
Mémoire de fin d'études : "Vers une sobriété matérielle des bâtiments : la paille comme ressource historique et emblématique dans un contexte de réémergence des matériaux biosourcés. Étude de cas et recherche autour de la composition de parois"

Auteur : Simon, Clément

Promoteur(s) : Laurent, François; Chaumont, Henri

Faculté : Faculté d'Architecture

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

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/12559>

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.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE — FACULTÉ D'ARCHITECTURE

Vers une sobriété matérielle des bâtiments : la paille comme
ressource historique et emblématique dans un contexte de
réémergence des matériaux biosourcés.

Étude de cas et recherche autour de la composition de parois.

Travail de fin d'études présenté par Clément SIMON en vue de l'obtention du grade de
Master en Architecture

Sous la direction de : François LAURENT et Henri CHAUMONT

Année académique 2020-2021

Axe de recherche : Haute Qualité Construite

*Maison de paille où l'on rit vaut mieux qu'un palais
où l'on pleure.*

Proverbe chinois

Remerciements

Par ces mots, je tiens à remercier tout particulièrement mon promoteur François Laurent pour sa patience, son implication et le soutien qu'il m'a apporté durant l'écriture de ce travail.

Par ces mots, je tiens à remercier mon co-promoteur, Henri Chaumont pour la vision pertinente qu'il a su apporter à mon travail.

Par ces mots, je tiens à remercier Stephen Toumpsin pour avoir accepté de m'accompagner et de me présenter les projets analysés dans ce travail, lui apportant ainsi une grande plus-value.

Par ces mots, je tiens à remercier Anne Dengis d'avoir accepté de consacrer du temps et d'apporter un regard extérieur à ce travail.

Par ces mots, je tiens à remercier Nicolas Halkin et Astrid Huyghe, Olivier Georges et Anne Philippe, Romain Hallet et Laurie Vanderveck, pour m'avoir accueilli dans leur habitation respective et avoir répondu à toutes mes questions.

Par ces mots, je tiens à remercier Odile Vandermeeren qui, avec Stephen Toumpsin, m'a invité à participer au stage d'écoconstruction que j'ai pu introduire dans mon travail.

Par ces mots, je tiens à remercier grandement « mon équipe », composée de ma maman, ma sœur et ma compagne, qui ont accepté de relire ce travail durant son écriture.

Par ces mots, je tiens à remercier les membres de ma famille et les proches qui ont su m'apporter le soutien moral nécessaire durant cette période d'écriture intense.

Enfin, même si ces mots ne seront jamais suffisants, je tiens à remercier mon parrain pour m'avoir transmis ses passions de la construction, du travail manuel, du travail rigoureux, pour m'avoir appris à être passionné et m'avoir soutenu jusqu'au bout...
En pensées.

Motivations

Passionné par la construction et le travail du bois, c'est tout naturellement que le choix de ma question de recherche s'est tourné vers la construction mettant en œuvre des systèmes constructifs en bois. J'ai dans un premier temps décidé d'étudier les éléments de façade préfabriqués en bois, car je trouvais intéressant le fait de déplacer le travail du chantier à l'atelier. Je me suis cependant rendu compte, durant ma recherche, que ce sujet avait sans doute été choisi avec un peu de hâte et ne correspondait pas tout à fait à mes convictions et ma manière de penser l'architecture. J'ai donc décidé de remettre en question mon sujet de recherche.

Pour réaliser ce changement de sujet de la meilleure manière possible, j'ai repris tous les éléments qui me tenaient à cœur. J'ai en effet toujours apprécié le travail manuel et je rêve depuis toujours de pouvoir construire mon habitation moi-même, comme l'avait fait mon parrain. Le domaine de la construction, voire de l'autoconstruction par le biais de systèmes constructifs en bois me semblait donc pertinent à explorer. Après discussion avec mon promoteur, j'ai décidé de contacter différentes personnes afin de discuter avec elles de ce changement d'orientation. Toutes les discussions que j'ai pu avoir se sont avérées d'un grand secours pour moi durant cette période intense de remise en question où mes idées affluaient, certes avec abondance, mais également dans un désordre le plus total...

C'est au cours de ces discussions tournées dans un premier temps autour du sujet de l'autoconstruction que j'ai découvert un certain intérêt concernant les matériaux biosourcés. L'utilisation de ce type de matériau aujourd'hui me semble en effet s'imposer à nous suite à la transition écologique que nous traversons actuellement. Mais alors comment pouvons-nous concevoir des façades sobres en termes de matériaux alors que celles-ci doivent répondre aux critères actuels en matière d'énergie ? Quels matériaux mettre en valeur ? Ne pouvons-nous pas prendre exemple sur nos ancêtres ?

Table des matières

Remerciements	2
Motivations	3
Table des matières	4
Avant-propos.....	7
1. Introduction théorique à la question de recherche	8
1.1. État de l'art.....	9
1.1.1. Matériaux biosourcés.....	9
1.1.2. Architecture vernaculaire.....	12
1.1.3. L'architecture terre-paille, d'où vient-elle ?.....	15
○ La maison Feuillette.....	17
1.1.4. Lien entre paille et enduits.....	18
○ Quelques exemples de compositions de parois.....	20
○ Test du boudin.....	20
○ Test de la sédimentation	21
1.1.5. Production de la paille.....	22
1.1.6. Petites ou grosses bottes	25
○ Exemple 1 : gros ballots.....	30
○ Exemple 1 : petits ballots	31
○ Exemple 2 : gros ballots.....	32
○ Exemple 2 : petits ballots	33
○ Conclusion	34
1.1.7. Bilan performanciel des bâtiments en paille.....	35
○ Isolation thermique	35
○ Inertie thermique	37
○ Étanchéité à l'air	38
○ Humidité relative de l'air	39
○ Structure	40
○ Impacts environnementaux	40
1.1.8. La paille et le grand méchant loup ?.....	40
○ Résistance et réaction au feu	41
○ Les insectes et les rongeurs	43
○ Les tempêtes	43
1.1.9. La construction paille en Belgique.....	44

1.2.	Techniques particulières	45
1.2.1.	La paille porteuse	45
1.2.2.	Le GREB.....	47
2.	Renforcement des acquis théoriques par les études de cas	48
2.1.	Méthodologie	49
o	Rencontre avec les autoconstructeurs.....	49
o	Introduction du chantier	49
o	Analyse	49
2.2.	Acquisition des ressources	51
2.3.	Choix des projets	52
o	Localisation	52
o	Systèmes constructifs	52
o	L'autoconstruction	52
2.4.	Études de cas.....	53
2.4.1.	Analyse du projet HALKIN.....	53
o	Introduction du projet.....	53
o	Analyse	55
2.4.2.	Analyse du projet GEORGES	60
o	Introduction du projet.....	60
o	Analyse	62
2.4.3.	Analyse du projet HALLET.....	69
o	Introduction du projet.....	69
o	Analyse	71
2.4.4.	Analyse commune	77
o	Analyse comparative	77
o	Axonométrie comparative : maison HALKIN	81
o	Axonométrie comparative : maison GEORGES.....	82
o	Axonométrie comparative : maison HALLET	83
3.	Recherche et mise en application sur base de la théorie et la pratique.....	84
3.1.	Prolégomènes.....	85
3.2.	Questionnements et recherches	86
3.2.1.	Mise en situation	86
3.2.2.	Des surfaces courbes	87
3.2.3.	La forme et les matériaux au service des performances.....	91
o	Performances énergétiques	92

○ Performances structurelles	93
○ Une manière de vivre	95
3.3. Conception d'une cabane en terre-paille pour un stage.....	97
3.3.1. Données du stage	97
3.3.2. Documents	98
○ Plan	98
○ Coupe.....	99
○ Élévation	99
4. Conclusion	100
○ Matériau biosourcé par excellence	102
○ Des performances tout à fait correctes	102
○ Un matériau fiable	103
○ Dans l'ère du temps	103
○ In fine	Erreur ! Signet non défini.
4.1. Limites et domaines d'études potentiels	105
4.2. Perspectives personnelles	106
Tables des illustrations	107
Table des figures.....	107
Table des graphiques.....	109
Table des tableaux.....	109
5. Ouvrages et ressources	110
6. Annexes	113

Avant-propos

Construisons-nous aujourd'hui comme nous construisions au début du vingtième siècle ?
Construisons-nous aujourd'hui comme nous construirons demain ? L'Histoire n'est-elle pas un éternel recommencement ?

Depuis plusieurs dizaines d'années, nous assistons à une véritable course technologique et performancielle. Dans le secteur de la construction, les bâtiments sont de plus en plus isolés et de mieux en mieux équipés pour le confort des utilisateurs... Mais à quel prix ? D'où viennent ces matériaux si performants utilisés pour retenir thermiquement, ou non, nos bâtiments ? Comment sont fabriqués les outils technologiques mis en place ? Mais surtout quelle dépendance créent-ils pour les utilisateurs ? Si la question de la fabrication et de l'utilisation semble ici très importante, il ne faut surtout pas oublier celle du recyclage : que deviennent tous ces matériaux en fin de vie ?

Suite à la transition écologique que nous traversons actuellement, toutes ces questions prennent de plus en plus d'importance et deviennent des éléments prépondérants dans certains choix architecturaux. Il semble que nous ayons compris que l'augmentation des performances énergétiques des bâtiments n'était pas suffisante à elle seule afin d'obtenir des constructions saines et respectueuses de l'environnement. En effet, il est impératif de ne pas mettre de côté tout ce qui doit être mis en place pour atteindre ces performances. Tous les matériaux utilisés et mis en œuvre dans ce contexte doivent également correspondre à cette démarche écologique. Ceux-ci, appelés ici « matériaux sobres », se présentent comme un compromis, le plus juste possible, entre tout ce qui a été dit un peu plus haut. Ils proposent en règle générale de bonnes performances énergétiques avec un bilan d'énergies grises souvent très réduit du fait qu'ils nécessitent souvent peu de transformations. La terre et la paille sont présentées ici telles des ambassadrices des matériaux biosourcés.

1. Introduction théorique à la question de recherche

*Construire c'est collaborer avec la terre : c'est
mettre une marque humaine sur un paysage qui en
sera modifié à jamais.*

Marguerite Yourcenar

1.1. État de l'art

1.1.1. Matériaux biosourcés

Pour introduire ce chapitre mettant en avant les matériaux biosourcés, il me semble important de parler de l'ère industrielle. La première révolution industrielle débutera vers la fin du XVIII^e siècle, alors que la machine à vapeur est inventée et que le processus de mécanisation fait son apparition dans le secteur de l'industrie. La construction de ponts et le développement des chemins de fer en Europe, grâce à l'industrie métallurgique, accélèrent les échanges humains, matériels et donc, par conséquent, économiques. C'est avec l'extraction du charbon, du pétrole et du gaz à la fin du XIX^e siècle qu'est enclenchée la seconde révolution industrielle. Les métaux comme l'acier ou l'aluminium peuvent maintenant être utiles aux industries de pointe qui se développent de plus en plus rapidement. Ce processus de mécanisation va, depuis ses débuts, modifier totalement le regard des penseurs sur l'industrie. Ainsi, on retiendra la division du travail et l'analyse des effets de la parcellisation sur la productivité, dont une description avait été faite par Adam Smith dans une fabrique d'épingles. Mais également le taylorisme qui réorganise scientifiquement le travail industriel par une utilisation optimisée des outils alors existants et la suppression des gestes superflus. Et enfin le fordisme, qui fit son apparition dans l'usine Ford de Highland-Park, mettant en avant le travail à la chaîne.

C'est dans ce contexte que les matériaux naturels sont peu à peu délaissés au profit des nouvelles inventions en matière de construction. Dans un premier temps, le monde de la construction est révolutionné grâce à l'apparition de l'acier, et plus tard du béton armé. Ces nouveaux matériaux permettent en outre d'obtenir de beaucoup plus grandes portées qu'avec les matériaux utilisés jusqu'alors. Les recherches concernant ces matériaux ne se sont alors jamais arrêtées et on les trouve toujours de plus en plus performants. Viennent ensuite tous les matériaux dits « synthétiques » tels que le plastique, les résines ou encore les polyesters. Ces matériaux sont rarement utilisés comme éléments structurels mais sont aujourd'hui omniprésents dans le monde de la construction.

Les matériaux biosourcés sont, par définition, issus de matière d'origine biologique, végétale ou animale. Il est facilement compréhensible que ces matériaux aient pu disparaître au cours

de la révolution industrielle car ils nécessitent rarement des transformations conséquentes avant d'être mis en œuvre. Cela a pour conséquence qu'ils nécessitent plus de soins lors de leur mise en place sur chantier, donc plus de temps, plus de connaissances et de main d'œuvre qualifiée, soit des valeurs qui vont à l'encontre des théories industrielles de l'époque, qui ont opéré comme une sorte de « tabula rasa » dans le monde de la construction.

Depuis plusieurs années déjà, nous évaluons les bâtiments selon des performances énergétiques qui sont établies en faisant la somme de plusieurs critères, tels que l'isolation ou leur consommation en chauffage par exemple. Mais ces critères ne sont pas les seuls à prendre en compte lorsque l'on analyse les besoins en ressources d'une construction. Les énergies grises prennent également une grande importance. L'énergie grise d'un matériau représente l'analyse du cycle complet de sa vie, de l'extraction de la matière première, en passant par sa transformation et/ou son ajout à d'autres composants, jusqu'à sa commercialisation et sa mise en œuvre, sans oublier bien évidemment son éventuel recyclage. Cette partie « grise » des énergies totales, utiles à l'utilisation d'une construction, peut avoisiner 40 % sur 50 ans.

Les matériaux biosourcés ne nécessitent donc que très peu, voire aucune émission d'énergies grises, contrairement à l'acier, le béton ou encore les matériaux synthétiques. De plus, ces matériaux possèdent une très bonne empreinte environnementale. Prenons pour exemple le cas d'une habitation construite avec du bois, de la terre crue et de la paille comme principaux matériaux. Si cette habitation était amenée à être démolie, tous ces matériaux pourraient sans aucun problème être déposés, voire ensevelis sous la terre sans engendrer un seul dégât ou méfait pour notre planète puisqu'ils n'ont pas, ou très peu été transformés et qu'ils retournent à leur point d'extraction. Après tout, n'est-ce pas l'une des plus vieilles pratiques de l'homme ? « *Memento, homo, quia pulvis es, et in pulverem reverteris.* » ou plutôt « *Souviens-toi, homme, que tu es poussière et que tu redeviendras poussière.* » (Genèse (Gn 3, 19)) Ce principe de fin de vie des matériaux pousse les limites et semble atteindre le paroxysme de la théorie de l'économie circulaire.

Il est tout de même important de noter que si ces matériaux ne sont pas « gourmands » en termes d'énergies grises, ils nécessitent tout de même une main d'œuvre qualifiée et souvent plus importante que les matériaux « conventionnels ». Il n'existe malheureusement pas encore, aujourd'hui, de critères d'évaluation qui permettent de dire avec précision si un

matériau est biosourcé ou non, seul le bon sens des architectes et constructeurs est de mise dans ce cas-ci. Ci-dessous, un tableau présentant différents matériaux ainsi que leurs énergies grises respectives en kWh/m³.

Tableau 1 – Energies grises de différents matériaux biosourcés (ECOCONSO, 2016)

Matériaux porteurs :	Béton armé	1 850
	Béton	500
	Brique terre cuite	1200
	Brique terre crue	120
	Béton cellulaire	200
	Bois	180
	Bois lamellé-collé	2 200
	Métaux :	Acier
Cuivre		140 000
Aluminium		190 000
Zinc		180 000
Isolants :	Verre cellulaire	700 à 1300
	Panneau en fibre de bois	1 400
	Mousse polyuréthane	1 000 à 1 200
	Polystyrène expansé	450
	Liège	450
	Argile expansé	300
	Laine de verre	250
	Laine de roche	150
	Cellulose de bois	50
	Fibre de chanvre	40
	Fibres de lin	30
	Béton de chaux-chanvre	450
	Ponces naturelles	16
	Ouate de cellulose injectée	100
	Panneaux de ouate de cellulose	152
	Laine de mouton	56
Paille	0	

Il est important de préciser qu'en construction, un mètre cube de béton n'est pas utilisé de la même manière qu'un mètre cube d'acier ou encore de paille, toutes les valeurs présentées ci-dessus doivent donc être lues en tenant compte de ceci. De plus, la valeur « 0 » du matériau paille vient du fait qu'il est considéré comme un déchet agricole n'étant pas d'origine, utile à la construction.

Nous voilà donc aujourd'hui dans l'ère post-industrielle, où l'utilisation de matériaux biosourcés fait sans aucun doute référence aux matériaux autrefois utilisés dans le secteur de la construction. Ces matériaux, tant repoussés par les grands industriels, semblent être, à ce jour, l'une des meilleures solutions si nous voulons arriver, ou plutôt revenir, à une architecture respectueuse de son environnement, soit une architecture mettant en œuvre des matériaux à faibles énergies grises afin de construire des bâtiments avec une empreinte environnementale raisonnable.

Comme expliqué un peu plus tôt, ces matériaux nécessitent souvent une main d'œuvre qualifiée et importante. De ce fait, ils sont souvent mis en œuvre par des autoconstructeurs, qui réduisent ainsi fortement le coût de leur construction. En sachant que ces matériaux proviennent souvent des alentours de constructions (la paille est pressée à quelques kilomètres de là seulement, la terre utilisée vient des déblais du chantier, le bois est européen, etc.), ne pouvons-nous pas considérer cela comme un retour à une sorte d'architecture vernaculaire ?

1.1.2. Architecture vernaculaire

« L'architecture symbolise de toute évidence autre chose qu'un toit au-dessus de notre tête, ou la contrainte de 4 murs. » (Rudofsky, 1977/1979, p.12).

Qu'est-ce que l'architecture vernaculaire exactement ?

Cette architecture peut porter différents noms : indigène, anonyme, rurale, spontanée. Le terme « spontanée » est, selon moi, très intéressant puisque, contrairement à une grande partie de l'architecture réalisée aujourd'hui, le vernaculaire met en avant les qualités intrinsèques du



Figure 1 – Habitation vernaculaire

Source : Pixabay (libre de droits)

site, qu'il s'agisse de l'orientation, de la configuration du terrain ou des espèces végétales présentes sur le site. Nous avons en effet tendance aujourd'hui à nous faciliter la tâche en aplanissant les terrains et en dégagant tout ce qui gêne sur notre passage avant de construire. Nous sommes-nous déjà posé la question de savoir comment les anciens réussissaient à construire sans les moyens technologiques actuels, mais surtout, en respectant le site qui les accueillait ? L'utilisation du terme « spontanée » prend également tout son sens

lorsque l'on parle des matériaux. L'architecture vernaculaire part en effet du principe d'utilisation des ressources immédiatement disponibles sur place, ne nécessitant ainsi aucun transport entre leur lieu d'extraction et le lieu de construction. Ces ressources peuvent donc être qualifiées de « ressources spontanées ». *« En certains endroits, l'usage exclusif de matériaux de construction locaux garantit à lui seul la persistance des méthodes de travail consacrées. Au contraire, quand des méthodes et des matériaux étrangers sont introduits, les traditions locales s'effacent, les coutumes sont remplacées par des courants, et le vernaculaire périt. »* (Rudofsky, 1977/1979, p.13).

L'architecture n'a pas attendu l'arrivée de l'homme sur terre pour exister... En effet, les forces élémentaires de la nature à elles seules avaient déjà façonné une forme primitive d'architecture. Si nous prenons pour exemple les cavernes, elles ne sont pas l'œuvre de l'homme qui s'en est cependant servi comme abri pendant plusieurs centaines d'années. L'homme n'a d'ailleurs fait que prendre exemple sur les animaux. *« Il est peu probable que les castors eurent l'idée de se mettre à construire des digues en regardant des hommes faire ce travail. C'est plutôt le contraire qui arriva. L'homme, vraisemblablement, commença par prendre exemple sur ses cousins les singes anthropomorphes. »* (Rudofsky, 1964/1977, p.1-2). Ainsi, l'architecture dans ses débuts peut se résumer en une forme d'appropriation empirique des espaces ou des techniques de construction. L'homme n'a rien inventé, mais a tout mis au point. C'est en se construisant une expérience de vivre (pour ne pas dire survivre) que celui-ci a pu déterminer et créer l'architecture vernaculaire telle que nous la connaissons actuellement.

C'est dans ce contexte d'architecture vernaculaire que l'on retrouve les premières utilisations de la terre comme matériau. Les habitats troglodytes d'un petit village souterrain situé non loin de Lo-Yang en Chine du nord sont en effet creusés directement dans le sol. Aucun déplacement de la terre n'est donc nécessaire et les plafonds à l'intérieur des volumes ainsi créés prennent une forme voûtée afin de ne pas s'effondrer. Les techniques se sont ensuite développées jusqu'à permettre la construction, il y a plusieurs millénaires d'ici, de tours en terre crue. C'est au Yémen que l'on retrouve les premiers gratte-ciel en terre. Ces bâtiments de plusieurs étages sont toujours debout et résistent particulièrement bien aux tremblements de terre grâce à leur masse.



Figure 2 – Habitation avec un toit en paille

Source : Pixabay (libre de droits)

La paille a quant à elle connu ses premières utilisations comme composante d'enduit avec la terre, servant ainsi de liant et améliorant la tenue de l'enduit sur ses différents supports. Mais les constructeurs de l'époque avaient cependant déjà bien compris le rôle isolant contre le chaud et le froid que la paille pouvait jouer dans une construction, sans parler de sa durabilité

exemplaire, comme en témoignent les toitures en chaume de maisons.

Dès lors, que penser d'un retour à une architecture vernaculaire aujourd'hui ? Même si l'architecture sans architecte est difficilement envisageable à ce jour, certaines techniques de construction nous font en effet penser que nous tendons vers ce genre d'architecture. Qu'il s'agisse d'architecture bioclimatique ou de conception à partir de matériaux biosourcés, le leitmotiv est le même : nous voulons retrouver une architecture qui respecte son contexte de manière durable. Le domaine de l'autoconstruction en est certainement la représentation la plus fidèle. En effet, ces matériaux sont peu coûteux mais nécessitent souvent beaucoup de main d'œuvre, plus qualifiée, afin d'être mis en œuvre. Les autoconstructeurs imitent ainsi nos ancêtres en bâtissant eux-mêmes leur maison mais ne possèdent pas les compétences nécessaires. Cela s'explique facilement par la complexité de notre civilisation ; nous sommes formatés afin de connaître moins de choses, mais mieux. Prenons un exemple simple : le nombre des exploitations agricoles a fortement diminué au cours des derniers siècles. Il fut un temps où tout le monde avait sa vache et son petit lopin de terre à cultiver. Mais les mœurs ont bien changé. Aujourd'hui, nous ne produisons plus notre propre nourriture, nous ne réparons plus nos voitures, nous ne fabriquons plus nos meubles et nous ne construisons plus notre maison nous-mêmes. C'est à ce moment-là que le rôle de l'architecte devient prépondérant (dans le cadre de l'autoconstruction en parallèle avec l'architecture vernaculaire), celui-ci est un accompagnant, un véritable guide pour les autoconstructeurs, une personne de référence. Plus que jamais, la confiance est de mise, que ce soit du côté des autoconstructeurs qui apprennent de l'architecte ou du côté de l'architecte qui fait construire

ce qu'il a dessiné par des personnes « inexpérimentées ». Chacun des deux intervenants a tout intérêt à faire confiance à l'autre mais également à être à l'écoute.

Voilà pourquoi nous pouvons, selon moi, parler d'architecture vernaculaire (avec architecte) dans le cadre de l'autoconstruction mettant en œuvre des matériaux biosourcés. Ces démarches sont le fruit de longue réflexion concernant une construction avec un objectif durable de respecter son contexte et, à plus grande échelle, le contexte de toutes les autres constructions, la Terre.

1.1.3. L'architecture terre-paille, d'où vient-elle ?

L'utilisation de la terre en architecture peut s'expliquer facilement de par sa simplicité d'utilisation, sa disponibilité partout et à prix souvent très réduits, et la faible transformation nécessaire sans aucun apport de chaleur (cuisson) ou de produits chimiques, lui procurant ainsi un impact environnemental extrêmement faible. La paille nécessite quant à elle un peu plus de transformations que la terre mais reste autant disponible que cette dernière et présente, globalement, les mêmes impacts environnementaux. Ces atouts sont en lien direct avec l'architecture vernaculaire.

C'est vers le XV^e siècle ACN, lors des premières sédentarisation, que la terre fait son apparition comme matériau dans le monde de la construction. Les installations alors construites afin de remplacer les abris dans les cavernes se résument souvent à des petites huttes circulaires aux murs enduits de terre crue. Ces parois étaient



Figure 3 – Empilements de briques en terre crue

Source : Pixabay (libre de droits)

principalement constituées de clayonnages ; il s'agit d'une structure mettant en œuvre des assemblages de claies. Les claies sont des pieux et des branchages assemblés afin d'obtenir un cadre porteur sur lequel viendra se poser la terre crue, qui permettra, une fois séchée, de rigidifier l'ensemble. Dans certains cas, de la paille est ajoutée à la terre argileuse comme liant afin d'augmenter les capacités adhésives de celle-ci.

Il faudra attendre à peu près neuf siècles, soit le IX^e siècle ACN, avant que cette technique évolue. La terre deviendra un élément porteur des constructions, c'est l'apparition de « constructions en couches ». Cette technique débutera avec l'utilisation de mottes de terre humide empilées pour faire les murs et évoluera vers des blocs de terres séchés au soleil. C'est l'avènement des blocs préfabriqués. Ces briques de terre crue seront ensuite liaisonnées avec de la terre et donneront naissance, plus tard, aux briques de terre crue.

C'est à la fin du XIX^e siècle et après la création des premières presses à balle aux États-Unis que la paille fera son apparition comme matériau, sans être nécessairement associée à la terre. Les bottes de paille seront utilisées comme éléments porteurs de la construction. Pour ce faire, celles-ci seront agencées en quinconce comme des briques. Cette technique sera nommée la « technique de Nebraska », de par son lieu d'apparition. Le manque d'argile et de bois dans ces régions a en effet forcé les pionniers à changer leurs habitudes de construction. L'apparition de la presse a été perçue comme une opportunité d'innover et de construire de manière nouvelle pour faire face au climat difficile de l'hiver sur place. Ces constructions ont d'ailleurs jusqu'ici fait preuve d'une incroyable durabilité. *« Las, les bâtiments en paille résistent très bien aux tempêtes et tornades, n'en déplaie aux sceptiques ; il n'en est pour preuve que de nombreux bâtiments américains construits en paille porteuse qui sont toujours debout après un siècle de bons et loyaux services. »* (Floissac, 2012, p.27)

C'est après la Seconde Guerre mondiale, alors que l'Allemagne cherchait un moyen de reconstruire rapidement et avec des moyens qui nécessitaient peu de matière première, que la construction en terre paille a fait son apparition en Europe. Les premières subtilisations de ce matériau dans nos contrées se sont faites sous forme de torchis léger. L'Allemagne fut d'ailleurs le premier pays européen à mettre au point des normes constructives concernant ce matériau, le considérant comme fiable et ayant fait ses preuves.

○ La maison Feuillette

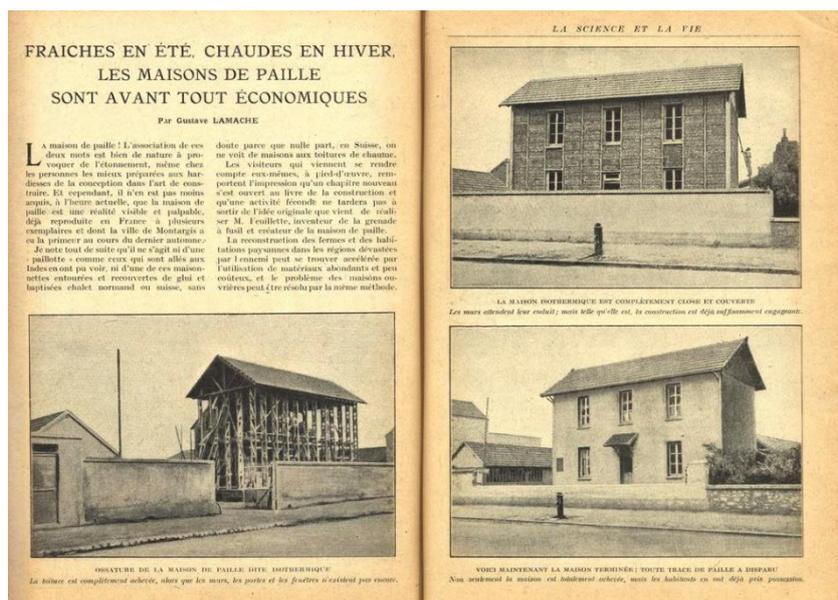


Figure 4 – Article sur la maison Feuillette

Source : Lamache, G. (1921, p.484)

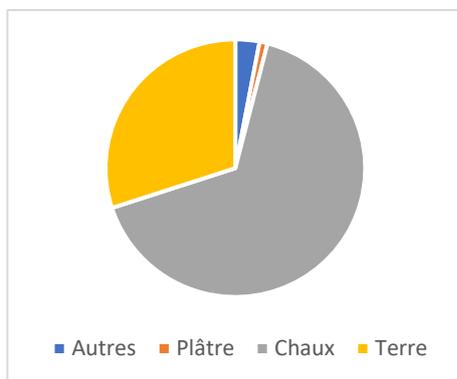
Cependant, c'est en France que l'on retrouve le plus vieux bâtiment européen construit en paille à ce jour. Il serait également le plus vieux bâtiment au monde à associer une structure en bois avec un remplissage en paille. Cette maison a eu exactement cent ans en 2020 et est appelée la « Maison Feuillette », du nom de son concepteur, l'ingénieur Émile Feuillette. Il s'agit de l'un des premiers bâtiments à mettre au point une structure portante dans laquelle la paille avait pour seule vocation d'isoler. Les bottes étaient ici un simple élément de remplissage et n'avaient aucune valeur structurelle. La structure se compose de poutres treillis en bois dimensionnées au strict minimum et assemblées à chaque coin du bâtiment afin d'obtenir un ensemble rigidifié. À côté de cet édifice se trouve un hangar, construit exactement avec la même ossature qui n'a cependant pas été remplie de paille. Il nous est donc possible de voir et comprendre comment a été édifié le squelette de la maison. Aujourd'hui, nous pouvons constater que le bâtiment n'a subi que très peu de travaux depuis sa construction, les enduits ainsi que les menuiseries sont d'ailleurs d'origine. Son diagnostic des performances énergétiques est plus que convenable compte tenu du simple vitrage et de son extension mal isolée. *« La maison la Feuillette est un magnifique témoignage de la durabilité et de la pertinence de l'utilisation des fibres végétales dans la construction. »* (Floissac, 2012, p.222).

Aujourd'hui, on constate un véritable engouement pour cette technique de construction, certainement grâce à la sobriété matérielle qu'elle procure aux bâtiments mais également de par sa simplicité de mise en œuvre et son coût modéré, surtout dans le cadre de l'autoconstruction. Les deux techniques de construction en paille que sont la paille comme élément de remplissage et la paille comme élément structurel, autrefois mises au point, sont

toujours utilisées. Dans l'utilisation de la paille comme simple isolant (remplissage), on distingue une sous-catégorie qui consiste en la préfabrication en atelier de caissons en bois. Ces caissons peuvent être porteurs ou non et peuvent également être préremplis en atelier ou déplacés vides et remplis une fois arrivés sur le chantier. Cette méthode de préfabrication, qui a par ailleurs déjà touché beaucoup d'autres systèmes constructifs, a pour but de minimiser le temps de travail sur chantier en déplaçant ce dernier dans les ateliers, afin de faciliter le travail et de réduire tous les risques sur chantier liés à la sécurité, aux intempéries, etc. Nous pouvons aujourd'hui nous rendre compte à travers l'histoire que si nous avons commencé à construire des bâtiments en terre et en paille avec des techniques dites « primitives » pour ensuite évoluer vers des matériaux soi-disant « modernes » mis en œuvre comme éléments isolants et structurels avec des énergies grises importantes, notre « conscience » nous pousse à revenir vers l'utilisation de matériaux biosourcés, tels que la terre et la paille, rarement dissociables.

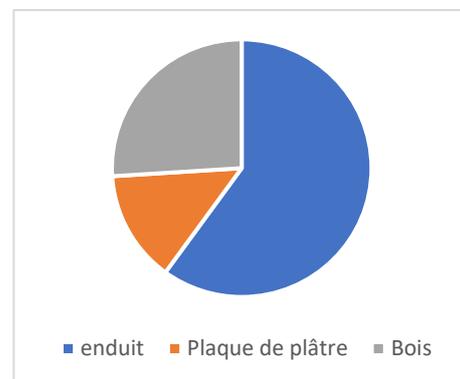
1.1.4. Lien entre paille et enduits

Ce n'est certainement pas dû au hasard si les finitions intérieures et extérieures des constructions isolées avec de la paille sont souvent composées d'enduit à base de terre crue. Dans le cas d'une finition extérieure, on ajoute très souvent de la chaux au mélange car elle ne permet pas à l'eau de passer au travers de l'enduit. En revanche, l'humidité, elle, a la possibilité de migrer à travers l'enduit.



Graphique 1 - Enduits appliqués à l'extérieur

Source : valeurs selon Floissac L, 2012



Graphique 2 - Enduits appliqués à l'intérieur

Source : valeurs selon Floissac L, 2012

Historiquement, la paille en tant que matériau a toujours été associée à la terre crue, qui est l'une des composantes principales des enduits. Nos ancêtres ne connaissaient effectivement pas encore les bottes de paille et ne possédaient pas les moyens techniques pour en réaliser... Ils n'en avaient d'ailleurs aucune utilité, car la paille, à cette époque, était stockée en vrac dans de grands hangars ou en fagots. Le fagot est en effet l'ancêtre du ballot, la paille était rangée avec toutes ses fibres parallèles et ficelée à l'aide d'une corde pour maintenir le tout. Ainsi, la paille était associée à la terre crue afin de jouer un rôle de liant dans l'enduit pour permettre la fabrication de briques de terre crue ou encore de torchis. Ce service était rendu dans les deux sens, car si l'enduit était beaucoup plus résistant avec l'utilisation de la paille, la terre crue permettait de lier cette paille et de la faire tenir dans les murs. Bien sûr, tous les autres matériaux composés de fibres tels que le chanvre et le lin peuvent être utilisés comme liants.

