliser $1,85\text{ m}^2$ de mur en bois cordé et donc 10h de travail par personne par m^2 . Lorsque nous étions bien rodés, à trois personnes, nous maçonniions environs 3 niveaux de bûches en 30 minutes.

Pour réaliser le rejointoyage, nous avons travaillé 4h à deux pour réaliser les deux faces de la paroi, soit $3,7\text{ m}^2$. Il faudrait environ 2h de travail seul pour réaliser 1 m^2 de rejointoyage sur une face.

Nous arrivons donc à un total de 26h30 de travail pour une personne seule pour $1,85\text{ m}^2$ de paroi avec le rejointoyage des deux côtés compris, soit environ 14h30 par m^2 par personne. Cela représente 1 m^2 de paroi par jour à deux, ce qui est peu par rapport à la construction complète d'une paroi traditionnelle. Cependant, la vitesse de travail d'un auto-constructeurs ne peut pas être comparée à celle d'un professionnel et est donc à relativiser. Cette technique a pour avantage de ne pas nécessiter l'intervention d'un corps de métier formé et reste donc accessible à tous, ce qui la rend conviviale, selon le concept d'Illich (1973). Une personne non professionnelle peut réaliser cette mise en œuvre à son rythme, avec tout de même une limite de temps à respecter pour garantir une qualité de résultat.

Au niveau du coût des matériaux, en prenant en compte le complexe de paroi au complet et en reprenant les remises de prix de chez « Ecobati », « IsoHemp » et le prix d'un stère de bois de chauffage, nous arrivons à un total de 82€ par m^2 , hors TVA et main d'œuvre. Ce prix reste une estimation et peut varier selon le type d'isolant utilisé et l'essence de bois. Au m^2 et suivant la variante expérimentée dans ce travail, le coût des matériaux pour un mur en bois cordé revient moins cher qu'une paroi traditionnelle en bloc béton.

Tableau 4 – Comparatif du coût matière hors TVA par m ² entre une structure en bois cordé et une structure traditionnelle			
Bois cordé ⁸		Structure traditionnelle ⁹	
Matériaux	Prix hors TVA par m ²	Matériaux	Prix hors TVA par m ²
Mélèze (GG bois transport)	21,2 €	Bloc béton porteur 14x39x19cm	13,5€
Sciure de récupération	0 €	Mortier préparer	13,2€
Chanvre (Isohemp)	15,8€	Isolation PU	21,5€
Prokalk (Isohemp)	31,5 €	Brique de parement et rejointoyage	50€
Chaux NHL 3.5 (Ecobati)	7€	Enduit plâtre	2,7€
Sable de Rhin (Ecobati)	6,4€		
Total	81,9€ HTVA/m ²	Total	100,9€ HTVA/m ²

Si cette technique devait être réalisée par une entreprise, il faudrait ajouter le coût de la main d'œuvre. Suivant les chiffres donnés par l'architecte Jonas Lambert, il faut compter environ 350€ hors TVA de main d'œuvre pour un journée de travail (8h) d'un ouvrier. Si on considère toujours qu'on réalise 1 m² de paroi en bois cordé à deux en un jour, cela représente 700€ par m² de main d'œuvre hors TVA. A titre de comparaison, selon le bureau verviétois « Architectes 4D », un complexe de mur mixte traditionnel en bloc béton isolé au polyuréthane avec brique de parement et en prenant en compte sa finition intérieure, revient aujourd'hui en moyenne à 200€/m² hors TVA, main d'œuvre comprise. Cependant, comme nous l'avons déjà dit, ces montants ne peuvent pas être simplement comparés au vu de la différence de rendement entre un professionnel et un auto-constructeur.

Nous pouvons donc en conclure que l'intérêt de cette technique réside dans le faible coût de la matière et dans sa mise en œuvre en auto-construction.

4.3.3 Étanchéité à l'air

Pour chaque phase de tests, nous avons réalisé, quand c'était possible, 3 prises de mesures d'étanchéité à l'air. La première à une pression de 15 Pascals, la seconde à 50 Pascals et la dernière à 85 Pascals. Lorsque les pertes étaient trop importantes et que nous ne pouvions pas obtenir des résultats aux pressions voulues, nous avons dû extrapoler certains points. Pour ce faire, en encodant les résultats obtenus dans un tableur Excel, nous avons généré un graphique à courbes logarithmiques (graphique 1) et réutilisé la formule de la courbe calculée par Excel pour ensuite remplacer la valeur x par les pressions manquantes afin d'obtenir le débit de fuite. Pour le dernier test, nous n'avons pu obtenir

⁸ Prix renseigné par Isohemp, Ecobati et GG bois transport

⁹ Prix professionnel renseigné par l'entreprise Delporte Matériaux

qu'une valeur, il était donc impossible de générer une courbe et une formule. Nous avons donc repris la formule de la courbe du test précédent et adapté la formule en remplaçant les variables x (pression) et y (débit de fuite) par les seules valeurs obtenues lors du test. La courbe devrait donc être légèrement différente mais, avec un seul point de mesure, c'est la méthode qui nous permet d'approcher au mieux les résultats réels.

Pour l'ensemble des courbes du graphique, nous n'avons pas tenu compte des valeurs extrêmes, qui sont victimes d'un biais d'extrapolation. En effet, une différence de pression de 0 Pascal entre un environnement intérieur et extérieur est impossible. Nous avons donc compté un minimum de 5 Pascals de pression car nous considérons que les formules sont inutilisables en-dessous de cette valeur. C'est en partie pour cela que les tests sont généralement effectués à une valeur de 50 Pascals, afin de négliger les effets naturels de pression (différences de température, teneur vapeur d'eau, vent, ...) et ne prendre en compte que les effets de la machine. Nous avons donc également supprimé les variations logarithmiques pour les valeurs très basses de débit de fuite.¹⁰

4.3.3.1 Test à blanc

Lors de cette première phase de tests, nous nous sommes rendu compte que le débit de fuite du caisson était anormalement élevé. Nous avons donc réalisé des tests avec des fumigènes afin de détecter les fuites. Après avoir réétanchéifié une seconde fois le caisson, nous avons obtenu comme résultats : 0,2 m³ de perte d'air par heure à 15 Pascals (**V₁₅**), 0,8 m³ de perte d'air par heure à 50 Pascals (**V₅₀**) et 1,4 m³ de perte d'air par heure à 85 Pascals (**V₈₅**).

4.3.3.2 Test sans rejointoyage

Pour cette phase, nous avons obtenu : 2,85 m³ de perte d'air par heure à 15 Pascals (**V₁₅**), 3,2 m³ de perte d'air par heure à 19,4 Pascals et 4,3 m³ de perte par heure à 37,2 Pascals. Pour ce test, la perte était trop élevée et nous n'avons pas pu mettre le caisson à une pression supérieure à 37,2 Pascals, c'est pour cela que nous avons pris des valeurs intermédiaires. Nous avons dû extrapoler les valeurs à 50 Pascals (**V₅₀**) et à 85 Pascals (**V₈₅**). En déduisant le résultat du test à blanc, le débit de fuite à une pression de 50 Pascals (**q₅₀**) est de 2,14 m³ par heure et par m².

4.3.3.3 Premier test après rejointoyage

Lors de cette phase, nous avons de nouveau réalisé un test fumigène et nous n'avons détecté aucune fuite. Nous avons également remarqué que nous arrivions à mettre le caisson

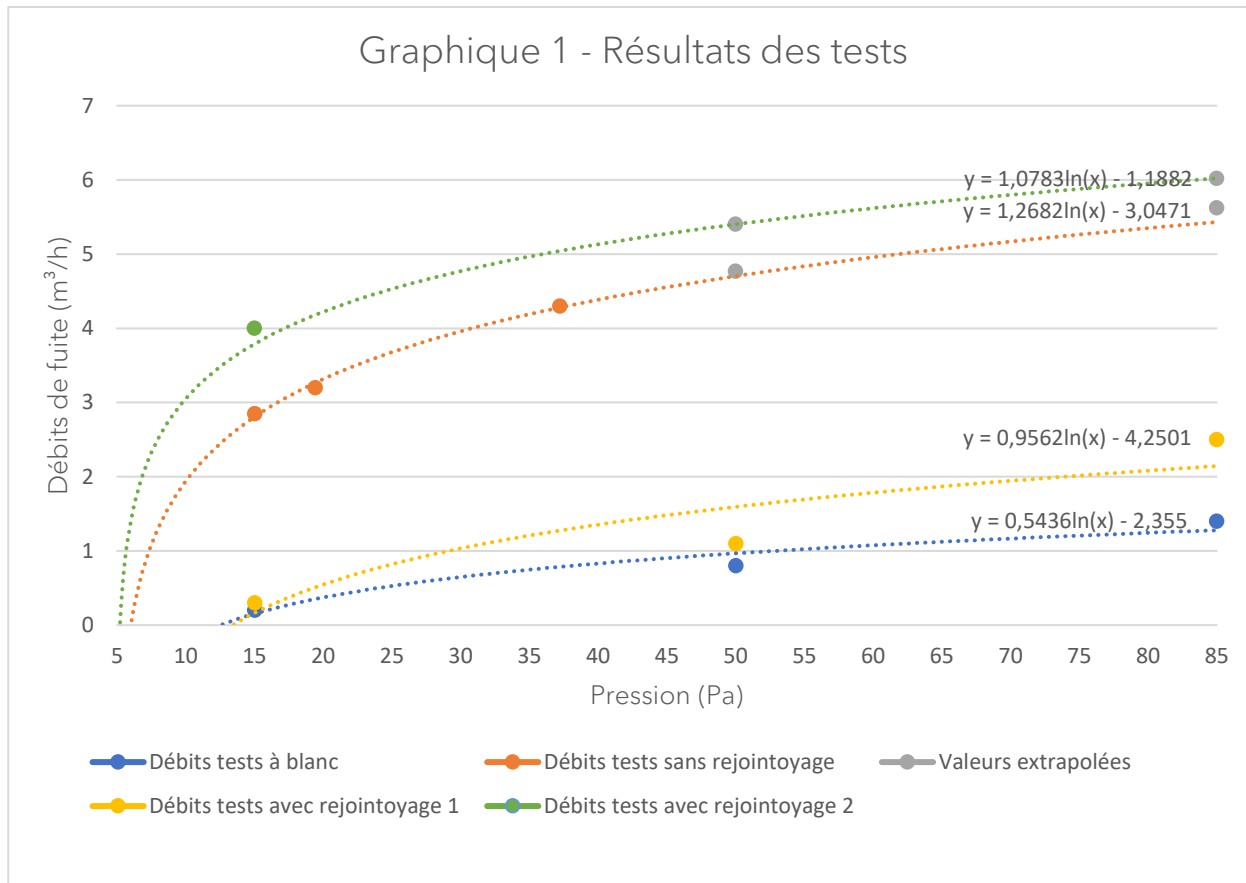
¹⁰ Informations et suggestions renseignées par le chercheur Stéphane Monfils lors d'échanges par email le 11 Aout 2022

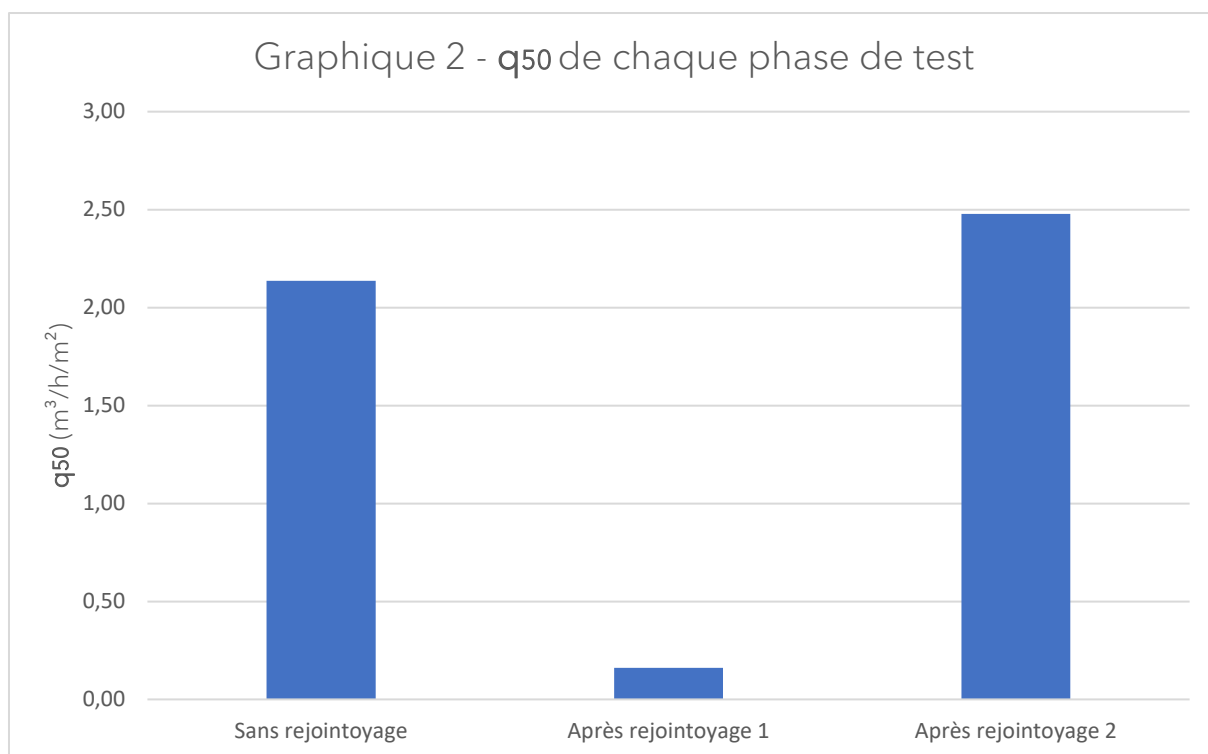
sous des pressions plus élevées, ce qui est un premier signe d'une meilleure étanchéité et de l'importance du rejointoyage. Dans le cadre de ce test, nous avons obtenu des résultats nettement meilleurs. Nous sommes arrivés à une perte d'air de 0,3 m³ par heure à 15 Pascals (**V₁₅**), de 1,1 m³ par heure à 50 Pascals (**V₅₀**) et de 2,5 m³ par heure à 85 Pascals (**V₈₅**). En déduisant les résultats du test à blanc, nous obtenons, avec 50 Pascals de pression, un débit de fuite (**q₅₀**) de 0,16 m³ par heure et par m².