Aujourd'hui, la paille est souvent utilisée comme matériau isolant en remplissage entre les éléments d'ossature. Cette paille est un excellent support d'enduit, qu'elle soit compactée en ballots ou en vrac. Aucun matériau ne doit être ajouté à la paille pour permettre la bonne adhérence de l'enduit si ce n'est le Gobetis. Il s'agit d'une couche d'accrochage de l'enduit sur les ballots, composée de terre crue, de plâtre ou de chaux. Cette couche peut être appliquée soit en la projetant à l'aide d'un pistolet, soit en la lançant à l'aide d'outils sur les bottes de paille disposées dans la structure. Il ne faut pas le confondre avec la barbotine que nous pourrions qualifier de « boue de protection », et non de support d'enduit. Elle peut être appliquée en la projetant ou en trampant les bottes de paille directement dans une « piscine » de barbotine avant de les insérer dans le complexe de la paroi. Cette deuxième technique permet une meilleure pénétration de la barbotine dans la botte de paille, lui conférant ainsi une meilleure protection, mais est cependant difficilement réalisable lorsque l'on met en œuvre une isolation constituée de grosses bottes de paille. Pour en revenir au gobetis, une fois que le mélange a bien pris dans la paille, celle-ci présente une surface extrêmement dure et prête à recevoir les différentes couches de l'enduit de finition. Le nombre de couches à appliquer dépend des recettes d'enduit utilisées ainsi que de l'exposition aux intempéries de celui-ci, ou encore du rôle qu'il jouera dans la future construction. Il est en effet possible que dans certains cas l'enduit joue un rôle structurel, voire de contreventement de la structure. Celui-ci intervient également dans les performances de l'enveloppe du bâtiment.

○ *Quelques exemples de compositions de parois*

Tableau 2 - Caractéristiques thermiques de « parois types » isolées en paille

Source : Floissac, L. (2012, p.36)

Caractéristiques thermiques de « parois types » isolées en paille						
Composition simplifiée	Face intérieure		Épaisseur	Résistance thermique	Déphasage	Inertie quotidienne côté intérieur
			cm	m ² .K/W	heures	kJ/m ² .K
Enduit extérieur Petites bottes Enduit intérieur	Enduit épais – 50 mm		45	7,2	19,4	87
Bardage ventilé Petites bottes Enduit intérieur			49	7,7	19,5	106
Enduit extérieur Grosses bottes Enduit intérieur			128	14,5	40	108
Enduit extérieur Petites bottes Plaques intérieures	Plaques – 13 mm		42	7,4	16,4	23
Plaque extérieure Petites bottes Plaques intérieures			41	7,4	16,4	23
Bardage Petites bottes Plaques intérieures			46	7,6	18,6	22
Enduit extérieur Petites bottes Parpaings creux	Mur massif		61	7,3	20	186
Enduit extérieur Petites bottes Bois massif			55	8,5	26	68
Enduit extérieur Terre-paille Enduit intérieur	Béton végétal		42	3,8	17	98
Plaque extérieure Paillettes en vrac Plaques intérieure	Paille en vrac		42	7	17,8	29

Enfin, la couleur des enduits peut être nuancée en fonction des composantes ajoutées lors de leur formation ; ils peuvent également être peints.

Avant de décider de la composition d'un enduit qui sera appliqué sur une façade ou en intérieur, il est important de réaliser différents tests avec la terre crue, si celle-ci provient des déblais du chantier. Dans le cas d'une terre crue commercialisée, une fiche technique avec les résultats détaillés est fournie. La terre argileuse de terrassement utilisée afin de réaliser des enduits doit impérativement être séparée de la terre arable (il s'agit des quelques centimètres présents en surfaces des terrains, son épaisseur peut varier en fonction du type de sol), pour ensuite être tamisée afin d'en enlever tous les gravas qui pourraient s'y trouver. Des tests préliminaires et intuitifs peuvent être réalisés en prenant la terre en main et en essayant de ressentir la viscosité de celle-ci. Une terre cassante ne sera bien évidemment pas adaptée.

○ *Test du boudin*

Afin de pouvoir utiliser une terre pour un enduit, il est important de commencer par définir le taux d'argile présent dans celle-ci ; ce taux doit être au minimum égal à 10 %. Une fois l'échantillon de terre récolté en profondeur et tamisé, le test, comme son nom l'indique,

consiste à réaliser un boudin de terre crue mélangée avec un peu d'eau. Dans le cas où la boulette de terre n'arrive pas à se former, la terre est alors trop sableuse et ne pourra pas être utilisée. Au contraire, si le boudin se forme facilement, cela signifie que le taux d'argile présent dans la terre est de minimum 10 %. Un test complémentaire peut être réalisé en essayant de former un anneau avec le boudin obtenu. Si la terre se casse lors de la formation de cet anneau, la terre est alors limoneuse et se compose de moins de 30 % d'argile. Si l'anneau se forme sans aucune cassure, la terre est alors composée de minimum 30 % d'argile.

○ *Test de la sédimentation*

Ce test vient en complément au premier et sert à déterminer avec plus de précision les composantes de la terre crue récoltée. Le principe est simple, il suffit de disposer l'échantillon de terre dans un bocal en verre ou une bouteille et de le recouvrir d'eau. Après avoir attendu durant 24 heures pour laisser le temps au mélange de bien décanter, on peut alors observer différentes couches formées par les composantes présentes dans l'échantillon. Les matières les plus lourdes se déposeront dans le fond du bocal alors que les plus légères resteront au-dessus.

Dans l'ordre et en partant du dessus, nous pouvons retrouver :

- Déchets organiques,
- Eau décantée,
- Humus,
- Argiles,
- Limons,
- Sables fins,
- Sables grossiers.



Figure 5 – Test de sédimentation

Source : photographie personnelle

Il est important de noter que certaines couches peuvent ne pas être présentes dans le mélange ou l'être en trop petite quantité nécessaire pour être visualisées et mesurées. Il faut ensuite établir le rapport entre chacune des couches et la hauteur totale afin de connaître avec plus ou moins de précision leur pourcentage de présence dans le mélange. Nous pouvons ainsi établir la formule :

$$\frac{\text{Ht matière}}{\text{Ht totale}} = \text{taux de présence du composant dans le volume total en \%}.$$

Ht étant la hauteur et la somme de tous les taux de présence des composants doit être égale à 100 %.

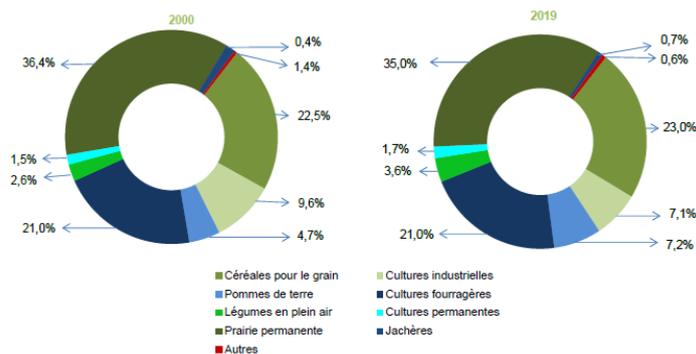
Ainsi, la revalorisation du déchet de chantier « terre » semble tout à fait correspondre à l'utilisation des bottes de paille... Celles-ci peuvent en effet provenir d'un surplus de production agricole.

1.1.5. Production de la paille

Entre 1980 et 2019, on constate une forte diminution structurelle du nombre d'exploitations agricoles en Belgique, engendrant un phénomène majeur qui se résume en une concentration des moyens de production et des surfaces cultivables. Ce phénomène a conduit à la multiplication pratiquement par trois de la surface moyenne par exploitation entre 1980 et 2019. Paradoxalement à cela, on constate une baisse significative de la main d'œuvre dans ce secteur. Cela s'explique facilement par la mécanisation des moyens de production. L'agriculture biologique prend une place de plus en plus importante dans notre pays et montre ainsi sa capacité à s'adapter à l'évolution de notre société.

Ci-dessous, deux graphiques nous montrant l'évolution de l'importance des différents types de cultures en Belgique. Ceux-ci nous montrent particulièrement bien que l'agriculture céréalière prend une grande place dans le système agricole belge : plus d'un tiers de la surface totale cultivée. Cette part n'a que très peu diminué en vingt ans, on constate une faible diminution de 1,4 % seulement.¹

¹ Chiffres et graphiques visible en **Annexe 6.1**.



Graphique 3 – Importance des différentes cultures en Ha

Source : Statbel (2020, p.7)



Figure 6 – Paille hachée lors de la moisson

Source : photographie personnelle

Dans les 35 % consacrés à la production de céréales, il est important de noter que toute la paille récoltée n'est pas utilisée pour faire des bottes. Les exploitants n'ont en effet pas toujours besoin de faire des ballots, que ce soit pour les utiliser pour leur bétail ou encore pour les vendre à d'autres

exploitants. La paille peut en effet être hachée à la sortie de la moissonneuse-batteuse et directement répartie de manière homogène sur les champs. Cette paille, matière organique, va se décomposer sur le sol et en modifier ainsi sa couche supérieure appelée « humus », ce qui va permettre de régénérer une partie des minéraux présents dans la terre.

Si la paille n'est pas hachée, elle va ressortir en andins de la moissonneuse-batteuse, puis ballotée une fois sèche. Les ballots de paille ainsi produits pourront soit être « ronds », soit être « carrés », mais pour des raisons évidentes, nous ne nous intéresserons ici qu'aux balles « carrées ». Une presse hydraulique à paille fonctionne à l'aide d'un pick-up qui ramasse les andins alors que la presse passe par-dessus ceux-ci. Le flux de récolte doit être le plus régulier possible et se fait par le biais d'éléments qui travaillent en complément au pick-up. La paille est ensuite acheminée en continu vers une barre de coupe à l'aide d'un rotor qui oriente les fibres de la paille ramassée. Un système de collecte stocke ensuite la paille pour la libérer dans

le pressoir lorsque la quantité de fourrage est suffisante. L'opérateur, depuis sa cabine, peut régler différents paramètres des bottes de paille. Il peut définir une pression voulue en modifiant les paramètres des vérins hydrauliques présents dans le canal de pressage. Celui-ci peut également définir la longueur des bottes finies, une petite roue crantée suit en effet la production des ballots afin de déterminer leur longueur. Une fois les dimensions finales obtenues, la balle est ficelée automatiquement avant d'être éjectée de la presse.

Les ballots de paille utilisés dans le domaine de la construction ne peuvent pas non plus provenir de n'importe quel type de céréale. En Belgique sont cultivés majoritairement l'escourgeon (appelé orge chez nos voisins français), l'épeautre, l'avoine et le froment. Les bottes de paille provenant des cultures de froment, d'escourgeon et d'épeautre sont préférées dans le cadre de la construction en paille de par leur composition. La paille d'avoine est quant à elle à éviter car elle possède une souplesse importante. Cependant, l'origine de la paille n'a pas trop d'importance lorsque celle-ci est utilisée dans des bétons végétaux ou comme remplissage en vrac. « *La paille à utiliser est donc en priorité celle qui est la plus proche de la construction.* » (Floissac, 2012, p.46).

Les dimensions des bottes de paille peuvent donc varier. La longueur (qui peut être ajustée dans la machine) est souvent comprise en 120 cm et 220 cm, alors que la largeur et la hauteur sont rarement ajustables et dépendent des caractéristiques de la « balloteuse » utilisée. Ces valeurs tournent autour de 70 cm pour la largeur et 90 cm pour la hauteur.

Cette technologie n'est bien évidemment pas arrivée d'un jour à l'autre et un long procédé a d'ailleurs été nécessaire avant d'atteindre de telles performances de production. Les premières presses fonctionnaient avec les mêmes principes de base que les presses actuelles mais étaient beaucoup moins performantes, en termes de



Figure 7 – Ballot de paille

Source : Pixabay (libre de droits)

ramassage des andins ou de pressage de la paille par exemple. Il faut également souligner le fait qu'à l'époque, nous ne disposions pas des mêmes moyens de manutention qu'aujourd'hui. Les ballots devaient donc être de taille plus raisonnable afin de pouvoir être déplacés à la main. Nous remarquerons cependant que la production de petits ballots est loin de s'être arrêtée suite à la création de grandes presses hydrauliques. Les bottes de petites

tailles sont en effet encore très utilisées par les petits exploitants et aujourd'hui même dans le domaine de la construction. Les dimensions de ces petites bottes, comme celles des gros ballots, peuvent varier. La longueur est comprise entre 80 cm et 120 cm alors que la largeur et la hauteur sont d'environ 48 cm par 38 cm.

Il est très important de ne pas presser les balles trop vite après la moisson, la paille doit en effet rester un certain temps au sol afin de sécher. Si la paille est trop humide lors du pressage, c'est-à-dire plus de 20 % d'humidité relative, l'humidité enfermée dans le ballot ne pourra plus partir. Faute d'une bonne circulation d'air à l'intérieur, la température pourra monter jusqu'à 80° Celsius et risque de déclencher un incendie par auto-inflammation des bottes de paille. Le stockage est également une étape très importante et précautionneuse. Les bottes sèches ne doivent pas être exposées aux intempéries avant d'être enfermées dans les parois du complexe isolant des bâtiments. Encore une fois, le manque d'air à l'intérieur risquerait de déclencher une auto-inflammation des bottes de paille isolantes. Des sondes à plonger existent aujourd'hui afin de connaître l'humidité relative de la paille lorsque celle-ci est encore disposée en andains, mais également lorsqu'elle est pressée et entreposée.

1.1.6. Petites ou grosses bottes

Les bottes de paille, utilisées comme matériau de construction, sont comparables aux différents blocs qui existent sur le marché aujourd'hui. Les bottes sont en effet des éléments modulables dont les caractéristiques intrinsèques influent sur le dessin de l'architecte. Cependant, si toutes les dimensions des blocs conventionnels peuvent être modifiées, ce n'est pas nécessairement le cas pour la paille. La modification de sa hauteur est impossible, celle de la largeur difficile. La longueur peut en revanche être modifiée par déficelage et « reficelage » sur chantier ou alors directement définie par la presse qui effectue le travail sur le champ récolté | cf. **1.1.5.** | Les dimensions des ballots sont donc plus contraignantes que celles des blocs de maçonnerie traditionnels et le choix de l'utilisation de grosses ou de petites bottes doit donc être fait en préliminaire de l'étude de la conception du bâtiment.

Les presses utilisées pour réaliser les petites bottes de paille ont un canal de pressage mesurant dans la plupart des cas 36 cm de haut par 46 cm de large. Les ballots qui en sortent ont une légère tendance à se détendre, ce qui leur confère des dimensions finales d'environ

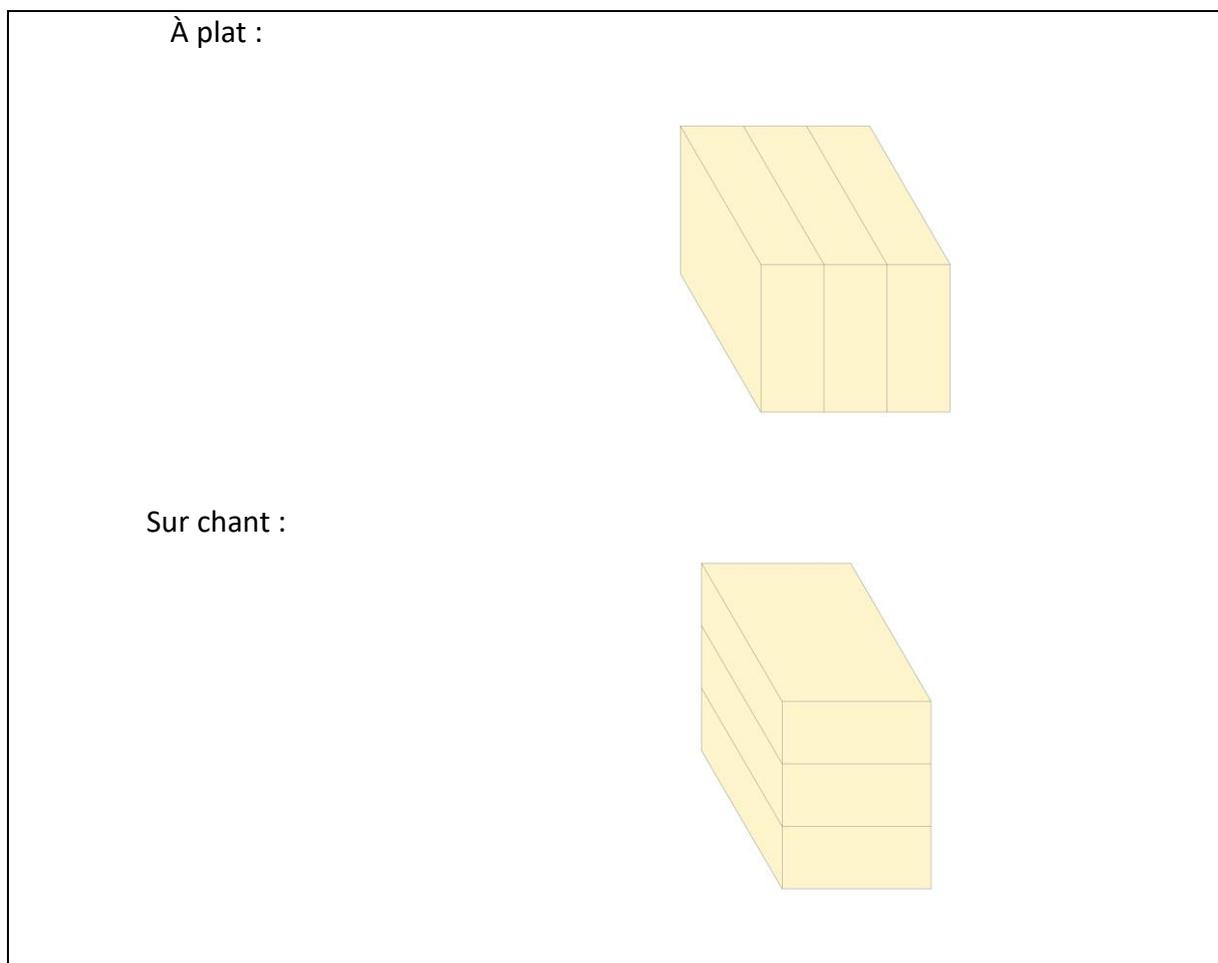
38 cm par 48 cm. Ces dimensions finales peuvent être d'autant plus différentes des dimensions du canal de pressage en fonction du taux de compacité de la paille. Cette compacité varie en fonction du modèle et de l'âge de la presse utilisée et influence directement les qualités isolantes de la paille. Avec des presses plus récentes, nous pouvons obtenir un taux de compactage de l'ordre de 120 kg/m³ environ, alors qu'avec des modèles plus anciens, il sera compris entre 60 et 90 kg/m³. L'utilisation de machines récentes est donc fortement conseillée lorsque l'isolation d'une construction est prévue avec des bottes de petites tailles.

Les presses utilisées pour façonner les bottes de plus grandes tailles sont de manière générale plus récentes que les autres. En effet, la mécanique d'aujourd'hui connaît plus de problèmes et est réputée pour être moins solide que celle d'antan... Les dimensions du canal de pressage de ces machines peuvent varier en fonction des machines, ces dimensions sont choisies lors de l'achat mais ne peuvent plus varier par la suite. Les dimensions de canal les plus courantes sont 90 cm de large par 70 cm de haut, ou encore 120 cm par 80 cm. La longueur peut quant à elle être définie par l'opérateur depuis sa cabine pendant le travail de pressage. Elle peut varier entre 190 cm et 250 cm, largeur maximum d'un plateau de tracteur ou de camion hors convoi exceptionnel. Le taux de compacité des grosses bottes de paille est généralement supérieur à 150 kg/m³ et donc bien meilleur que celui des petites bottes. Les performances isolantes des ballots de grande taille seront donc meilleures que celles de petits ballots. Ce haut taux de compacité permettra, en outre, d'obtenir des dimensions plus fidèles à celles du canal de pressage.

Il est important de noter que le taux de compacité des bottes de paille n'est pas le seul paramètre qui influence la qualité de leurs performances isolantes. L'orientation des fibres y joue également un rôle. Les presses hydrauliques ont une certaine tendance à orienter le sens des fibres de paille dans un même sens lors du pressage des ballots. Le pouvoir isolant de la paille étant plus grand lorsqu'il est traversé par un flux thermique perpendiculaire au sens de ses fibres, les bottes sont par conséquent plus isolantes selon leur positionnement dans un sens ou dans l'autre. Cependant, il n'est pas toujours évident de trouver le bon compromis entre sens de pose des bottes de paille pour les performances énergétiques et facilité de la conception de l'enveloppe. Cette dernière proposition sera souvent préférée à la première, compte tenu du fait que les bottes de paille, peu importe leur orientation, confèrent à la paroi

de très bonnes performances isolantes². Ainsi, il sera préférable d'alterner le sens de pose des ballots lors de leur mise en place dans le complexe. Cette alternance de positionnement permet également de pallier la légère dissymétrie des bottes de paille. « *la position du piston dans le canal de presse, les frottements internes à celui-ci, la dissymétrie des assemblages mécaniques et surtout le côté d'admission de la paille font que les bottes ne sont jamais exactement symétriques.* » (Floissac, 2012, p.27).

Les ballots peuvent ainsi être disposés de différentes manières dans l'enveloppe :



² Certaines études, menées par l'UCL prouvent en effet que l'orientation des fibres présentes dans les bottes de paille n'influence pas vraiment leurs performances isolantes, comme le montre l'**Annexe 6.2**.

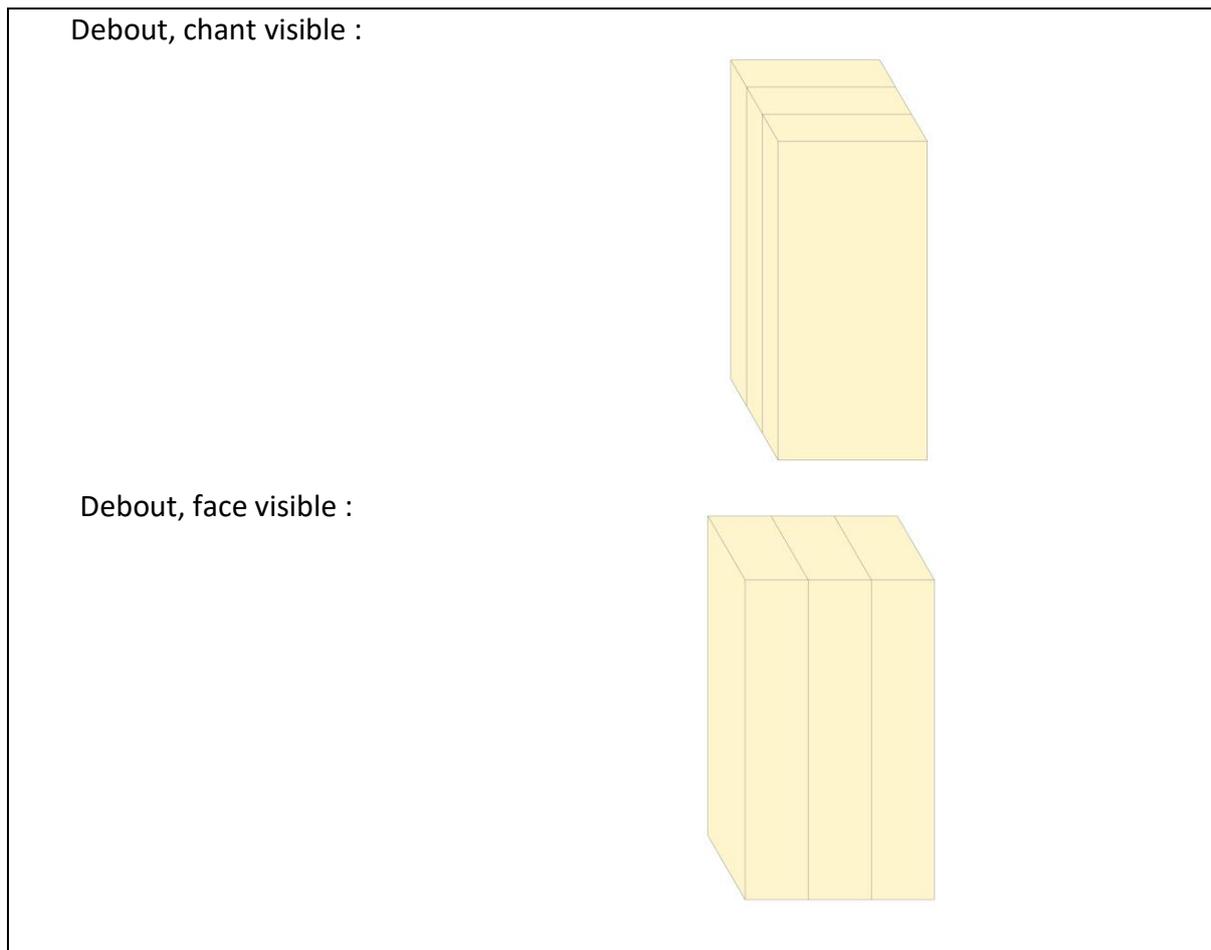
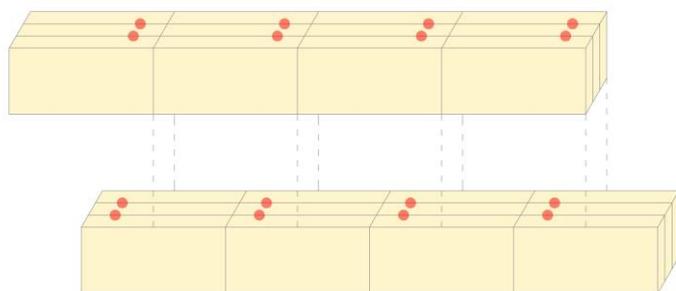


Figure 8 – Disposition des ballots dans l’enveloppe

Source : schéma personnel

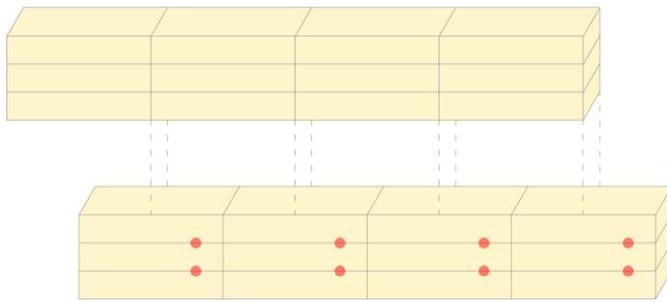
En fonction de leur sens de pose, il sera donc nécessaire de faire varier leur position. Pour ce faire, nous pouvons utiliser un repère visuel avec les nœuds des cordes :



Lorsque les bottes de paille sont posées à plat, le sens de pose doit être alterné entre les rangées. Ainsi, si la première rangée est posée avec les nœuds des cordes vers la droite, la seconde devra présenter ses nœuds à gauche et ainsi de suite.

Figure 9 – Position des nœuds lors de la disposition à plat des ballots

Source : schéma personnel



Si les bottes de paille sont posées sur leur chant, les nœuds devront se trouver une fois vers l'extérieur de l'enveloppe et une fois vers l'intérieur de celle-ci.

Figure 10 – Position des nœuds lors de la disposition de face des ballots

Source : schéma personnel

Afin d'établir un comparatif entre l'utilisation de grosses ou de petites bottes de paille, nous allons maintenant imaginer un bâtiment fictif dont la surface au sol est de 100 m² avec une toiture plate débordant de 50 cm de l'enveloppe. Nous allons dessiner deux propositions différentes de ce même bâtiment. Il sera ainsi plus facile de mettre en évidence les influences qu'ont ces deux systèmes constructifs sur l'enveloppe d'un bâtiment. Dans cet exemple, la structure, les membranes d'étanchéité ainsi que les éléments de finitions ne seront pas pris en compte afin de se concentrer uniquement sur les ballots de paille. Par ailleurs, aucun percement ne sera présent dans le dessin en plan du bâtiment fictif.

Tableau 3 – Caractéristiques des ballots mis en œuvre dans l'exemple ci-dessous

	Petites bottes	Grosses bottes
Hauteur	40 cm	70 cm
Largeur	50 cm	90 cm
Longueur	100 cm	200 cm
Compacité	90 kg/m ³	150 kg/m ³
Volume/ballot	0.18 m ³	1,26 m ³
Poids/ballot	16,2 kg	189 kg

Deux exemples vont être réalisés et seront ensuite comparés. Le premier aura une surface **brute** de 100 m² alors que le second aura quant à lui une surface **utile** de 100 m².

○ Exemple 1 : gros ballots

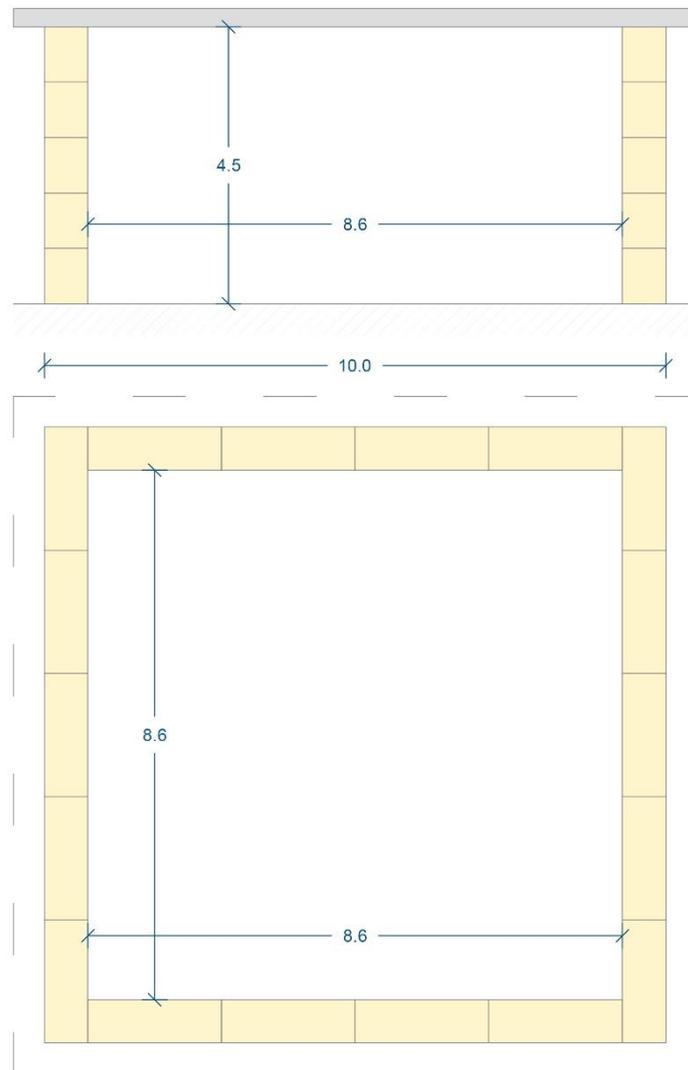


Figure 11 – Exemple 1 : gros ballots

Source : schéma personnel

Tableau 4 – Exemple 1 : gros ballots

Surface brute	100 m ²
Surface utile	74 m ²
Volume protégé	332,8 m ³
Surface de l'enveloppe	280 m ²
Volume de l'enveloppe	147,2 m ³
Coefficient de compacité	0,84

○ Exemple 1 : petits ballots

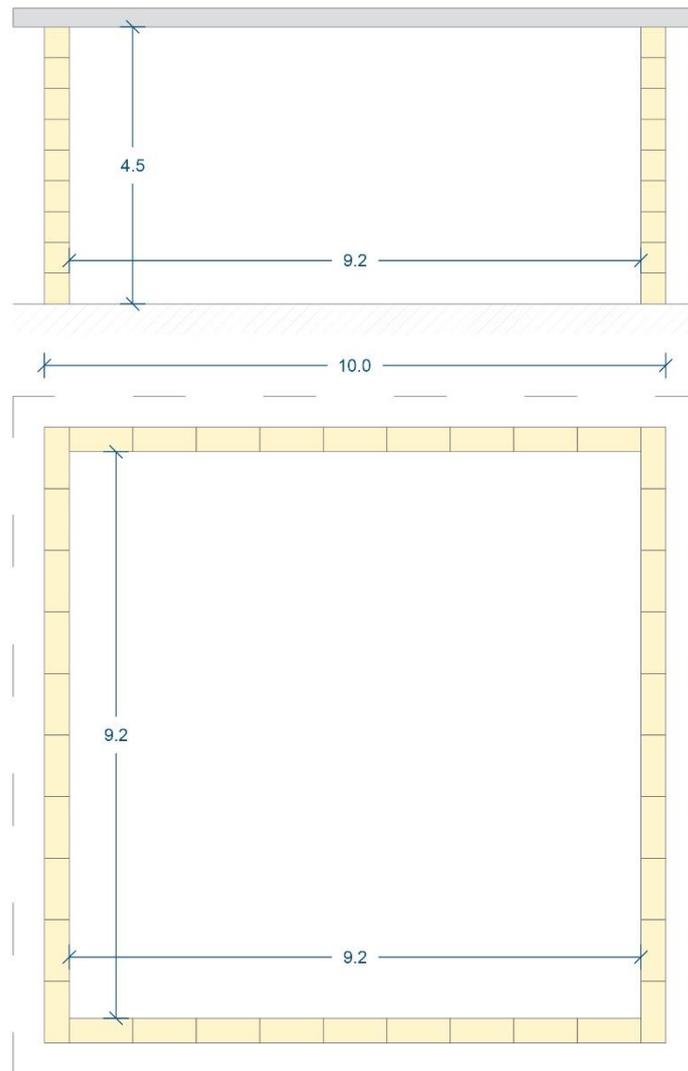


Figure 12 – Exemple 1 : petits ballots

Source : schéma personnel

Tableau 5 – Exemple 1 : petits ballots

Surface brute	100 m ²
Surface utile	84,6 m ²
Volume protégé	380,9 m ³
Surface de l'enveloppe	280 m ²
Volume de l'enveloppe	69,1 m ³
Coefficient de compacité	0,73

○ Exemple 2 : gros ballots

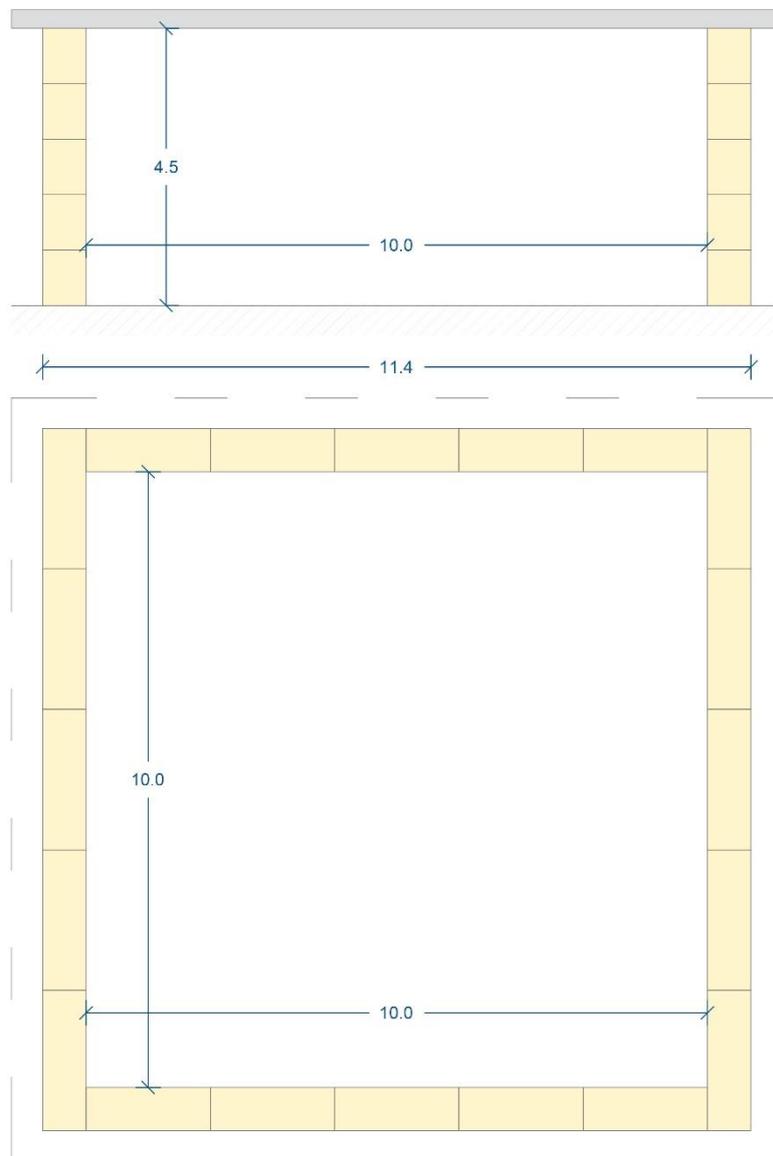


Figure 13 – Exemple 2 : gros ballots

Source : schéma personnel

Tableau 6 – Exemple 2 : gros ballots

Surface brute	130 m ²
Surface utile	100 m ²
Volume protégé	450 m ³
Surface de l'enveloppe	305,2 m ²
Volume de l'enveloppe	164,8 m ³
Coefficient de compacité	0,67

○ Exemple 2 : petits ballots

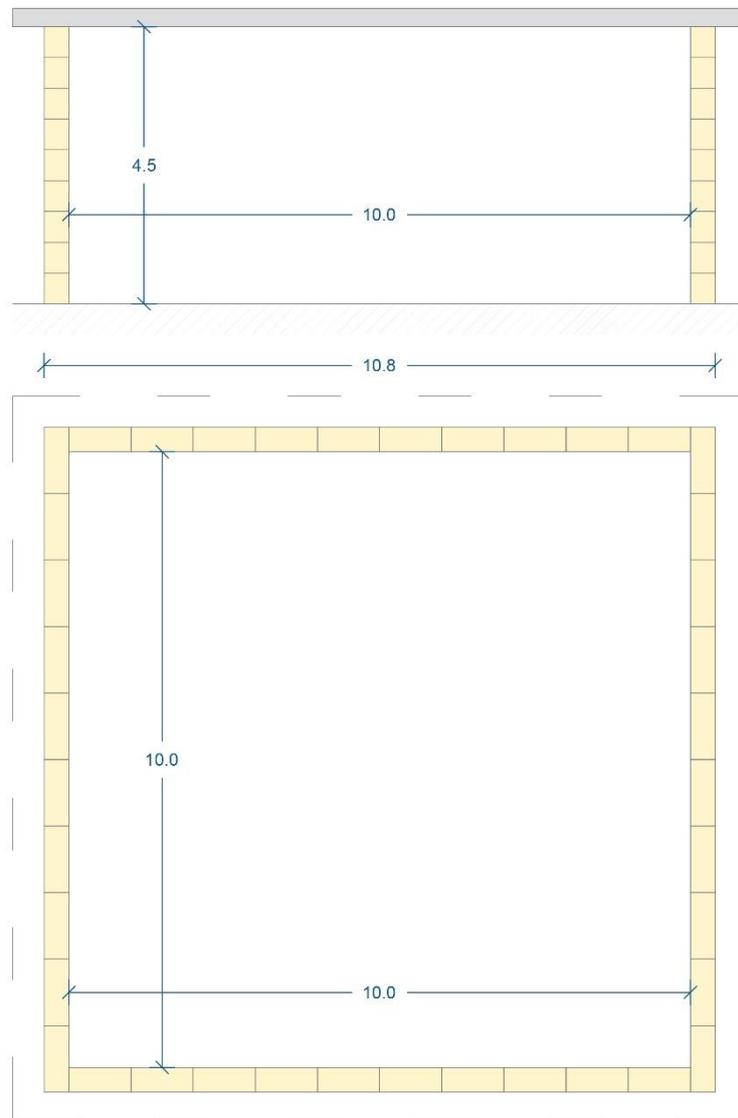


Figure 14 – Exemple 2 : petits ballots

Source : schéma personnel

Tableau 7 – Exemple 2 : petits ballots

Surface brute	116,6 m ²
Surface utile	100 m ²
Volume protégé	450 m ³
Surface de l'enveloppe	294 m ²
Volume de l'enveloppe	104,9 m ³
Coefficient de compacité	0,65

○ *Conclusion :*

Nous pouvons donc constater que si la taille des ballots utilisés influence les surfaces utiles et brutes des projets, cela fonctionne également dans l'autre sens : les surfaces peuvent déterminer l'utilisation d'un type ou l'autre de botte de paille. Cependant, ce ne sont pas les seuls paramètres qui varient. En effet, la taille du complexe isolant a également une influence sur les performances énergétiques de l'enveloppe. Sa surface se voit en effet modifiée, influençant ainsi la quantité de matériaux mis en œuvre, aussi bien visibles que cachés (Ex. : les fondations), mais également le coefficient de compacité de la future construction. Ce coefficient est obtenu en effectuant le rapport entre les surfaces de déperdition (telles que les murs, planchers, toitures, etc.) et le volume ainsi renfermé.

D'un point de vue architectural, et même si les percements n'ont pas été pris en considération dans ces exemples, l'épaisseur des parois ainsi mises en œuvre influencera notamment la pénétration de la lumière à l'intérieur de la construction. Le complexe de l'enveloppe pouvant prendre différentes épaisseurs en fonction des ballots mis en œuvre, il est dès lors possible de « jouer » avec la profondeur des ouvertures | cf. **2.4.2** | qui pourront également avoir des dimensions plus ou moins grandes en fonction de la modulation induite par l'utilisation de grosses bottes (ex : 90 cm x 70 cm x 200 cm) ou de petites bottes (ex : 47 cm x 37 cm x 100 cm). Ce calepinage n'influencera pas uniquement les ouvertures mais également le plan général de la construction, d'où l'importance de prendre en considération la taille des bottes au début de la conception.

Le calepinage et les dimensions générales ainsi déterminés permettront donc de dimensionner la structure portante de la construction. Dans le cas d'un système isolant mettant en œuvre de petits ballots, il est tout à fait envisageable de positionner les montants d'ossature entre les bottes de paille, car l'entre-axe ainsi induit sera idéal. En revanche, les grosses bottes ayant des dimensions plus importantes, la structure bois sera préférablement disposée dans une autre couche que celle du complexe isolant. Dans le cas contraire, la section des montants d'ossature se verrait fortement augmentée, du fait de la valeur importante de l'entre-axe. Nous pouvons prendre pour exemple les deux analyses de cas réalisées un peu plus bas ; la maison Georges mettant en œuvre un complexe isolant formé par de grosses bottes de paille et la maison Hallet, utilisant des petits ballots de paille pour isoler l'habitation.

1.1.7. Bilan performanciel des bâtiments en paille

Maintenant que nous avons pu mettre en lumière un grand nombre d'aspects pratiques et théoriques liés à l'utilisation de la paille dans la construction, de l'histoire de l'utilisation de ce matériau jusqu'aux éléments pouvant altérer son utilisation normale, en passant par sa production et son conditionnement, nous allons aborder la question des performances. Nous allons voir dans ce chapitre comment la paille répond aux performances actuelles des constructions. Nous parlerons ici de performances énergétiques, qui représentent en réalité la quantité d'énergie consommée par un bâtiment et qui dépend de son isolation, des équipements du bâtiment mais également du mode de vie des habitants. Nous aborderons également les performances liées au confort de vie des habitants, car ce paramètre est également très important aujourd'hui, même si on en entend beaucoup moins parler. Et enfin, le troisième thème abordé portera sur la durabilité des constructions et sur leur empreinte environnementale.

○ *Isolation thermique :*

L'isolation thermique d'une paroi est la capacité de celle-ci à empêcher toute fuite calorique et donc à offrir une bonne résistance thermique. Cette résistance est qualifiée par un coefficient U de transmission thermique surfacique exprimé en $W/m^2 \cdot K$. Les besoins en isolation des nouvelles constructions sont toujours de plus en plus importants. En effet, depuis plusieurs années déjà, nous vivons une course folle aux bâtiments qui consommeront le moins d'énergie. Le problème est que cette recherche toujours plus poussée en termes de performance thermique s'est souvent faite au détriment de la sobriété des matériaux isolants utilisés. Les énergies grises ont rarement été prises en compte au début de cette évolution mais sont heureusement à ce jour très présentes dans les différents débats.

La paille n'est bien évidemment pas le seul isolant « biosourcé », il existe aujourd'hui bon nombre d'isolants à base végétale tels que :

- Panneaux en fibre de bois : chutes de bois de scierie récupérées et liées avec de la lignine, voire des fibres synthétiques ou du textile.
- Ouate de cellulose : fabriquée à partir de papier recyclé recevant différents traitements (antifongique, ignifuge, insecticides, etc.) pour améliorer sa résistance et ne pas altérer ses performances. Conditionnée en vrac pour être insufflée ou

simplement posée, celle-ci est également commercialisée sous forme de panneaux fabriqués avec des fibres polyoléfiniques.

- Laine de chanvre : liant synthétique ajouté à la laine obtenue à partir de fibres végétales de chanvre afin de former des « matelas ».
- Laine de coton : laine végétale recevant des traitements contre les moisissures, les insectes et les champignons et conditionnée sous forme de « matelas » également.
- Laine de lin : fibres végétales liées avec des polyesters et conditionnées sous forme de panneaux rigides ou semi-rigides.
- Le liège : fabriqué à partir d'écorces d'arbre transformées en granulés agglomérés à la vapeur.
- Laine de mouton : un traitement antimite est nécessaire avant de la conditionner en « matelas ».

Si tous ces isolants semblent fortement semblables à la paille, un élément les distingue. En effet, la paille ne nécessite aucun ajout de produit et aucune transformation une fois récoltée dans le champ de céréales. « *La paille n'est pas produite pour elle-même. Il s'agit d'un sous-produit de l'agriculture céréalière à des fins alimentaires.* » (Floissac, 2012, p.24). Les ballots sont prêts et ne doivent plus qu'être ramassés avant d'être mis en œuvre dans le complexe isolant des bâtiments en construction. De surcroît, avec la transition écologique en cours, on retrouve de moins en moins de pesticides dans les bottes de paille utilisées pour la construction, diminuant ainsi fortement son impact environnemental et rendant ce matériau presque incomparable à ce point de vue.

L'isolant paille, très souvent mis en œuvre entre deux ossatures (sauf dans le cas de bâtiments en paille porteuse), possède de très bonnes performances et permet en règle générale d'éviter facilement les ponts thermiques. Il s'agit des endroits dans le complexe isolant qui présentent un léger affaiblissement de résistance thermique. Les performances sont encore meilleures dans le cas de bâtiments mettant en œuvre un système constructif en paille porteuse car aucun élément ne vient rompre la continuité d'isolation entre les bottes de paille. Un léger point faible reste cependant à signaler avec cette méthode d'isolation. Les ballots sont en effet posés l'un sur l'autre et nous pouvons ainsi observer une très légère discontinuité

d'isolation entre chaque botte. Cette discontinuité est d'autant plus négligeable lorsque les ballots sont correctement mis en place, c'est-à-dire qu'ils sont bien tassés dans l'enveloppe. Pour ce faire, il est possible de rajouter des traverses horizontales entre les éléments d'ossature qui ont pour vocation de tasser correctement chaque « étage » des bottes de paille.

○ *Inertie thermique :*

L'isolation seule ne suffit pas à protéger un bâtiment de la chaleur. L'inertie thermique d'une paroi est la capacité que possède cette même paroi à stocker des calories (donc de la chaleur). Ainsi, plus l'inertie d'un matériau est importante, plus celui-ci sera apte à stocker de la chaleur et donc à retarder le réchauffement d'un bâtiment (plus un matériau est lourd, plus son inertie sera grande). Le déphasage est le temps que met ce matériau avant de rejeter la chaleur accumulée. Plus le déphasage est important, plus longtemps le matériau garde la chaleur. Sachant que la chaleur se déplace toujours du plus chaud vers le plus frais, il sera intéressant de mettre en œuvre des matériaux avec beaucoup d'inertie et un déphasage important afin que les calories accumulées en été soient rejetées vers l'extérieur des bâtiments en soirée (la température extérieure étant inférieure à la température intérieure).

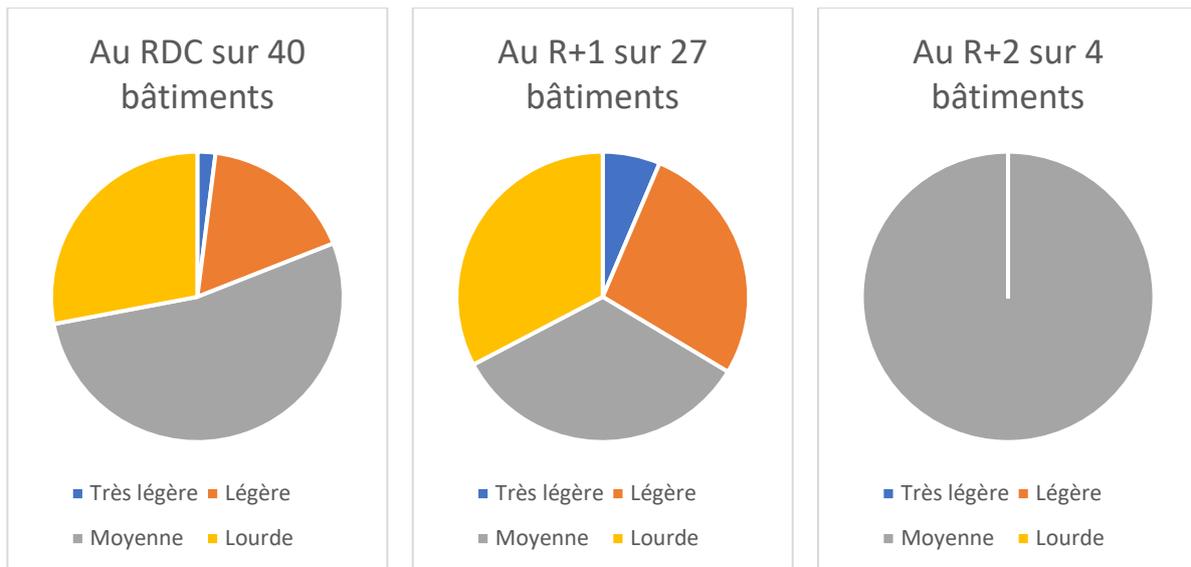
Pour déterminer les épaisseurs des complexes, il nous faut connaître la diffusivité ainsi que la masse thermique du matériau mis en œuvre. En guise d'exemple, nous aurons :

Tableau 8 – Masse volumique et diffusivité de différents matériaux (Floissac, 2012)

	Masse volumique	Épaisseur idéale	Chaleur stockée
béton	2 300 kg/m ³	30 à 45 cm	190 à 290 Wh/m ² . K
Brique de terre cuite	1 900 kg/m ³	25 à 35 cm	130 à 190 Wh/m ² . K
Terre crue	1 800 kg/m ³	20 à 30 cm	160 à 240 Wh/m ² . K
Eau	1 000 kg/m ³	15 cm ou plus	174 Wh/m ² . K

Ainsi, les bâtiments construits avec un système d'ossature bois ont souvent la particularité d'avoir des parois, qu'elles constituent l'enveloppe du bâtiment ou un simple cloisonnage à l'intérieur, relativement légères. Cette situation n'étant pas optimale d'un point de vue de l'inertie, il est alors nécessaire de les alourdir. Les ossatures bois remplies avec un isolant en paille associé à la terre crue sont généralement un bon compromis. La paille, bien qu'il s'agisse d'un matériau isolant relativement lourd, soit environ 90 kg/m³ pour les petites bottes et minimum 150 kg/m³ pour les grosses | cf. **1.1.6.** |, ne propose pas autant d'inertie que les matériaux de type maçonnerie. En réalité, c'est la terre qui y est associée, soit en guise

d'enduit, soit en vue d'un remplissage | cf. 2.4.2. et 2.4.3. | qui augmentera cette inertie. Les terres argileuses utilisées possèdent généralement une masse volumique de l'ordre de 1 300 kg/m³ à 1 700 kg/m³ alors que les terres organiques, qui ne sont pas utilisées dans le domaine de la construction possèdent une masse volumique d'environ 1 250 kg/m³. Ce matériau, associé aux ossatures légères, permet d'obtenir une inertie très correcte, notamment grâce à sa densité importante.



Graphique 4 – Classe d'inertie de constructions en paille en fonction des niveaux (Floissac, 2012)

o Étanchéité à l'air :

La consommation énergétique d'un bâtiment dépend également de son étanchéité à l'air. Lors du chauffage des pièces, un bâtiment va se trouver en surpression par rapport à l'extérieur, et comme c'est le cas pour les phénomènes météorologiques, les hautes pressions se dirigent toujours vers les basses pressions. Ainsi, l'air enfermé à l'intérieur de la construction va avoir tendance à en sortir afin d'équilibrer les pressions ; nous avons donc une perte d'énergie. L'étanchéité à l'air d'un bâtiment est donc sa capacité à retenir l'air qui y est enfermé. Cette valeur peut être obtenue suite à des tests d'infiltrométrie, qui consistent à mettre le bâtiment en surpression afin de déterminer la quantité d'air qui en sort. « en Europe (label Passivhaus, Minergie), on utilise généralement l'indice n50 qui correspond au volume de fuite d'air constaté sous une différence de pression de 50 Pa, exprimé en volume/heure. » (Floissac, 2012, p.39).

Prenons l'exemple d'un bâtiment de 150 m² avec une hauteur sous-plafond moyenne de 2,8 m, mesurée sur une heure de temps.

Tableau 9 – Exemple de test d’infiltrométrie

Pour un volume de 420 m ³	Fuite d’air mesurée	Indice
	50 m ³	0,12 vol/h
	100 m ³	0,24 vol/h
	200 m ³	0,48 vol/h
	400 m ³	0,95 vol/h
	600 m ³	1,43 vol/h

○ *Humidité relative de l’air :*

Les constructions doivent aujourd’hui respecter certains critères d’habitabilité et de confort d’utilisation. Ainsi, l’air enfermé à l’intérieur ne doit être ni trop humide, ni trop sec, afin de conférer un confort de vie adéquat aux habitants ou utilisateurs. L’humidité relative d’un local (HR) représente la quantité de vapeur d’eau présente dans l’air. Lorsque l’humidité relative d’un air à 21 °C est à 100 %, cela signifie qu’il y aura de la condensation si sa température diminue.

Tableau 10 – Taux d’humidité en fonction du type d’air

Type d’air	HR
Air sec	<30 %
Air normal	30 %<air<80 %
Air humide	>80 %

Pour le confort des habitants ou utilisateurs, il est préférable que l’humidité relative (HR) de l’air à l’intérieur de la construction ne varie pas de trop. Ainsi, il est important de mettre en œuvre des matériaux capables de réguler l’humidité. C’est le cas de la terre crue, encore une fois souvent associée à la paille, qui possède une grande inertie hydrique. Comme l’inertie thermique, l’inertie hydrique est la capacité d’un matériau à stocker plus ou moins d’humidité. Plus cette inertie est importante, plus le matériau en question stockera l’humidité et moins le local subira des variations hygrométriques. La terre crue utilisée pour réaliser les enduits de finition, ou la terre crue disposée entre les montants d’ossature pour conférer plus d’inertie à l’ensemble, peut donc bien évidemment jouer ce rôle.

○ *Structure :*

Dans certains cas, la paille peut également être utilisée comme structure porteuse du bâtiment, le matériau prend alors une autre dimension en ne jouant plus uniquement un rôle isolant mais également un rôle structurel | cf. **1.2.1.** |.

○ *Impacts environnementaux :*

Les constructions en paille possèdent en effet de très bons scores environnementaux grâce à plusieurs grands aspects. Le premier avantage reste sans aucun doute leur faible coût en matière d'énergies grises, que ce soit pour la production des bottes de paille ou leur démolition. Comme dit un peu plus tôt, une construction faite de bois et de terre-paille peut tout à fait, lors de sa destruction, être enterrée sans perturber l'équilibre des sols et sans leur causer préjudice, étant donné que ces matériaux viennent de la terre et ont subi un nombre extrêmement limité de transformations afin d'être mis en œuvre.

Cependant, si nous parlons ici de démolition, il est important de noter que les constructions en paille nous offrent une excellente durabilité, comme en témoignent de nombreuses constructions datant d'il y a plusieurs siècles déjà et qui tiennent toujours debout aujourd'hui | cf. **1.1.3.** |.

La combinaison de ces éléments fait de la paille un véritable matériau de choix pour les constructions d'aujourd'hui et de demain. L'émergence des matériaux biosourcés semble en effet être l'une des meilleures réponses que peut apporter le secteur de la construction à la transition écologique que nous traversons actuellement. Ce « nouveau mode de construire » emprunté en partie à nos ancêtres est très certainement voué à prendre une place de plus en plus importante dans notre société.

Et peut-être qu'ainsi, le souffle du grand méchant loup comme tornade fatale disparaîtra de l'imaginaire collectif afin de laisser place à la paille et tous les matériaux modulables, solides et robustes qui l'entourent, offrant d'excellentes performances en termes d'énergie, mais également de confort d'habitabilité des constructions.

1.1.8. La paille et le grand méchant loup ?

Il est évident que la construction en paille ne suscite pas encore énormément d'intérêt aujourd'hui. Le manque de confiance et de connaissance dans le domaine de la construction

en est sûrement la cause. En effet, allez expliquer que vous souhaitez construire une maison en paille, et vous serez bien vite pris à la rigolade. Cette technique de construction est considérée comme ancestrale et totalement désuète, comme si elle n'avait pas évolué et n'était pas adaptée au contexte actuel en termes de normes et de réglementations. « *Dans une société moderne tous les jours un peu plus virtuelle et éloignée de la nature, un phénomène de fascination-répulsion est développé vis-à-vis du monde vivant.* » (Floissac, 2012, p.25).

Dans les paragraphes qui suivent, je vais tenter de briser ces idées reçues et prouver que la paille est aujourd'hui un matériau de choix dans le monde de la construction. Pour ce faire, je ne parlerai que des aspects venant d'une vision erronée de ce matériau, l'ensemble des éléments qui « décrédibilisent » ce procédé de construction que je nomme ici : le grand méchant loup.

○ *Résistance et réaction au feu :*

Toute tentative de mettre le feu à un annuaire serait vouée à l'échec car une fois fermé, l'annuaire emprisonne très peu d'air et ne permet donc pas la propagation du feu à l'intérieur. C'est exactement le même principe pour la paille. Lorsque les bottes sont bien pressées et correctement mises en œuvre dans les parois, un incendie aura énormément de difficultés à se propager



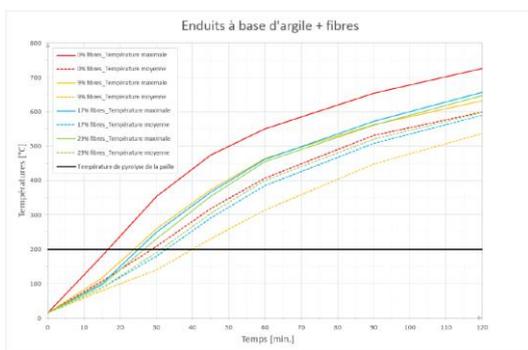
Figure 15 – Résistance au feu d'un ballot enduit

Source : Interreg (s.d.)

dans le bâtiment. Différents essais ont été réalisés et les procès-verbaux peuvent d'ailleurs être retrouvés dans le RFCP (le Réseau Français de la Construction en Paille). Dans un premier temps, il faut bien différencier la résistance au feu de la réaction au feu. La résistance au feu d'un élément de construction est la capacité que possède cet élément à conserver ses propriétés en cas d'incendie. La réaction au feu correspond quant à elle à l'aptitude que présente le matériau de construction à la contribution ou non de la propagation de l'incendie dans le bâtiment.

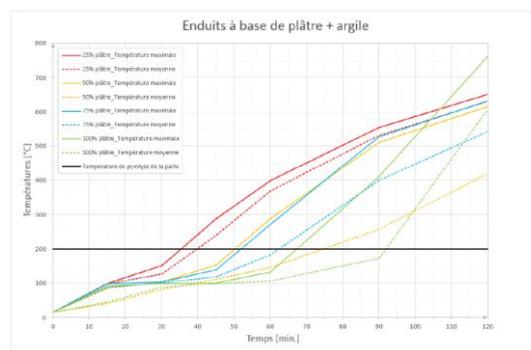
Les différents procès-verbaux issus des rapports d'action (CSTB, 2017) prouvent donc que la paille comme matériau de construction peut largement atteindre les mêmes caractéristiques en termes de résistance au feu que des matériaux plus conventionnels.³

De plus, et à titre d'exemple, la résistance au feu d'une paroi mettant en œuvre de la paille comme isolant peut être augmentée à l'aide des enduits de finition utilisés. La composition de ces enduits influencera bien évidemment leur contribution à la résistance au feu. Comme le montrent les figures ci-dessous, un enduit de finition à base d'argile et de fibres sera moins performant qu'une composition à base de plâtre et d'argile.



Graphique 5 - Températures mesurées pendant l'essai avec enduit à base d'argile et de fibres

Source : CSTB (2017, p.35)



Graphique 6 - Températures mesurées pendant l'essai avec enduit à base de plâtre et d'argile

Source : CSTB (2017, p.36)

L'image de paillers (lieux où l'on stocke la paille dans une exploitation agricole) en feu semble pourtant avoir du mal à sortir de l'esprit des gens. Cette situation n'est cependant pas du tout comparable à la construction mettant en œuvre des bottes de paille. En effet, ces incendies surviennent généralement peu de temps après que les ballots aient été mis à l'abri. La cause est en fait l'humidité relative enfermée à l'intérieur du ballot qui va entraîner une auto-inflammation. Les ballots utilisés dans la construction sont contrôlés de manière très précise à l'aide d'outils permettant de vérifier leur humidité relative avant de les enfermer dans la paroi. De plus, les ballots utilisés pour isoler un complexe sont tassés au mieux dans celui-ci afin de laisser le moins de place possible pour l'air. Dans certains cas, des traverses sont même utilisées pour presser les ballots de manière plus efficace. Ce n'est évidemment pas le cas dans les lieux de stockage des exploitations agricoles.

³ Rapport en partie disponible en **Annexe 6.3**.

○ *Les insectes et les rongeurs :*

Il n'y a absolument aucun risque de retrouver des insectes dans une paroi isolée en paille pour plusieurs raisons. La première étant que la paille ne fait pas partie des aliments habituels des insectes. Prenons pour exemple les termites, avec lesquelles des essais d'appétences ont été réalisés pour le RFCP. Tous ces essais ont démontré que ces insectes meurent petit à petit dans la paille, faute d'avoir pu trouver de la nourriture. Ce n'est d'ailleurs pas anodin si les bottes de paille présentes dans les exploitations agricoles sont souvent stockées dans des hangars très ouverts.

Pour ce qui est des rongeurs, la paille constitue en effet une niche chaude et confortable pour eux. Cependant, il est important de noter que la paille, très siliceuse et difficile à creuser, est nettement moins confortable que d'autres isolants d'origine naturelle tels que la laine de bois ou la laine de verre... Ces isolants sont en effet moins durs et surtout beaucoup plus doux que la paille. De plus, si les bottes de paille peuvent servir d'habitat aux rongeurs, ceux-ci ne sont pas capables d'y trouver de la nourriture car les grains ont tous été séparés de la paille par la moissonneuse-batteuse. On ne constate donc pas de prolifération de rongeurs dans les bâtiments isolés en paille.

La solution est donc la même pour tous les procédés d'isolation à partir de matériaux biosourcés : il est nécessaire d'empêcher les rongeurs de pénétrer à l'intérieur du complexe afin d'éviter tout problème potentiel.

○ *Les tempêtes :*

« L'histoire des trois petits cochons a eu un succès planétaire et on ne peut évoquer la construction en paille ni même en bois devant une assistance de néophytes sans entendre une référence malicieuse à ce conte. » (Floissac, 2012).

Un examen du patrimoine nous démontrera facilement que les bâtiments construits à l'aide d'un système constructif en paille (ou autre type pan de bois, torchis, etc.) font preuve d'une incroyable durabilité. Ces bâtiments datent souvent de plusieurs centaines d'années et démontrent donc que nous pouvons avoir confiance en ce matériau. Par ailleurs, il a également été démontré que les bâtiments construits en paille avec enduits possédaient une bonne résistance aux tornades et tempêtes.

1.1.9. La construction paille en Belgique

Si la construction en paille est déjà bien assimilée dans certains pays voisins, ce n'est pas encore tout à fait le cas en Belgique. La France par exemple, qui met en œuvre ce genre de construction depuis bon nombre d'années possède aujourd'hui le « Réseau Français de la Construction en Paille », appelé plus couramment le « RFCP ». cette communauté est en charge de différentes formations professionnelles autour de la paille, ainsi que de la rédaction des **Règles professionnelles de la construction en paille**, dont la première parution fut en 2011.

Il n'existe malheureusement pas d'ouvrage équivalent en Belgique mais j'ai l'intime conviction que cela ne devrait plus trop se faire attendre. En effet, diverses entreprises semblent aujourd'hui particulièrement intéressées par le sujet, convaincues qu'il s'agit d'un secteur d'avenir pour la construction... Parmi ces coopératives, nous pouvons compter Paille-Tech. D'abord connue sous le nom de Grappaille, en 2007 l'asbl avait pour objectif la sensibilisation à la construction mettant en œuvre des matériaux biosourcés tels que la paille ainsi que l'aide aux autoconstructeurs. Elle se charge aujourd'hui de la préfabrication d'ossatures portantes en bois, isolées en paille et pouvant accueillir des enduits de finition. Certains architectes, également, mettent en valeur ce procédé de construction au travers des projets qu'ils proposent à leur clients. Ce sont eux qui les accompagnent, les rassurent et les conseillent dans leurs démarches.

1.2. Techniques particulières

À l'heure actuelle, beaucoup de matériaux possèdent des techniques de mise en œuvre qui leur sont propres et qui sont même parfois brevetées par certaines entreprises et certains fabricants de matériaux. La paille aussi possède des techniques d'emploi spécifiques ; je vais ici en présenter deux des plus connues.

1.2.1. La paille porteuse

Cette technique, sans doute plus intuitive que la seconde présentée ci-dessous, existe depuis très longtemps. Les premières constructions en paille porteuse réalisées par les paysans constructeurs se trouvaient au Nebraska | cf. **1.1.3.** |.

Un soubassement mesurant la largeur des ballots doit d'abord être réalisé afin de poser les bottes à une hauteur suffisante du sol et éviter qu'elles pourrissent. Les ballots sont ensuite disposés en couches successives à joints croisés sur le soubassement, tels des blocs de maçonnerie. La règle d'élançement des murs est également d'application ici. Cette règle stipule qu'il faut empiler les éléments constituant du mur sur une hauteur qui est égale à maximum 6 fois la largeur (cette règle est plus souvent d'application pour les petites bottes, car les grosses n'atteignent normalement jamais cette limite). Ainsi, pour un mur réalisé avec des petites bottes de 47 cm de large, sa hauteur maximale sera de 282 cm. Une lisse doit ensuite être placée au-dessus de ce mur afin de répartir le plus uniformément possible les charges des murs qui seront construits par-dessus ou simplement de la toiture du bâtiment. La lisse, tout comme le soubassement, doit avoir la même largeur que les bottes de paille utilisées. Les structures des planchers et toitures seront, elles, réalisées le plus souvent en gitage qui se posera de part et d'autre des lisses. Le contreventement de l'ensemble du bâtiment est alors assuré par les enduits de finition intérieure et extérieure.

Pour ce qui est du tassement lié à l'utilisation du bâtiment, différents tests ont été réalisés et il en ressort que pour un bâtiment d'un seul niveau, les tassements sont inférieurs à 2 %. Reprenons donc notre exemple de tout à l'heure :

- Soubassement : 30 cm
 - Lisse basse : 12 cm
 - Ballots porteurs : 7 soit 259 cm
 - Lisse haute : 12 cm
- ⇒ Hauteur totale = 313 cm
- ⇒ Hauteur totale après tassements : 306 cm

La hauteur finale, après tassement, est donc tout à fait acceptable.