4.3.3.4 Second test après rejointoyage

Ce test a été réalisé 2 mois après le précédent et nous avons obtenus de moins bons résultats. Comme pour le test avant le rejointoyage, nous ne sommes pas arrivés à mettre le caisson sous pression à 50 et 85 Pascals. Nous n'avons obtenu qu'une valeur de 4 m³ de perte d'air par heure à 15 Pascals (**V₁₅**). En extrapolant la valeur manquante à 50 Pascals (**V₅₀**) et en déduisant les résultats du test à blanc, nous obtenons un débit de fuite à 50 Pascal (**q₅₀**) de 2,48 m³ par heure par m². Pour cette phase, nous avons de nouveau réalisés un test fumigène et constaté que les pertes viennent bien du mur en bois cordé et plus précisément de la partie supérieure du mur.

4.3.3.5 Synthèse des résultats





Nous constatons ici que, malgré la variante proposée, la paroi n'est toujours pas étanche à l'air. Le rejointoyage semble tout de même jouer un rôle important et étanchéifie, dans un premier temps, la paroi. Il perd cependant peu à peu de son rôle au fur et à mesure que le taux de séchage augmente. Pour le dernier test, nous déduisons que les pertes sont probablement liées à un phénomène de tassement à l'intérieur de la paroi. En effet, l'utilisation d'un fumigène bleu met très clairement en valeur le retrait entre le bois et le mortier et entre le mur et le caisson (Illustration 63).

A l'exception des joints périphériques, les fuites semblent réparties de manière homogène sur l'ensemble de la paroi. Elle met également en avant que ce sont autant ces retraits que les fissures dans les bûches elles-mêmes qui réduisent l'étanchéité à l'air de la paroi. Nous pouvons donc conclure que ce défaut est fortement lié au souhait de laisser les bûches apparentes des deux côtés, ce qui pourrait être corrigé par leur enduisage d'un côté. Cela modifierait évidemment l'esthétique d'une des faces mais c'est une alternative qui n'augmenterait ni la technicité ni le coût.



Illustration 63 : Mise en valeur des retraits

Chapitre V – Conclusions

Cette recherche s'est tout d'abord attachée à faire état des connaissances relatives à une technique constructive marginale. Si le bois cordé est une technique présente dans différentes régions du monde depuis longtemps, son apparition et sa mobilisation par les constructeurs sont intrinsèquement liés à l'abondance d'une ressource : le bois de chauffage. C'est en effet le détournement (provisoire) de la bûche, utilisée comme brique ou bloc, qui donne naissance à cette technique constructive ; elle n'est pas vertueuse pour elle-même, elle est une opportunité constructive liée à une situation d'abondance. La mise en lumière de cette technique au tournant du 20^{ème} siècle, portée par l'émergence de préoccupations tant sociétales qu'environnementales en Occident, lui a donné une place dans la production architecturale récente aux Etats-Unis d'Amérique puis en Europe. Ses vertus environnementales et sa capacité à l'appropriation en ont fait une technique porteuse de valeurs autant que sujet d'innovation. Elle est cependant toujours restée marginale et fortement ancrée à la logique spécifique de l'auto-construction et son mode particulier de transmission et d'évolution du savoir-faire par l'expérience et la pratique.

Si cette technique a continué d'être mobilisée jusque dans les années 2010 en Belgique, nous avons vu qu'elle montre des limites qui invitent à lui préférer d'autres techniques telles que l'ossature bois, plus à même de rencontrer les enjeux performanciers qui cadrent et réglementent aujourd'hui le secteur de la construction autant que la pratique des architectes.

Afin de mettre à l'épreuve ces limites, nous avons mis en place un travail d'expérimentation à l'échelle 1/1. Au terme de celui-ci, nous pouvons mettre en évidence les éléments suivants.

Tout d'abord, l'adaptation de cette technique ancestrale constitue un grand potentiel dans une logique low-tech car la variante proposée s'adapte aux préoccupations actuelles. En effet, une technique doit pouvoir évoluer selon son contexte et non l'inverse. Certains matériaux peuvent en effet être réutilisés et valorisés, comme ça a été le cas ici de la sciure de bois et des bûches de bois de chauffage.

Ensuite, en laboratoire, nous avons dû mettre en place des variantes du protocole de tests pour que celui-ci soit fonctionnel et que les résultats soient représentatifs. La collaboration entre les chercheurs et les techniciens ont permis de faire émerger des solutions et de mener à bien ces expérimentations.

En outre, en comparant les performances d'étanchéité à l'air des éléments de notre construction à ceux publiés par Prignon, M. (2021), nous constatons que le prototype réalisé en bois cordé est peu performant par rapport aux valeurs d'étanchéité d'une maçonnerie extérieure qui est de $1,6 \text{ m}^3$ par heure par m^2 à 50 Pascals (**q50**). Or, dans la présente étude, nous obtenons un débit de fuite de $2,48 \text{ m}^3$ par heure par m^2 à 50 Pascals (**q50**), ce qui est tout de même supérieur aux valeurs représentées dans l'étude de Prignon, M. (2021).

Même si les tests sur l'étanchéité à l'air se sont avérés peu concluants, notre variante, en plus d'avoir généré plusieurs apprentissages, a tout de même permis d'améliorer considérablement les performances thermiques théoriques de la paroi. Elle peut désormais atteindre une valeur inférieure au U de $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ exigée par la norme PEB. Par ailleurs, nous avons pu confirmer que cette variante de mise en œuvre est réalisable par des auto-constructeurs car elle garde une faible technicité. C'est d'ailleurs en auto-construction qu'elle est la plus économique car elle serait impayable si elle devait être mise en œuvre par des entreprises. Enfin, notons que l'appropriation de cette technique est accessible à tous et garde donc un grand potentiel d'expression créative et de variante esthétique, c'est également pour cela qu'elle est qualifiée de « marginale ». Elle se distingue aussi par son aspect et sa méthode de construction organique, ancestrale, presque primitive, qui sort complètement des constructions traditionnelles que nous avons l'habitude de voir aujourd'hui. Ce type d'habitat est façonné par les habitants eux-mêmes, sans rentrer dans le système de consommation rapide actuel, de type « commande-livraison ».

A la question : « **Ce procédé technique, dont il existe des applications récentes en Région Wallonne, est-il en mesure de répondre aux exigences normatives actuelles ?** », nous pouvons désormais répondre qu'une nouvelle voie est ouverte. Actuellement, aucune exigence d'étanchéité à l'air n'est imposée par la PEB, il pourrait donc tout à fait être mis en œuvre de la manière expérimentée dans ce travail. Cependant, les défauts d'étanchéité à l'air, liés aux retraits et aux fissures dans les bûches elles-mêmes, entraînent une diminution du confort dans ces habitations et restent donc toujours à solutionner. D'autres alternatives sont envisageables et un travail plus approfondi sur le rejointoyage et/ou l'enduisage vaudrait la peine d'être mené.

Cette technique reste, malgré tout, un sujet d'intérêt pour beaucoup de personnes. En effet, lors de notre séjour et de nos expérimentations à Arlon, beaucoup de doctorants et de chercheurs ont manifesté leur curiosité et leur intérêt pour cette technique hors du commun jusqu'à, dans certains cas, réorienter leurs recherches. Ainsi au-delà des résultats obtenus au travers de la démarche de prototypage et sa mise à l'épreuve, le prototype en

lui-même, par sa matérialité et sa présence physique, a eu des effets : il a généré des échanges et des questionnements et, peut-être, continuera de le faire jusqu'à son démontage prochain qui donnera une dernière information relative à son potentiel de déconstruction et de réemploi des matériaux. Par cette recherche, nous espérons avoir montré le grand potentiel de transmission et, surtout, d'évolution de cette technique constructive autant que de cette méthode de recherche mobilisant le prototypage.



Illustration 64 : Résultat final du prototype

Table des illustrations

- Illustration 1 : DAYLIGHT. *Maison Dethier à Ovifat, réalisée par l'architecte Chritina Dewart en 1991*. Photo extraite de Butil, P. et Lozet, B. (1998). *Habiter le bois en wallonie*. Mardaga, p. 53.
- Illustration 2 : *Imperial cord graphic*. <https://woodlotmanitoba.com/wood-wise/buying-firewood/how-to-measure-firewood/>, consulté le 26 juillet 2022.
- Illustration 3 : Szewczyk, J. (2010). *Kryteria Strukturalne*. Photo extraite de Szewczyk, J. (2010). *Budownictwo z polan opałow*.
- Illustration 4 : Henstridge, J. *Cordwood Wall detail*. <https://cordwoodconstruction.org/cordwood-in-norway>, consulté le 26 juillet 2022
- Illustration 5 : Szewczyk, J. (2007). *Dilapidated cordwood house built in the 1930's in Bialystok*. Photo extraite de Szewczyk, J. (2007). *Cordwood Heritage* [Vilnius Gediminas Technical University Publishing House Technika]. http://www.vgtu.lt/leidiniai/leidykla/lt/urban_heritage_research_interpretation_education/21666.16056.
- Illustration 6 : Roy, R. *Stoneview guesthouse*. <https://www.cordwoodmasonry.com/>, consulté le 26 juillet 2022 .
- Illustration 7 : Bouteville, U. & STDI. *Composition du bois*. Photo extraite de Fuchs, S et Mussier, J. (2019). *Construire avec le bois*. Le Moniteur.
- Illustration 8 : Bouteville, U. & STDI. *Vue microscopique d'un feuillu et d'un résineux*. Photo extraite de Fuchs, S. et Mussier, J. (2019). *Construire avec le bois*. Le Moniteur.
- Illustration 9 : *Essais de compression simple des mortiers*. Graphique extrait de R. Mouterde, M. Paulin, L. Arnaud et J.C. Morel. *Une expérience pédagogique et de recherche sur le « bois cordé » aux Grands Ateliers*.
- Illustration 10 : *Two types of embedded wood alignment : Orthogonal and oblique*. Photos extraites de Mouterde, R., Morel, J. C., Martinet, V., & Sallet, F. (2011). *The mechanical performance of cordwood*. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511010002576>
- Illustration 11 : *Valeur de référence de la perméabilité à l'air v50 et statistiques disponibles au sujet de la performance du parc de bâtiments*. Figure extraite de la note d'information technique n°255 réalisé par le CSTC (2015).
- Illustration 12 : *Elévation en bois cordé*. Photographie personnelle réalisée le 11 octobre 2021 à Dave.

- Illustration 13 : *Élévation dessinée sur le logiciel "Autocad"*. Capture d'écran réalisée en novembre 2021.
- Illustration 14 : *Fondation et soubassement*. Numérisation d'une photographie de chantier réalisée à Mohiville en 1997 appartenant à l'auto-constructeur.
- Illustration 15 : *Mise en œuvre et pied de mur*. Photographie de chantier réalisée en 1999 par J-M Delhay à Mohiville.
- Illustration 16 : *Mise en œuvre et raccord en toiture*. Photographie de chantier réalisée en 2000 par J-M Delhay à Mohiville.
- Illustration 17 : *Structure principale*. Numérisation d'une photographie de chantier réalisée à Mohiville en 1997 appartenant à l'auto-constructeur.
- Illustration 18 : *Détail de mise en œuvre*. Numérisation d'une photographie de chantier réalisée à Mohiville en 1999 appartenant à l'auto-constructeur.
- Illustration 19 : *Fils de nylon*. Photographie personnelle réalisée le 3 novembre 2021 à Mohiville.
- Illustration 20 : *Débordant de toiture*. Photographie personnelle réalisée le 3 novembre 2021 à Mohiville.
- Illustration 21 : *Façade principale en bois cordé*. Photographie personnelle réalisée le 3 novembre 2021 à Mohiville.
- Illustration 22 : *Fissures*. Photographie personnelle réalisée le 3 novembre 2021 à Mohiville.
- Illustration 23 : *Structure principale avec couverture*. Photographie de chantier réalisée le 4 mai 2009 par J-M Delhay à Liège.
- Illustration 24 : *Soubassement et structure principale*. Photographie de chantier réalisée le 19 mai 2009 par J-M Delhay à Liège.
- Illustration 25 : *Mise en œuvre bois cordé et encadrement de baies*. Photographie de chantier réalisée le 16 août 2009 par J-M Delhay à Liège.
- Illustration 26 : *Mise en œuvre bois cordé, vue d'ensemble*. Photographie de chantier réalisée le 16 août 2009 par J-M Delhay à Liège.
- Illustration 27 : *Détail de mise en œuvre*. Photographie de chantier réalisée le 16 août 2009 par J-M Delhay à Liège.
- Illustration 28 : *Façade avant la mise en place du bardage*. Photographie de chantier réalisée le 28 janvier 2011 par J-M Delhay à Liège.
- Illustration 29 : *Façade avec bardage*. Photographie personnelle réalisée le 14 octobre 2021 à Liège.