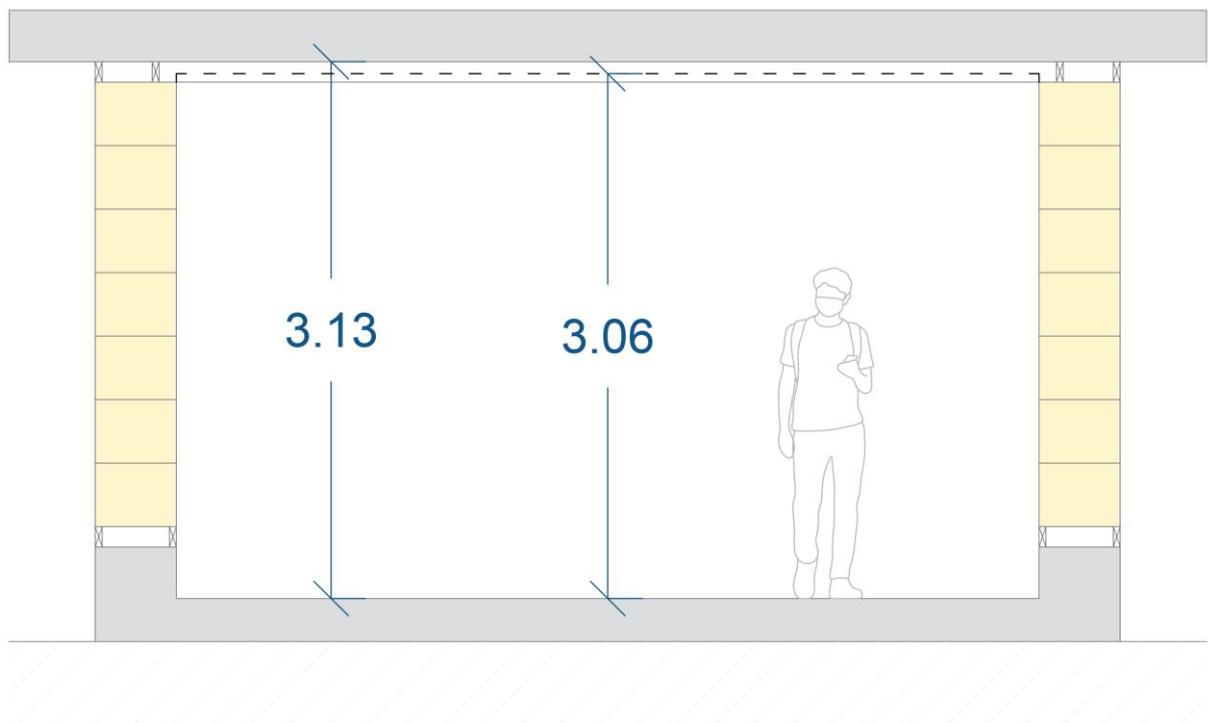


Figure 16 – Exemple de construction en paille porteuse

Source : schéma personnel

1.2.2. Le GREB

Cette technique dont le nom est emprunté directement à ses fondateurs, le Groupe de Recherche Ecologique de la Baie, a la particularité d'être extrêmement simple à mettre en œuvre pour des personnes qui n'auraient aucune formation en menuiserie ou en charpenterie, voire en construction. La structure mise en place ici se compose de pièces de bois de mêmes dimensions (généralement des 40 mm par 100 mm) en Douglas, mélèze, ou autre. La lisse basse ainsi que la lisse haute de l'ossature en bois sont construites avec ces éléments comme des échelles qui seront ensuite reliées entre elles par les montants d'ossature. L'entre-axe de ces montants correspond le plus généralement à la longueur des bottes de paille qui seront utilisées pour isoler le complexe. Dans certains cas, il est préférable de relier les montants d'ossature intérieurs avec ceux extérieurs à l'aide de pièces de bois ou de feuillards métalliques. La structure se comportera donc comme une « cage » dans laquelle les bottes de paille seront disposées, et les espaces laissés vides par les bottes de paille dans cette cage seront comblés à l'aide de paille en vrac, afin d'assurer une continuité dans l'isolation de l'enveloppe.

Les ballots ne sont pas tous placés en même temps dans l'ossature. En effet, cette technique a la particularité de mettre en œuvre un enduit coulé et non projeté. Pour ce faire, un coffrage perdu est disposé du côté de l'ossature où l'enduit se trouvera et alors que les rangées de ballots sont formées, l'enduit est coulé. Tout comme du béton, il est important de vibrer correctement l'enduit après l'avoir introduit entre les panneaux de coffrage et l'ossature remplie de paille afin d'éliminer un maximum de bulles d'air qui pourraient s'y trouver. Cela permet de tasser correctement l'enduit mais également d'obtenir des surfaces lisses et sans défauts, ou, en tous cas, avec le moins de défauts possible.

Si les deux faces de l'ossature sont finies avec des enduits, ces enduits participent alors au contreventement de l'ensemble de la structure. Dans le cas contraire, on peut fixer des panneaux dérivés du bois afin d'assurer cette fonction structurelle.

2. Renforcement des acquis théoriques par les études de cas

Le fondement de la théorie c'est la pratique.

Mao Tsé-Toung

2.1. Méthodologie

○ *Rencontre avec les autoconstructeurs*

Le travail commencera par une rencontre avec les autoconstructeurs afin d'introduire l'analyse de cas. Tous les échanges qui auront lieu au cours de cette rencontre vont me permettre de comprendre les choix qui ont été faits avant le commencement du chantier, mais également pendant. Différentes questions auront été posées aux intervenants dans le but de comprendre dans un premier temps pourquoi ils se sont tournés vers l'autoconstruction, mais également pourquoi leur choix s'est orienté vers l'utilisation de matériaux biosourcés. Il s'agira également de mettre en évidence l'élément qui est venu en premier dans la réflexion, si c'est le cas. En effet, ces deux composants peuvent très bien avoir émergé au même moment de la réflexion. Enfin, il sera également intéressant de comprendre les tenants et aboutissants de la relation entre les autoconstructeurs et l'architecte qui doit les accompagner tout au long du chantier.

Il est évident que cette rencontre n'est pas unique. Un second moment d'échange est nécessaire après avoir commencé les analyses afin d'approfondir certains points.

○ *Introduction du chantier*

Cette partie n'a pour objectif que de présenter le chantier qui va être étudié, afin de poser les bases et faire comprendre au lecteur le contexte dans lequel l'analyse va se dérouler. Une « carte d'identité » du projet se trouvera au début de cette introduction, suivie d'une photo représentative du projet. J'aborderai ensuite de manière très succincte le fonctionnement global des plans ainsi que certaines petites particularités présentes dans chaque projet.

○ *Analyse*

Pour chaque projet, une analyse individuelle sera réalisée. Cette analyse sera introduite par une coupe type dans l'enveloppe grâce à laquelle un inventaire des matériaux mis en œuvre sera établi en suivant la disposition des matériaux de l'intérieur vers l'extérieur. Il est important de noter que je ne mentionnerai pas les membranes d'étanchéité dans cet inventaire. Les différents matériaux seront ensuite répartis selon leurs « services » rendus au bâtiment. Ainsi je mettrai en évidence une partie structurelle, une concernant l'isolation, une concernant les finitions intérieures et enfin une traitant des finitions extérieures. Ces parties

ne seront plus disposées selon le même ordre que l'inventaire des matériaux mais plutôt selon un ordre logique de construction.

La partie structurelle mettra en évidence les différents moyens techniques mis au service de la structure du bâtiment et dans certains cas, les influences que peuvent avoir certaines techniques d'isolation sur la structure. La partie isolation ainsi que les parties concernant les finitions traiteront quant à elles des matériaux biosourcés mis en œuvre pour isoler et finir le bâtiment.

Enfin, un bref tableau récapitulatif des données concernant la PEB sera établi en reprenant les informations suivantes :

- Valeurs U_{max} et R_{min} :

Ces deux paramètres permettent d'évaluer la qualité thermique de la paroi. Plus la valeur R est grande, plus l'isolation de la paroi sera performante, alors qu'à l'inverse, plus la valeur U sera petite, plus l'isolation sera performante.

conforme	Non conforme
----------	--------------

- Niveau K

Ce paramètre sert à représenter le niveau d'isolation thermique global du bâtiment. Il est directement dépendant des performances énergétiques des parois qui forment le volume protégé du bâtiment. L'isolation thermique globale d'un bâtiment sera d'autant plus performante que le niveau K sera faible.

conforme	Non conforme
----------	--------------

- Niveau E_w et E_{spec}

Mis au point pour représenter le niveau de consommation énergétique primaire du bâtiment. Il est obtenu suite à la division de la consommation annuelle d'énergies primaires par la surface totale du plancher chauffé.

conforme	Non conforme
----------	--------------

- Ventilation

Les prescriptions pour garantir la qualité de l'air intérieur d'un bâtiment sont précisées dans la réglementation PEB définissant les débits minimums à satisfaire dans différents locaux.

conforme	Non conforme
----------	--------------

- Indice de surchauffe

Calculé sur base d'un équilibre entre apports (solaires et internes) et pertes (par ventilation et par transmission) et de l'inertie thermique. On retiendra certains paramètres qui agissent sur cet indicateur, tels que la présence ou non de protections solaires et le dimensionnement et l'orientation de surfaces vitrées.

conforme	Risque de non-conformité	Non conforme
----------	--------------------------	--------------

Pour conclure les études de cas, les analyses individuelles seront comparées et les différents critères étudiés seront synthétisés afin de permettre une comparaison plus aisée. Enfin, une axonométrie représentative du système constructif par projet sera réalisée afin de faciliter la visibilité du positionnement des différents éléments dans l'enveloppe. Ces trois documents mettront ainsi en évidence les différences entre les projets étudiés.

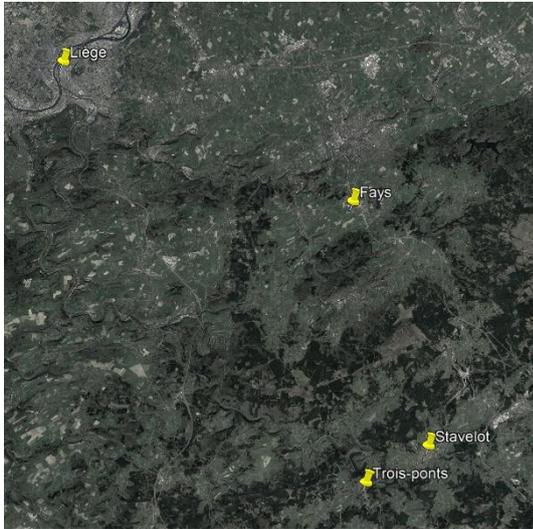
2.2. Acquisition des ressources

Les données utilisées lors du travail se diviseront en deux parties. La première partie comprend des notes prises lors des rencontres avec les différents intervenants, alors que la seconde partie correspond aux plans de détails et notes de calculs qui m'auront été envoyés par l'architecte en charge du chantier. Tous les documents se trouveront également en annexe du TFE.

2.3. Choix des projets

Les trois projets analysés ci-après ont été choisis selon différents critères.

○ Localisation :



Les trois projets se situent aux alentours de la ville de Liège afin de faciliter les déplacements vers ceux-ci le cas échéant. Leur situation géographique rapprochée peut s'expliquer par le fait qu'ils aient été conçus par le même architecte, Stephen Toumpsin, particulièrement impliqué dans le domaine des matériaux biosourcés dans le cadre de l'autoconstruction notamment.

Figure 17 – Localisation des projets

Source : Google Earth Pro

○ Systèmes constructifs :

Les systèmes constructifs des projets mettent évidemment tous en œuvre des matériaux biosourcés, de la structure des bâtiments aux finitions intérieures et extérieures en passant par l'isolation. Nous remarquerons cependant que si deux habitations sont isolées en paille, la troisième utilise quant à elle le matériau chaux-chanvre. Il s'agit d'un bloc formé par un mélange de chaux, de liant et de paille de chanvre. Sa comparaison avec les autres projets me semble donc tout à fait cohérente.

○ L'autoconstruction :

Ce choix apporte une dimension supplémentaire aux analyses. En effet, deux systèmes constructifs égaux présenteront nécessairement des disparités de mise en œuvre de par les moyens que possèdent les autoconstructeurs. Ceci n'aurait, selon moi, pas été le cas dans le cadre de projets construits par des entreprises spécialisées.

2.4. Études de cas

2.4.1. Analyse du projet HALKIN

○ Introduction du projet

Projet :	Maison HALKIN
Propriétaires :	Nicolas HALKIN et Astrid HUYGHE
Localisation :	Fays
Année du début de construction :	2020
Année de livraison :	-
Superficie habitable :	165 m ²
Structure :	Bois
Isolation :	Chaux-Chanvre

Très soucieuse de l'environnement, la famille HALKIN a pris la décision d'autoconstruire sa maison à partir de matériaux biosourcés. N'étant dans un premier temps pas familiers au monde de la construction, ils ont pris la décision de se faire accompagner sur chantier par différentes entreprises expérimentées dans les domaines de la menuiserie ou de la maçonnerie par exemple. Il s'agit la plupart du temps d'entreprises qui travaillent souvent avec des autoconstructeurs et qui ont donc l'habitude de travailler dans de telles conditions mais il est important de noter que ceci n'est pas une généralité. Il est important de noter qu'à ce jour, le chantier n'est toujours pas livré.



Figure 18 – Photographie du projet Halkin

Source : photographie de Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Le terrain sur lequel s'implante l'habitation subit une forte proximité avec l'un des voisins du côté de l'exposition Sud. Une serre bioclimatique a donc été mise en place contre cette façade afin de permettre à la famille HALKIN de garder une certaine intimité à l'intérieur de ses espaces de vie. Jouant ainsi un rôle de double peau à la végétation dense, cette serre, appelée « bioclimatique » permet également de chauffer les espaces de vie grâce à son exposition optimale (nous en parlerons un peu plus tard dans l'analyse).

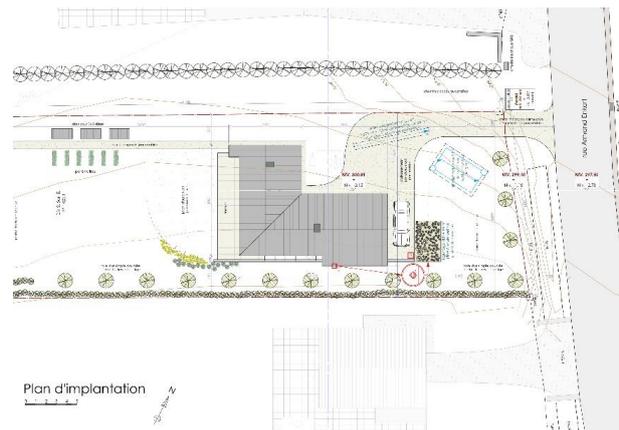


Figure 19 – Plan d'implantation 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

On remarque clairement l'importance que prend cette serre bioclimatique dans les dessins de la façade exposée sud-est.



Figure 20 – Façade Sud-Est 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

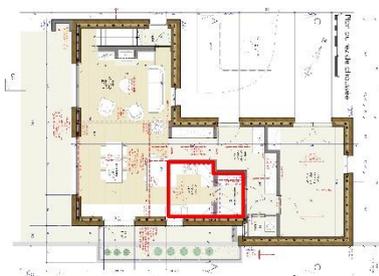


Figure 21 – Plan du RDC 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Pour ce qui est des techniques et évacuations d'eau (hors cheminée), celles-ci ont toutes été concentrées en un seul et unique point de la construction afin d'optimiser au mieux la disposition des gaines techniques et donc opérer un gain de place.⁴

⁴ Des documents complémentaires à ceux se trouvant dans l'analyse sont disponibles en **Annexe 6.4**.

○ *Analyse :*

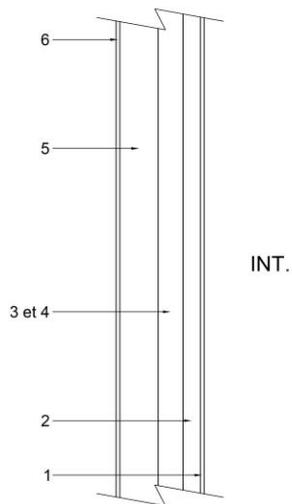


Figure 22 – Coupe type

Source : schéma personnel

Inventaire des matériaux :

- Finition à l'enduit d'argile(1)
- Bloc de chaux-chanvre (2)
- Structure bois (3)
- Chènevotte (4)
- Bloc de chaux-chanvre (5)
- Finition à l'enduit de chaux (6)

Structure :

L'ossature portante du projet est en bois et composée d'éléments de dimensions 38 mm par 89 mm doublés, donnant ainsi des montants de 76 mm par 89 mm. Ces éléments sont disposés à entre-axe régulier de 40 cm et joints en partie basse et haute par une lisse formée d'un KVH de 80 mm par 120 mm. Au droit du raccord de l'ossature avec les fondations, cette lisse est remplacée par deux éléments en bois autoclavé. Comme expliqué un peu plus haut, c'est une entreprise qualifiée qui est venue assister l'autoconstructeur pour mettre en place l'ossature de l'habitation.

La structure de certaines cloisons intérieures a elle été pensée en blocs de béton de 14 cm. Ces cloisons ont la particularité de courir du niveau supérieur de la dalle de sol à la toiture, permettant ainsi de réduire la portée des planchers et ainsi de réduire l'épaisseur du complexe.

Isolation :

Le vide entre les montants de l'ossature bois sera comblé avec de la chènevotte en vrac. Ce matériau vient de la partie ligneuse de la tige de chanvre et mesure entre 0,5 mm et 3 cm de

long. Il possède de très bonnes performances isolantes, tant sur le plan thermique que d'un point de vue acoustique. Monsieur Halkin a pris la décision de chauler la chènevotte en vrac afin de la protéger d'éventuelles intrusions d'insectes. Ce traitement à la chaux sera réalisé par lui-même à l'aide d'une bétonnière. Le rapport chaux-chènevotte sera de 1/1 (22 kg de chaux pour 20 kg de chènevotte), alors qu'une chènevotte chaulée venant du commerce s'approche plus souvent de 2/1. Cependant, ce traitement diminue légèrement la valeur lambda du matériau et donc ses qualités isolantes.

De part et d'autre de la structure sont maçonnés des blocs de chaux-chanvre. Ceux-ci sont composés d'un mélange de chaux aérienne et hydraulique avec des copeaux de chanvre. L'épaisseur des blocs se trouvant du côté intérieur de la structure est de 9 cm alors que ceux se trouvant à l'extérieur ont une épaisseur de 19 cm.

Finitions intérieures :

Les cloisons de séparation présentes à l'intérieur de l'habitation sont montées à l'aide de blocs de maçonnerie en béton. Le recours à ce type de matériaux vient sans doute de l'idée initiale de Monsieur Halkin de réaliser l'ensemble de la structure en béton. Une autre possibilité serait que les parois en blocs de béton augmentent considérablement la masse de l'habitation donc son inertie. Un poêle à bois a été choisi pour chauffer le bâtiment, il est donc important qu'il possède une bonne inertie.

Les finitions intérieures n'ont pas encore été appliquées. Un enduit à base de chaux ou d'argile a été choisi pour finir les murs intérieurs. La provenance de l'argile reste encore floue pour l'autoconstructeur qui ne sait pas encore s'il va utiliser la terre provenant de son chantier. Il devra ensuite faire tous les tests nécessaires afin de s'assurer que la terre soit bien utilisable et afin de déterminer la composition de l'enduit à mettre en œuvre. Comme pour le montage des blocs de maçonnerie, un corps de métier qualifié (enduseur) sera sur place pour écoler le propriétaire du futur projet.

Finitions extérieures :

Ce travail n'a pas encore été réalisé mais le projet initial met en œuvre un enduit à la chaux directement sur les blocs de chaux-chanvre. Ceux-ci ayant besoin de respirer, un enduit classique comme le crépis n'aurait pas convenu. La chaux, elle, laissera respirer correctement les blocs isolants.

Analyse d'un raccord type — fondations :

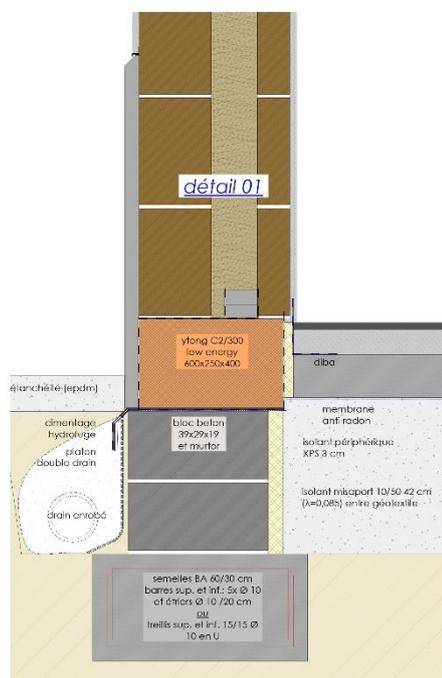


Figure 23 – Raccord de fondations 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Dans ce projet, l'ensemble du complexe portant de l'enveloppe, c'est-à-dire l'ossature en bois ainsi que les deux couches isolantes se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'ossature, repose sur une seule semelle de blocs en béton de 39 cm par 29 cm par 19 cm. Ces blocs reposent eux-mêmes sur une semelle filante en béton armé. Pour faire le lien entre les blocs de béton et l'ossature en bois, on retrouve un bloc isolant type Ytong Low Energy® de dimensions 60cm par 25 cm par 40 cm. Ce bloc de béton cellulaire est composé de sable, ciment, chaux, gypse et d'un agent d'expansion. Un bloc fini nécessite l'apport de 80 % d'air pour 20 % de matière première. La continuité thermique est donc assurée entre la paroi verticale et l'isolation de la dalle de sol. La lisse basse de l'ossature bois est composée de deux éléments en bois autoclavé, ce traitement du bois consiste à plonger celui-ci dans une cuve sous pression (appelée autoclave) afin d'augmenter la pénétration du

produit de protection à l'intérieur du bois. Ce traitement est très efficace et offre une durabilité optimale pour les bois exposés aux intempéries ainsi qu'aux moisissures et aux insectes. Cette dernière isolation est en Misapor® 10/50 protégé entre des géotextiles. Enfin, un soubassement en ciment est réalisé à l'extérieur afin de protéger l'enduit de finition de tout type d'attaque provenant du sol.

Analyse d'un raccord type — plancher :

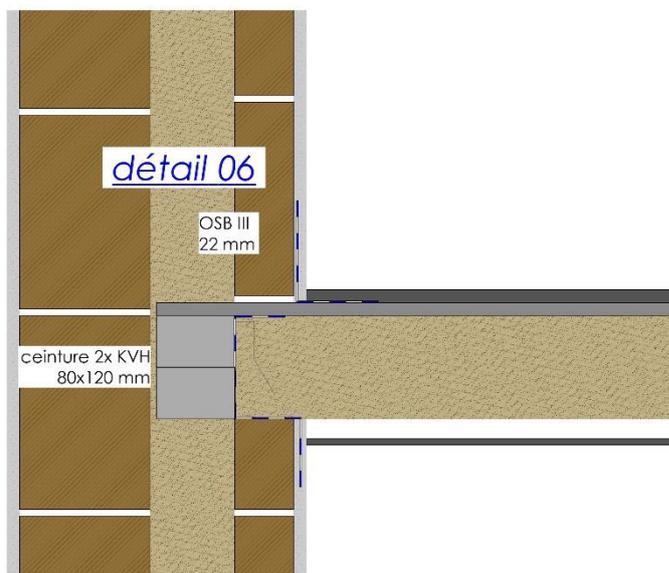


Figure 24 – Raccord de plancher 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Les éléments de gitage du plancher viennent s'accrocher à la ceinture périphérique composée par les lisses haute et basse des ossatures bois. Pour rappel, ces lisses sont des KVH de dimensions 80mm par 120 mm. Le vide entre ces éléments de gitage devait être comblé par de la chènevotte en matelas. Cependant, l'autoconstructeur pense avoir recours à de la laine de chanvre ou un autre isolant matelassé. Cet isolant sera maintenu par de l'OSB en face inférieure qui sera enduit ou recevra une plaque de Gyproc. Une couche de plaques d'OSB III de 22 mm est

placée sur le gitage pour recevoir la finition.

Analyse d'un raccord type — toiture :

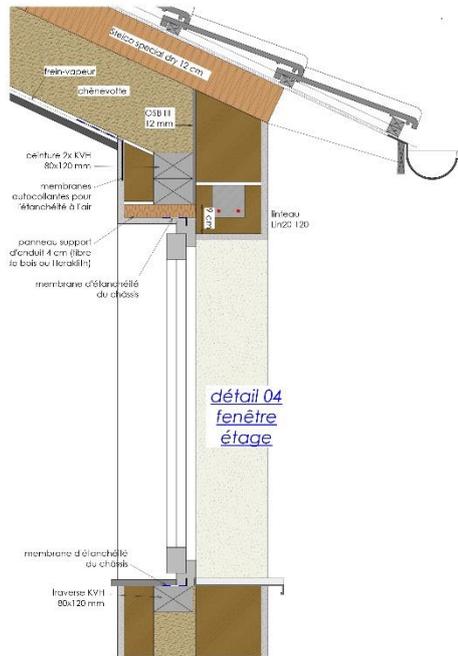


Figure 25 – Raccord de toiture 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

La lisse haute ainsi que la lisse de chaînage de l'ossature bois se trouvant à l'étage de l'habitation sont composées de KVH de dimensions 80mm par 120 mm.

Un panneau en fibre de bois est utilisé en dessous de la double lisse en KVH comme support d'enduit mais permet également la continuité de l'isolation entre le châssis et les blocs de chaux-chanvre intérieurs.

L'isolation du complexe de toiture est un remplissage entre gitages de chènevotte.

Performances énergétiques du bâtiment :

Le bâtiment a un volume protégé total de 707 m³

Tableau 11 – Récapitulatif des performances énergétiques 1

Source : valeurs communiquées par Stephen Toumpsin

U/R	
Niveau K	28,0
Niveau E _w	65,0
Espec	115
Ventilation	-
Indice de surchauffe	

Attention, certaines données peuvent encore évoluer car elles ont été extraites du formulaire de déclaration PEB initial du projet.

2.4.2. Analyse du projet GEORGES

○ Introduction du projet

Projet :	Maison GEORGES
Propriétaires :	Olivier GEORGES et Anne PHILIPPE
Localisation :	Stavelot
Année du début de construction :	2013
Année de livraison :	2016
Superficie habitable :	185 m ²
Structure :	Bois
Isolation :	Paille

Monsieur Olivier GEORGES, propriétaire et autoconstructeur de cette maison a été titulaire durant quelques années d'un cours sur l'environnement. La question d'une construction respectueuse et sobre en énergie lui semblait donc être primordiale lorsqu'il a entamé la conception de son habitation. Une hybridation entre contrainte financière et passion pour la construction a conduit Monsieur GEORGES a décidé de construire lui-même sa maison.



Figure 26 – Photographie du projet Georges

Source : photographie de Stephen Toumpsin (avec autorisation)

La construction de cette habitation a été achevée il y a 5 ans maintenant. Ce bâtiment peut accueillir une famille de 5 personnes (deux adultes et trois enfants) et a été conçu pour pouvoir être divisé en deux le cas échéant. L'espace situé face au parking de la maison peut en effet être séparé du reste du bâti par un « recloisonnement » afin d'y accueillir une fonction libérale par exemple [Fig. 1].

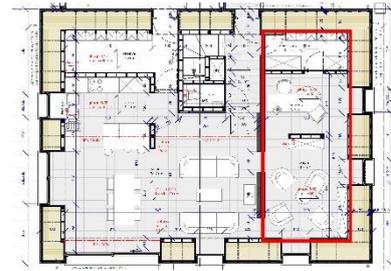


Figure 27 – Plan du RDC 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation) et ajouts personnels

Cet espace peut également servir de zone d'entrée pour une habitation qui se situerait au niveau du rez-de-chaussée, alors que le hall d'entrée actuel ainsi que la cage d'escalier seraient quant à eux séparés de ce niveau afin de desservir l'étage du bâtiment.

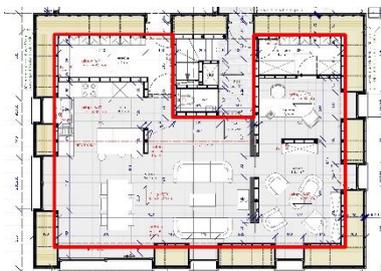


Figure 28 – Découpe du plan 1

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation) et ajouts personnels

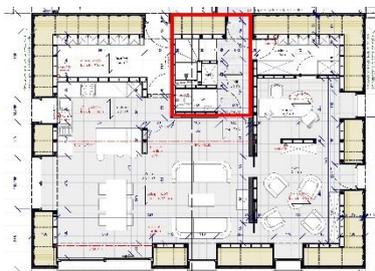


Figure 29 – Découpe du plan 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation) et ajouts personnels

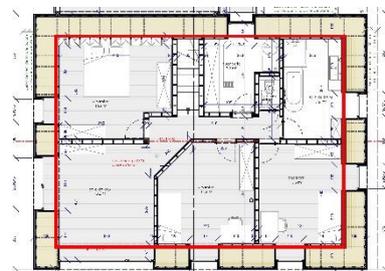


Figure 30 – Découpe du plan 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation) et ajouts personnels

D'un point de vue architectural et conception, on remarque que le choix des techniques mises en œuvre notamment au niveau de l'isolation a une grande influence sur le dessin des façades du bâtiment. Nous y reviendrons plus tard.⁵



Figure 31 – Façade Sud 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

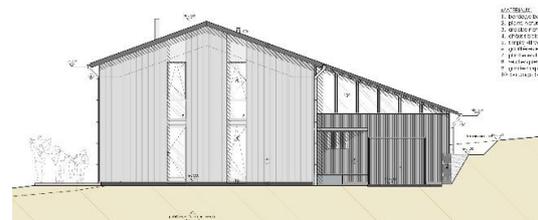


Figure 32 – Façade Est 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

⁵ Des documents complémentaires à ceux se trouvant dans l'analyse sont disponible en **Annexe 6.5**.

○ Analyse :

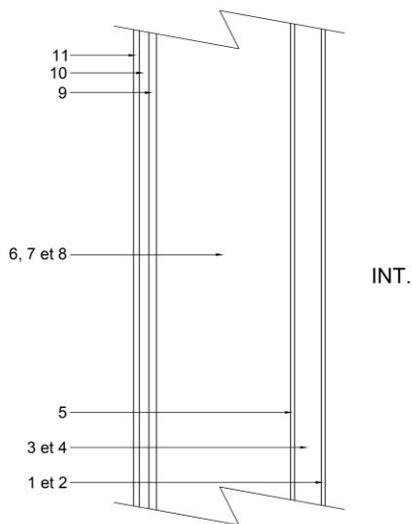


Figure 33 – Coupe type 2

Source : Schéma personnel

Inventaire des matériaux :

- Finition à l'enduit d'argile (1)
- Canisses de roseaux pour le support d'enduit (2)
- Remplissage en terre crue (3)
- Structure bois (4)
- Panneau Naturspan étanche à l'air (5)
- Botte de paille (6)
- Barbotine (7)
- Structure bois (8)
- Voliges de serrage des bottes (9)
- Lattes et contre-lattes (10)
- Bardage bois (11)

Structure :

Deux ossatures sont mises en place dans l'enveloppe, la première constitue la structure de l'habitation et se compose de madriers en bois de section 38mm par 140 mm disposés à entre-axe régulier de plus ou moins 450 mm. Ces madriers sont triplés aux extrémités des pans de murs. Cette structure porte à elle seule les planchers ainsi que la toiture du projet. L'idée de l'autoconstructeur était ici de pouvoir fermer au plus vite l'intérieur de l'habitation avec la première structure pour venir ensuite déposer les grosses bottes de paille à l'extérieur. La seconde structure quant à elle est disposée horizontalement et n'a pour but que de « porter » le bardage extérieur, elle est maintenue à la structure principale par des chevrons entre les ballots d'isolation. Une autre raison pour laquelle les deux structures ont été réalisées indépendamment est que l'ossature principale, ainsi que les châssis et la toiture ont été posés par une entreprise en menuiserie générale. L'autoconstructeur avait ainsi organisé son chantier de telle sorte à ce qu'il doive préparer les fondations pour que l'entreprise vienne

ensuite monter le gros œuvre fermé en un seul temps et qu'il puisse dès lors continuer à travailler lui-même sur l'isolation et les finitions extérieures et intérieures de la maison.

L'utilisation de grosses bottes de paille pour isoler le projet apporte certaines contraintes d'un point de vue structurel. La plus importante est le fait de ne pas pouvoir créer des linteaux sur lesquels viendraient reposer les ballots du fait de leur poids important, donnant un aspect vertical à l'architecture des façades (comme mentionné plus haut). L'enveloppe est donc composée de différents pans structurels à tendance verticale, reliés entre eux par des poutres KVH situées au niveau des ouvertures.

Pour augmenter l'inertie hydrique et thermique de la structure bois, un remplissage en terre crue a été inséré entre les montants de l'ossature. La terre utilisée provenait des déblais du chantier et a été entreposée dans le garage de la future construction et a évidemment dû être tamisée afin d'en enlever toutes les impuretés ainsi que les gravas qui pouvaient s'y trouver. Cette couche performante est maintenue entre un panneau de Naturspan se trouvant d'un côté des montants de l'ossature et de canisses de roseaux se trouvant de l'autre côté.

Le panneau de particules Naturspan® HS est un produit commercial utilisé pour contreventer la structure bois. Ce panneau propose différentes caractéristiques telles qu'une résistance élevée en milieu intérieur humide, une émission faible de formaldéhyde comparable à celle du bois massif (à savoir moins de 2 mg par 100 g de panneau sec), ainsi que l'absence de colles phénoliques et d'isocyanates dans sa composition. Ce panneau peut également être recouvert d'une couche de finition sur l'une de ses faces mais ce n'est pas le cas ici étant donné son utilisation restreinte à l'intérieur de la paroi. Ce panneau joue également un rôle de surface d'étanchéité à l'air.

Isolation :

Les bottes de paille utilisées pour isoler l'habitation sont des gros ballots. Ceux-ci sont plus compliqués à mettre en œuvre que des ballots de petite taille mais proposent de meilleures performances car ils sont plus larges et étant donné leur taille plus importante, on compte moins de « raccords » entre ceux-ci. De plus, ces ballots sont généralement mieux compactés que les petits de par leur taille et les machines utilisées pour le pressage qui sont plus performantes. Cette technique a été préférée à celle utilisant des petites bottes car l'autoconstructeur, venant d'une famille d'agriculteurs, disposait d'un chariot télescopique

gros tonnage de type Merlo®. Étant donné que les bottes de paille se trouvent à l'intérieur des deux ossatures, aucun complément d'isolation n'a été requis afin d'obtenir des performances homogènes. La longueur des ballots peut être déterminée lors du pressage de ceux-ci. Une fois la longueur encodée, la presse sort les ballots demandés. Ceux-ci doivent donc être numérotés et seront positionnés selon un plan de montage précis où les dimensions de parois verticales influencent la longueur des ballots.

De la chaux vive a été projetée sur les bottes de paille se trouvant en partie inférieure du complexe afin d'ajouter une protection supplémentaire contre les rongeurs. La même chaux a été utilisée entre les lits de ballots. Cette partie présentant une discontinuité d'un point de vue compacité, les rongeurs pourraient s'y loger, dans le cas où ils parviendraient à pénétrer dans l'enveloppe du bâtiment. Il était donc également important pour l'autoconstructeur de protéger correctement cet endroit sensible.

D'un point de vue architectural, la technique d'isolation avec de grosses bottes permet de créer des espaces privilégiés aux endroits des ouvertures vers l'extérieur. L'épaisseur des parois, induite par les ballots, donne naissance à de véritables espaces au sein du plan dans lesquels il est par exemple possible de s'asseoir et de lire un livre face au paysage. Cette sensation d'espace est augmentée par l'absence complète de linteau, laissant ainsi le plafond courir jusqu'à rencontrer le châssis. On constate également un jeu entre larges et fines ouvertures, encore une fois accentué par l'épaisseur de l'enveloppe qui se fait bien plus ressentir au niveau des petites baies que des grandes. Enfin, la notion d'habiter mais surtout d'abriter prend ici tout son sens, ce bâtiment est un véritable cocon aux parois épaisses destinées à protéger son habitant.

Finitions intérieures :

Les canisses de roseaux sont quant à elles fixées sur le chant opposé aux montants d'ossature. Elles servent dans un premier temps à retenir la terre crue qui a été disposée entre les montants d'ossature mais sont également présents pour servir de support d'enduit de finition intérieure. Les canisses sont conditionnées en rouleaux et doivent être correctement espacées pour permettre à l'enduit d'y adhérer au mieux. De surcroît, afin d'éviter toute fissuration, la toile de jute peut être placée entre les raccords des rouleaux pour les « armer ». Cependant, ce n'est pas le cas ici : l'autoconstructeur a opté pour la pose d'un filet sur la deuxième couche

d'enduit. Cette étape est très délicate, car l'enduit est plus fin à certains endroits, ce qui engendre l'apparition du filet en surface de la finition.

Tout comme la terre crue se trouvant dans l'ossature bois, l'argile utilisée pour faire l'enduit de finition intérieure vient des déblais du chantier. Celui-ci a donc également dû être tamisé afin d'y enlever toutes les impuretés qui s'y trouvaient. Différents tests ont été réalisés avec cette terre afin de trouver la composition idéale | cf. **1.1.4.** |. Il fallait que l'enduit ne soit pas trop humide, car il aurait été trop collant lors de la mise en œuvre et aurait présenté plus de risques de fissuration par la suite. Mais il ne devait pas être trop sec sous peine de ne pas être mis en œuvre correctement et de ne pas adhérer suffisamment au support d'enduit. Pour ce faire, plusieurs compositions différentes ont été réalisées puis disposées sur une canisse de roseaux verticale afin de les laisser sécher et qu'ils puissent « prendre ». Après quelques jours, la composition qui sera utilisée pour réaliser les enduits de finition est définie par simple observation des résultats.

Ici, on remarque la volonté de garder la couleur naturelle de l'enduit à base d'argile. On voit clairement apparaître sur les murs certaines composantes du mélange telles que les fibres qui donnent une légère texture à l'enduit. Les enduits présents dans la salle de bain ont cependant été peints l'année passée afin d'éclaircir la pièce.

Il est important de noter que si la majorité des finitions intérieures est réalisée à partir d'enduit, certaines pièces de l'étage, comme les chambres, sont revêtues de finitions en bois. Le travail de tamisage des terres pour réaliser les enduits demande en effet un investissement considérable. Le choix a donc été fait de favoriser les finitions à l'enduit pour les pièces de vie et de garder le bois, une finition plus simple à mettre en œuvre pour d'autres pièces. Les plafonds sont quant à eux recouverts de plaques de plâtre.

Finitions extérieures :

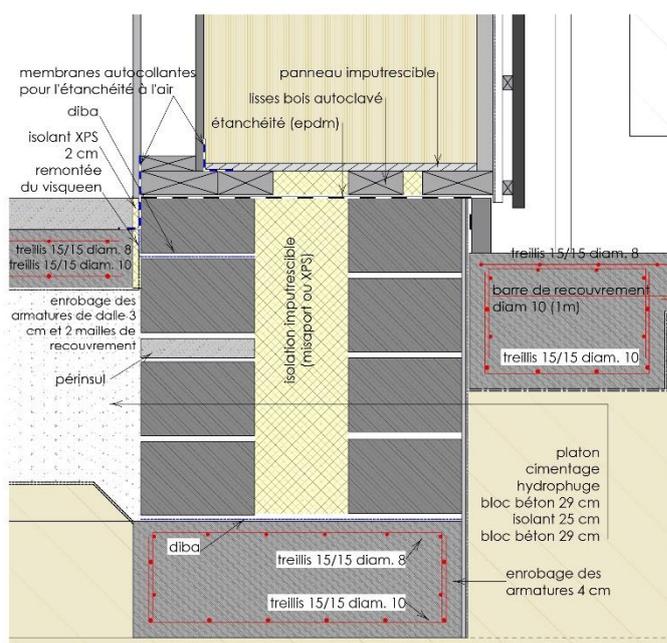
Les bottes de paille sont enduites sur leur surface extérieure de barbotine. Il s'agit d'une pâte d'argile délayée dans l'eau qui est appliquée sur la surface des ballots au pinceau ou à l'aide d'un pistolet projecteur sur une profondeur de 3 à 4 cm afin de permettre une meilleure adhérence de l'enduit de finition sur le ballot. Lorsque l'on travaille avec des ballots de plus petite taille, ceux-ci peuvent être directement plongés dans un bain de barbotine avant d'être mis en place dans la paroi. Cela permet une pénétration du liquide à l'intérieur du ballot. Cette

barbotine, utile lorsque l'on met en œuvre des enduits, sert ici surtout à protéger la construction du feu et à améliorer la régulation de l'humidité.

Sur la structure secondaire (horizontale) sont fixées des voliges de serrage afin de maintenir correctement les bottes de paille en place.

Enfin, un lattage contre-lattage est fixé sur ces voliges afin de permettre une aération correcte des lames de bardage en bois fixées verticalement. Ce bardage est en douglas autoclavé, cela signifie qu'il a subi un traitement en profondeur afin d'être résistant aux agressions biologiques. Le douglas, contrairement aux bois exotiques, est sensible à la pourriture et aux insectes. Les lames de bardage de la partie habitation sont disposées en deux couches, de telle sorte qu'une lame recouvre toujours un joint entre deux lames. Pour ce qui est de la partie garage, les joints ne sont pas recouverts.

Analyse d'un raccord type — fondations :



Comme pour la structure de l'habitation, les fondations mises en place ici sont doubles. Les blocs en béton de 29 cm reprennent d'une part la structure portante du projet et d'autre part la structure secondaire, qui porte le bardage. Ils reposent sur une semelle filante en béton armé. Entre ces blocs, un isolant Misapor® est mis en place. Cet isolant est très intéressant à plusieurs points de vue, car il

Figure 34 – Raccord de fondations 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

possède également de très bonnes performances en matière d'étanchéité et de drainage. Il est également très adapté à l'autoconstruction, car son emploi est simple et rapide.

Analyse d'un raccord type — plancher :

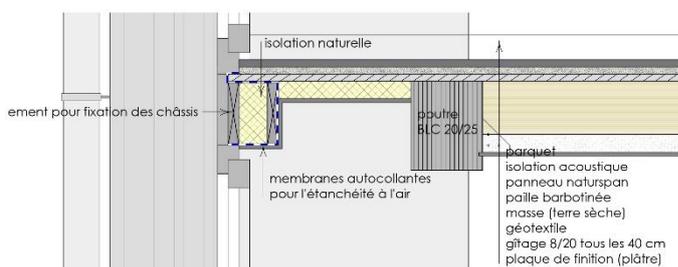


Figure 35 – Raccord de plancher 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Le plancher se compose d'un gitage 80mm par 200 mm avec entre-axe de 400 mm qui vient se fixer dans les poutres de ceinture se trouvant dans l'enveloppe du bâtiment. On retrouve sur la face supérieure le même panneau Naturspan® que dans cette enveloppe.

Analyse d'un raccord type — toiture :

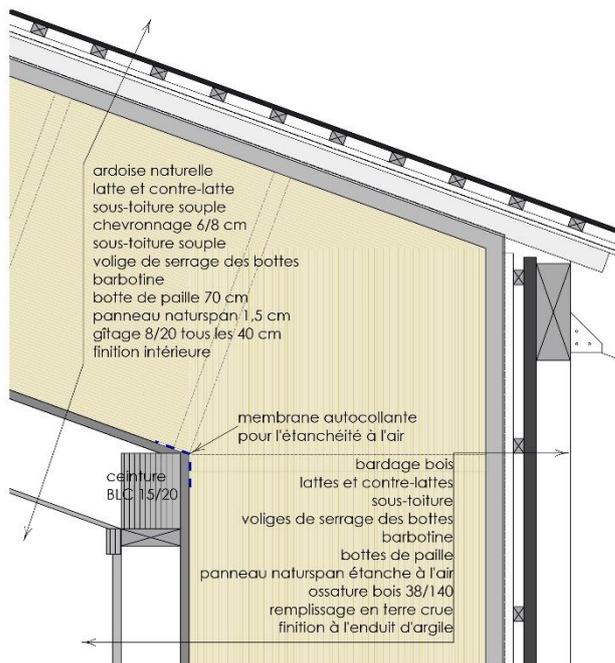


Figure 36 – Raccord de toiture 2

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

La continuité entre l'isolation des parois verticales et l'isolation de la toiture est complètement assurée du fait du système constructif employé. Les ballots viennent se déposer sur la structure principale, enveloppant l'intégralité de l'habitation sans discontinuité. Le chevronnage dans les deux sens en toiture permet un débordement de 50 cm de celle-ci au-delà de l'aplomb du mur afin de protéger le raccord entre la paroi verticale et la toiture mais également servir de casquette pour éviter toute surchauffe à l'intérieur du bâtiment lorsque le soleil est haut.

Performances énergétiques du bâtiment :

Le bâtiment a un volume protégé total de 943 m³

Tableau 12 - Récapitulatif des performances énergétiques 2

Sources : valeurs communiquées par Stephen Toumpsin

U/R	
Niveau K	21,0
Niveau E _w	23,0
Espec	32,5
Ventilation	
Indice de surchauffe	

2.4.3. Analyse du projet HALLET

○ Introduction du projet

Projet :	Maison HALLET
Propriétaires :	Romain HALLET et Laurie VANDERVECK
Localisation :	Trois-Ponts
Année du début de construction :	2016
Année de livraison :	-
Superficie habitable :	186 m ²
Structure :	Bois
Isolation :	Paille

Ayant vécu l'expérience de l'autoconstruction avec ses parents, Monsieur HALLET a voulu réitérer l'expérience. Cela lui a également permis de travailler avec des matériaux biosourcés. Les économies réalisées grâce au choix de cette technique de construction lui ont permis de mettre en œuvre des matériaux plus onéreux. Les termes « matériaux onéreux » doivent ici être précisés... Des matériaux qui ne sont pas particulièrement plus chers que les autres mais qui nécessitent plus de main d'œuvre et ont donc un coût final plus important. Au moment de l'écriture de ce travail, le gros œuvre extérieur ainsi que l'intérieur du rez-de-chaussée sont terminés alors que l'étage est toujours en travaux.



Figure 37 – Photographie du projet Hallet

Source : photographie de Stephen Toumpsin (avec autorisation)

L'habitation est prévue pour recevoir une famille de quatre à cinq personnes, dont deux adultes. Le rez-de-chaussée s'organise autour du hall d'entrée qui dessert les espaces de vie, une buanderie, la chambre parentale ainsi qu'un escalier qui monte à l'étage où l'on retrouve la salle de bain, les chambres des enfants et une salle de jeu, qui le cas échéant peut être transformée en quatrième chambre.

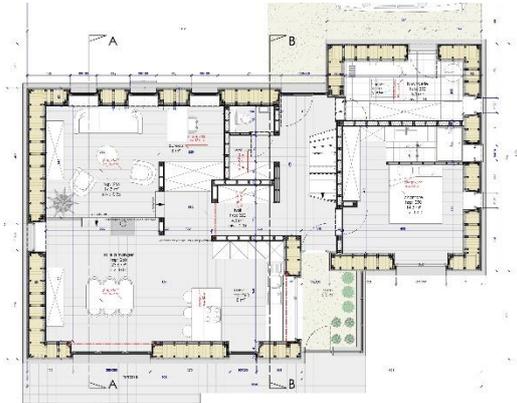


Figure 38 – Plan du RDC 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

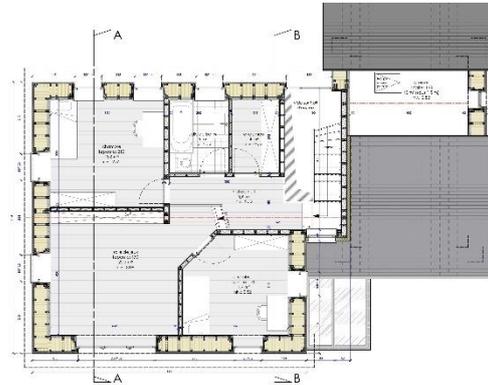


Figure 39 – Plan du +1 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Une serre bioclimatique est dessinée en enfilade du hall d'entrée. Cet espace a pour vocation de servir de zone tampon entre le jardin et l'intérieur de l'habitation mais également de chauffer les pièces de vie de celle-ci.

On peut remarquer que les façades de l'habitation s'orientant vers le terrain sont plus généreusement percées que les autres. Cette différence du traitement des façades vient d'une volonté d'intégration du bâtiment dans son contexte. Les autres habitations disposent en effet de façades à caractère rural avec des percements mesurés. L'intention était donc de montrer cet aspect rural de la construction alors que la façade qui n'est pas visible propose elle des percements beaucoup plus généreux afin de maximiser les apports lumineux à l'intérieur du projet.⁶

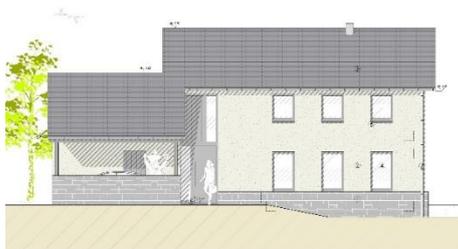


Figure 40 – Façade Est 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)



Figure 41 – Façade Ouest 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

⁶ Des documents complémentaires à ceux se trouvant dans l'analyse sont disponible en **Annexe 6.6**.

○ Analyse :

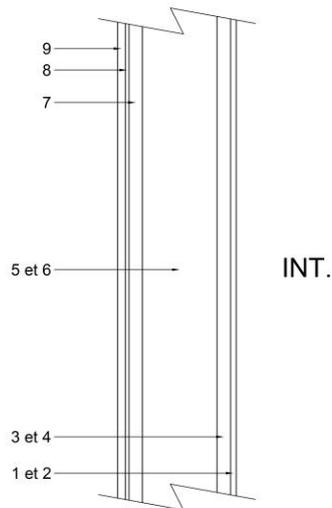


Figure 42 – Coupe type 3

Source : schéma personnel

Inventaire des matériaux :

- Finition à l'enduit d'argile (1)
- Canisses de roseaux pour le support d'enduit (2)
- Remplissage en terre crue (3)
- Structure bois (4)
- Botte de paille dressée (5)
- Gobetis (6)
- Structure bois (7)
- Lattage en résille (8)
- Finition à l'enduit de chaux (9)

Structure :

L'ossature du projet a été pensée avec une double structure portante, les montants d'ossature ne sont cependant pas destinés à soutenir les mêmes éléments. Les KVH de dimensions de 60 mm par 140 mm se trouvant du côté intérieur de l'enveloppe supportent les planchers et la toiture ainsi que les différentes composantes de la paroi, alors que les KVH de dimensions 60 mm par 70 mm se trouvant du côté extérieur de l'enveloppe sont utilisés pour soutenir les composantes de la paroi et contreventer le bâtiment. Ces deux ossatures reposent sur une lisse basse composée d'un panneau de multiplex baké de 21 mm d'épaisseur et de lisses en bois autoclavé et sont reliées entre elles au droit des planchers. Ces éléments, une fois mis en place, servent de cage dans laquelle viennent se glisser les petites bottes de paille qui isoleront l'habitation. L'entre-axe des montants d'ossature a été déterminé par la largeur des bottes de paille isolantes.

Le contreventement de l'ensemble est assuré par la seconde ossature sur laquelle sont fixées des lattes en résille. Cette méthode de contreventement consiste à disposer le lattage sur les montants d'ossature à intervalle régulier et de manière oblique, ce qui permet de créer une triangulation suffisante. Cette technique offre différents avantages tels que le travail avec du bois massif plutôt que des panneaux recomposés souvent très gourmands en énergies grises

et offrant un confort d'habitabilité moins important de par les éléments qui s'en dégagent. On remarque également un gain réel de matière première.

Le problème de l'inertie thermique et hydrique des structures bois est souvent mis en avant dans la construction. Il est cependant ici réglé à l'aide d'un remplissage de la structure avec de la terre crue provenant directement des déblais du chantier. Comme pour le projet mettant en œuvre de grosses bottes de paille comme matériau isolant, cette terre a dû être tamisée afin d'en enlever toutes les impuretés ainsi que les gravas qui pouvaient s'y trouver. Elle est maintenue entre les ballots de paille d'un côté et des rouleaux de canisses de roseaux fixés sur les montants intérieurs de l'ossature.

Isolation :

L'isolation du bâtiment se compose de petits ballots de paille de « section » 36cm par 46 cm et de longueur variable. L'utilisation de bottes de plus petite taille permet une mise en œuvre plus facile mais également de travailler l'isolation à l'intérieur du bâtiment. Comme c'est le cas pour les gros ballots, il est possible de déterminer la longueur des bottes lors du pressage de celles-ci, allant de 80 cm à 120 cm de longueur. Ainsi, si la largeur des ballots a une influence considérable sur le plan du projet de par le report du module de 36 cm, la hauteur quant à elle ne contraint absolument pas le travail de l'architecte qui détermine la longueur des bottes en fonction des hauteurs des planchers. Les ballots isolants sont ici disposés de manière verticale (d'où l'utilisation du terme « dressée » dans l'inventaire des matériaux). Comme dit plus haut, l'entre-axe des éléments de structure a été déterminé selon la taille des bottes isolantes, de telle manière que celles-ci rentrent à serrage dans la cage et soient bloquées sans l'ajout de matériaux complémentaires, facilitant ainsi grandement la mise en œuvre des éléments.

Les ballots disposés verticalement sont plus sujets au tassement que des ballots disposés de manière horizontale. Il faut également ajouter que les petites presses sont moins performantes que celles qui pressent de gros ballots et compactent donc les bottes de manière moins efficace. Il est important de prendre ce paramètre en compte pour éviter un tassement trop important de l'isolant, ce qui amènerait un risque de présence de pont thermique dans l'enveloppe. La solution mise en place ici a donc été de diviser en deux l'enveloppe sur sa hauteur (au niveau des planchers) et de faire reposer les ballots de la partie

supérieure sur la structure du bâtiment au lieu de les laisser s'appuyer sur les bottes inférieures. Ceci permet de diviser la charge propre des bottes de paille en deux pour ainsi réduire les effets de tassement qui y sont directement liés.

Un remplissage avec de la paille en vrac est nécessaire entre les montants d'ossature car ceux-ci empêchent les ballots d'être disposés l'un contre l'autre. Il est impératif que ce remplissage soit réalisé correctement, c'est-à-dire qu'il doit être suffisamment tassé pour que la différence de compacité entre les ballots et la paille en vrac ne soit pas trop importante, de manière à ne pas créer une trop grande discontinuité dans l'isolation de l'enveloppe. Il est également nécessaire d'ajouter de la paille en vrac entre le ballot situé en haut et l'assise reprenant les charges des bottes isolantes supérieures.

Finitions intérieures :

La paille est un support idéal pour les enduits de finition intérieure ou extérieure. Cependant, dans ce projet, une couche de terre crue a été ajoutée pour augmenter l'inertie de la structure bois. Cette couche empêche donc l'utilisation de la paille comme support d'enduit. C'est à ce moment qu'interviennent les rouleaux de canisses en roseaux. Ceux-ci ont une double fonction, comme dit plus haut, puisqu'ils servent à retenir les 7 cm de terre crue ajoutés entre les montants d'ossature ; par facilité, la mise en œuvre de ces deux éléments se fait d'ailleurs simultanément. Mais ils servent également de support d'enduit. Faute de temps, mais également car elles étaient beaucoup trop caillouteuses, les terres résultantes des déblais n'ont pas été utilisées dans ce cas-ci. Les surfaces intérieures de l'enveloppe ont donc été enduites avec de la terre commerciale. Un treillis en fibre de verre a également été disposé dans la dernière couche d'enduit afin de minimiser les risques de fissuration. Les plafonds sont également revêtus, en utilisant comme support des canisses agrafées à des panneaux d'OSB. Les finitions ont parfois été teintées pour en faire varier les nuances sur les différents murs de l'habitation. Mais à certains endroits, celui-ci a gardé sa couleur naturelle.

Finitions extérieures :

Le choix de la finition extérieure s'est tourné vers un enduit à base de chaux. Cette composition permet une migration de la vapeur mais empêche la pluie de pénétrer dans l'enveloppe protectrice de l'habitation.

Le support d'enduit à l'extérieur de l'enveloppe est double. En effet, la résille en lattage qui sert au contreventement de la structure bois permet un excellent accrochage de l'enduit sur la façade. Alors que la paille, en arrière-plan, sert également de support d'enduit, les qualités adhérentes à ce second support sont augmentées par l'ajout d'un gobetis projeté au pistolet.

Enfin, un soubassement en moellons d'une quarantaine de centimètres de haut a été dessiné sur tout le périmètre de l'habitation afin de protéger l'enduit blanc de tout type d'attaque. Ce soubassement en pierre sert également de rappel à l'architecture des anciennes bâtisses avoisinantes, pourvues d'un soubassement qui a subi un traitement différencié du reste des façades.

Analyse d'un raccord type — fondations :

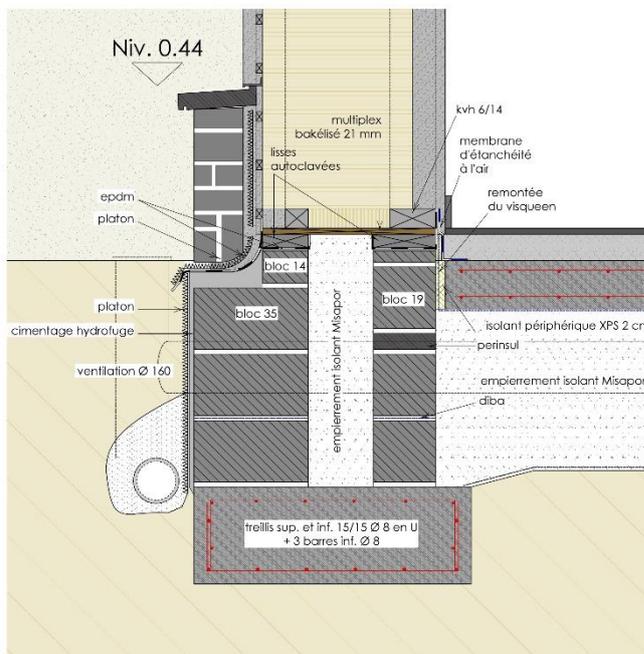


Figure 43 – Raccord de fondations 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Par le simple fait de correspondance avec la structure mise en place dans le projet, les fondations sont doubles. Des blocs de 19 cm reprennent les charges qui descendent de la structure se trouvant du côté intérieur de l'enveloppe alors que des blocs de 35 cm reprennent les charges qui viennent de la seconde structure en plus du soubassement protecteur. Ces deux composantes des fondations reposent sur une semelle filante en béton armé et renferment un isolant Misapor®. On retrouve également cet isolant sous toute la surface de la dalle de sol. Cette solution permet de stabiliser très efficacement la surface de construction, en plus de ses

performances en matière de drainage et d'étanchéité.

Analyse d'un raccord type — plancher :

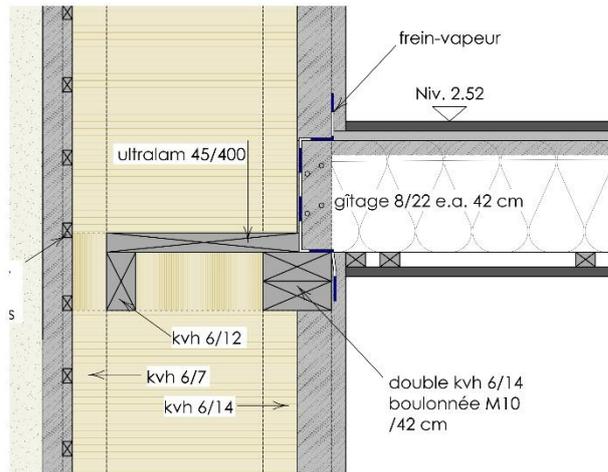


Figure 44 – Raccord de plancher 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Le plancher de l'étage porte sur un gitage composé d'éléments 80 mm par 220 mm disposés à entre-axe régulier de 42 cm. Ce gitage vient s'appuyer sur un double KVH boulonné de 120 mm par 140 mm portant sur l'ossature intérieure de l'enveloppe.

Une assise en bois type ultralam® (panneau dérivé bois) de 45 mm par 400 mm portant sur les deux ossatures et alignée à la surface inférieure des madriers de gitages permet de reprendre le poids propre des bottes de paille isolantes se trouvant au niveau de l'étage. Ce procédé permet de minimiser le tassement des ballots et donc d'optimiser l'isolation de l'habitation. Un complément d'isolation de paille en vrac est cependant nécessaire pour combler le faible tassement présent ainsi que l'espace vide en dessous du panneau Ultralam®.

Analyse d'un raccord type — toiture :

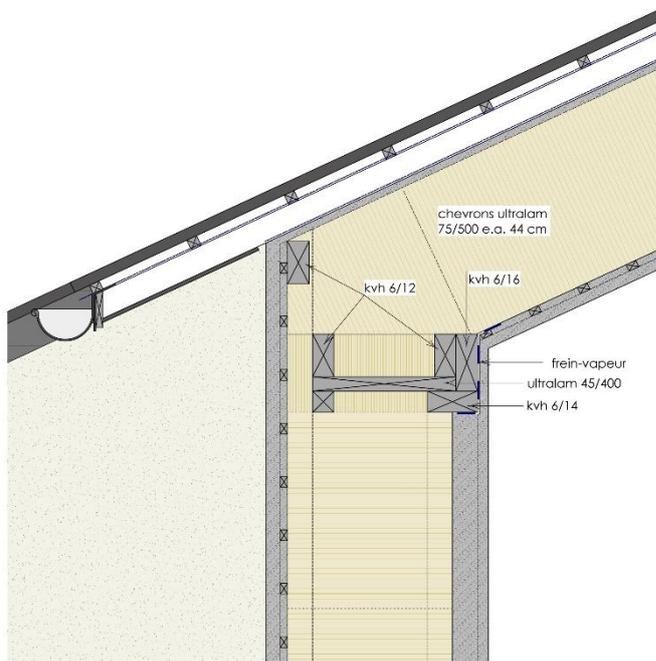


Figure 45 – Raccord de toiture 3

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation)

Comme pour le détail du raccord avec le plancher de l'étage, on retrouve ici une assise en bois type Ultralam® afin de reprendre le poids propre des bottes de paille isolant la toiture de l'habitation. La charge à reprendre étant moins importante, cette assise repose sur un seul KVH de 60 mm par 140 mm du côté de l'ossature se trouvant à l'intérieur du complexe et sur un seul KVH de 60 mm par 70 mm du côté de l'ossature se trouvant à l'extérieur du complexe. De la paille en vrac est également ajoutée dans les espaces qui le nécessitent autour de cet élément d'assise.

Performances énergétiques du bâtiment :

Le bâtiment a un volume protégé total de 805 m³

Tableau 13 - Récapitulatif des performances énergétiques 3

Sources : valeurs communiquées par Stephen Toumpsin

U/R	
Niveau K	23,0
Niveau E _w	64,0
Espec	104,2
Ventilation	-
Indice de surchauffe	

Attention, certaines données peuvent encore évoluer car elles ont été extraites du formulaire de déclaration PEB initial du projet.

2.4.4. Analyse commune

Maintenant que les trois projets ont été analysés de manière séparée, ils vont être comparés poste par poste (structure, isolation, finitions intérieures et extérieures) et synthétisés sous forme d'une axonométrie par projet qui mettra en évidence ces différents postes.

○ Analyse comparative :

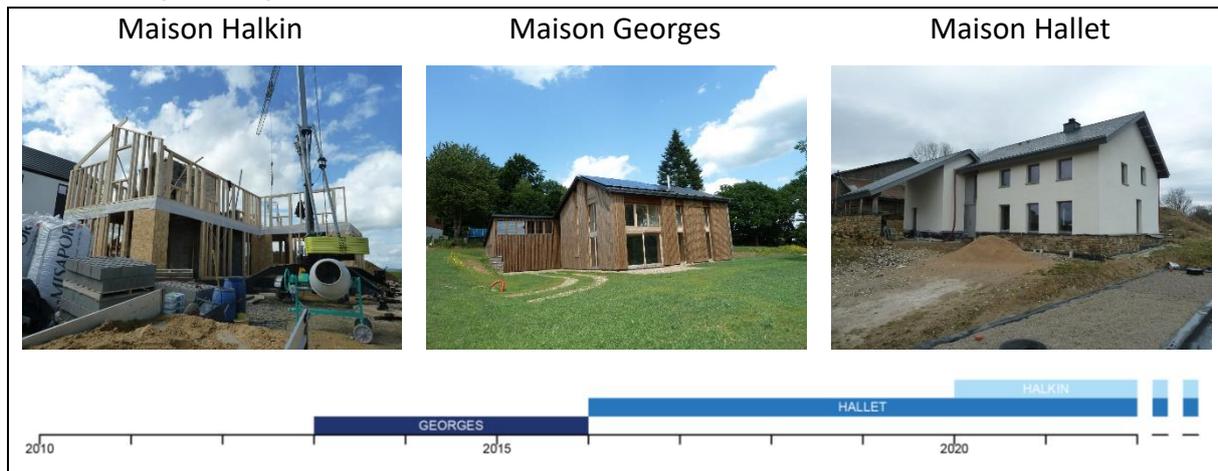


Figure 46 – Comparatif des projets

Source : Stephen Toumpsin (avec autorisation) et ajouts personnels

Structure :

Maison Halkin
Simple ossature en bois reposant sur une fondation en blocs de béton.

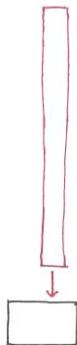


Figure 47 – Schéma structurel 1

Source : schéma personnel

Maison Georges
Double ossature en bois reposant sur une double fondation en blocs de béton avec remplissage de Misapor® entre ceux-ci.

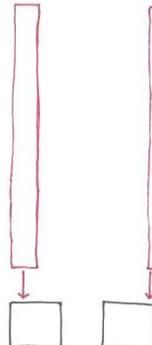


Figure 48 – Schéma structurel 2

Source : schéma personnel

Maison Hallet
Double ossature en bois reposant sur une double fondation en blocs de béton avec remplissage de Misapor® entre ceux-ci.

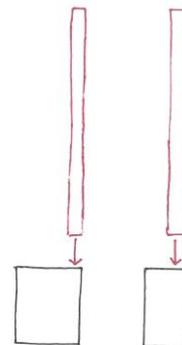


Figure 49 – Schéma structurel 3

Source : schéma personnel

Isolation :

Maison Halkin

Les blocs de chaux-chanvre viennent envelopper la structure bois, un bloc de 9 cm est disposé à l'intérieur de l'habitation alors qu'un bloc de 19 cm se trouve à l'extérieur. Un complément d'isolation en chènevotte est apporté entre les montants d'ossature.

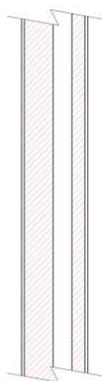


Figure 50 – Schéma isolation 1

Source : schéma personnel

Les couches isolantes extérieure et intérieure représentent respectivement 41 % et 20 % du volume total, donc 61 % de la composition de l'enveloppe, soit $0,63 \text{ m}^3$ d'isolant dans 1 m^3 d'enveloppe.

Maison Georges

Remplissage de la structure en bois avec de grosses bottes de paille enveloppant la structure intérieure de l'habitation.

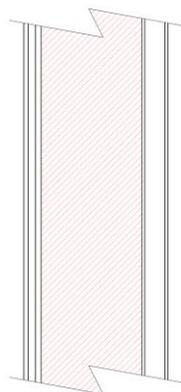


Figure 51 – Schéma isolation 2

Source : schéma personnel

L'isolation représente 70 % de la composition de l'enveloppe, soit $0,7 \text{ m}^3$ d'isolant dans 1 m^3 d'enveloppe.

Maison Hallet

Remplissage de la structure avec des petites bottes de paille insérées par l'intérieur du bâtiment, une fois celui-ci hors air.

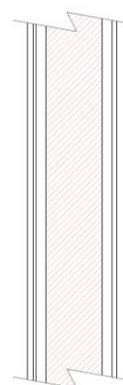


Figure 52 – Schéma isolation 3

Source : schéma personnel

L'isolation représente 63 % de la composition de l'enveloppe, soit $0,63 \text{ m}^3$ d'isolant dans 1 m^3 d'enveloppe.

Les bottes de paille utilisées pour l'isolation des projets GEORGES et HALLET proviennent du même producteur situé à Héléciné dans le Brabant Wallon. Son activité consiste notamment en la production et la vente de grosses ou de petites bottes de paille et de chanvre pour la construction. Les ballots ainsi produits sont d'une qualité supérieure, nécessaire à l'isolation des bâtiments. Il est en effet très important de ne pas mettre en œuvre n'importe quel type de paille dans les complexes isolants.



Figure 53 – Photographie de l'exploitation

Source : photographie personnelle

Finitions intérieures :

Maison Halkin	Maison Georges	Maison Hallet
Finition future : enduit à l'argile dont la provenance n'est pas encore connue.	Enduits de terre crue réalisés avec les déblais du chantier. Ils ont gardé leur couleur naturelle.	Enduits de terre crue réalisés avec les déblais du chantier. Ils ont parfois gardé leur couleur naturelle mais ont également été teintés.