- Illustration 30 : *Traces d'infiltrations d'eau*. Photographie personnelle réalisée le 14 octobre 2021 à Liège.
- Illustration 31 : *Structure principale*. Photographie de chantier réalisée entre les années 2010 et 2012 par J-M Delhay à Dave.
- Illustration 32 : *Structure principale avec couverture*. Photographie de chantier réalisée entre les années 2010 et 2012 par J-M Delhay à Dave.
- Illustration 33 : *Mise en œuvre bois cordé*. Photographie de chantier réalisée entre les années 2010 et 2012 par J-M Delhay à Dave.
- Illustration 34 : *Raccord d'angle en encadrement de baies*. Photographie de chantier réalisée entre les années 2010 et 2012 par J-M Delhay à Dave.
- Illustration 35 : *Détail mise en œuvre*. Photographie de chantier réalisée entre les années 2010 et 2012 par J-M Delhay à Dave.
- Illustration 36 : *Façade principale en bois cordé et débordant de toiture*. Photographie personnelle réalisée le 11 octobre 2021 à Dave.
- Illustration 37 : *Retrait au niveau des buches et des éléments de structure*. Photographie personnelle réalisée le 11 octobre 2021 à Dave.
- Illustration 38 : *Sous bassement et structure principale*. Photographie de chantier réalisée le 17 juillet 2012 par J-M Delhay à Olne.
- Illustration 39 : *Structure avec couverture et encadrement de baies*. Photographie de chantier réalisée le 15 avril 2013 par J-M Delhay à Olne.
- Illustration 40 : *Mise en œuvre bois cordé, encadrement de baie et châssis*. Photographie de chantier réalisée le 17 juin 2013 par J-M Delhay à Olne.
- Illustration 41 : *Raccord mur-toiture*. Photographie de chantier réalisée le 27 juin 2011 par J-M Delhay à Olne.
- Illustration 42 : *Détail mise en œuvre*. Photographie de chantier réalisée le 10 juin 2013 par J-M Delhay à Olne.
- Illustration 43 : *Façade principale en bois cordé et débordant de toiture*. Photographie personnelle réalisée le 14 octobre 2021 à Olne.
- Illustration 44 : *Mur en bois cordé côté intérieur*. Photographie personnelle réalisée le 14 octobre 2021 à Olne.
- Illustration 45 : *Chronologie du travail*. Ligne du temps réalisée sur le site <http://www.frisechronos.fr/>
- Illustration 46 : *Modélisation 3D sur le logiciel "Sketchup" des propositions de caissons*. Capture d'écran réalisée le 6 janvier 2022

- Illustration 47 : *Caisson définitif assemblé dans l'annexe du laboratoire BEMS à Arlon.* Photographie personnelle réalisée le 30 janvier 2022 à Arlon.
- Illustration 48 : *Simulation sur le logiciel "Therm" d'une paroi similaire aux études de cas.* Capture d'écran réalisée le 6 janvier 2022
- Illustration 49 : *Simulation sur le logiciel "Therm" de la première proposition de mise en œuvre.* Capture d'écran réalisée le 6 janvier 2022
- Illustration 50 : *Simulation sur le logiciel "Therm" de la seconde proposition de mise en œuvre.* Capture d'écran réalisée le 6 janvier 2022
- Illustration 51 : *Tri et assainissement des buches.* Photographie personnelle réalisée le 31 janvier 2022 à Arlon.
- Illustration 52 : *Préparation du béton de chanvre.* Photographie réalisée par J-P Possoz le 31 janvier 2022 à Arlon.
- Illustration 53 : *Préparation de l'enduit à la chaux.* Photographie personnelle réalisée le 30 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 54 : *Mise en œuvre départ.* Photographie personnelle réalisée le 1^{er} février 2022 à Arlon.
- Illustration 55 : *Mise en œuvre premières buches.* Photographie réalisée par J-P Possoz le 1^{er} février 2022 à Arlon.
- Illustration 56 : *Mise en œuvre suite.* Photographie personnelle réalisée le 1^{er} février 2022 à Arlon.
- Illustration 57 : *Rejointoyage.* Photographie personnelle réalisée le 30 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 58 : *Finition.* Photographie personnelle réalisée le 30 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 59 : *Apparition de champignon sur la paroi.* Photographie personnelle réalisée le 23 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 60 : *Blower-door test.* Photographie personnelle réalisée le 23 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 61 : *Équipement de prise de mesure définitif.* Photographie personnelle réalisée le 23 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 62 : *Équipement de prise de mesure, data logger.* Photographie personnelle réalisée le 23 mars 2022 à Arlon.
- Illustration 63 : *Mise en valeurs des retraits.* Photographie personnelle réalisée le 7 juillet 2022 à Arlon.
- Illustration 64 : *Résultat final du prototype.* Photographie personnelle réalisée le 20 avril 2022 à Arlon.

Bibliographie

- Altomonte, S., Dawans, A., Ossio, F., Prignon, M., & Van Moeske, J. (2021). *On the applicability of meta-analysis to evaluate airtightness performance of building components*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107684>
- Ardheia. (2007). *Le bois cordé* [document technique]. https://boiscorde.weebly.com/uploads/3/1/2/4/31244775/article_ardheia.pdf
- Bernard, J. (2014). *Le réemploi de la brique de terre-cuite à travers la problématique du parement: compréhension d'un secteur et évolution possible*. [Mémoire architecture, Université de Liège].
- Berthier, S. (2017). *Création architecturale et industrialisation de la filière bois : l'architecture comme milieu d'expérimentation des innovations techniques*. [Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay].
- Berthier, S. (2018). *Le développement expérimental en situation de projet*. [recherche architecturale urbaine et paysagère]. <http://journals.openedition.org/craup/294>
- Bihoux, P. (2021). *L'Âge des low tech : Vers une civilisation techniquement soutenable*. Edition du seuil.
- Bohnke, I. (1993). *Étude expérimentale et théorique des traitements thermiques du bois. Caractérisation physico-mécanique des bois traités*. [Thèse génie des procédés, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne et de Paris].
- Bongartz, J. (2019). *Construction durable au 21ème siècle, mythe ou réalité ? Approche critique : transition, low tech, résilience*. [Mémoire architecture, Université de Liège].
- Butil, P., & Lozet, B. (1998). *Habiter le bois en Wallonie*. Mardaga.
- Chapiron, A. (2021). *Étude de l'impact des modes de vie sur l'analyse du cycle de vie d'un logement unifamilial belge*. [Mémoire ingénieur civil architecte, Université de Liège].
- Cluster Eco Construction. (2019). *Carnet de route vers l'éco-construction : Matériaux bio-sourcés et de réemplois dans la construction*. Consulté le 3 juillet 2022 sur <https://clusters.wallonie.be/ecoconstruction/node/30>
- Courard, L. (2012, 9 mai). *Quels critères de choix pour les matériaux de demain ?* [Diapositive - Conférence Blida]. <https://orbi.uliege.be>
- Courgey, S. & Oliva, J. (2010). *L'isolation thermique écologique*. Terre vivante.
- CSTC. (2015). *Note d'information technique 255 : L'étanchéité à l'air des bâtiments*.

- CSTC. (2007). *Informations environnementales propres aux produits : le point de la situation en Belgique et en Europe* (Cahier n°3). [Les Dossiers du CSTC]. <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact13&art=196&lang=fr>
- Directive 2008/98/CE du Parlement Européen et du Conseil du 19 novembre 2008 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.
- Directive 89/106/CEE du Conseil du 21 décembre 1988 relative au rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives des États membres concernant les produits de construction.
- Fuchs, S et Mussier, J. (2019). *Construire avec le bois*. Le Moniteur.
- Gillet, S. (2016, 26 avril). *Importance de l'étanchéité à l'air dans les bâtiments* [Conférence]. L'étanchéité à l'air, de la conception à la mise en œuvre, Bruxelles. https://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/PRES_160421_Sem14_etancheite_FR.pdf
- Hagman, O. (2012). *A Technology in Permanent Transition: 200 Years of Cordwood Building with Consumers as Producers*. 18, 16.
- Hauglustaine, J-M. & Simon, F. (2018). *La conception globale de l'enveloppe et l'énergie : Guide pratique pour les architectes* (2^e éd.). SPW.
- Higuët, V. (1996). *Contribution à l'amélioration de la technique du bois cordé par la construction d'un bâtiment agricole*. [Industrie et commerce du bois, Institut d'enseignement de promotion sociale de la communauté française de Libramont].
- Hout Info Bois. (2012). *Bois – Guide pour le bon usage*. www.houtinfobois.be
- Hurmekoski, E. (2017). *Comment la construction en bois peut-elle contribuer à réduire la dégradation de l'environnement ?* European Forest Institute.
- Illich, I. (1973). *La Convivialité*. Edition du Seuil
- IsoHemp. (2021). *Le béton de chanvre : Guide de mise en œuvre*. [Documentation technique]
- Jenkins, P. B. (1923). A "Stove-Wood" House. *The Wisconsin Magazine of History*, 189-193.
- Koenig, H. (2008). *Le grand retour des mortiers à base de chaux*. Consulté le 13 juin 2022 sur <https://www.batirama.com/article/150-le-grand-retour-des-mortiers-a-base-de-chaux.html>
- Lafarge. (2014). *Fiche commerciale : chaux NATHURAL*. [Documentation technique]
- Larousse. (2022). *Chènevotte*. Dans le Dictionnaire Larousse consulté le 4 juillet 2022 sur www.larousse.fr/dictionnaires/francais

- Lecompte, T. (2020). *Le chanvre dans les bâtiments de demain : atouts, freins et enjeux*. <https://www.cairn.info/revue-annales-de-bretagne-et-des-pays-de-l-ouest-2020-3-page-193.htm>
- Lefrancois, C. (2020). *Maison écologique : Construire ou rénover*. Terre vivante
- Maku T. (1954). *Studies on the Heat Conducting in Wood: The present study is a discussion on the results of investigations made hitherto by author on heat conduction in wood*. [Wood Research Institute, Kyoto University].
- Maniaque, C. (2014). *Go West. Des architectes au pays de la contre-culture*. Marseille : Parenthèses.
- Mouterde, R., Morel, J. C., Martinet, V., & Sallet, F. (2011). The mechanical performance of cordwood. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511010002576>
- Muytjens, L. (2018). *Réseaux de collaboration et valorisation des ressources locales en bois dans le secteur de la construction : évaluation du potentiel de développement de la filière bois wallonne par les proximités*. [Mémoire bioingénieur, Université de Liège]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/5177>
- Nature & Progrès. (2019, 5 juin). *Ecobioconstruction*. Natpro. Consulté le 12 avril 2022 sur <https://www.natpro.be/ecobioconstruction/>
- Nanquette, H. (1859). *Exploitation, débit et estimation des bois: cours fait à l'École impériale forestière*. Ve Raybois, imprimeur.
- Nguyen, T. T. (2014). *Contribution à l'étude de la formulation et du procédé de fabrication d'éléments de construction en béton de chanvre*. [Thèse Génie civil, Université de Bretagne Sud]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01017510>
- OEWB. (2021). *PanoraBois Wallonie 2021*. Emmanuel Defays. https://www.oewb.be/sites/default/files/media-documents/OEWB-PanoraBois_2021_0.pdf
- ProfilWood (2012). *Dossier de Presse ProfilWood : Développement de l'innovation et des circuits courts dans la filière forêt-bois*. [ProfilWood - Fonds européen de développement régional].
- ProfilWood. (2018). *Argumentaires : Le bois local - Guide des usages*. [ProfilWood - Fonds européen de développement régional]. <https://www.profilwood.eu/fr/publications/publication/22:argumentaire-le-bois-local-guides-des-usages>
- Skok, A. (2019). *Équipement : Thermique 1*. [Syllabus - Université de Liège].

- Snell, C et Callahan, T. (2006). *Manuel de construction écologique : Murs en paille, en torchis, en bois cordé, toit végétalisé*. La plage.
- Solinhac, M. (2010). *Compte rendu du livre Cradle to Cradle de William McDonough et Michael Braungart*. [CEMOTEV-Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines]. <http://ethique-economique.net>
- SPW. (2017). *Exigences PEB & électromobilité à partir du 11 mars 2021*. Consulté le 13 juin 2022 sur <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-electromobilite-a-partir-du-11-mars-2021.html?IDD=149405&IDC=7224>
- SPW. (2016). *Guide PEB : Étanchéité à l'air*. Consulté le 28 juillet 2022 sur https://energie.wallonie.be/fr/08-02-difference-entre-v50-v50-et-n50.html?IDC_PEB=9491&IDD=113676&IDC=9095
- Steiger, L. (2013). *Basic construction : Construire en bois*. Birkhäuser.
- Sudres, M. (2016). *Caractères des structures en bois dans l'histoire de l'architecture*. [Mémoire, École nationale supérieure d'architecture de Toulouse]. <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01764848>
- Szewczyk, J. (2007). *Cordwood Heritage* [Vilnius Gediminas Technical University Publishing House Technika]. http://www.vgtu.lt/leidiniai/leidykla/lt/urban_heritage_research_interpretation_education/21666.16056
- Tanguay, F. (1990). *Petit manuel de l'auto-construction*. Edition de Mortagne.
- Tétreault, J. (2004). *Construire sa maison en bois cordé*. La Maison du 21^{ème} siècle, Bio-construction, 9-13. <https://maisonsaine.ca/wp-content/uploads/2018/05/bois-corde-2004.pdf>
- The Shifters. (2022). *Synthèse du rapport AR6 du GIEC publié le 28/02/2022*.
- Utovie. (2017). *Construire en buches, selon la technique du bois cordé*. Utovie
- WCED. (1987). *Rapport Brundtland : Our Common Future*. Consulté le 11 août 2022 sur : https://developpementdurable.wallonie.be/sites/default/files/user_uploads/rapport_brundtland_0.pdf

Annexes

Annexe 1 : Entretien avec Jean-Marie Delhayé

14 octobre 2021

D : Je crois que, pour t'en sortir valablement avec les murs en bois cordé, pour les faire reconnaître, tu seras obligé de remettre un enduit de terre complet à l'intérieur et de mettre ce qu'il faut comme isolant par l'intérieur. C'est une bonne structure à l'extérieur. Ou alors, on privilégie l'intérieur, on aime bien le mur à l'intérieur en bois cordé et alors à l'extérieur, refaire un bardage, isoler, et en profiter pour mettre un pare-pluie. Je ne sais pas si, avec les normes actuelles, un mur massif en bois cordé apparent à l'intérieur et à l'extérieur va être fonctionnel au niveau de l'étanchéité à l'air. Est-ce qu'il est suffisamment étanche et comment trouver une validité technique et financière à ça dès lors qu'il ne répond pas aux normes d'isolation minimum ? Ou alors, ce serait juste une partie, un morceau parce qu'on aime bien.