Finitions extérieures :

Maison Halkin	Maison Georges	Maison Hallet
Finition future : enduit à la chaux.	Bardage bois posé sur lattage et contre-lattage afin de permettre à toutes ses faces de respirer correctement.	Enduit de finition réalisé avec un mélange de terre crue et de chaux afin de permettre une bonne étanchéité à l'eau.

Aspect budgétaire :

Compte tenu du fait que les trois projets n'ont pas été conçus en même temps et ne sont pas tous achevés, je vais comparer ici les budgets estimatifs réalisés par l'architecte. Il sera également intéressant d'établir une comparaison de ce qu'auraient pu coûter ces habitations si elles n'avaient pas été autoconstruites. Le prix au mètre carré indiqué dans ce tableau vient d'une valeur de base de 1 500 € / m² HTVA qui est majorée en fonction du « taux d'autoconstruction ».

Tableau 14 – Comparatif des budgets

Source : valeurs communiquées par Stephen Toumpsin et ajouts personnels

	Projet HALKIN	Projet GEORGES	Projet HALLET
Taux d'autoconstruction estimé	50 %	75 %	80 %
Budget HTVA estimé avec autoconstruction (1)	210 000 €	190 000 €	165 000 €
Budget HTVA estimé sans autoconstruction (2)	285 000 €	295 000 €	275 000 €
$\frac{\text{Budget HTVA 1}}{\text{Budget HTVA 2}}$	74 %	64 %	60 %
Budget / m ² HTVA estimé sans autoconstruction	1 500 €	1 500 €	1 500 €
Budget / m ² HTVA estimé avec autoconstruction	1 110 €	960 €	900 €

Deux constatations peuvent être faites sur base de ce tableau. Tout d'abord, le budget d'un projet peut, en fonction de la part d'autoconstruction du projet, être 30 à 40 % moindre par rapport au budget d'un projet plus conventionnel (recours à des entreprises spécialisées, etc.). Ensuite, nous pouvons constater un montant au m² légèrement supérieur pour le projet HALKIN. Ceci peut s'expliquer par le fait que le « taux d'autoconstruction » de ce projet est largement inférieur aux deux autres, et pourquoi pas par l'emploi de matériaux différents tels que le chaux -chanvre, les cloisons en blocs de béton, etc.

- Axonométrie comparative : maison HALKIN

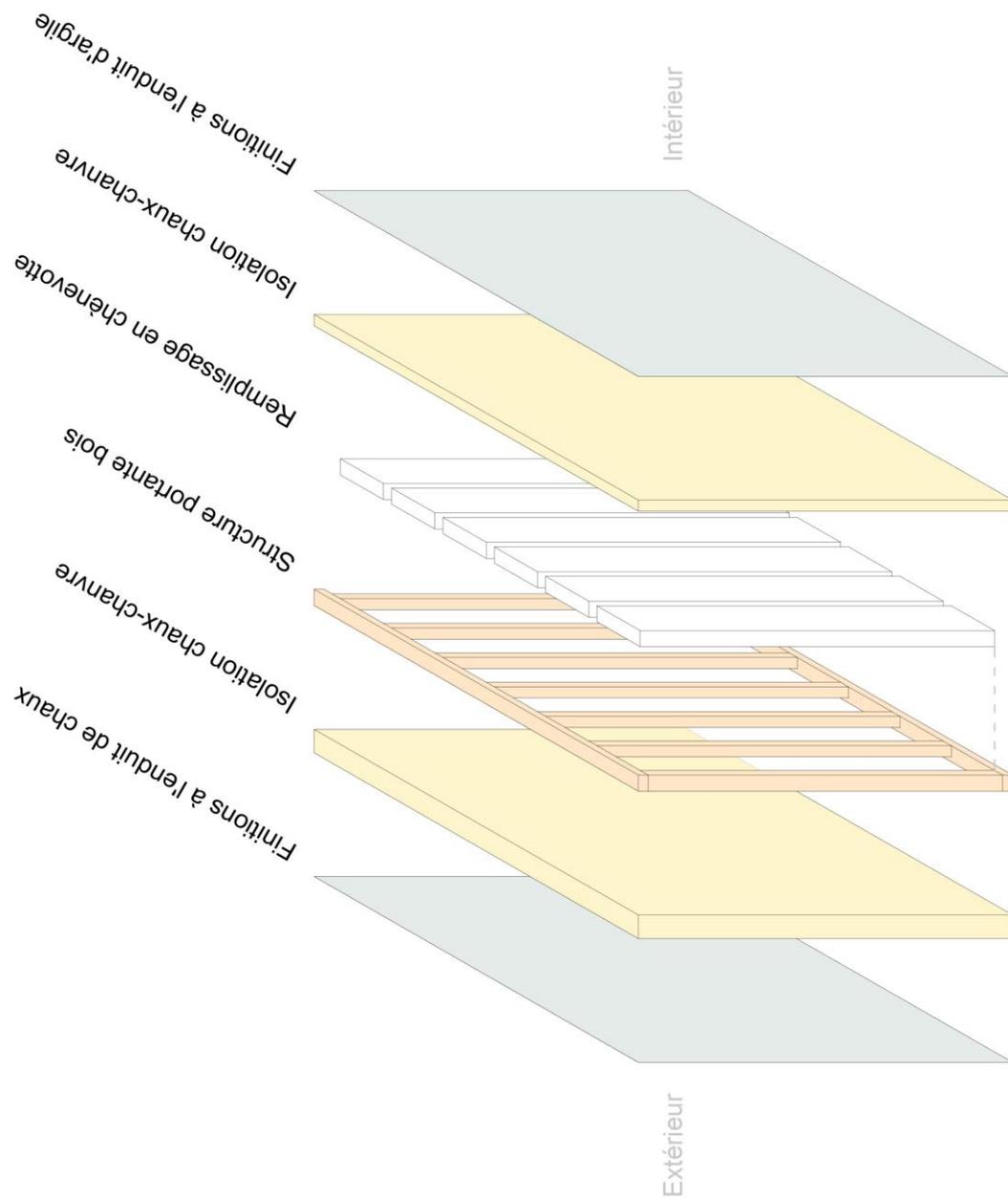


Figure 54 – Axonométrie du système constructif du projet Halkin

Source : schéma personnel

○ Axonométrie comparative : maison GEORGES

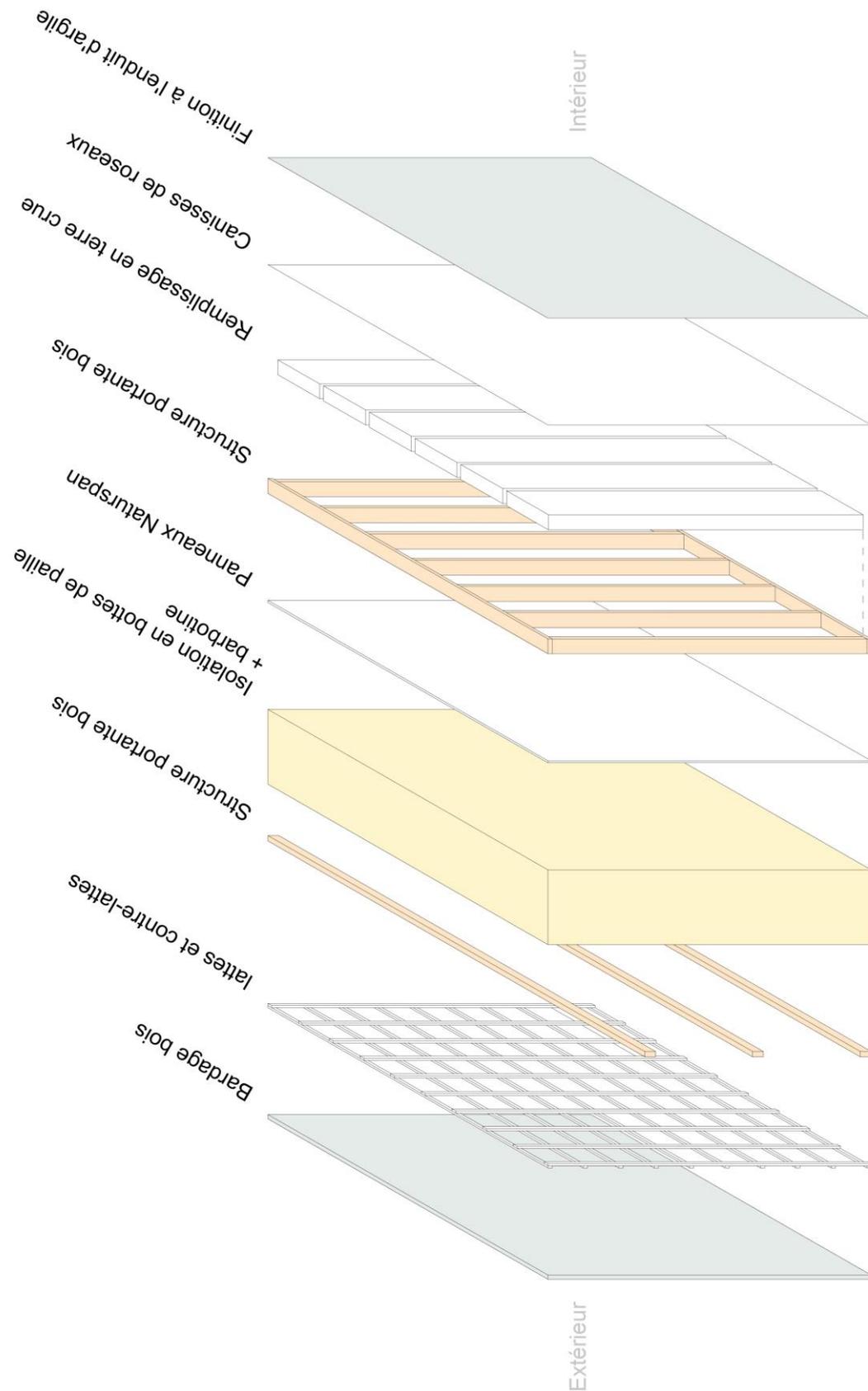


Figure 55 – Axonométrie du système constructif du projet Georges

Source : schéma personnel

○ Axonométrie comparative : maison HALLET

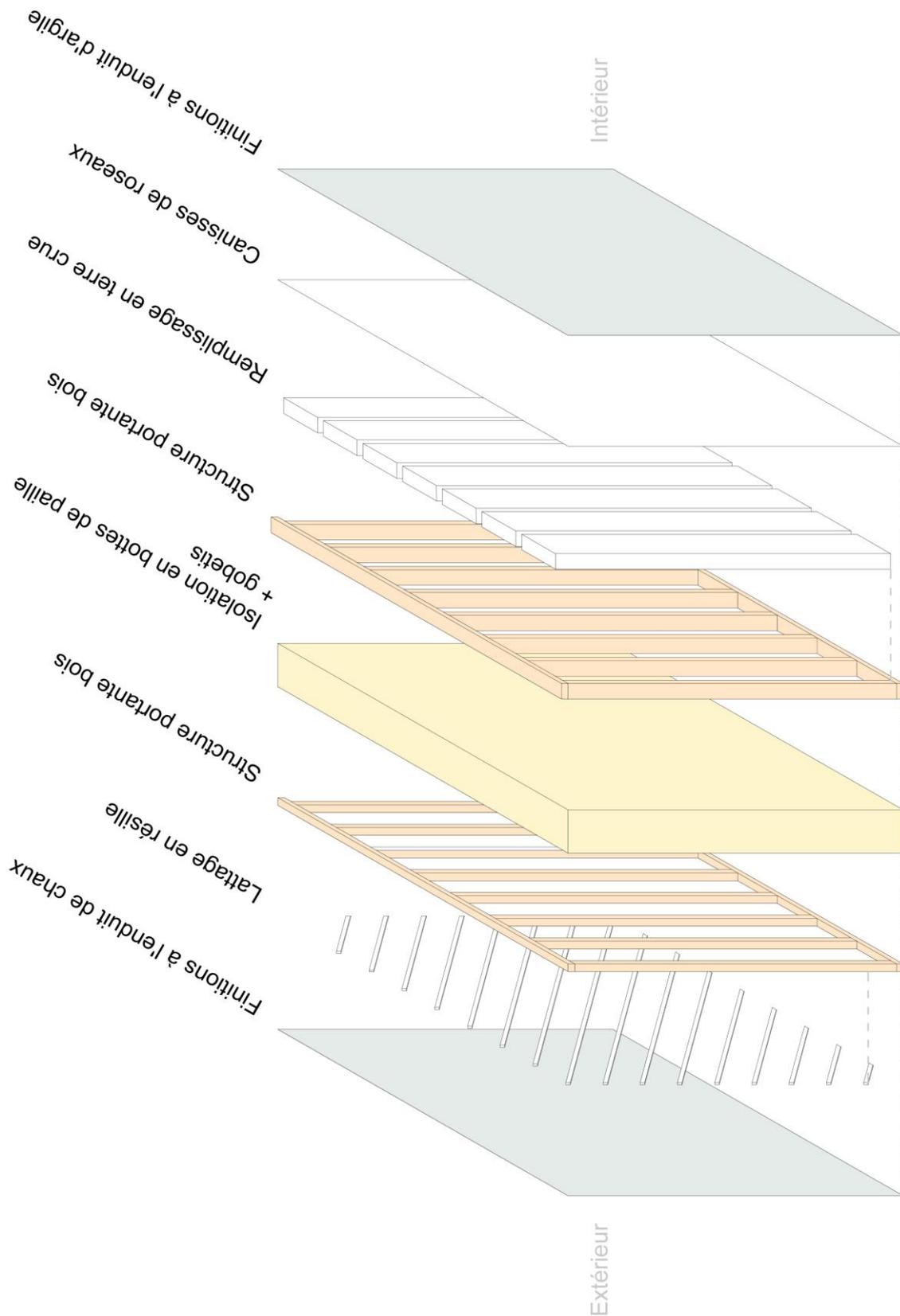


Figure 56 – Axonométrie du système constructif du projet Hallet

Source : schéma personnel

3. Recherche et mise en application sur base de la théorie et la pratique

La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Si la pratique et la théorie sont réunies, rien ne fonctionne et on ne sait pas pourquoi.

Albert Einstein.

3.1. Prolégomènes

Maintenant que les bases théoriques ont été posées et renforcées par les études de cas pratiques, je vais pouvoir mener quelques recherches avant de conclure ce travail. Cette recherche se fera par l'intermédiaire de différentes questions que je me poserai et auxquelles je tenterai de répondre le plus pertinemment possible.

Les matériaux utilisés aujourd'hui dans le monde de la construction ont selon moi souvent tendance à perdre leurs valeurs intrinsèques une fois mis en œuvre dans les différents complexes. Nous ne nous rendons certainement plus compte de toutes les richesses qu'ils peuvent nous apporter d'un point de vue architectural ; leur modularité, leur texture et bien d'autres valeurs tellement de fois oubliées aujourd'hui... Si nous prenons l'exemple de la brique, utilisée durant ces dernières décennies comme simple élément de parement, Frank Lloyd Wright a dit à son sujet : « *Mesdames et Messieurs, savez-vous ce qu'est une brique ? C'est un petit objet ordinaire sans grande valeur, qui coûte 11 cents, mais qui a une particularité extraordinaire. Donnez-moi une brique et elle vaudra son pesant d'or.* » (Schildt et Alvar Aalto Foundation, 1997/2012, p.173). Cette phrase, si percutante soit-elle, veut prôner une architecture qui profite également pleinement des caractéristiques des matériaux mis en œuvre afin de les mettre en valeur, une architecture capable de se détacher du format d'un matériau notamment grâce à l'inventivité de l'architecte qui s'approprie le matériau pour le « glorifier ».

3.2. Questionnements et recherches

3.2.1. Mise en situation

« La brique, parce qu'elle est parallélépipédique, ne convient pas. Le mur de briques conservera son cubisme tant que l'on n'aura pas inventé une brique permettant aux formes de s'exprimer librement. » (Schildt et Alvar Aalto Foundation, 1997/2012, p.173) : serait-ce ici, une sorte de provocation de la part d'Alvar Aalto ? L'architecte, de par son devoir de créativité, peut-il se permettre d'en rester là ? L'architecture expressionniste de l'école d'Amsterdam nous prouvera bien le contraire. La paille, dès lors comparable au matériau brique de par sa modularité, pourrait-elle également permettre l'expression de formes libres ?

Cette sorte de provocation prononcée par Alvar Aalto m'a poussé à approfondir mes recherches en quête d'autres types d'architectures mettant en œuvre ce matériau.



Figure 57 – Photographie de l'école fondamentale de Bernwiller

Source : Matthieu Husser Architectures © (2021)

Qui pourrait croire que cette école en France a été construite et isolée à l'aide de ballots de paille ? C'est pourtant bien le cas ! Dès lors, comment les murs incurvés sont-ils réalisés ? Comment les bottes de paille sont-elles mises en œuvre autour des percements ronds ? Mais surtout comment minimiser les discontinuités d'isolation de l'enveloppe ?

3.2.2. Des surfaces courbes

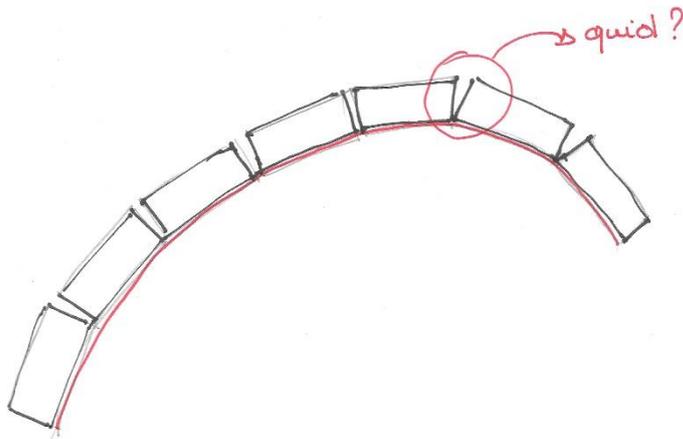


Figure 58 – Recherche d'une forme courbe

Source : dessin personnel

Comment mettre en œuvre une courbe avec des modules (bottes de paille) possédant de telles dimensions? Que se passe-t-il dans le vide résultant du positionnement des ballots?

Une des solutions envisageables serait de remplir ce vide à l'aide de paille en vrac.

Le vide présent entre les deux bottes de paille peut cependant être minimisé si l'on découpe les ballots.

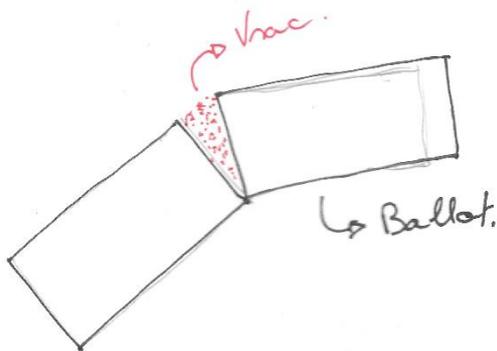


Figure 60 – remplissage avec du vrac

Source : dessin personnel

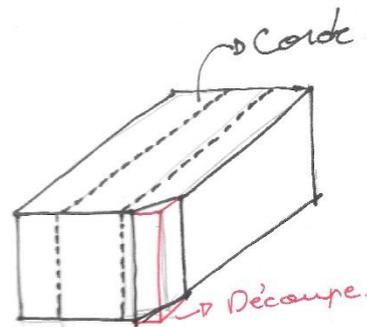


Figure 59 – découpe d'un ballot horizontal

Source : dessin personnel

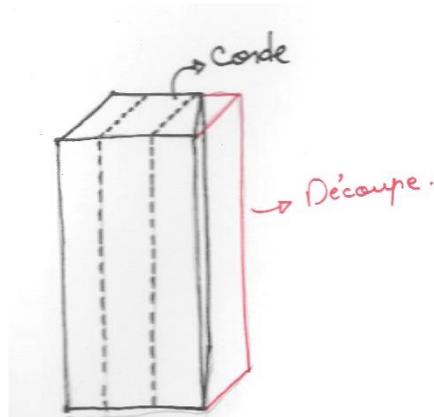


Figure 61 – Schéma : découpe d'un ballot vertical

Source : dessin personnel

Il est possible d'effectuer cette découpe dans deux plans différents du ballot, le troisième n'étant pas envisageable à cause de la disposition des cordes qui le maintiennent comprimé.

Existe-t-il une disposition optimale des bottes de paille pour épouser une forme courbe ? Je vais tenter par les exemples qui suivent d'émettre une ou plusieurs hypothèses concernant ce questionnement. Voici donc quelques dessins à l'échelle de différentes solutions de mise en place des ballots isolants.

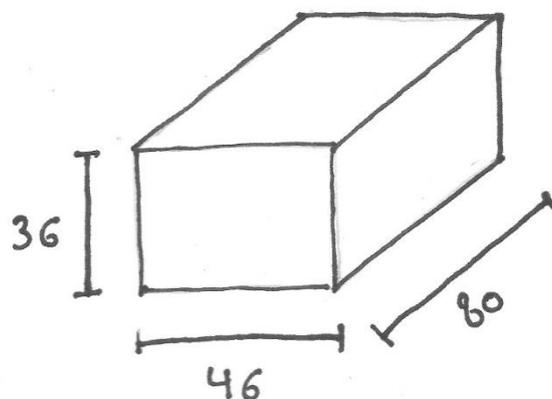
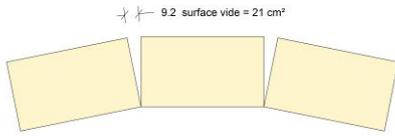


Figure 62 – dimension d'un ballot type

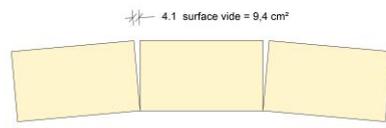
Source : dessin personnel

Rayon de courbure fixe :

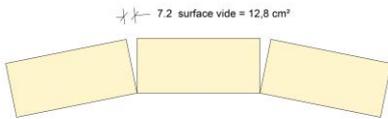
Rayon de courbure variable :



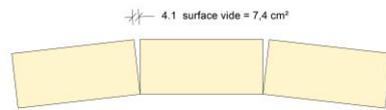
R = 400 cm



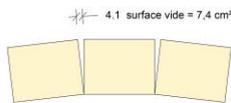
R = 895 cm



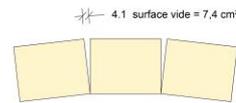
R = 400 cm



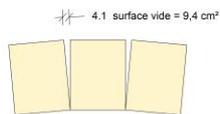
R = 700 cm



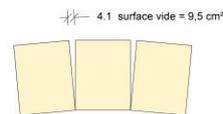
R = 400 cm



R = 403 cm



R = 400 cm



R = 400 cm

Figure 63 – Recherches autour de la courbure

Source : schéma personnel

La solution optimale pour épouser un tracé courbe semble donc être une disposition des bottes debout, chant de face (dernière solution). Cette disposition permet en effet de suivre la courbure avec des segments de la plus petite taille possible. La profondeur du complexe sera cependant un peu plus importante mais la surface à combler entre les ballots ne sera pas plus importante, ou du moins de manière négligeable, que s'ils sont disposés debout, de face (troisième solution).

Qu'en est-il de la structure ? Peut-elle être utilisée pour combler le vide entre les bottes de paille résultant de la courbure ? Ou simplement pour maintenir le vrac disposé dans ce même espace vide ?

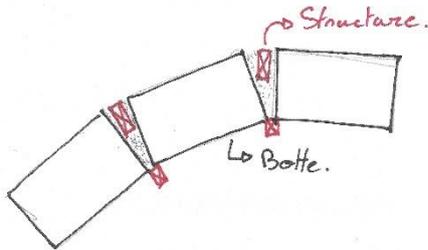


Figure 64 – La structure dans l'angle

Source : dessin personnel

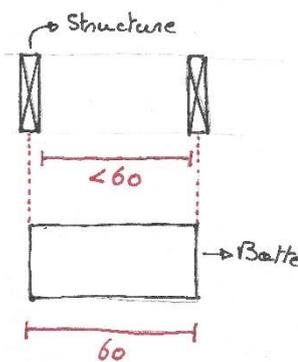


Figure 66 – Insertion d'une botte

Source : dessin personnel

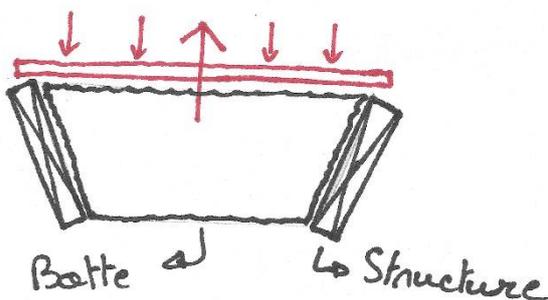


Figure 68 – Poussée résultante de l'insertion de la botte

Source : dessin personnel

Dans le cas des caissons préfabriqués de l'école de Bernwiller, les ballots de paille sont insérés entre les montants d'ossature qui « reprennent » la courbure du mur.

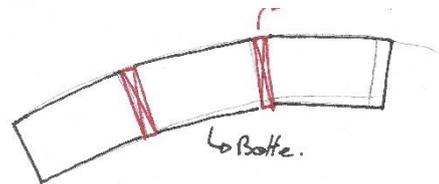


Figure 65 – La structure et les ballots dans une courbe

Source : dessin personnel

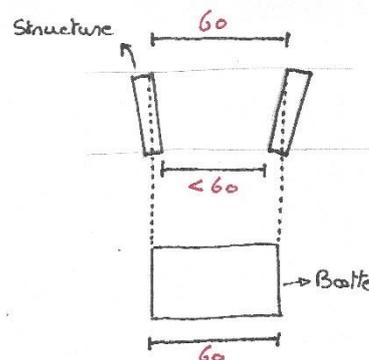


Figure 67 – La structure reprend la courbe

Source : dessin personnel

Il est important de prendre en compte la poussée résultant de l'inclinaison des montants d'ossature. Le ballot sera en effet poussé vers l'extérieur de la courbure et un système calculé en conséquence doit être mis en place afin de contrer cette force.

3.2.3. La forme et les matériaux au service des performances

Ce n'est pas un pur hasard si j'ai décidé d'introduire cette troisième partie de mon travail par la recherche de la disposition des bottes de paille dans un mur courbe. Quelle serait la forme de la construction la plus performante, du point de vue de l'énergie mais également de l'utilisation des matériaux, structure, etc. ? Nos ancêtres semblent avoir déjà réfléchi à cette question lors de la construction de leurs habitats. L'œuf, ce petit volume abritant un être vivant en phase de gestation ne les aurait-il pas inspirés ?

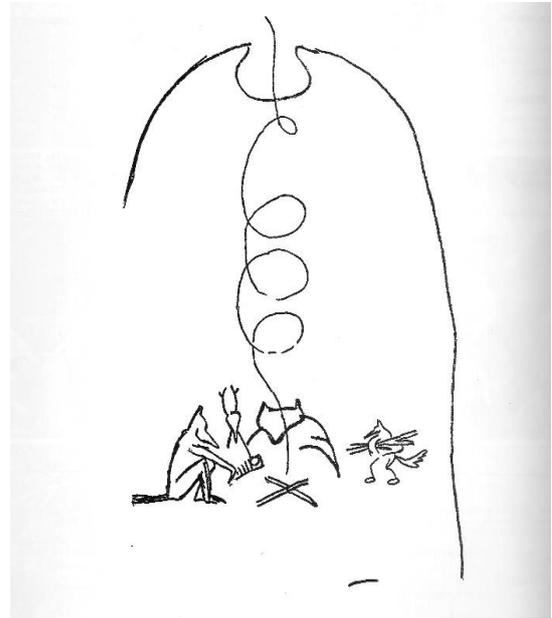


Figure 69 – Autour du feu

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, p.1)



Figure 70 – Hutte de l'âge de fer

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, p.9)

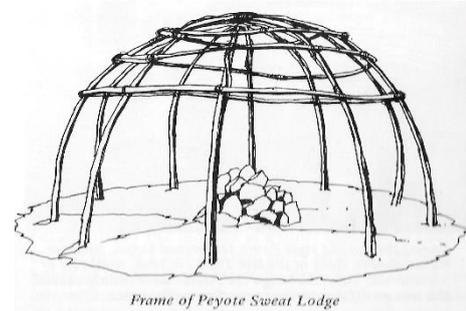


Figure 71 – Hutte de sudation de Peyote

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, p.19)

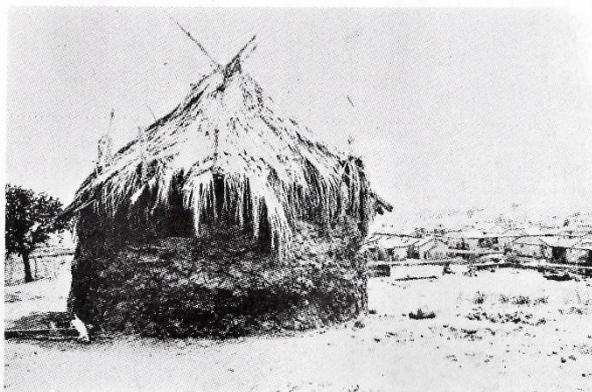


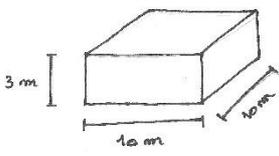
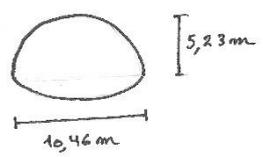
Figure 72 – Dans le Sud de la Californie

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, p.9)

○ Performances énergétiques :

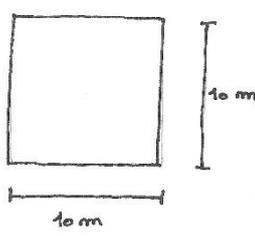
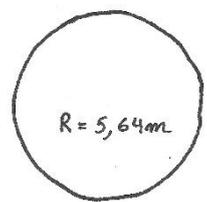
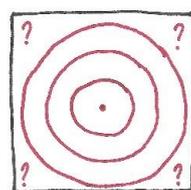
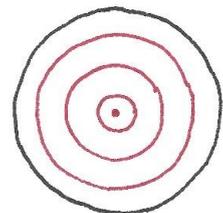
Le dôme, comparé à un volume parallélépipédique, est sans aucun doute la forme la plus performante d'un point énergétique. Ce volume possède en effet le meilleur coefficient de compacité | cf. 1.1.6. |. L'exemple suivant permet de démontrer cela de manière non exhaustive. Le volume des différentes propositions est toujours égal à 300 m³.

Tableau 15 – Comparaison de volumes d'habitation

Forme :	Parallélépipède rectangle	Dôme
		
Volume :	300 m ³	300 m ³
Surface de la couverture :	320 m ²	429 m ²
Coefficient de compacité :	0,94	0,69

Au-delà du simple fait que le dôme possède un meilleur coefficient de compacité, il sera également plus performant en termes de chauffe du volume. Un point de chauffage disposé au centre de chaque volume rayonnera, en effet, de manière plus uniforme dans une surface ronde. La surface des différentes propositions est toujours égale à 100 m².

Tableau 16 - Comparaison du rayonnement d'un feu

Surface :		
Rayonnement :		

○ *Performances structurelles :*

Si nous faisons fi de l'utilisation de structure portante en bois et considérons ici une construction en paille porteuse, pouvons-nous trouver une forme géométrique performante d'un point de vue structurel, et sur base de ce que nous avons déjà pu constater juste avant ? Plus tôt dans ce travail, je me suis permis de comparer les bottes de paille à des blocs de béton en mettant en avant leur modularité. Nous pouvons donc, de manière instinctive, faire le rapprochement avec les constructions en brique et en pierres sèches, car celles-ci étaient très utilisées avant l'arrivée du béton. Dans ce type de constructions, le dôme et la voute sont des exemples très parlants en termes de performances structurelles. Ces formes constructives ont en effet la particularité de s'autoporter, ne laissant ainsi aucun « poids mort » dans la construction. Il est également important de noter que ce type de forme engendre un contreventement parfait dans tous les axes.



Figure 73 – Voute en Tunisie

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, p.15)

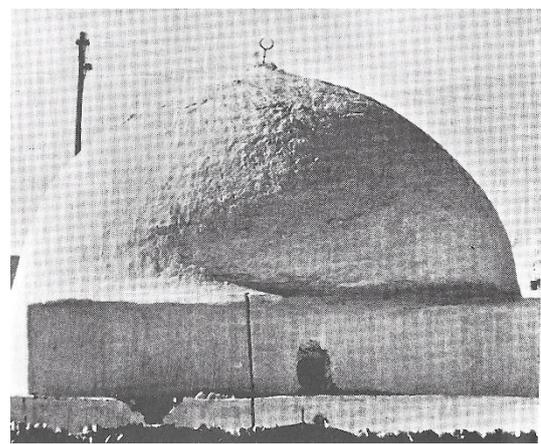


Figure 74 – Dôme en briques sur base carrée

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, p.15)

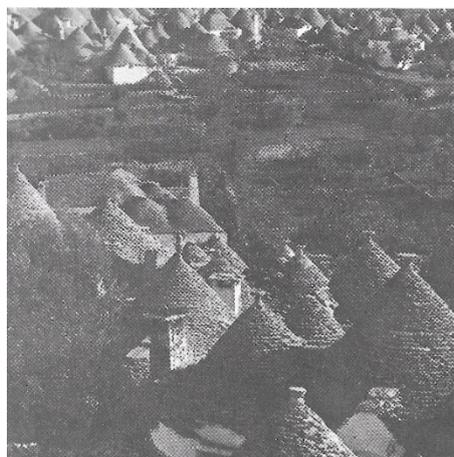


Figure 75 – Ensemble de trulli

Source : Kahn, L., Easton, B. (1973, pp.48-49)

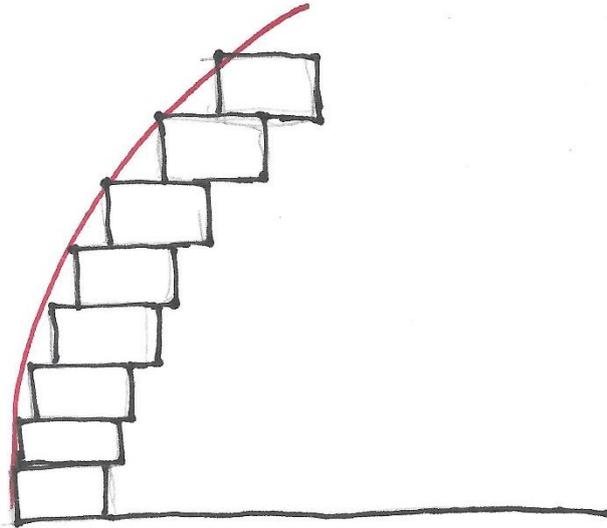


Figure 76 – Recherches autour du dôme 1

Source : dessin personnel

Est-il dès lors possible d'effectuer un percement dans cet ensemble ? On aurait en effet tendance à penser qu'enlever une seule des bottes de paille perturberait l'équilibre de la construction. Si tel est le cas, le ballot manquant doit être remplacé par une structure indépendante, comme un cadre en bois, qui aurait pour but d'empêcher les autres éléments de s'écarter et de mettre ainsi en péril la stabilité de l'édifice.