T : Ou en parement intérieur ?

D : J'ai vu des parements intérieurs de 10cm avec des petites bûches mais c'est de la déco, ce n'est pas ...

T : Tout d'abord, quelle est votre philosophie, vous, en tant qu'architecte ?

D : Ma philosophie, c'est rendre l'écobioconstruction accessible à tous. Qui est-ce qui utilisait ces matériaux alternatifs dans les années 70, 80 et 90 ? C'est les auto-constructeurs, c'est pour ça que j'ai beaucoup travaillé avec eux. Toujours maintenant mais j'appelle plutôt ça un chantier participatif où l'auto-constructeur est encadré par un accompagnateur de chantier, un référent technique, qui va pouvoir le suivre point par point dans la réalisation de son projet, et je ne serai plus là pour voir comment l'auto-constructeur va interpréter toutes les données nécessaires à la bonne exécution de son projet. Parce qu'eux sont parfois un peu « borderline » avec tout ça.

T : Donc il y a un suivi ?

D : Un suivi par le référent technique. Moi, comme architecte, j'ai fait mon suivi d'architecte mais des bêtises, il peut en faire le matin, le midi et le soir, je ne peux pas être tout le temps avec lui quoi. Et donc un référent technique, lui, il travaille avec lui pendant un ou deux jours, le temps qu'il comprenne bien. Et on l'accompagne dans la structure des « Batacles ? », des bâtisseurs accueillants. On a créé une Asbl

pour suivre ce type de chantiers, avec des chantiers de bois, de paille, de terre, etc., toutes ces techniques alternatives qui permettront d'avoir un projet qui est bien ficelé et bien exécuté. Ça ne sert à rien, moi comme architecte, de faire ceci cela si ce n'est pas pour le réaliser comme il faut. C'est pour ça que maintenant, je veux te dire que, c'est bien le bois cordé mais il est arrivé au-delà de ses limites aujourd'hui en termes de performances énergétiques et d'étanchéité à l'air.

T : Quand avez-vous été confronté au bois cordé pour la première fois et pour quelles raisons ?

D : C'est parce que j'ai rencontré François Tanguay, un canadien, tu vois le livre ? Je l'ai rencontré et j'ai trouvé ça sympathique mais c'était dans les années 90 ça. J'ai visité des chantiers que lui avait fait en Bourgogne, etc., où il utilisait du béton. Donc c'était vraiment un mortier qui n'était même pas allégé. Au début, sa recette de mortier c'était : du ciment, de la chaux, du sable et de la sciure de bois. Donc, il mélangeait ça. Va expliquer ça à ton professeur de techniques de construction, de mettre de la sciure de bois dans du béton. Après on en a plus (+) parlé. Ça, je l'ai mis sur le côté et quand j'ai découvert le béton de chaux/chanvre, j'ai utilisé uniquement ça. Ça me paraissait plus familier de la texture du bois le chaux/chanvre que le ciment. Et toute la première maison, ça a été fait avec du « trasskalk ». C'est un ciment naturel, comme son nom le dit en germano, kalk c'est de la chaux. Enfin, on ne va pas parler de tous les mortiers différents, de la différence entre la chaux, le ciment, etc. Mais il y a certains ciments naturels. On utilisait ça mais, quand même, c'était trop costaud pour le bois. Le chaux/chanvre est beaucoup mieux.

T : Il est plus flexible ?

D : Voilà, exactement. Et François Tanguay, il construisait avec de la paille aussi mais il prenait des ballots de paille et il les maçonait avec une « croûte » de béton comme ça. Il faut être dingue pour faire ça. Enfin, à la relecture 30 ans après.

T : Au niveau des ponts thermiques ?

D : Oui, déjà les ponts thermiques et puis, finalement, il disait, le squelette du mur c'était son gros joint de béton. Maintenant, il y a d'autres techniques pour construire en paille. Quand il parlait de paille et de bois cordé, moi j'ai sauté sur le bois cordé mais je ne savais pas que 10 ou 20 ou 30 ans plus tard, ça allait être la paille qui allait « gagner » on va dire, qui allait prendre le dessus.

T : Mais à Olne, c'est une maison qui est en bois cordé et en paille ?

D : Il y a du bois cordé, que tu as vu, dans les formes courbes et arrondies, ce n'est pas structurel, c'est un remplissage entre structures mais le reste, dans les murs au nord etc., c'est de la paille.

T : Donc vous n'avez jamais imaginé un jour de faire un mur en bois cordé plus une isolation en paille, par l'intérieur ?

D : Non, il y a des gens qui ont fait du bois cordé et qui l'ont maçonné avec du terre/paille. Ça veut dire plonger de la paille dans de l'argile assez liquide, c'est la technique du terre/paille. Donc ils mettaient de la terre/paille au milieu et il mettait de la terre avec de la paille hachée dedans. Parce que dans la paille il y avait des fibres et ça donnait un peu de cohésion au mortier. Mais ça je n'ai jamais fait, et c'est plutôt des techniques issues des « kerter ? », c'est encore plus alternatif, ce n'est pas dans les normes de constructions architecturales d'aujourd'hui, c'est plutôt une « plaine de jeu » quoi.

T : On en a parlé mais quels sont les points faibles de cette mise en œuvre ? Il y a l'étanchéité à l'air ?

D : C'est surtout le fait que ça demande beaucoup de temps. Et tu ne peux pas demander ça à un entrepreneur.

T : Monsieur Prion m'a dit qu'à deux, quand tout était prêt, donc ils devaient juste poser, ils faisaient 2m²/jour.

D : Oui, ce n'est pas beaucoup 2m²/jour. Même un maçon fait 14 ou 16m²/jour.

T : Quels sont les atouts de cette technique selon vous ?

D : Les atouts, c'est l'ancien directeur de l'urbanisme d'Arlon qui le disait, ça ressemble de loin très fort à une maçonnerie en pierres, qui est aussi très coûteuse et absolument pas thermique. Mais c'est un aspect qui est séduisant. Ce qui est intéressant, c'est que ça peut être mis en œuvre par quelqu'un qui ne sait pas maçonner. On n'est pas en train de maçonner des matériaux équarris ou, encore plus difficile, des moellons. Comme le bois, la bûche, est de part en part, elle a deux assises, il suffit de monter d'aplomb quoi. Son atout c'est de faire des murs courbes aussi. On n'est pas obligés de respecter ça, on peut faire un mur droit, mais c'est facile de faire un mur courbe. Voilà un peu ses atouts.

T : Selon vous, cette technique est-elle appropriée au climat wallon actuel ? Par rapport aux températures que l'on a, au taux d'humidité ?

D : Ça oui, parce que le chaux-chanvre l'est, la construction en bois l'est. En parlant de climat, j'ai le responsable écoconstruction de nature et progrès, c'est un africain, il utilise le bois cordé dans son pays, il vient de Côte d'Ivoire je crois, et il m'a envoyé des photos de bois cordé qu'il faisait. Mais là, ils maçonnent avec de la terre. Il n'y a pas besoin d'isolant, ils ont besoin d'une masse pour se protéger du chaud et du froid. C'est des relativement petits bois, parce qu'ils n'ont pas de gros bois à débiter, c'est des bois de 7, 8 ou 10 cm. Enfin voilà, ça existe.

T : Habituellement, vous utilisez quel type de bois ?

D : Moi quand je dis bois je dis mélèze. C'est du bois local, t'as du sapin blanc, t'as du sapin rouge, t'as du douglas, t'as du cèdre et puis t'as du mélèze. Mais le cèdre ne pousse pas chez nous.

T : Et éventuellement utiliser cette technique avec du bois de réemploi ?

D : Ah oui. Le bois de réemploi il risque d'avoir été protégé avec un produit chimique inconnu. Je l'ai fait avec des chevrons, tu vois des bois carrés quoi, c'est un peu moins...

T : Donc ça change un peu l'esthétique.

D : Oui c'est ça. Et le bois de réemploi, ça risque d'être du bête sapin blanc, et forcément protégé, on ne sait pas avec quoi il a été protégé, sûrement pas avec des produits bio.

T : Mais le mélèze, ce n'est que parce que c'est local ? Ce n'est pas par rapport à ses propriétés ?

D : Si, il est beaucoup plus solide. Ce bois-là est plus dense, il a une meilleure classe de durabilité. Proche du cèdre mais quand même en-dessous.

T : Vous m'en avez rapidement parlé mais, pour vous, quel type de mélange pour le mortier, donc vous utilisez du béton de chanvre ?

D : Oui du béton de chanvre.

T : Et pour l'enduisage ?

D : L'enduisage, dans le cadre où on garde les bûches apparentes ? Donc le rejointoyage ?

T : Oui le rejointoyage pardon.

D : Donc je garde 5 cm, je fais ça presque un an après que le mur se soit stabilisé, donc les bûches sont restées à l'air, le premier mortier de structure est déjà bien sec. Je vais mettre 2cm/2,5cm du même béton de chanvre, le même mélange. Et pour finir, pour que ce soit bien refermé, je vais fortement diminuer le chanvre pour mettre, soit, à l'intérieur on peut le faire avec de la terre, soit, à l'extérieur, avec un mélange de chaux et de sable uniquement.

T : Et pas de terre du tout alors ?

D : Non, pour finir à l'extérieur, je ne vais pas mettre de la terre, la terre va se délayer à l'extérieur, sauf si c'est protégé. Donc à l'extérieur, là où c'est battu pleine pluie, le bois debout est résistant, et je vais finir avec un joint de 2 cm d'épaisseur de sable et de chaux. De sable, pas jaune, de sable de rivière de rejointoyage.

T : Et au niveau de l'isolation, vous utilisez uniquement du liège ?

D : C'est le plus pratique, le plus courant. J'ai utilisé de la vermiculite aussi. Ça c'est bien contre le feu. Ou de l'Argex, dans les soubassements, là où j'avais un peu trop d'humidité.

T : Tout qui pourrait convenir, au final, à l'humidité.

D : Ou alors ce qu'on met beaucoup dedans c'est de la sciure carrément. Un mélange de sciure et de copeaux. Et la sciure a ça de bien que les souris n'y vont pas, c'est sec et ça va se laisser aller, on ne sait pas faire de galeries. Comme avec les billes de liège.

T : Mettez-vous des dispositifs en place pour protéger au mieux ces murs ?

D : On fait un fort dépassant et on est tranquilles.

T : Donc un fort dépassant et des soubassements ?

D : Oui parfois le soubassement est un peu plus haut avec de la terre cuite, des blocs de terre cuite.

T : Vous avez déjà utilisé des variantes, par rapport aux normes actuelles, est-ce que vous avez des pistes à proposer pour cette technique ? Si on fait des murs plus épais par exemple ?

D : Oui voilà, plus épais c'est facile. J'en ai qui ont fait des murs de 50 cm mais ça consomme plus de matériaux et ça demande plus de temps. Mais forcément, on va améliorer l'isolant. Il y a peut-être moyen d'améliorer l'isolant en améliorant l'épaisseur. Mais comme le principal défaut est l'étanchéité à l'air, et si on n'est pas maître de tout le rejointoyage convenable comme on pourrait le faire et l'espérer, je ne vois qu'une solution c'est de doubler le mur, soit d'un côté soit de l'autre, à l'intérieur ou à l'extérieur. Un bardage ou tout ce que tu veux, pour avoir une étanchéité à l'air ou à la pluie maximum. J'ai des gens qui ont réenduit tout le mur avec un enduit de chaux/chanvre, c'était facile mais on ne voit plus les bûches quoi. C'est comme si le joint revenait partout, c'est le même mélange de chaux/chanvre.

T : Et une dernière question alors, quels sont vos fondements par rapport à votre point de vue ?

D : Quels sont les ?

T : Quels sont les fondements par rapport à votre point de vue ? C'est-à-dire est-ce que c'est issu juste d'expériences ou de littérature, ou ... ?

D : Non, non, la littérature, je n'ai pas le temps de lire, c'est l'expérience, c'est le retour. J'ai visité d'autres projets dans d'autres pays, etc. mais voilà, uniquement avec l'expérience.

T : Et la rencontre avec Monsieur Tanguay ?

D : Oui mais ça c'était au tout début donc c'est là que sont les plus mauvaises pistes parce que, je te dis, ce n'était que du béton et du ciment. Lui, c'est un peu comme tous les précurseurs, c'est très bien de lancer l'idée mais après quand tu grattes un peu, ce n'est pas tout à fait... Il y a beaucoup à faire quoi.

T : Et au niveau détails techniques, vous n'en avez aucun ?

D : Dans les dessins... c'était sur place donc un auto-constructeur il n'a pas besoin de ça. Qui a besoin de ça ? Un entrepreneur pour donner à son ouvrier qui sait très bien comment on maçonne etc. Mais à l'usage, ce n'est pas comme ça que je travaille avec les auto-constructeurs. Eux, ils ont besoin d'un accompagnement, d'avoir quelqu'un sur place.

T : Si j'ai éventuellement besoin de l'une ou l'autre photos

D : Oui, on se recontacte. Une fois tu pourrais venir et pêcher un peu les photos qui t'intéressent directement de la machine de laquelle je les ai envoyées quoi

T : Est-ce que je peux éventuellement vous emprunter le travail de fin d'étude que vous m'avez montré ?

D : Oui, oui, je vais faire une photocopie.

Annexe 2 : Fiches comparatives

Fiche 1 : Visite du 11 octobre 2021

Informations générales

Type de projet : Nouvelle Construction gérée en auto-construction

Système constructif : Poteau-poutre

Propriétaire : Gilles Prion

Architecte : Jean-Marie Delhaye

Année de construction : 2012

Adresse : Rue des sautes, 65 à Dave

Photos du chantier



Photo 14 : Structure principale



Photo 2 : Structure principale avec couverture



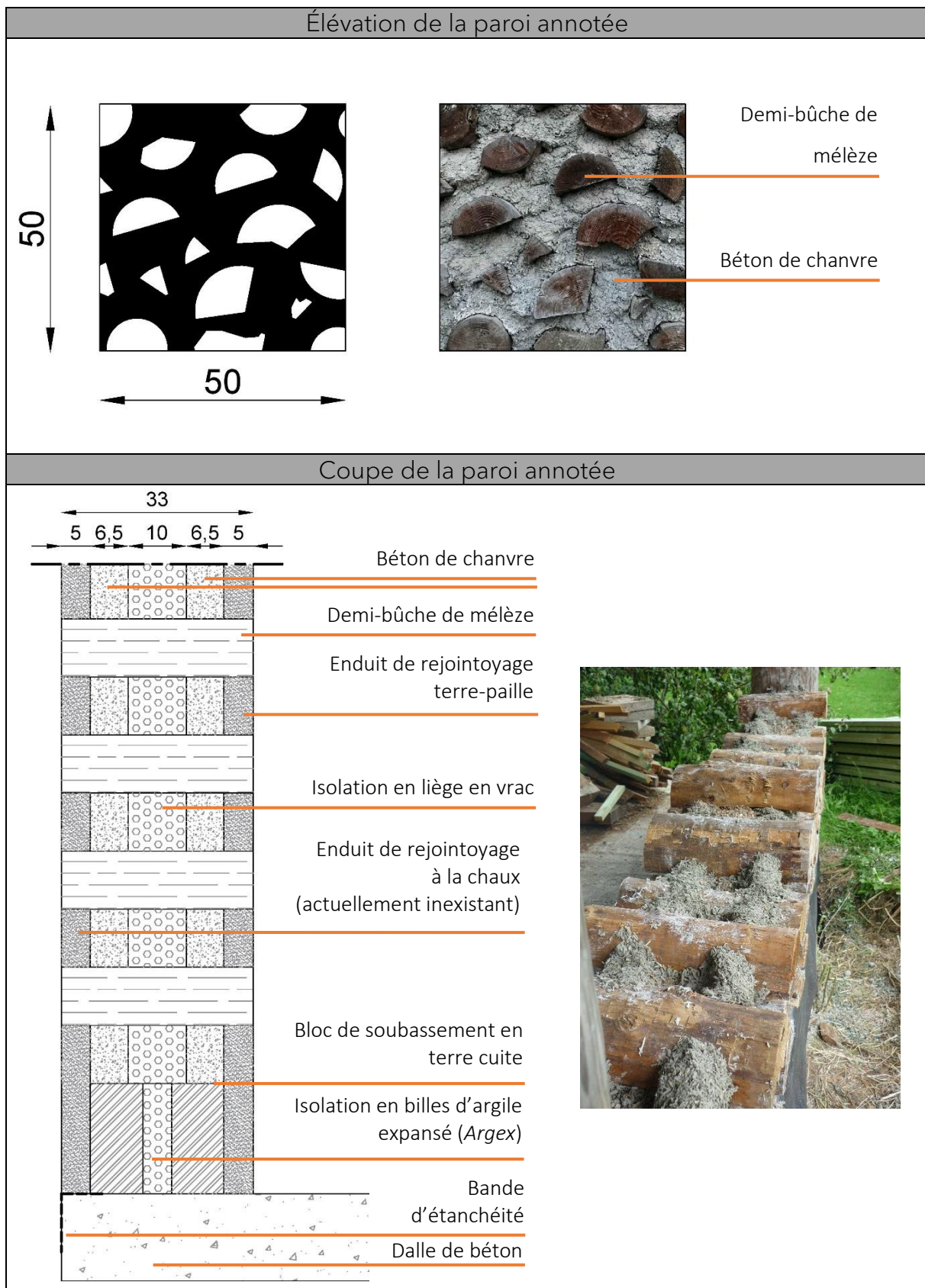
Photo 3 : Mise en œuvre du bois-cordé



Photo 4 : Raccord d'angle et encadrement de baies

Composition de la paroi

Orientation de la paroi étudiée : Est et Sud-est



Calcul théorique de la valeur U (W/m²K)

Type de bois : Mélèze

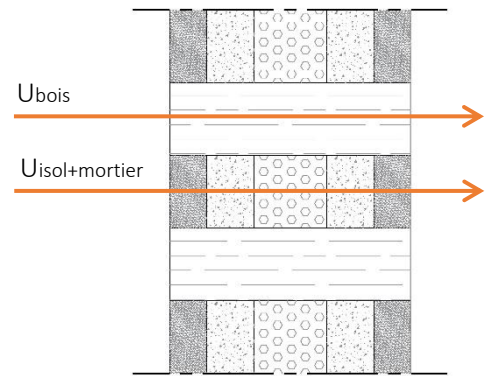
Pourcentage : 33%

Type de liant : Béton de chanvre

Type d'isolant : Liège en Vrac

Enduit : Terre/paille coté intérieur

Pourcentage : 67%



Calculs :

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,33}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,13}{0,12} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{0,1}{0,045} + \frac{0,05}{0,5} + \frac{1}{23}} = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,33 \times 0,95) + (0,67 \times 0,26) = 0,49 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Formules :

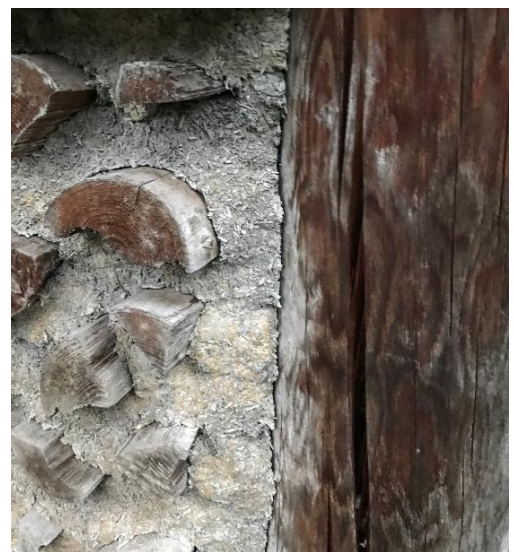
$$R = \frac{\text{Epaisseur (en M)}}{\text{Lambda}}$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{int.}} + \sum R + R_{\text{ext.}}}$$

Conclusions/observations



Façade principale en bois cordé



Retrait au niveau des buches et des éléments de structure

- Débordement conséquent de la toiture
 - Enduisage extérieur toujours pas réalisé
 - D'après Monsieur Prion, les murs en bois-cordé ont peu d'inertie et sont très perméables à l'air, ce qui crée des problèmes acoustiques et des courants d'air dans sa maison.
 - Par rapport à la littérature lue au préalable, le taux de bois me semble très faible. 33% ici contre 60% d'après les ouvrages de Rob Roy.
- État général de la paroi : Moyen, gros retraits au niveau des bûches

Informations générales

Type de projet : Agrandissement et rénovation géré en partie en autoconstruction

Système constructif : Poteau-Poutre

Propriétaire : Richard Lannoy

Architecte : Jean-Marie Delhay

Année de construction : 2010

Adresse : Rue du Géron, 59 au Thier-à-Liège

Photos du chantier



Photo 1 : Structure principale avec couverture



Photo 2 : Soubassement et structure principale



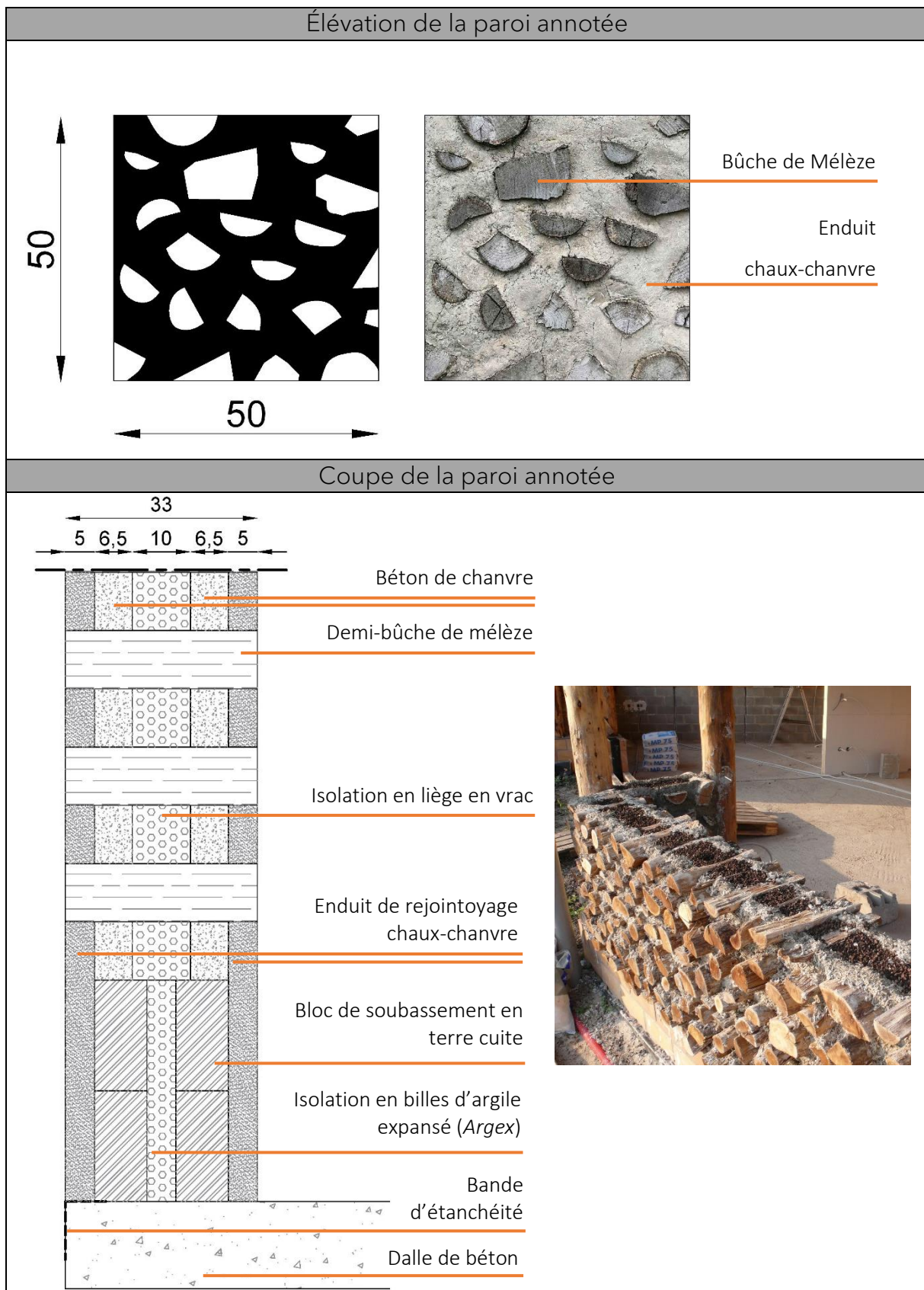
Photo 3 : Mise en œuvre bois-cordé et encadrements de baies



Photo 4 : Mise en œuvre bois-cordé, vue générale

Composition de la paroi

Orientation de la paroi étudiée : Ouest



Calcul théorique de la valeur U (W/m²K)

Type de bois : Mélèze

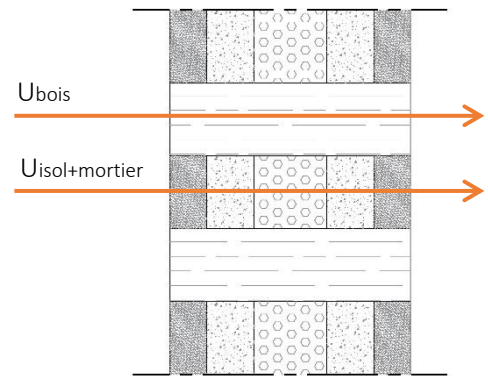
Pourcentage : 30%

Type de liant : Béton de chanvre

Type d'isolant : Liège en Vrac

Enduit : Terre/paille

Pourcentage : 70%



Calculs :

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,33}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,13}{0,12} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{0,1}{0,045} + \frac{0,05}{0,2} + \frac{1}{23}} = 0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,3 \times 0,95) + (0,7 \times 0,25) = 0,46 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Formules :

$$R = \frac{\text{Epaisseur (en M)}}{\text{Lambda}}$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{int.}} + \sum R + R_{\text{ext.}}}$$

Conclusions/observations

- Débordement de toiture faible, voire inexistant.

- A cause d'importantes infiltrations d'eau dans la paroi, un pare-pluie et un bardage ont été ajoutés. → État général de la paroi : Mauvais, façade très exposée aux intempéries (plein ouest) sans dispositif de protection étudié au préalable. Beaucoup de fissures et de brèches apparentes qui ont causé des infiltrations d'eau.