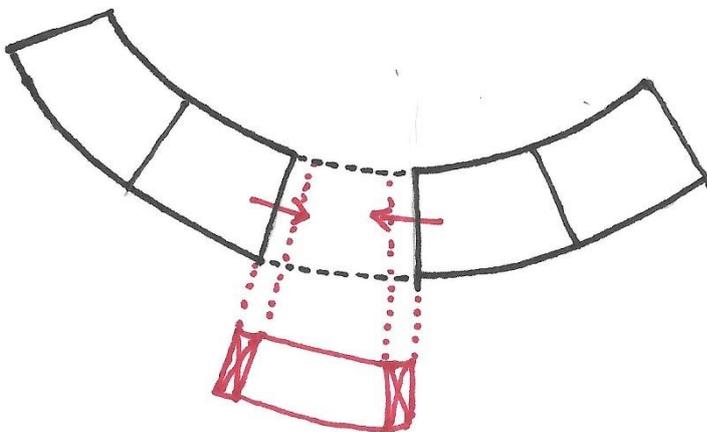


Figure 78 – Recherches autour du dôme 3

Source : dessin personnel

Telles les pierres des trulli, les ballots s'entassent en créant des cercles de plus en plus petits. La structure prend ainsi forme et tient d'elle-même. Chacun des cercles formés travaille en compression, la paille aura ainsi tendance à vouloir « s'échapper » de la construction alors que sa disposition (toujours plus à l'intérieur) vient contrer ce phénomène. Les forces sont donc équilibrées. Un enduit de finition peut alors est utilisé à l'extérieur afin de renforcer l'ensemble.

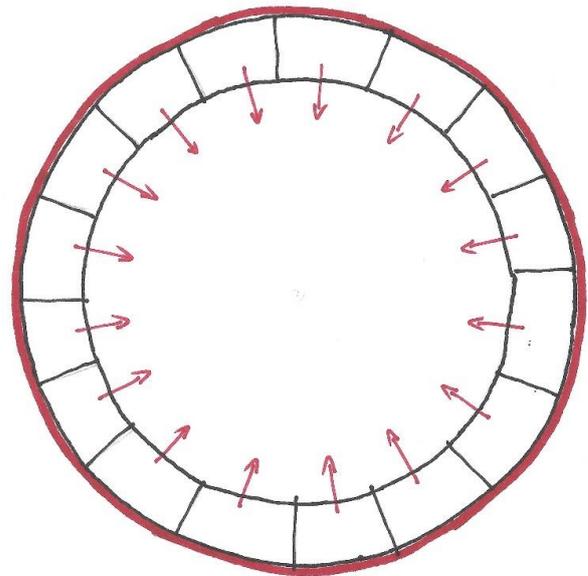


Figure 77 – Recherches autour du dôme 2

Source : dessin personnel

o Une manière de vivre ?

J'ai pu trouver, au travers des recherches dûment menées afin d'établir les points précédents, d'autres types d'architectures qui m'ont permis encore une fois de penser que la surface ronde reste l'une des formes performantes à tous les points de vue, également en terme d'habitabilité. Les architectures « en spirale » de la « Bavinger House » de Bruce Goff et de la « Big Sur House » de Mickey Muennig⁷ en sont ici la preuve. Dans ces deux projets, le rond accueille, rassure, protège l'utilisateur. La forme engendre la circulation et scénarise les « moments d'habiter »...

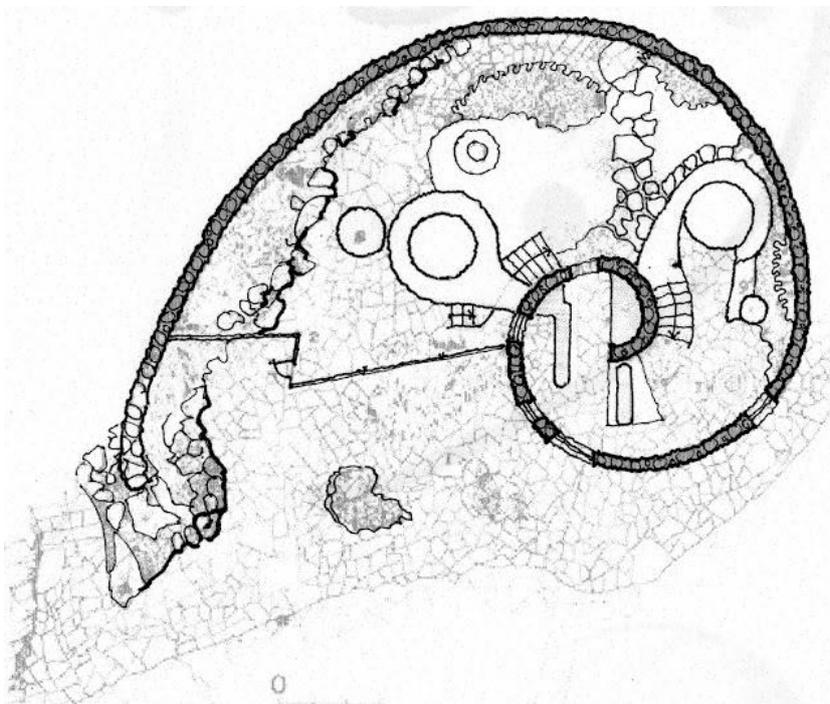


Figure 79 – Plan de la Bavinger House

Source : Architect (2010)

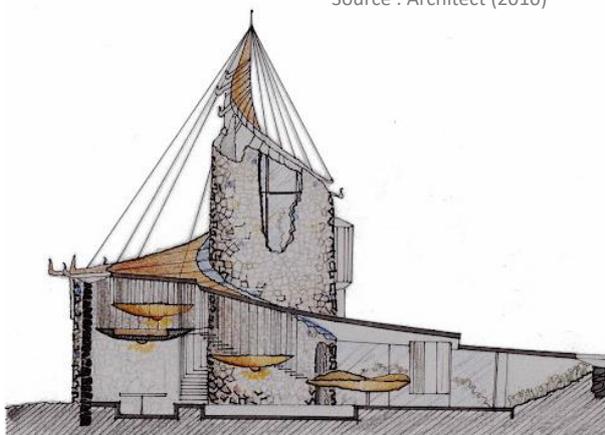


Figure 81 – Coupe de la Bavinger House

Source : Architect (2010)

Alors qu'un « pilier » central semble se démêler et tournoier vers l'extérieur, l'utilisateur se sent accueilli au sein du projet. Sa curiosité l'appelle à se rendre au sommet de la construction, point de départ de celle-ci.

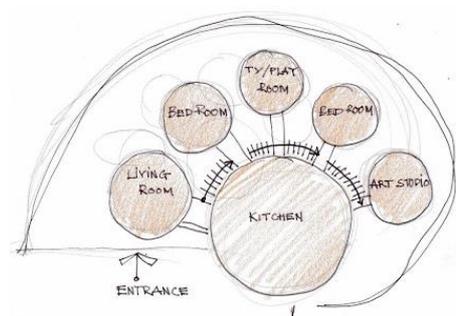


Figure 80 – Schéma de composition

Source : Architect (2010)

⁷ Les documents complets ainsi que d'autres relatifs à ces projets sont visibles en **Annexe 6.7.** et **Annexe 6.8.**

La spirale, traversée par un élément rectiligne, crée la cohésion entre les espaces extérieurs et les volumes intérieurs de l'habitation.

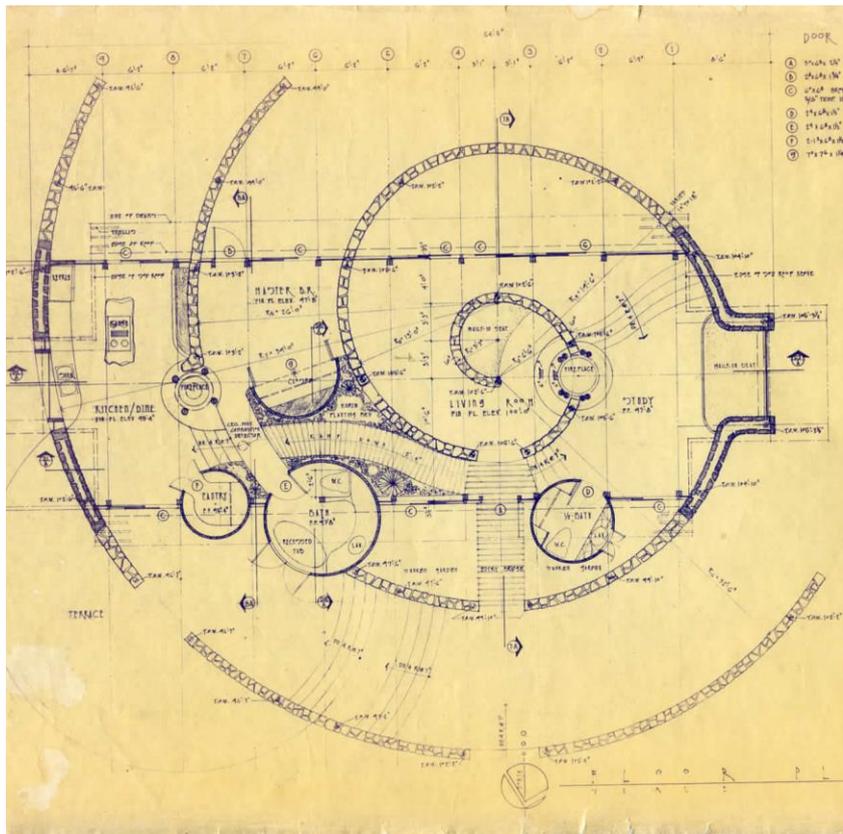


Figure 82 – Plan de la Big Sur House

Source : document numérisé et envoyé par Henri Chaumont (avec autorisation)

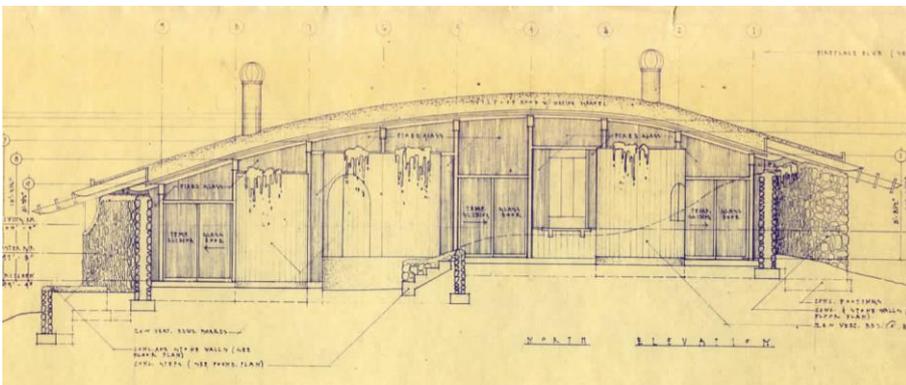


Figure 83 – Coupe de la Big Sur House

Source : document numérisé et envoyé par Henri Chaumont (avec autorisation)

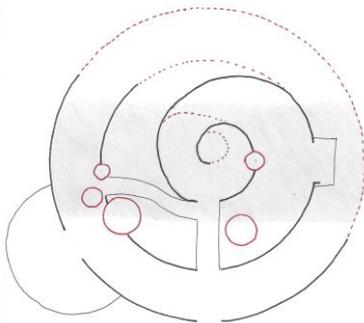


Figure 85 – Schéma d'analyse

Source : dessin personnel

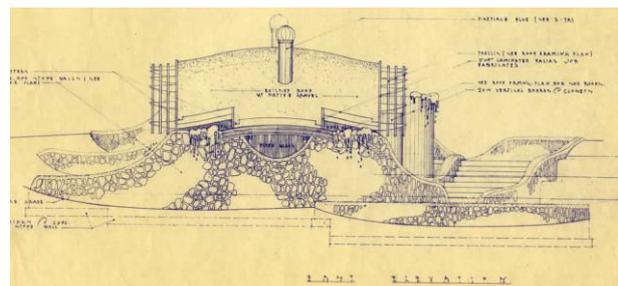


Figure 84 – Elévation de la Big Sur House

Source : document numérisé et envoyé par Henri Chaumont (avec autorisation)

3.3. Conception d'une cabane en terre-paille pour un stage

3.3.1. Données du stage

Le stage auquel j'ai été invité à participer a pour but de faire découvrir l'architecture et l'utilisation de matériaux spécifiques grâce à diverses expériences telles que des essais de manipulation de terre crue ainsi que des jeux d'adresse. Son principe est de sensibiliser les participants à l'utilisation de matériaux naturels que sont la paille et la terre à travers la construction d'une cabane. Cette construction se veut à la fois expérimentale et didactique, il est donc important que les moyens mis en œuvre pour ériger cette cabane restent rudimentaires et par conséquent abordables pour tout le monde.

Le projet est donc de réaliser une construction très simple partant d'un plan rond avec une entrée, sans doute inspiré des recherches menées un peu plus tôt. Pour simplifier les choses, un soubassement en blocs de béton et en terre sera réalisé afin de mettre à niveau le terrain et de faire fi de la pente existante. Des ballots seront ensuite disposés horizontalement et verticalement afin de réaliser les murs de l'édifice, tandis que la toiture se composera de torchettes de paille entrelacées entre des branches de saule, se rejoignant toutes au point le plus haut de la construction.



Figure 86 – Construction des fondations de la cabane

Source : photographie personnelle

3.3.2. Documents

Voici, ci-après, les plan, coupe et élévation de la futur construction.⁸

○ Plan

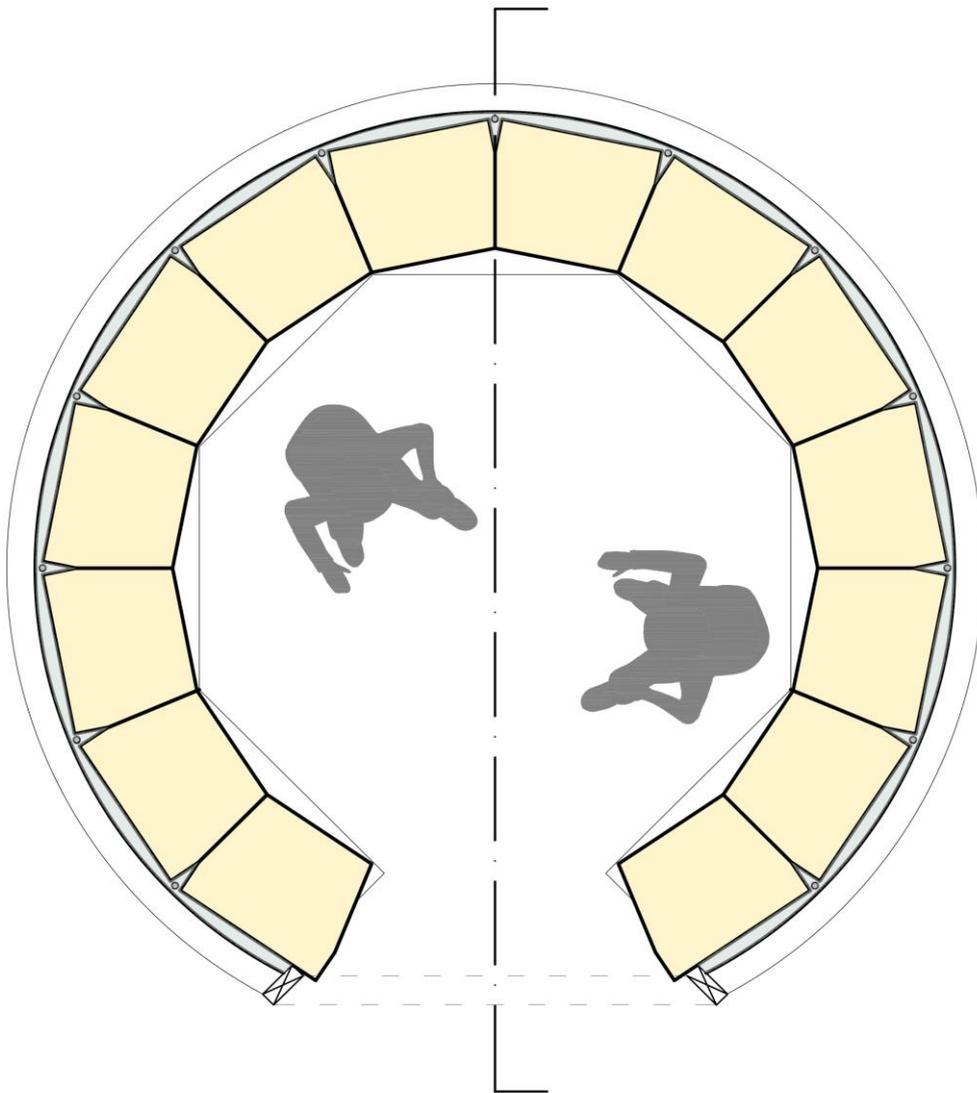


Figure 87 – Plan de la cabane

Source : dessin personnel

⁸ D'autres plans de positionnement des ballots ainsi que des variantes sont visible en **Annexe 6.9.**

○ Coupe

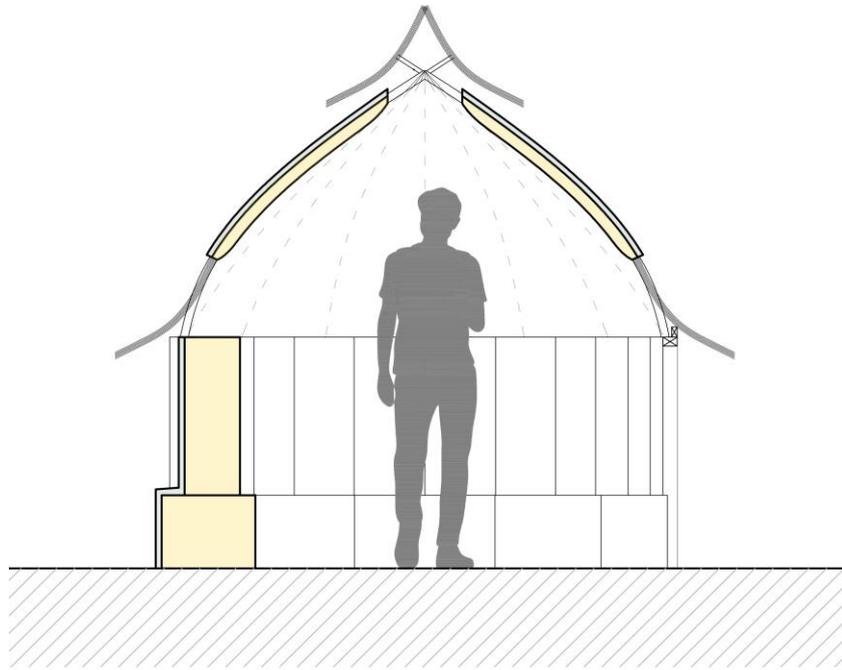


Figure 88– Coupe dans la cabane

Source : dessin personnel

○ Élévation

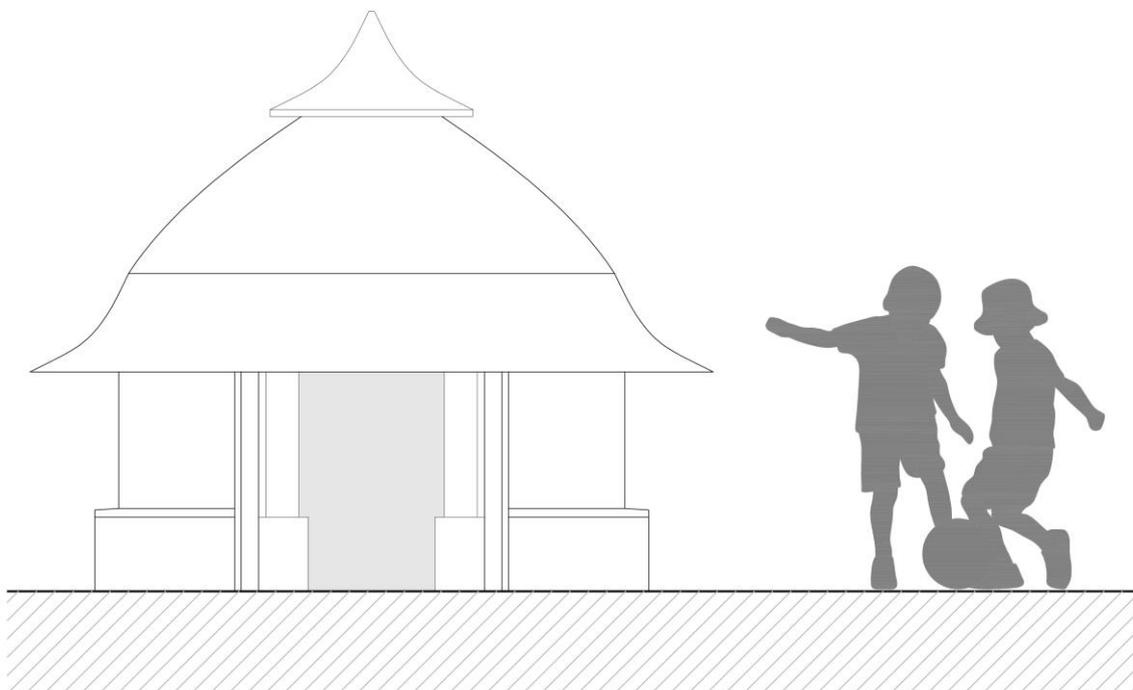


Figure 89 – Élévation de la cabane

Source : dessin personnel

4. Conclusion

Tout ce qui a un début a une fin, mais chaque fin est le début d'un nouveau départ.

Serge Zeller

J'ai mentionné plus tôt dans ce travail le terme « spontané ». Ce type d'architecture, surtout connu pour être une caractéristique de l'architecture vernaculaire, correspond parfaitement bien à l'utilisation du matériau paille, voire des matériaux biosourcés en général. L'architecture spontanée, au-delà du fait qu'elle profite des qualités et défauts intrinsèques du site, possède en effet la spécificité de mettre en œuvre des matériaux directement disponibles et nécessitant très peu de transformations avant d'être mis en œuvre. Un savoir-faire spécifique est donc requis pour construire avec ce type de matériau, car ceux-ci nécessitent une mise en œuvre plus spécifique et souvent plus importante. Il est possible aujourd'hui d'observer l'effet inverse : certains matériaux qui nécessitent beaucoup de transformations sont plutôt faciles à mettre en œuvre.

Cette philosophie de travail semblait être vouée à disparaître complètement suite à l'avènement des machines à vapeur et au développement fulgurant de la société industrielle. Alors que la rentabilité ainsi que la rapidité d'exécution sont mises en avant dans le monde de la construction, de nouveaux matériaux naissent, plus performants, plus forts, plus modernes,... Des constructions d'un nouveau genre sont alors érigées avec des matériaux extraits sur un site, transformés dans un, voire plusieurs autres endroits, et ensuite acheminés sur chantier. Le secteur du bâtiment n'a cessé d'évoluer depuis, devenant toujours plus performant, notamment grâce aux nouvelles technologies, toujours de plus en plus poussées. Cependant, la conscience écologique de l'homme semble avoir, il y a quelques années, repris le dessus et de nouvelles idées sont apparues. Les bâtiments devaient en effet être performants, car pour polluer peu, il faut isoler assez, afin de gaspiller un minimum d'énergie. Bien sûr ! Mais de quelles énergies parlons-nous ici ? Si le bâtiment doit être performant après avoir été construit, il doit aussi l'être avant. Les énergies grises sont ainsi toutes les énergies nécessaires à l'extraction des matériaux, leur transformation par ajout d'autres matières premières ou changements d'état, leur transport entre les différents lieux de transformation et de mise en œuvre et enfin, leur potentiel de recyclage, de réutilisation ou dans le moins favorable des cas, leur destruction.

C'est avec l'introduction de cette « nouvelle manière de penser la construction » que les bâtisseurs ont commencé à chercher des solutions pour amoindrir les besoins en transformation des matériaux utiles à la construction. Le terme « biosourcés » est alors apparu

et commence à faire son chemin dans la pensée collective. Nous pouvons le décomposer comme suit :

- Biologique : « *relatif à la production de denrées naturelles non traitées chimiquement.* » (Larousse, s.d.)
- Source : « *principe, cause, origine de quelque chose.* » (Larousse, s.d.)

Par conséquent, les matériaux biosourcés présentent donc un bilan des énergies grises particulièrement intéressant de par leur faible besoin en transformations, que ce soit après leur récolte ou avant, par exemple lorsqu'un apport en matière chimique est nécessaire, mais de plus en plus évité dans le cadre de l'agriculture biologique.

C'est à ce moment-ci que la paille, souvent associée à la terre de par son historique d'utilisation dans la construction, refait son apparition. Ce matériau est selon moi l'ambassadeur des matériaux biosourcés pour plusieurs raisons.

○ *Matériau biosourcé par excellence :*

La paille aujourd'hui utilisée pour construire provient dans 99 % des cas d'exploitations agricoles n'ayant que très peu recours à l'utilisation de pesticides durant la croissance des céréales. Ces exploitations portent parfois le nom d'exploitations biologiques, parfois une autre désignation : exploitation à haute qualité environnementale. Cette désignation signifie que l'exploitant est en transition, car l'arrêt de l'utilisation de tels produits ne se fait en effet pas du jour au lendemain. Quelques années sont nécessaires avant de pouvoir qualifier une exploitation de biologique. De plus, si nous calculons les énergies utiles à la fabrication de ce matériau, celles-ci sont proches de zéro. Cela s'explique simplement par le fait que la paille est en fait un déchet de l'agriculture qui, s'il n'est pas transformé en bottes, sera étalé sur les surfaces agricoles afin de nourrir le sol. Le transport sera donc l'étape la plus coûteuse en énergies, mais les ballots de paille sont très souvent produits à proximité immédiate des chantiers les mettant en œuvre.

○ *Des performances tout à fait correctes :*

La paille comme matériau possède en effet de très bonnes performances en matière d'isolation. Certes, ces performances ne sont pas égales à épaisseurs équivalentes, mais d'un autre côté, les bottes de paille possèdent des dimensions conséquentes et difficilement

modifiables si ce n'est dans le sens de la longueur. Ainsi, 10 cm de paille n'apporteront pas le même degré d'isolation que 10 cm de polyuréthane.

La paille, encore une fois souvent associée à la terre, elle aussi un matériau biosourcé (dans les analyses de cas présentées plus haut, la terre utilisée dans la construction provenait en effet des déblais des chantiers), offre à la future construction de remarquables performances en termes d'inertie hydrique ou thermique.

- Inertie hydrique : il est en effet important d'obtenir un bon confort hydrique au sein des constructions en évitant de trop grandes variations hydrométriques. La terre crue, enfermée dans les parois et souvent utilisée pour réaliser les enduits de finition, a la capacité de réguler ce taux d'humidité grâce à son inertie importante.
- Inertie thermique : la paille étant souvent associée aux constructions en ossature bois, l'utilisation de terre crue permet « d'alourdir » le complexe de l'enveloppe et ainsi de conférer à l'ensemble une bonne inertie thermique, importante pour le confort de vie des utilisateurs.

○ *Un matériau fiable :*

Il m'a en effet été possible au travers de ce travail de démontrer que la paille, enfermée dans l'enveloppe d'une construction, est un matériau tout à fait digne de confiance. Les rongeurs, les insectes, les incendies et les tempêtes pouvant déraciner les constructions, soit tout ce que j'ai nommé plus haut « le grand méchant loup » en référence au célèbre compte des trois petits cochons, sont en effet des éléments prépondérants dans l'imaginaire collectif et qui induisent encore aujourd'hui une certaine décredibilisation de la construction en paille. Différents tests ont été réalisés par la communauté scientifique et ont permis de mettre en lumière la résistance importante qu'offre le matériau paille contre tous ces éléments nocifs.

Le temps nous permet également de prendre conscience de la durabilité de telles constructions. Que nous partions d'exemples d'habitations en paille construites par les pionniers américains, ou de la maison Feuillette citée un peu plus haut, de nombreux bâtiments nous permettent de constater la fiabilité et la solidité de ce moyen constructif.

○ *Dans l'ère du temps :*

Si le matériau paille conditionné sous forme de bottes permet diverses mises en œuvre, de par les différentes dimensions que peuvent avoir les ballots ou encore par le fait qu'ils puissent

être placés dans plusieurs sens différents au sein des complexes, il est également tout à fait évolutif et sait s'adapter à son temps. Alors que la préfabrication prend aujourd'hui une part importante du marché de la construction en déplaçant le travail du chantier à l'atelier et faisant ainsi grandement économiser les maîtres d'ouvrage sur le coût total de la construction, ce matériau isolant a su tout à fait correspondre aux demandes des constructeurs et est aujourd'hui également utilisé dans ce domaine. La paille peut ainsi servir de matériau isolant pour des caissons de façade qui seraient préfabriqués. Je pense que cette facette de la construction en paille va contribuer, dans les années à venir, à faire reprendre confiance en ce matériau.

Et peut-être qu'un jour nous érigerons de grands palais à l'aide de cette ressource...

4.1. Limites et domaines d'études potentiels

Il est très important pour moi, à la fin de ce travail, de reconnaître mes limites. Je ne prétends en effet absolument pas établir une quelconque vérité à travers l'écriture de ce mémoire de fin d'études. Tous les éléments qui s'y trouvent proviennent de recherches promptement menées, d'analyses personnelles ainsi que, de temps en temps, de l'un ou l'autre jugement tout à fait personnel. Je conçois tout à fait l'idée que certaines personnes pourraient trouver des éléments à redire sur ce travail et je tiens à les informer que je serais tout à fait prêt à échanger avec eux le cas échéant. En effet, selon moi, ce sont justement les échanges qui permettent d'aboutir à une idée concrète. Ce sont ces échanges avec différents intervenants, qu'ils soient du monde de la construction ou qu'ils y soient tout à fait étrangers, qui m'ont permis de réaliser et d'alimenter ce travail. Ce sont ces échanges et leur diversité qui créent la richesse des propos. Cependant, ils ne contribuent absolument pas à établir la vérité, si difficile soit-elle à obtenir. Peu importe le nombre d'intervenants, mille subjectivités ne suffiront jamais à donner naissance à une objectivité. Il est donc très important d'en être conscient et de nuancer ses propos tout en reconnaissant ses limites personnelles.

En outre, même si je pense avoir fait un tour plutôt complet de la question, il est évident que je ne peux pas avoir tout abordé ou pris en considération durant la rédaction de ce travail. Ainsi, différentes études potentielles et futures peuvent en émerger, abordant des sujets complémentaires plus approfondis, tels que :

- La recherche autour d'autres matériaux biosourcés ;
- Des études performanciennes des constructions en paille comparées aux constructions « classiques » ;
- Les techniques particulières de construction en paille ;
- Une étude poussée de la durabilité des constructions en paille ;
- Un établissement des règles et normes de la construction en paille pour la Belgique (sur base d'un modèle français existant) ;
- Pertinence de l'utilisation de ce matériau dans le domaine de la rénovation ;
- La construction en paille dans l'environnement dense urbain ;
- etc.

4.2. Perspectives personnelles

Si les études peuvent susciter diverses émotions chez les étudiants, leur faire traverser des « hauts et des bas », je dois bien avouer que je n’y ai pas échappé... loin de là !

Ces deux dernières années se sont avérées particulièrement difficiles en raison, peut-être, du contexte de crise sanitaire actuel. Cette période, si intense fût-elle, a engendré pour moi une grande remise en question. Vais-je vraiment devenir architecte ? Suis-je prêt ? Si cette question m’a longuement tourmenté, je peux affirmer aujourd’hui que je désire plus que tout porter cette casquette. La question de recherche développée dans ce travail m’a absolument passionné et m’a apporté la conviction qu’il est encore possible aujourd’hui de construire tout en respectant notre environnement et notre planète. Avoir découvert cette facette de l’architecture m’a totalement réconcilié avec cette discipline et je sais maintenant que je suis prêt. Prêt à continuer mes recherches dans ce domaine, prêt à proposer une architecture mettant en œuvre de tels matériaux et prêt à relever les défis imposés par la transition écologique que nous traversons actuellement et qui ferait partie de notre futur.