Fiche 3 : Visite du 16 octobre 2021

Informations générales

Type de projet : Agrandissement et rénovation géré en partie en auto-construction

Système constructif : Poteau-Poutre

Propriétaire : Jean-Paul Meurens

Architecte : Jean-Marie Delhayé

Année de construction : 2012

Adresse : Rue des banquions, 2 à Olne

Photos du chantier



Photo 1 : Soubassement et structure principale



Photo 2 : Structure couverte et encadrements de baies



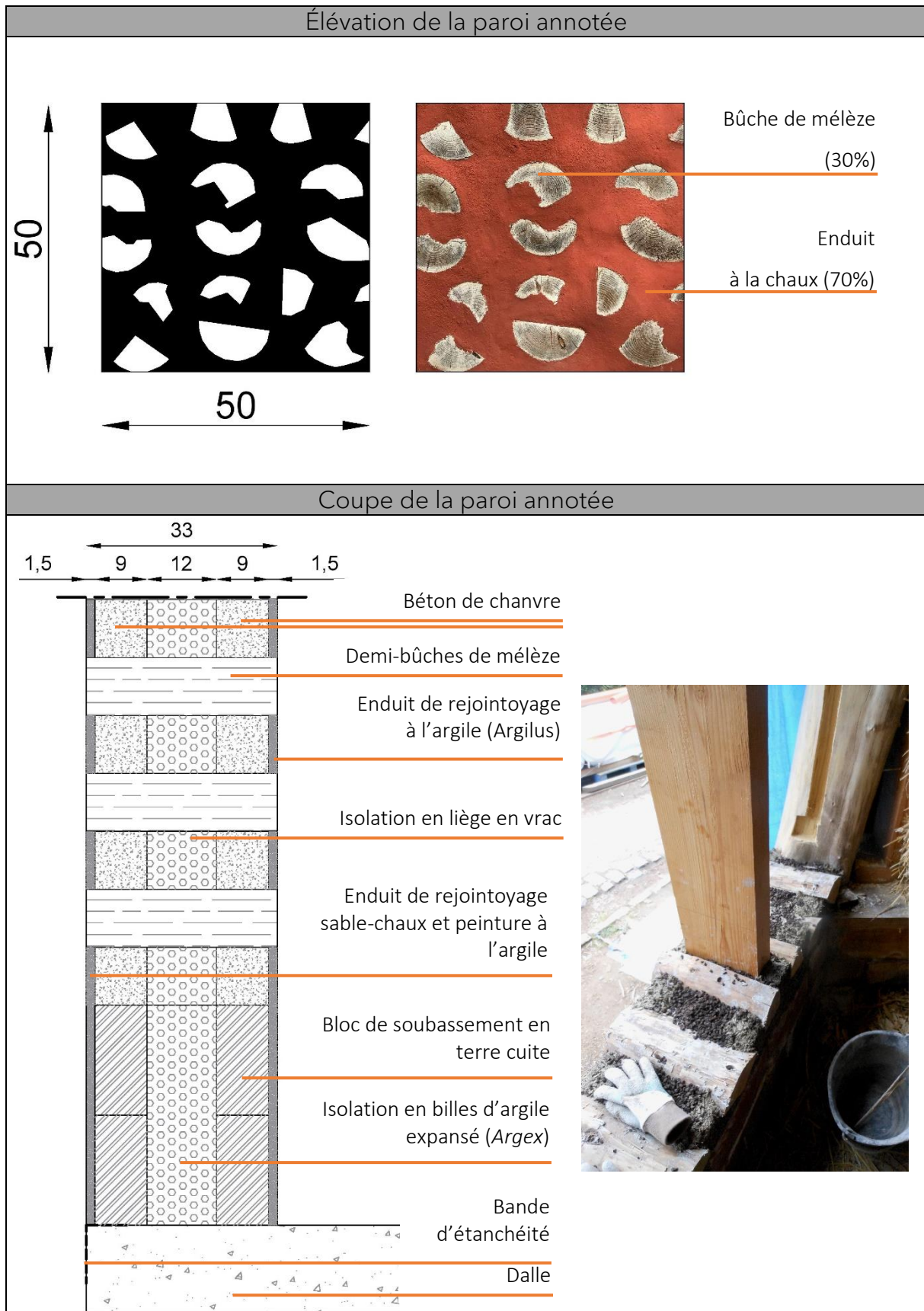
Photo 8 : Mise en œuvre bois-cordé, encadrements et châssis



Photo 9 : Raccord en toiture

Composition de la paroi

Orientation de la paroi étudiée : Plein Sud



Calcul théorique de la valeur U (W/m²K)

Type de bois : Mélèze

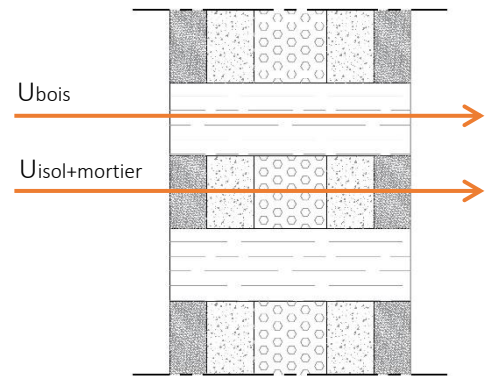
Pourcentage : 30%

Type de liant : Béton de chanvre

Type d'isolant : Liège en Vrac

Enduit : à base de chaux et à l'argile

Pourcentage : 70%



Calculs :

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,33}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,18}{0,12} + \frac{0,015}{0,8} + \frac{0,015}{0,95} + \frac{0,12}{0,045} + \frac{1}{23}} = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,3 \times 0,95) + (0,7 \times 0,23) = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Formules :

$$R = \frac{\text{Epaisseur (en M)}}{\text{Lambda}}$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{int.}} + \sum R + R_{\text{ext.}}}$$

Conclusions/observations

- Débordement de toiture tout le long de la façade en bois cordé et celle-ci est orientée plein Sud.
- Soubassement conséquent.
- Variante esthétique : utilisation de bouteilles en verre qui remplacent certaines bûches et réalisation de dessins avec celles-ci.



Mur en bois cordé côté intérieur



→ État général de la paroi : Très bon mais les finitions datent de 2020, donc peut être un peu trop tôt pour déterminer sa durée dans le temps.

Informations générales

Type de projet : Nouvelle construction gérée en auto-construction

Système constructif : Poteau-Poutre

Propriétaire : Georges Langellé

Architecte : Jean-Marie Delhayé

Année de construction : 1997

Adresse : Rue des Chafors, 11 à Hamois

Photos du chantier



Photo 1 : Fondations et soubassement



Photo 2 : Structure principale



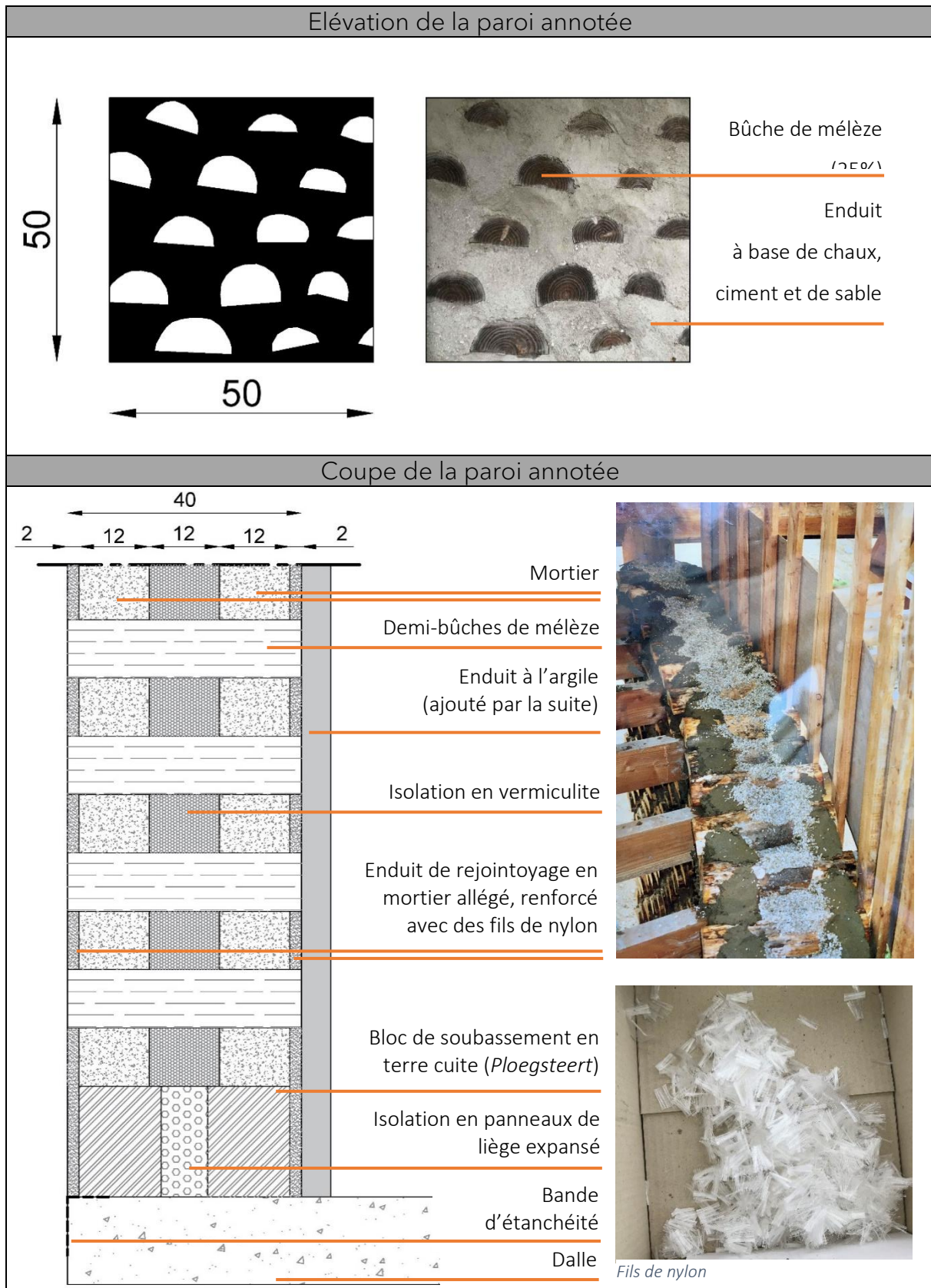
Photo 3 : Mise en œuvre bois cordé et pied de mur



Photo 4 : Mise en œuvre bois cordé, raccord en toiture et encadrements de baies

Composition de la paroi

Orientation de la paroi étudiée : Ouest



Calcul théorique de la valeur U (W/m²K)

Type de bois : Mélèze

Pourcentage : 25%

Type de liant : Mortier chaux/ciment/sable/sciure

Type d'isolant : Vermiculite

Enduit : Même composition que le mortier avec des fils de nylon

Pourcentage : 75%

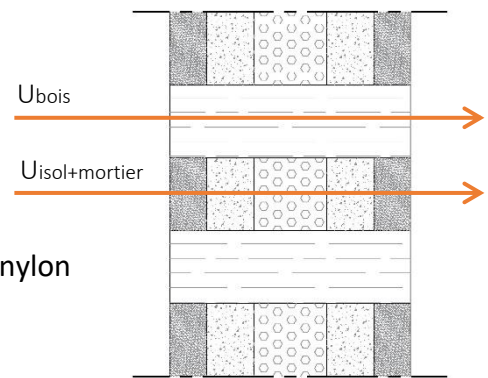
Calculs :

$$U_{\text{bois}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,4}{0,15 \times 2,5} + \frac{1}{23}} = 0,81 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{isol+mortier}} = \frac{1}{\frac{1}{8} + \frac{0,04}{1} + \frac{0,24}{0,6} + \frac{0,12}{0,045} + \frac{1}{23}} = 0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_{\text{parois}} = (0,25 \times 0,81) + (0,75 \times 0,31) = 0,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

-> Sans prendre en compte les 5cm d'argile ajouté par la suite



Formules :

$$R = \frac{\text{Epaisseur (en M)}}{\text{Lambda}}$$

$$U = \frac{1}{R_{\text{int.}} + \sum R + R_{\text{ext.}}}$$

Conclusions/observations



Façade principale en bois cordé et débordant de toiture



Façade principale en bois cordé, vue de face



Fissures

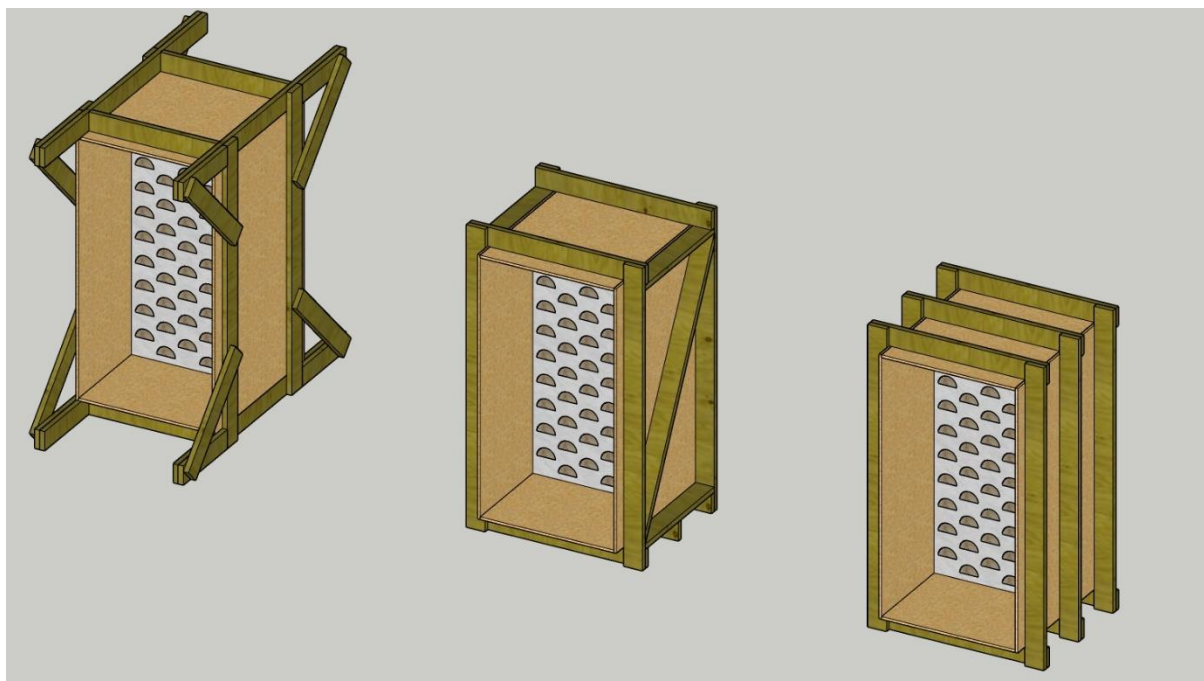
- Travail avec des demi-bûche positionnées toutes dans le même sens
 - Grand débordant de toiture
 - Un test blower-door a été réalisé par l'entreprise EURECA. Je ne dispose malheureusement pas des résultats mais ils ont constaté qu'il y avait de la perte au niveau des murs en bois cordé. Ils ont donc ajouté un enduit de 5 centimètres d'argile du côté intérieur de tous les murs en bois cordé pour pallier le problème d'étanchéité à l'air et ajouter de l'inertie aux parois.
- État général de la paroi : relativement bon, retraits et fissures aux endroits les plus exposés

Annexe 3 : Fiches préparatoires du prototype

Fiche 1 : Construction du caisson et proposition de mise en œuvre

Construction du « cadre » et de la boîte étanche

Voici les trois propositions imaginées avec les ressources en bois mises à ma disposition par la faculté : des SLS de 140x38x2220 mm et de 140x38x1380 mm. Nous réaliserons donc le prototype directement dans le caisson. Les dimensions intérieures de chaque caisson est de 1m de large sur 1,9m de haut et 0,59/67,5/1,22m de profondeur (suivant la largeur des panneaux OSB utilisés). Les dimensions de la porte soufflante sont donc respectées.

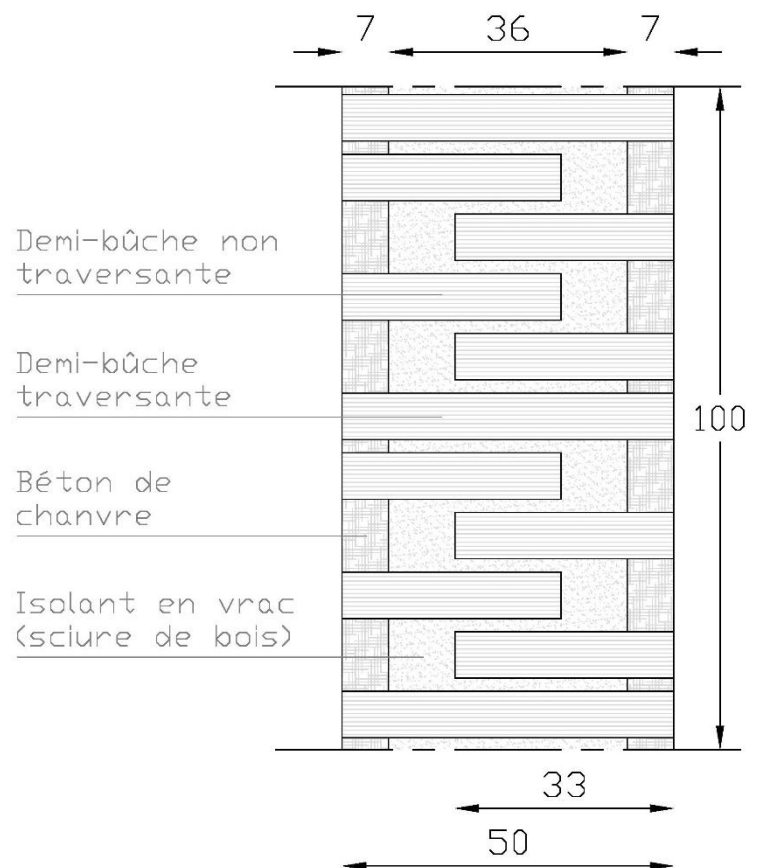
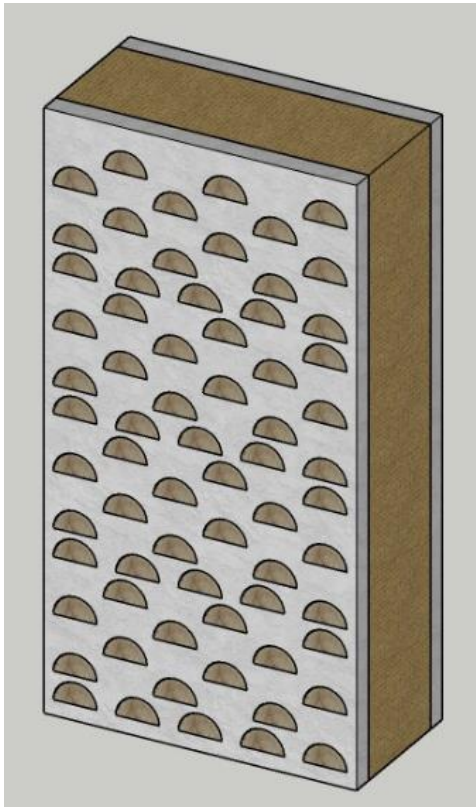


Prototype et type de mise en œuvre envisagée

Proposition 1 :

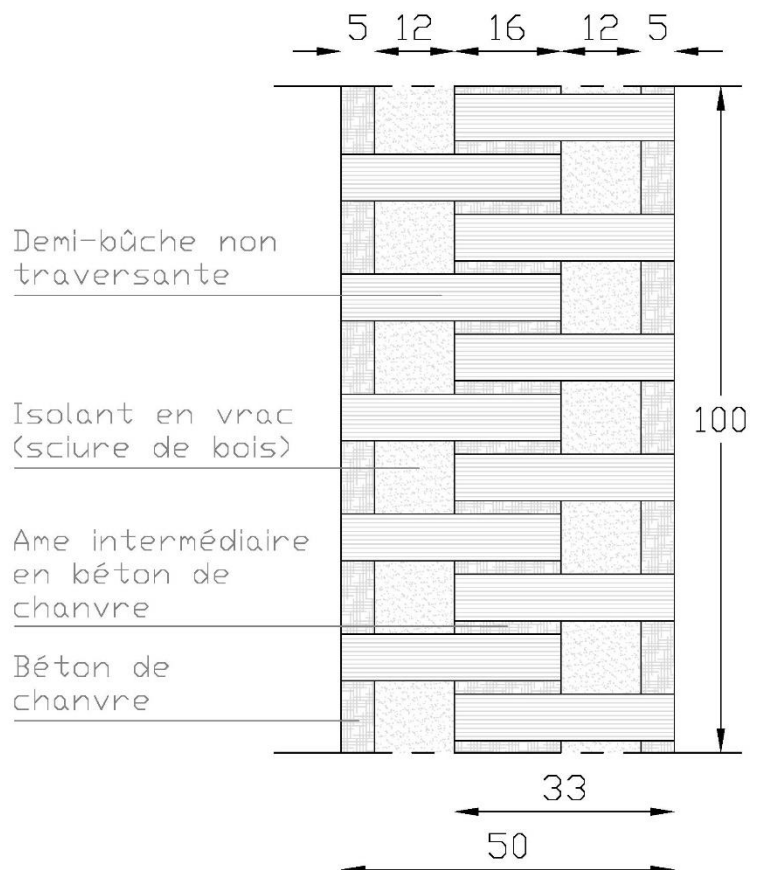
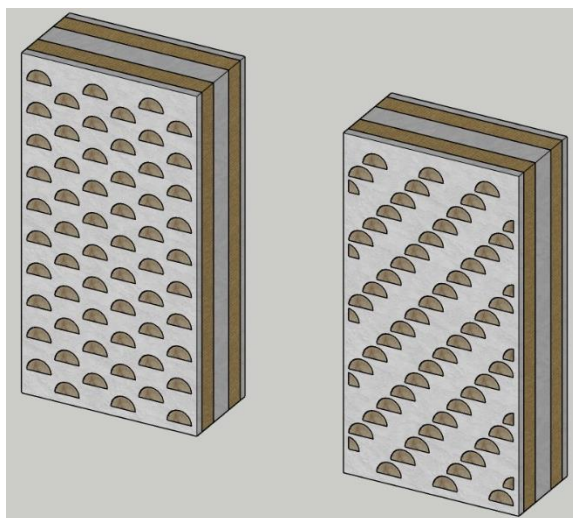
Cette proposition aurait des éléments de bois complètement traversants (bûche de 50cm de long) et d'autre partiellement (bûche de 33cm de long) disposés en alternance. Les éléments traversants permettent un maintien structurel en allant de part et d'autre de la paroi. Les éléments qui ne le sont pas permettent de minimiser les ponts thermiques venant du fil du bois.

Problème : le bois dont je dispose actuellement étant déjà débité en 33cm de long et les bûches mises en alternance n'étant maçonnées que d'un côté, elles risquent de se laisser aller à partir d'un moment dû à un éventuel tassement de l'isolant en vrac.

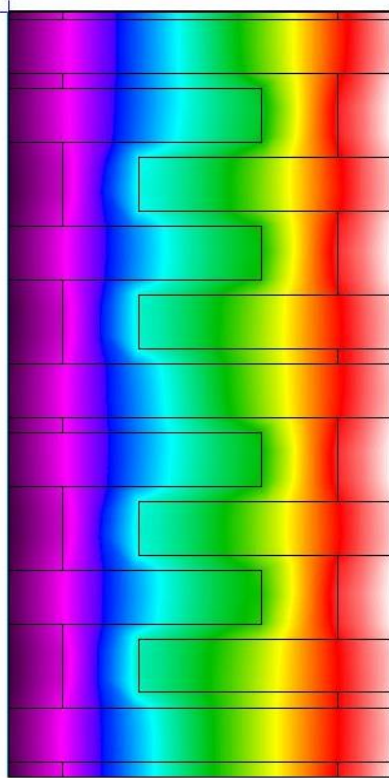


Proposition 2 :

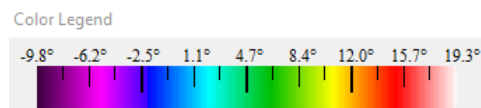
Dans cette proposition, les bûches sont disposées en alternance afin d'éviter tout pont thermique et aucune d'entre elles n'est complètement traversante. Une âme intermédiaire en béton de chanvre est à envisager afin d'assurer un bon maintien de part et d'autre de chaque bûche. Cette proposition nécessite une mise en œuvre un peu plus complexe mais sera probablement plus performante.



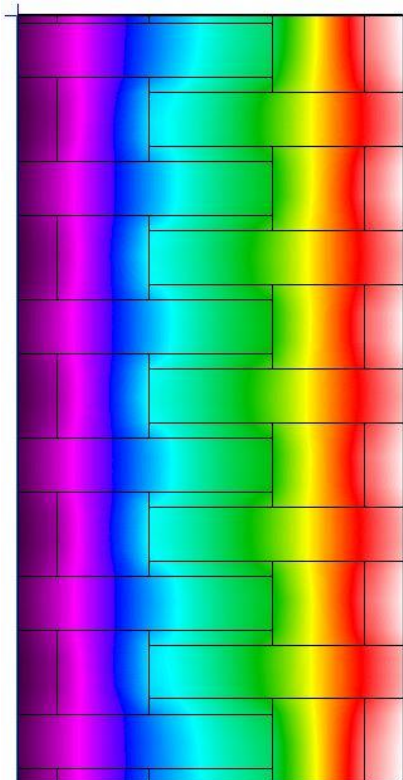
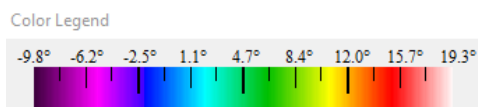
Étude des propositions via l'outil Therm :



Pour la proposition 1, avec des éléments complètement traversants, nous arrivons à un facteur U de **0,39 W/m²-K**. Le flux thermique



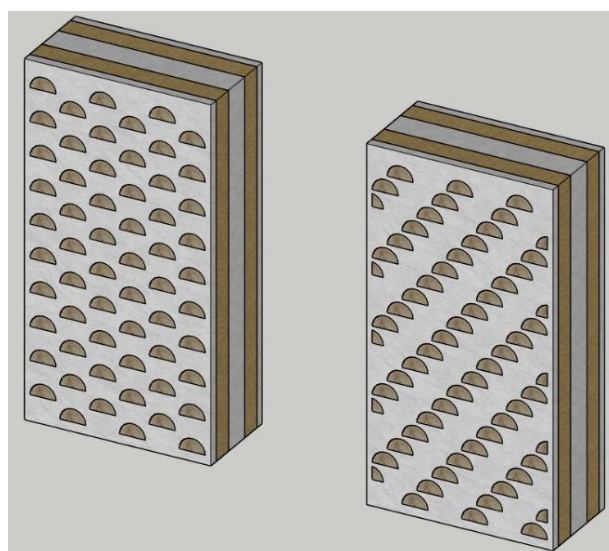
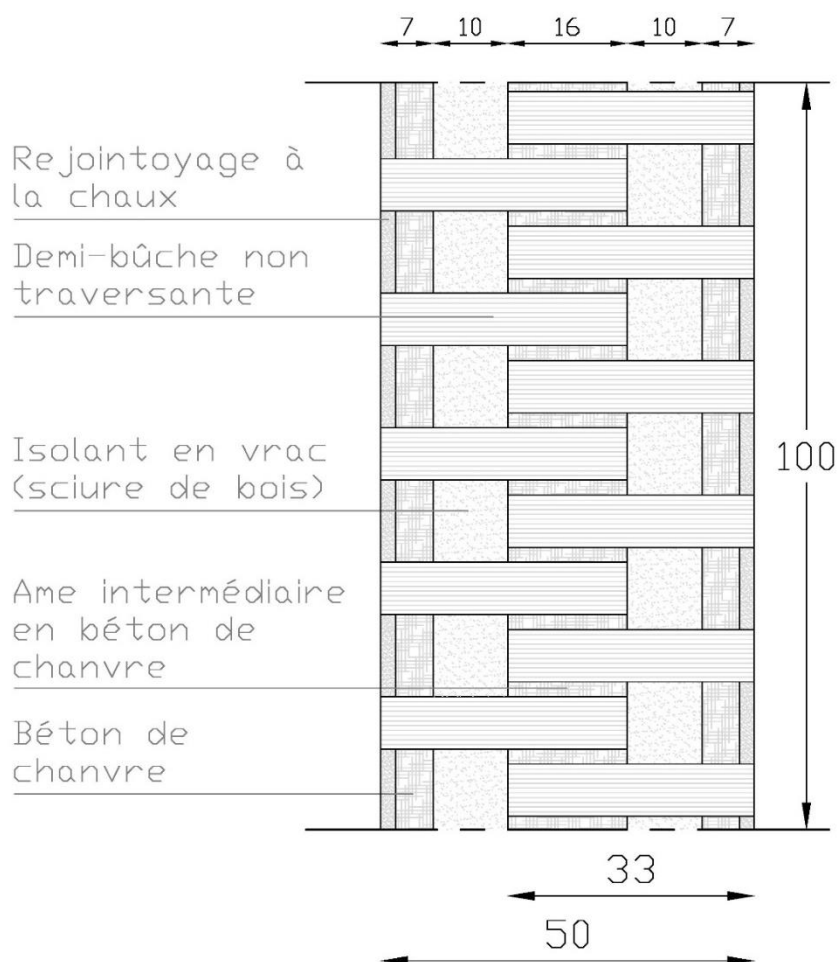
Pour la proposition 2, sans éléments traversants, nous arrivons à un facteur U de **0,35 W/m²-K**. Le flux thermique est plus



Remarque : Nous n'atteignons toujours pas le facteur U exigé par la PEB qui est de 0.24 W/m²-K. Après d'autres tests, pour l'atteindre, il faut faire une paroi de 60cm d'épaisseur ou diminuer le taux de bois et utiliser un isolant plus performant que la sciure de bois.

Fiche 2 : Protocole de mise en œuvre

Détails :



Test à blanc :

L'idée est de réaliser un premier test à blanc dans le caisson fabriqué pour l'expérimentation afin de déterminer ses pertes et, ainsi, pouvoir les déduire lorsque nous réaliserons les tests sur la paroi. Pour représenter les pertes par cm^2 , l'idéal serait de faire un second test avec un trou volontaire de 1cm^2 .

Mise en œuvre selon le guide de chez IsoHemp :

Pour les quantités, voir tableur Excel « Ratio/proportions/valeur U »

Lors de la mise en œuvre, la température ambiante doit toujours être comprise entre 5° et 30°C .

Le mélange doit toujours être homogène avec un bon enrobage de la chènevotte par le liant. La durée d'utilisation du béton de chanvre est, en moyenne, de **30 minutes** et le temps de prise est de **120 minutes** en fonction des conditions climatiques et de la teneur en eau du mélange.

Mélange :



Pour réaliser 1m^3 :

- 1) En premier lieu, verser 2 seaux de 10L d'eau, c'est-à-dire 80% de la quantité nécessaire.
- 2) Ensuite, ajouter petit à petit 1 sac de chaux ProKalk dans la bétonnière en s'assurant d'incorporer la chaux directement dans l'eau.
- 3) Laisser tourner quelques minutes pour faire gonfler la chaux le temps de voir apparaître une laitance.
- 4) Ensuite, ouvrir le ballot de chanvre pour l'aérer. Verser petit à petit la quantité de chanvre nécessaire, dans ce cas-ci, 100L (un demi sac) jusqu'à l'obtention d'un mélange pâteux. Ajouter les 5L d'eau restants et corriger si nécessaire.
- 5) Laisser tourner maximum quelques minutes. Analyser le mélange en le prenant en main pour vérifier que la quantité d'eau soit adaptée et éviter ainsi l'apparition de petites boulettes. Rajouter un peu d'eau si nécessaire.
- 6) Vider ensuite la bétonnière dans une cuvette ou une brouette. Le mélange doit être mis en œuvre dans les 30 minutes. Répéter l'opération autant de fois que nécessaire.

Pour le montage de la paroi, commencer par un lit de mortier et d'isolant, placer ensuite les bûches et répéter les lits de mortier en comblant les vides entre les bûches et en ajoutant l'isolant en vrac au fur et à mesure.

Répéter l'opération autant de fois qu'il le faut.

Vérifier le niveau après chaque ligne de bûches.

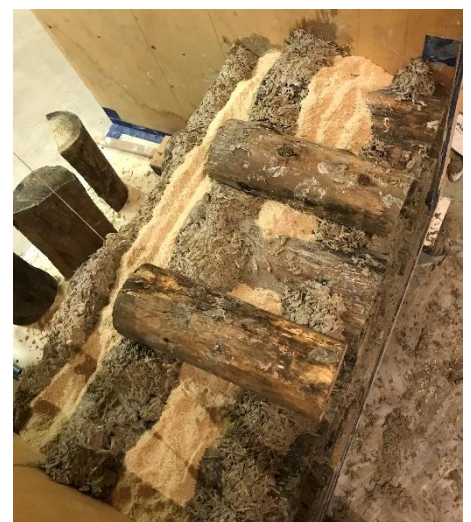
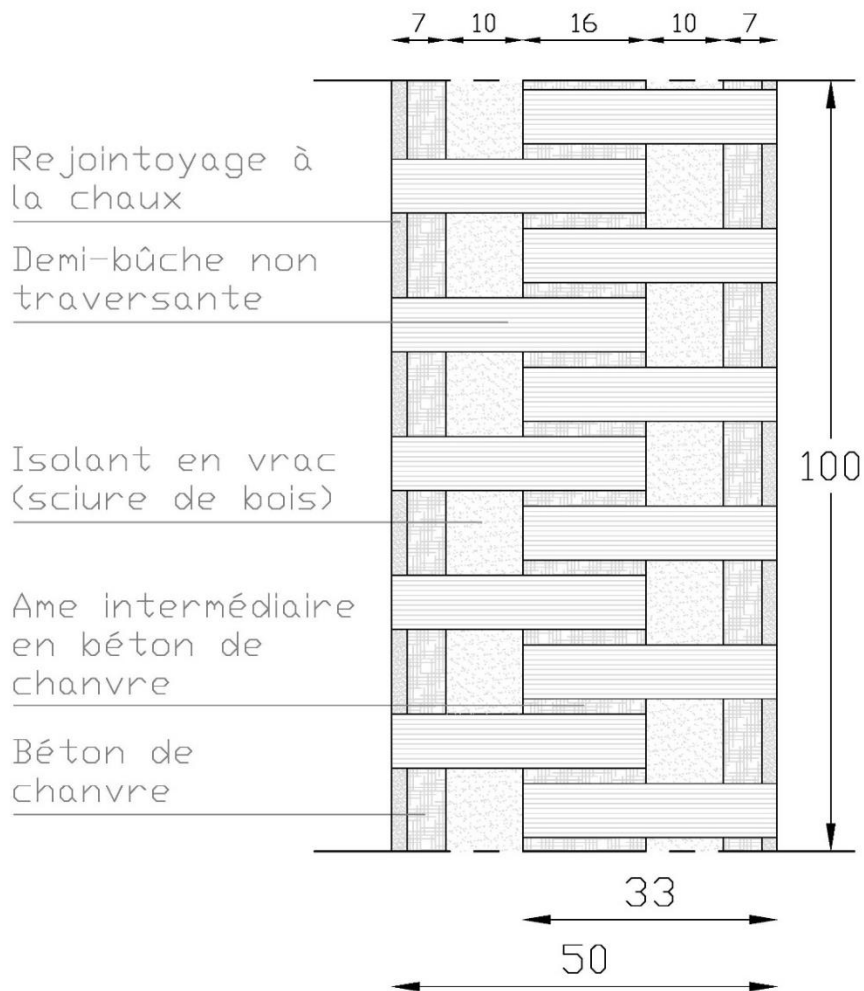
Ne pas oublier de **réaliser une « échancrure »** entre le cadre et la paroi maçonnée pour le joint d'étanchéité.

L'application de la finition se fait après le séchage complet du béton de chanvre. Celui-ci se fait en fonction de la ventilation des locaux, du taux d'humidité ambiant et de l'épaisseur mise en place. Les pièces doivent être aérées afin de favoriser le séchage. En fonction des conditions locales, **il faut compter environ 1 semaine de séchage par cm de béton de chanvre**. La perméabilité à la vapeur d'eau des bétons de chanvre ne doit pas être entravée. Pensez à dépoussiérer les murs banchés avant de les enduire.

Fin de la mise en œuvre prévue le 2 février → premier test et rejointoyage **mi-mars** et seconde phase de test **à partir de début avril**.

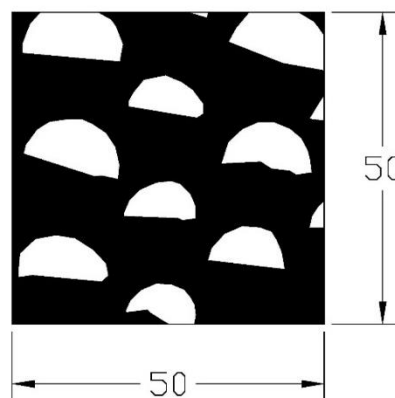
Fiche 3 : Premiers résultats et rejointoyage

Détails et photo de la mise en œuvre :

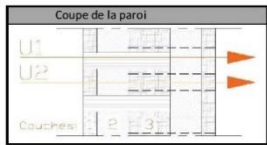


Résultats :

On estime 30% de bois sur chaque face et on obtient un λ de $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$. On arrive à un pourcentage de bois inférieur à ce qui était prévu et donc une meilleure valeur U.



Cases jaunes -> données variable	
Données de la paroi	
Composition	Lambda
Mélèze (dans le sens du fil)	0,375
Sciure de bois	0,045
Enduit à la chaux	0,8
Béton de chanvre Isohemp	0,07
Epaisseur totale de la paroi (m)	0,5



Méthode de calcul n°1			
U1 (avec bois)		U2 (sans bois)	
Epaisseur (m)	Résistance thermique (K/W)	Epaisseur (m)	Résistance thermique (K/W)
0,33	0,88	0	0,00
0,1	2,22	0,2	4,44
0,02	0,025	0,04	0,05
0,05	0,71	0,3	4,29
Valeur U total (W/m²K)	0,25	Valeur U total (W/m²K)	0,11
Pourcentage	60%	Pourcentage	40%

Méthode de calcul n°2							
Calcul par couche							
Dénomination	Nombre	Epaisseur (m)	Pourcentage bois	Résistance thermique bois (K/W)	Pourcentage restant	Résistance thermique restant (K/W)	RT total (K/W)
Couche 1 (rejointoyage)	2	0,02	30%	0,0075	70%	0,0175	0,05
Couche 2 (béton chanv.)	2	0,05	30%	0,04	70%	0,5	1,08
Couche 3 (isolant)	2	0,1	30%	0,08	70%	1,56	3,27
Couche 4 (Ame centrale)	1	0,2	60%	0,32	40%	1,14	1,46
Valeur U total de la paroi (W/m²K)							0,17

Mise en œuvre du rejointoyage avec la chaux NHL 3.5 Lafarge :

CARACTÉRISTIQUES

- **APPELLATION NORMATIVE :** NHL 3,5 CE
- **COULEUR LUMINANCE L* :** 92
- **DÉBUT DE PRISE :** 5h10
- **RÉSISTANCE À 28 JOURS :** 5 MPa
(NF EN 459-1 : 3,5 Mpa ≤ R ≤ 10 Mpa)
- **TAUX DE CHAUX LIBRE :** 44 %
(NF EN 459-1 : ≥ 25 %)
- **CHAUX 100% NATURELLE :**
sans ciment ni adjuvant

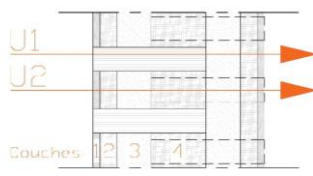
DOSAGES			
	Dosage équivalent Kg de chaux/m³ de sable	Sable 0/5 mm	Chaux
ENDUITS SUR BÂTI ANCIEN CORPS D'ENDUIT	300 À 350 Kg/m³	🪣 x 2,5	🪣 x 1
ENDUITS SUR BÂTI ANCIEN FINITION	250 À 300 Kg/m³	🪣 x 3	🪣 x 1
REJOINTOIEMENT	250 À 300 Kg/m³	🪣 x 3	🪣 x 1
MAÇONNERIE DE PIERRES DURES	350 À 450 Kg/m³	🪣 x 2	🪣 x 1
MAÇONNERIE DE PIERRES FERMES	250 À 400 Kg/m³	🪣 x 3	🪣 x 1
MAÇONNERIE DE PIERRES TENDRES	200 À 300 Kg/m³	🪣 x 4	🪣 x 1
SCELLEMENT DE CARREAUX DE TERRE CUITE	300 À 400 Kg/m³	🪣 x 2,5	🪣 x 1

Dosages donnés à titre indicatif et pouvant varier suivant les matériaux régionaux et le taux d'hygrométrie des granulats.

Conseil de Nicolas Félix : 2,5 parts de sable pour 1 de chaux. Réaliser le mélange à sec dans un récipient à part afin de pouvoir ajuster le mélange s'il y a trop d'eau. La consistance doit être crémeuse. Application à la spatule et à la langue de chat.

Annexe 4 : Tableurs Excel

Tableur 1 : Méthodes de calcul valeurs U suivant les pourcentages et calculs des proportions/quantités pour la mise en œuvre

Cases jaunes -> données variable	
Données de la paroi	
Composition	Lambda
Mélèze (dans le sens du fil)	0,375
Sciure de bois	0,045
Enduit à la chaux	0,8
Béton de chanvre Isohemp	0,07
Epaisseur totale de la paroi (m)	0,5
Coupe de la paroi	
	

Méthode de calcul n°1							
U1 (avec bois)				U2 (sans bois)			
Epaisseur (m)		Resistance thermique (K/W)		Epaisseur (m)		Resistance thermique (K/W)	
0,33		0,88		0		0,00	
0,1		2,22		0,2		4,44	
0,02		0,025		0,04		0,05	
0,05		0,71		0,3		4,29	
Valeur U total (W/m²K)		0,25		Valeur U total (W/m²K)		0,11	
Pourcentage		70%		Pourcentage		30%	

Tableur 2 : Valeurs récoltées, valeurs extrapolées et graphiques des résultats