Tables des illustrations

Table des figures

Figure 1 – Habitation vernaculaire	12
Figure 2 – Habitation avec un toit en paille	14
Figure 3 – Empilements de briques en terre crue	15
Figure 4 – Article sur la maison Feuillette	17
Figure 5 – Test de sédimentation	21
Figure 6 – Paille hachée lors de la moisson	23
Figure 7 – Ballot de paille	24
Figure 8 – Disposition des ballots dans l’enveloppe	28
Figure 9 – Position des nœuds lors de la disposition à plat des ballots	28
Figure 10 – Position des nœuds lors de la disposition de face des ballots	29
Figure 11 – Exemple 1 : gros ballots	30
Figure 12 – Exemple 1 : petits ballots	31
Figure 13 – Exemple 2 : gros ballots	32
Figure 14 – Exemple 2 : petits ballots	33
Figure 15 – Résistance au feu d’un ballot enduit	41
Figure 16 – Exemple de construction en paille porteuse	46
Figure 17 – Localisation des projets	52
Figure 18 – Photographie du projet Halkin	53
Figure 19 – Plan d’implantation 1	54
Figure 20 – Façade Sud-Est 1	54
Figure 21 – Plan du RDC 1	54
Figure 22 – Coupe type	55
Figure 23 – Raccord de fondations 1	57
Figure 24 – Raccord de plancher 1	58
Figure 25 – Raccord de toiture 1	59
Figure 26 – Photographie du projet Georges	60
Figure 27 – Plan du RDC 2	61
Figure 28 – Découpe du plan 1	61
Figure 29 – Découpe du plan 2	61
Figure 30 – Découpe du plan 3	61
Figure 31 – Façade Sud 2	61
Figure 32 – Façade Est 2	61
Figure 33 – Coupe type 2	62
Figure 34 – Raccord de fondations 2	66
Figure 35 – Raccord de plancher 2	67
Figure 36 – Raccord de toiture 2	68
Figure 37 – Photographie du projet Hallet	69
Figure 38 – Plan du RDC 3	70
Figure 39 – Plan du +1 3	70
Figure 40 – Façade Est 3	70
Figure 41 – Façade Ouest 3	70
Figure 42 – Coupe type 3	71
Figure 43 – Raccord de fondations 3	74

Figure 44 – Raccord de plancher 3	75
Figure 45 – Raccord de toiture 3	76
Figure 46 – Comparatif des projets	77
Figure 47 – Schéma structurel 1	77
Figure 48 – Schéma structurel 2	77
Figure 49 – Schéma structurel 3	77
Figure 50 – Schéma isolation 1	78
Figure 51 – Schéma isolation 2	78
Figure 52 – Schéma isolation 3	78
Figure 53 – Schéma isolation 3	79
Figure 54 – Axonométrie du système constructif du projet Halkin	81
Figure 55 – Axonométrie du système constructif du projet Georges	82
Figure 56 – Axonométrie du système constructif du projet Hallet	83
Figure 57 – Photographie de l'école fondamentale de Bernwiller	86
Figure 58 – Recherche d'une forme courbe	87
Figure 59 – Découpe d'un ballot horizontal	87
Figure 60 – Remplissage avec du vrac	87
Figure 61 – Schéma : découpe d'un ballot vertical	88
Figure 62 – Dimension d'un ballot type	88
Figure 63 – Recherches autour de la courbure	89
Figure 64 – La structure dans l'angle	90
Figure 65 – La structure et les ballots dans une courbe	90
Figure 66 – Insertion d'une botte	90
Figure 67 – La structure reprend la courbe	90
Figure 68 – Poussée résultante de l'insertion de la botte	90
Figure 69 – Autour du feu	91
Figure 70 – Hutte de l'âge de fer	91
Figure 71 – Hutte de sudation de Payote	91
Figure 72 – Dans le Sud de la Californie	91
Figure 73 – Voute en Tunisie	93
Figure 74 – Dôme en briques sur base carrée	93
Figure 75 – Ensemble de trulli	93
Figure 76 – Recherches autour du dôme 1	94
Figure 77 – Recherches autour du dôme 2	94
Figure 78 – Recherches autour du dôme 3	94
Figure 79 – Plan de la Bavinger House	95
Figure 80 – Schéma de composition	95
Figure 81 – Coupe de la Bavinger House	95
Figure 82 – Plan de la Big Sur House	96
Figure 83 – Coupe de la Big Sur House	96
Figure 84 – Elévation de la Big Sur House	96
Figure 85 – Dessin personnel	96
Figure 86 – Construction des fondations de la cabane	97
Figure 87 – Plan de la cabane	98
Figure 88 – Coupe dans la cabane	99
Figure 89 – Elévation de la cabane	99

Table des graphiques

Graphique 1 – Enduits appliqués à l'extérieur	18
Graphique 2 – Enduits appliqués à l'intérieur	18
Graphique 3 – Importance des différentes cultures en Ha.....	23
Graphique 4 – Classe d'inertie de constructions en paille en fonction des niveaux.....	38
Graphique 5 – Températures mesurées pendant l'essai avec enduit à base d'argile et de fibres	42
Graphique 6 – Températures mesurées pendant l'essai avec enduit à base de plâtre et d'argile.....	42

Table des tableaux

Tableau 1 – Energies grises de différents matériaux biosourcés	11
Tableau 2 – Caractéristiques thermiques de « parois types » isolées en paille	20
Tableau 3 – Caractéristiques des ballots mis en œuvre dans l'exemple ci-dessous.....	29
Tableau 4 – Exemple 1 : gros ballots	30
Tableau 5 – Exemple 1 : petits ballots.....	31
Tableau 6 – Exemple 2 : gros ballots	32
Tableau 7 – Exemple 2 : petits ballots.....	33
Tableau 8 – Masse volumique et diffusivité de différents matériaux.....	37
Tableau 9 – Exemple de test d'infiltrométrie.....	39
Tableau 10 – Taux d'humidité en fonction du type d'air	39
Tableau 11 – Récapitulatif des performances énergétiques 1.....	59
Tableau 12 – Récapitulatif des performances énergétiques 2.....	68
Tableau 13 – Récapitulatif des performances énergétiques 3.....	76
Tableau 14 – Comparatif des budgets.....	80
Tableau 15 – Comparaison de volumes d'habitation.....	92
Tableau 16 – Comparaison du rayonnement d'un feu.....	92

5. Ouvrages et ressources

Architect (2010). *Precedent one*. Retrieved from :
<http://archhcle.blogspot.com/2010/09/precedent-one.html>

Courgey, S., Oliva, J.-P. (2006). *La conception bioclimatique des maisons confortables et économes*. Mens, France : Terre vivante.

CSTB (2017). *Accompagnement de la détermination des caractéristiques incendie des matériaux biosourcés – Résistance au feu de murs en bottes de paille : Rapport d'action*. Retrieved from : <https://www.rfcp.fr/download/8206/>

Ecoconso (2016). *L'énergie grise des matériaux de construction*. Retrieved from the website of Ecoconso <https://www.ecoconso.be/fr/L-energie-grise-des-materiaux-de>

Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Lebeau, F., Courard, L. et al. (2016). *aPROpaille: Vadémécum 2 - La paille parois performantes*. UCL-ULg-ICEDD-Pailletec (Web).

Floissac, L. (2012). *La construction en paille : principes fondamentaux, techniques de mise en œuvre et exemples de réalisations*. Mens, France : Terre vivante.

Husser, M. (2021). *Ecole de Bernwiller*. Retrieved from the website of Matthieu Husser Architectures <https://www.husser-architecte.fr/projet/ecole-bernwiller/>

Interreg (s.d.). *Matériau d'isolation : la paille*. Retrieved from :
https://www.batic2.eu/sites/default/files/04.%20Technicom%20-%20Stro_Paille_FR.pdf.

Kahn, L., Easton, B. (1973). *Shelter*. Bolinas, California : Shelter Publications, Inc.

Lamache, G. (1921). Fraiches en été, chaudes en hiver, les maisons de paille sont avant tout économiques in *La sciences et la vie*. Paris, France : La science et la vie.

Larousse (s.d.) *Biologique*. Retrieved from the website of Larousse
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biologique/9431>

Rudofsky, B.(1977). *Architecture sans architects* (Lebourg, D., Trans.). Paris, France : Publiphotoffset. (Original work published 1964).

Rudofsky (1979). *L'architecture insolite* (Médina, J.-B., Mayoux, S., Trans.). Paris, France : Librairie Jules Tallendier. (Original work published 1977).

Schildt, G., Alvar Alto Foundation. (2012). *La table blanche et autres textes* (du Terrail, A.C, Trans.). Marseille, France : Editions Parenthèses.

Statbel (Direction générale Statistique – Statistics Belgium). (2020). Chiffres clés de l'agriculture : l'agriculture belge en chiffres. *Statbel : la Belgique en chiffres*.

6. Annexes

Table des annexes

Table des annexes	114
6.1. Chiffres clés de l'agriculture, l'agriculture belge en chiffres (Statbel, 2020)	115
6.2. aPROpaille – Vademecum – La paille parois performantes (Evrard, Biot, Keutgen, Lebeau, Courard et al., 2016).....	117
6.3. Rapport d'action – Accompagnement de la détermination des caractéristiques incendie des matériaux biosourcés – Résistance au feu de murs en bottes de paille (CSTB, 2017).....	119
6.4. Documents relatifs au projet HALKIN (Toumpsin, 2020)	128
6.5. Documents relatifs au projet GEORGES (Toumpsin, 2013)	134
6.6. Documents relatifs au projet HALLET (Toumpsin, 2016)	139
6.7. Documents relatifs à la « Bavinger House » de Mickey Muennig (Architect, 2010)	144
6.8. Documents relatifs à la « Big Sur House » de Bruce Goff (Envoi d'Henri Chaumont, s.d.)	146
6.9. Recherches concernant le stage de construction terre-paille	148

Nombre d'exploitations, superficie et main-d'œuvre							
Belgique	1980	1990	2000	2010	2013	2016	2019
Nombre d'exploitations *	113.883	87.180	61.926	42.854	37.761	36.888	36.111
Superficie agricole utilisée (en ha)	1.418.121	1.357.366	1.394.083	1.358.019	1.338.566	1.352.953	1.358.705
Main-d'œuvre	185.134	142.272	107.399	80.944	74.510	70.993	-
dont main-d'œuvre non familiale occupée régulièrement	7.139	7.791	9.962	14.437	15.443	19.802	-
Main-d'œuvre/exploitation	1,63	1,63	1,73	1,89	1,97	1,92	-
Flandre**	1980	1990	2000	2010	2013	2016	2019
Nombre d'exploitations *	75.898	57.934	41.047	28.331	24.929	24.034	23.378
Superficie agricole utilisée (en ha)	634.397	603.896	636.876	616.866	624.960	622.860	624.990
Main-d'œuvre	124.658	96.015	74.695	56.575	51.661	48.569	-
dont main-d'œuvre non familiale occupée régulièrement	5.140	6.223	8.121	11.296	12.376	15.545	-
Main-d'œuvre/exploitation	1,64	1,66	1,82	2,00	2,07	2,02	-
Wallonie	1980	1990	2000	2010	2013	2016	2019
Nombre d'exploitations *	37.843	29.178	20.843	14.502	12.832	12.854	12.733
Superficie agricole utilisée (en ha)	783.165	752.743	756.725	740.885	713.606	730.093	733.715
Main-d'œuvre	60.141	46.076	32.614	24.315	22.849	22.424	-
dont main-d'œuvre non familiale occupée régulièrement	1.883	1.494	1.806	3.106	3.067	4.257	-
Main-d'œuvre/exploitation	1,59	1,58	1,56	1,68	1,78	1,74	-

* Attention: pour le nombre d'exploitations, voir avertissement méthodologique à la page 2 lié au changement de registre des entreprises agricoles.

** à partir de 2010, les chiffres pour la Flandre comprennent aussi ceux de Bruxelles

Tracteurs agricoles: nombre et nouvelles immatriculations									
	1977	1987	2000	2010	2015	2016	2017	2018	2019
Nombre	114.517	146.550	162.123	177.989	186.334	188.122	189.938	192.187	194.399
Nouvelles immatriculations	N/A	9.817	8.964	10.692	16.490	13.222	12.085	12.082	12.598

Chiffres clés de l'agriculture 2020

Superficies agricoles (2000, 2015-2019)						
	2000	2015	2016	2017	2018	2019
Cultures (en ha)						
Céréales pour le grain	313.485	341.460	337.015	305.434	304.516	313.107
Froment d'hiver	200.600	198.481	204.789	182.825	181.810	189.699
Orge d'hiver	40.349	44.167	52.266	42.574	38.998	43.804
Maïs cultivé pour le grain	35.783	58.384	52.100	49.005	53.987	48.641
Cultures industrielles	133.307	87.056	91.407	99.773	101.688	96.270
Betteraves sucrières	90.858	52.341	55.536	62.470	62.696	57.606
Pommes de terre	65.844	78.640	89.210	92.854	93.331	98.188
Légumineuses	2.215	2.724	2.909	3.422	3.822	4.638
Cultures fourragères	292.104	266.837	272.150	274.794	287.184	285.346
Maïs fourrager	166.336	173.336	168.737	171.278	179.744	175.299
Prairies temporaires	114.730	80.886	90.454	90.946	93.150	95.792
Légumes en plein air	35.920	43.498	46.667	49.791	49.890	49.165
Cultures permanentes	20.642	22.539	23.049	23.484	23.679	23.673
Prairies permanentes	506.946	475.959	478.430	467.837	479.635	475.464
Cultures sous serres	2.327	2.058	2.120	2.165	2.308	2.283
Jachères	20.097	8.972	9.167	8.802	9.227	9.848

Chiffres clés de l'agriculture 2020

Introduction

La conductivité thermique d'un ballot de paille est une notion très discutée dans le monde de la construction en paille, tant à l'échelle nationale qu'internationale. Comme décrit dans les fiches essais de ce vademécum, la conductivité thermique est une grandeur physique qui caractérise l'aptitude d'un corps à conduire la chaleur par conduction. On suppose donc que la chaleur se propage à l'intérieur du matériau de particule à particule. De manière pratique on définit la conductivité thermique d'un corps grâce à son coefficient λ , **exprimé en W/m.K** qui représente la quantité de chaleur transmise par unité de surface et par unité de temps sous un gradient de température de 1 degré pour un mètre d'épaisseur. Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus celui-ci conduit la chaleur, et donc moins il est isolant. La conductivité thermique dépend principalement de la nature du matériau, de la température et de l'humidité. Quand l'humidité augmente, la conductivité thermique augmente en général, et un matériau isolant perd une partie de sa capacité d'isolation. En ce qui concerne la température, quand celle-ci augmente, un isolant perd de sa capacité d'isolation et, à l'inverse, un conducteur perd de sa capacité de conduction.

Le ballot de paille est de par sa nature relativement hétérogène, il est difficile pour un maître d'ouvrage ou un auteur de projet de sélectionner une valeur de conductivité thermique représentative du comportement global du matériau particulier qu'il utilise. Ceci est d'autant plus difficile que les données disponibles dans la littérature sont très variées et sont le fruit de techniques de mesure souvent empiriques. Pourquoi une telle divergence ? Tout simplement parce que les ballots de paille ont une épaisseur plus importante que la majorité des isolants disponibles sur le marché. En effet, même s'il existe de nombreuses méthodes pour mesurer la conductivité thermique des matériaux, les outils disponibles pour mesurer directement la conductivité thermique d'un isolant de grande épaisseur (> 25 cm) ne sont pas légion. Beaucoup d'essais ont donc été réalisés sur des épaisseurs plus faibles de matériaux ou au moyen de technique empirique. Sur base d'un petit tour de l'état de l'art actuel et des diverses expériences réalisés dans le projet APROPaille, des valeurs de conductivités thermiques sécuritaires et représentatives du comportement de la paille seront proposées. Outre l'épaisseur du ballot de paille, son comportement hygrothermique est également à considérer. Ainsi, selon le taux d'humidité relative dans la paroi (pouvant varier de 40 à 60% voire 90% dans certains cas critiques) la conductivité thermique du ballot de paille évoluera sensiblement.

Historique des résultats internationaux

Lorsque l'on regarde les données disponibles dans la littérature, il n'est pas rare de retrouver deux données de conductivité thermique : une donnée nous indiquant la conductivité thermique lorsque le flux de chaleur est perpendiculaire aux brins

6.2. aPROpaille – Vademecum – La paille parois performantes (Evrard, Biot, Keutgen, Lebeau, Courard et al., 2016)

de paille et une seconde valeur pour laquelle le flux de chaleur est parallèle aux brins de paille. Nous reviendrons sur ce point ci-après, mais il convient d'observer que cette distinction a été réalisée depuis le début des études thermiques sur ballots. En effet, dans le document de McCabe (1993), qui apparaît comme étant la première étude largement référencée sur la conductivité thermique de la paille, on retrouve déjà cette distinction. Grâce à un dispositif apparentant à une plaque chaude, il montra que la conductivité thermique d'un ballot de paille était de 0,061 W/m.K avec un flux parallèle aux fibres et de 0,048 W/m.K avec un flux perpendiculaire aux fibres. Dans la foulée des études similaires ont été conduites par un grand nombre d'auteurs dont notamment Andersen (2001) et Shea (2013). Dans son étude, Andersen (2001) a demandé à l'institut technologique danois d'étudier l'influence de la densité des échantillons de paille sur la conductivité thermique. Plus particulièrement, ils ont étudié deux lots d'échantillons, des échantillons dont la densité était de 75 kg/m³ et un second lot dont la densité était de 90 kg/m³. Pour le premier lot à 75 kg/m³, ils ont mesuré une conductivité thermique de 0,052 W/m.K pour un flux perpendiculaire aux fibres et 0,056 W/m.K pour un flux parallèle. Pour le second lot, ils ont mesuré des valeurs légèrement supérieures puisqu'ils ont obtenu 0,056 W/m.K avec un flux perpendiculaire aux fibres et 0,06 W/m.K lorsque celui-ci était parallèle. Plus récemment, Shea (2013) a étudié au moyen d'un fluxmètre thermique divers échantillons de paille de 25 cm d'épaisseur compressés à diverses densités sans organisation particulière des fibres. Les conductivités thermiques trouvées variaient entre 0,059 W/m.K pour une densité de 63 kg/m³ à 0,064 W/m.K pour une densité de 123 kg/m³. Une autre étude réalisée par la FASBA, sur des échantillons de plus faible épaisseur (10 cm), met en évidence de meilleures performances, puisqu'ils ont mesuré une conductivité thermique de l'ordre de 0,045 W/m.K pour un flux perpendiculaire aux fibres. Le tableau ci-dessous résume les valeurs décrites dans ce premier chapitre.

Conductivités thermiques d'un ballot de paille définies par divers auteurs.

Auteur	Densité	Orientation	Conductivité [W/m.K]
McCabe, 1993	130	Perpendiculaire	0,0487
		Parallèle	0,0605
Andersen, 2001	75	Perpendiculaire	0,052
		Parallèle	0,056
	90	Perpendiculaire	0,056
		Parallèle	0,06

Auteur	Densité	Orientation	Conductivité [W/m.K]
	63		0.0594
	76		0.0621
Shea, 2013	85	Sans arrangement	0.0619
	107		0.0642
	114		0.0642
	123		0.0636
Fasba, 2003	90-110	Perpendiculaire	0.045
Institut Allemand pour les techniques de construction, 2006	90-110	Parallèle	0.08
		Perpendiculaire	0.052

A côté de ces valeurs disponibles sur les sites internet ou dans certains articles scientifiques, on peut retrouver des valeurs un peu plus officielles disponibles dans un agrément général de contrôle des constructions édité par l'Institut allemand pour les techniques de construction¹. Encore une fois, dans cet agrément, une distinction est réalisée entre flux perpendiculaire aux fibres et flux parallèle aux fibres ($\lambda_{\perp} = 0,060 \text{ W/m.K}$ dans le sens des brins de paille ; $\lambda_{\parallel} = 0,052 \text{ W/m.K}$ transversalement au sens des brins de paille).

L'orientation de la fibre

Comme discuté ci-dessus, l'orientation de la fibre par rapport au flux de chaleur semble jouer un rôle majeur dans la détermination de la conductivité thermique du ballot de paille. Cette constatation émane des premiers tests et est toujours valable à ce jour, comme le démontrent les résultats de la recherche aPROpaille.

Cependant, à travers la littérature, les rapports de recherches internationales ou simplement dans le discours des professionnels du domaine, le vocabulaire employé peut poser problème. En effet, dans le but d'exprimer les 3 sens de pose du ballot de paille dans la paroi, différentes appellations ont vu le jour : sur champ, sur face, sur côté, sur sa tranche, sur sa plus grande face, sur son plus grand côté... La diversité des appellations complique davantage la compréhension de contenu scientifique à l'échelle internationale. La notion d'orientation de la fibre par

¹. Agrément technique générale n°Z-23.11-1535 du 10/02/2006 - INSTITUT ALLEMAND DES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION | pour le compte de FASBA.

rapport au flux de chaleur devient alors plus floue et des valeurs de conductivité thermique semblent utilisées de manière erronée. Afin d'éclaircir la situation et de ne laisser aucune ambiguïté dans l'interprétation des résultats de la recherche, le présent chapitre vise à présenter le plus clairement possible les 3 sens de pose du ballot de paille et, donc, les 3 directions possibles pour la mesure de la conductivité thermique.

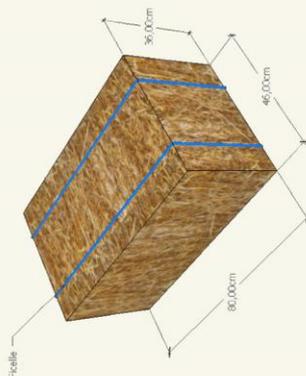


Fig. 31: Dimensions du ballot de paille considéré dans la recherche « aPROpaille ».

La figure 31 illustre les dimensions considérées comme « standards » pour chaque ballot de paille dans le cadre de la recherche. Le ballot est ainsi décrit comme ayant une largeur de 46 cm, une hauteur de 36 cm et une longueur de 80 cm. La hauteur et la largeur sont fixes et ne varient que dans de rares occasions (modèles de presses particuliers). Les dimensions du canal de compression déterminent la section du ballot et sont généralement de 46 cm x 36 cm. À la sortie de la presse, le ballot se « relâche » quelque peu ; on peut donc assister à une légère variation de la section du ballot (ex : 47 cm x 37 cm). La longueur, elle, est totalement variable et peut être adaptée selon les besoins. Selon le constructeur, les longueurs de ballots peuvent varier de 36 cm à 120-150 cm. À noter que la réduction de la longueur entraîne une manutention beaucoup plus importante et, à l'inverse, des longueurs trop importantes génèrent des problèmes de cohésion du ballot et de manutention (trop encombrant et/ou trop lourd).

Le présent procès-verbal de classement de résistance au feu définit le classement affecté à la paroi verticale conformément aux modes opératoires donnés dans l'EN 13501-2 : 2016-07.

1. Description

Les dimensions sont données en [mm].

1.1. Description du mur porteur

Mur porteur constitué de modules à ossature bois et isolation en paille enduite.

Hauteur maximale	: 3000.
Longueur maximale du mur porteur	: illimitée.
Dimensions maximales d'un module	: 3000 x 3000 (h x l).
Epaisseur minimale de l'isolation en paille	: 370.
Epaisseur minimale de l'enduit intérieur	: 40.

1.1.1. Ossature

L'ossature de chaque module constituant le mur porteur est composée de montants et traverses en Sapin lamellé-collé : montants extérieurs de section 320 x 60, montants intermédiaires de section 320 x 40 et traverses composées de trois éléments de section 95 x 45.

Au niveau des traverses, les éléments de section 95 x 45 sont mis en œuvre côte à côte avec un espacement moyen de 15 à 20. L'élément central est mis en œuvre à cheval sur deux modules adjacents, avec un décalage moyen de 1500 par rapport aux éléments extérieurs.

Les montants et les éléments de traverses sont assemblés par des vis Ø 6 x 120, à raison de deux fixations par jonction montant / élément de traverse.

Les montants intermédiaires sont mis en œuvre avec un entraxe maximal de 450.

1.1.2. Isolation

L'isolation du mur porteur est constituée de boîtes de paille mises en œuvre entre les éléments d'ossature (montants et traverses) et disposées sur chants. Le taux de compression des boîtes de paille est précisé dans le tableau 4.2 des Règles professionnelles de construction en paille [2] (voir annexe n° 6).

Côté intérieur du mur porteur, des bandes de support d'enduit en fibres de bois d'épaisseur 60, comprimées à 50 lors de leur fixation, sont agrafées sur les chants des éléments d'ossature (montants et traverses) afin de compenser la différence d'épaisseur entre l'ossature et les boîtes de paille et permettre la mise en œuvre de l'enduit.

1.1.3. Finition extérieure

Côté extérieur du mur porteur peut être mis en œuvre un pare-pluie.

Les lés du pare-pluie souple sont disposés avec un recouvrement minimal de 200.

Les bords du pare-pluie sont repliés sur les chants de l'ossature du mur porteur sur une longueur de 100 et maintenus par des bandes continues d'adhésif assurant le maintien du pare-pluie et l'étanchéité à l'air.

En complément peut être mis en œuvre tout type de vêture ou bardage comprenant une lame d'air ventilée entre le pare-pluie et la vêture.

1.1.4. Finition intérieure : enduit

La mise en œuvre de l'enduit est réalisée à plat, sur une paroi disposée horizontalement.

Avant la pose de l'enduit, la surface de l'isolation en paille est rectifiée à l'aide d'un outil adapté (exemple : débroussailluse) afin de limiter l'épaisseur d'enduit à appliquer et débarrasser la paroi des brins de paille non solidaires des boîtes et/ou trop longues.

De la barbotine, mélange terre/eau, est projetée au préalable afin de faciliter l'accroche de l'enduit sur la paille.

Côté intérieur du mur porteur est mis en œuvre un enduit à base de terre sur une épaisseur minimale de 40 en deux passes. Un treillis en fibres polypropyléniques de dimensions de mailles 25 x 25 est marouflé dans la première couche d'enduit.

1.1.5. Charge maximale

La charge maximale admissible par le mur porteur est de 6 t / m^l.

Plans de l'élément de construction

⇒ Voir annexe n° 1

1.2. Description de la cloison

Cloison constituée d'une ossature bois et d'une isolation en paille enduite.

Hauteur maximale	: 4000.
Longueur maximale	: illimitée.
Epaisseur minimale de l'isolation en paille	: 370.
Epaisseur minimale de l'enduit intérieur	: 40.

1.2.1. Ossature

L'ossature de la cloison est constituée d'un cadre extérieur composé de montants et traverses en Sapin lamellé-collé de section 350 x 65 assemblés par des tire-fonds Ø 6 x 120, à raison de trois fixations par jonction montant / traverse.

Pour des parois de grande largeur, des montants intermédiaires de section 350 x 65 sont mis en œuvre à entraxe maximal de 3000. Ils sont fixés aux traverses haute et basse par des tire-fonds Ø 6 x 120, à raison de trois fixations par jonction montant / traverse.

1.2.2. Isolation

L'isolation est constituée de boîtes de paille mises en œuvre dans le cadre d'ossature et disposées sur chants. Les dernières boîtes de paille sont insérées en force afin de conserver un taux de compression de l'isolant permettant le maintien structurel de l'ensemble.

Le taux de compression des boîtes de paille est précisé dans le tableau 4.2 des Règles professionnelles de construction en paille [2] (voir annexe n° 8).

Côté intérieur de la cloison, des bandes de support d'enduit en fibres de bois, comprimées à 16 % de leur épaisseur initiale lors de leur fixation, sont agrafées sur les chants des éléments d'ossature (montants et traverses) afin de compenser la différence d'épaisseur entre l'ossature et les boîtes de paille et permettre la mise en œuvre de l'enduit. Dans cette configuration, les bandes de treillis en fibres polypropyléniques décrites ci-dessous ne sont pas mises en œuvre.

1.2.3. Finition extérieure

Côté extérieur de la cloison peut être mis en œuvre un pare-pluie.

Les lés du pare-pluie sont disposés avec un recouvrement minimal de 200.

Les bords du pare-pluie sont repliés sur les chants de l'ossature de la cloison sur une longueur de 100 et maintenus par des bandes continues d'adhésif assurant le maintien du pare-pluie et l'étanchéité à l'air.
En complément peut être mis en œuvre tout type de vêture ou bardage comprenant une lame d'air ventilée entre le pare-pluie et la vêture.

1.2.4. Finition intérieure : enduit

La mise en œuvre de l'enduit est réalisée à plat, sur une paroi disposée horizontalement.

Avant la pose de l'enduit, la surface de l'isolation en paille est rectifiée à l'aide d'un outil adapté (exemple : débroussailluse) afin de limiter l'épaisseur d'enduit à appliquer et débarrasser la paroi des brins de paille non solidaires des bottes et/ou trop longues.

Lorsque l'ossature bois est affleurante côté intérieur, des bandes de largeur 100 de treillis en fibres polypropylènes de dimensions de mailles 10 x 10 sont mises en œuvre au droit des montants et traverses d'ossature afin de permettre l'accroche de l'enduit sur le bois. Dans cette configuration, les bandes de support d'enduit décrites précédemment ne sont pas mises en œuvre.

De la barbotine, mélange terre/eau, est projetée au préalable afin de faciliter l'accroche de l'enduit sur la paille.

Côté intérieur de la cloison est mis en œuvre un enduit à base de terre sur une épaisseur minimale de 40 en deux passes. Un treillis en fibres polypropylènes de dimensions de mailles 25 x 25 est marouflé dans la première couche d'enduit.

Plans de l'élément de construction

⇒ Voir annexe n° 2

1.3. Variantes de montage

1.3.1. Ossature

Mur porteur

Les murs porteurs sont constitués d'une ossature traversante telle que décrite dans le paragraphe 1.1.2 : montants extérieurs de section 320 x 60, montants intermédiaires de section 320 x 40 à entraxe maximal de 450 et traverses composées de trois éléments de section 95 x 45.

Cloison

Les cloisons peuvent être constituées des ossatures suivantes :

- Sans ossature avec isolation en bottes de paille disposées en quinconce et dont le maintien est assuré par la compression des bottes.
- Ossature traversante telle que décrite dans le paragraphe 2.1.2 : montants et traverses de section minimale 350 x 65 avec entraxe maximal entre montants intermédiaires de 3000.
- Simple ossature
 - o Centrée dans l'épaisseur de la cloison,
 - o Excentrée côté intérieur,
 - o Excentrée côté extérieur.
- Double ossature externe (en tunnel).

Quelle que soit la configuration, la mise en œuvre de la cloison (avec ou sans ossature bois) doit respecter les Règles professionnelles de construction en paille [2]. La section et l'entraxe des montants et traverses de l'ossature bois sont déterminés en fonction des contraintes de dimensionnement de l'ouvrage et de la nature des parements employés.

Plans des différentes configurations d'ossature

⇒ Voir annexes n° 2 à 7

Les bords du pare-pluie sont repliés sur les chants de l'ossature de la cloison sur une longueur de 100 et maintenus par des bandes continues d'adhésif assurant le maintien du pare-pluie et l'étanchéité à l'air.

En complément peut être mis en œuvre tout type de vêture ou bardage comprenant une lame d'air ventilée entre le pare-pluie et la vêture.

1.2.4. Finition intérieure : enduit

La mise en œuvre de l'enduit est réalisée à plat, sur une paroi disposée horizontalement.

Avant la pose de l'enduit, la surface de l'isolation en paille est rectifiée à l'aide d'un outil adapté (exemple : débroussailluse) afin de limiter l'épaisseur d'enduit à appliquer et débarrasser la paroi des brins de paille non solidaires des bottes et/ou trop longues.

Lorsque l'ossature bois est affleurante côté intérieur, des bandes de largeur 100 de treillis en fibres polypropylènes de dimensions de mailles 10 x 10 sont mises en œuvre au droit des montants et traverses d'ossature afin de permettre l'accroche de l'enduit sur le bois. Dans cette configuration, les bandes de support d'enduit décrites précédemment ne sont pas mises en œuvre.

De la barbotine, mélange terre/eau, est projetée au préalable afin de faciliter l'accroche de l'enduit sur la paille.

Côté intérieur de la cloison est mis en œuvre un enduit à base de terre sur une épaisseur minimale de 40 en deux passes. Un treillis en fibres polypropylènes de dimensions de mailles 25 x 25 est marouflé dans la première couche d'enduit.

Plans de l'élément de construction

⇒ Voir annexe n° 2

1.3. Variantes de montage

1.3.1. Ossature

Mur porteur

Les murs porteurs sont constitués d'une ossature traversante telle que décrite dans le paragraphe 1.1.2 : montants extérieurs de section 320 x 60, montants intermédiaires de section 320 x 40 à entraxe maximal de 450 et traverses composées de trois éléments de section 95 x 45.

Cloison

Les cloisons peuvent être constituées des ossatures suivantes :

- Sans ossature avec isolation en bottes de paille disposées en quinconce et dont le maintien est assuré par la compression des bottes.
- Ossature traversante telle que décrite dans le paragraphe 2.1.2 : montants et traverses de section minimale 350 x 65 avec entraxe maximal entre montants intermédiaires de 3000.
- Simple ossature
 - o Centrée dans l'épaisseur de la cloison,
 - o Excentrée côté intérieur,
 - o Excentrée côté extérieur.
- Double ossature externe (en tunnel).

Quelle que soit la configuration, la mise en œuvre de la cloison (avec ou sans ossature bois) doit respecter les Règles professionnelles de construction en paille [2]. La section et l'entraxe des montants et traverses de l'ossature bois sont déterminés en fonction des contraintes de dimensionnement de l'ouvrage et de la nature des parements employés.

Plans des différentes configurations d'ossature

⇒ Voir annexes n° 2 à 7

Terre – plâtre à 25 % de plâtre	25 %	15 %	/	30 %	15 %	15 %	1 vol d'argile + 4 vol de sable 0/4 + 1,66 vol de plâtre
---------------------------------	------	------	---	------	------	------	---

2. Appréciation de laboratoire en appui du classement

2.1. Appréciation de laboratoire

Organisme ayant réalisé l'étude	Nom du commanditaire	N° de référence de l'étude	Date de réalisation de l'étude	Méthode (Référentiels)
C.S.T.B	Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP)	RS20-012	06/01/2020	Arrêté du 22 mars 2004 modifié et son annexe 4

2.2. Résultats de l'étude n° RS20-012

Paramètres de l'essai	
Capacité portante	T = 345 kg (Rt + 1) + 20 Sens de feu côté enduit intérieur
Durée	Résultats 120 minutes
Étanchéité au feu	Résultats 120 minutes
Durée	Résultats 120 minutes
Isolation thermique	Résultats 120 minutes
Durée	Résultats 120 minutes
Étanchéité au feu	Résultats 120 minutes
Durée	Résultats 120 minutes
Isolation thermique	Résultats 120 minutes
Durée	Résultats 120 minutes

3. Représentativité de l'élément

Par ses matériaux issus de fabrication courante, par son principe de montage in-situ, l'élément mis en œuvre dans des conditions notées par le laboratoire, et conformément à la notice de mise en œuvre fournie par le fabricant, peut être considéré comme représentatif de la réalisation courante actuelle. Il donne lieu à la délivrance d'un **procès-verbal de classement confirmé**.

4. Classement et champ d'application

4.1. Pour la gamme de murs porteurs

4.1.1. Référence du classement

Le présent classement a été prononcé conformément au paragraphe 7.3.2.3 de l'EN 13501-2 : 2016-07.

4.1.2. Classement

L'élément est classé selon les combinaisons de paramètres et de performances décrites ci-dessous. **Aucun autre classement n'est autorisé.**

CLASSEMENT DE RESISTANCE AU FEU : REI 120 / RE 120

NOTA 1 : Pour conserver la validité du classement ci-dessus, aucune modification dimensionnelle ou de configuration ne pourra être appliquée et aucune modification de constitution de l'élément ne pourra être faite sans la délivrance d'une extension de classement ou d'un avis de chantier émis par un laboratoire agréé.

NOTA 2 : Ces conclusions ne portent que sur les performances de résistance au feu de l'élément objet du présent procès-verbal de classement. Elles ne préjugent en aucun cas des autres performances liées à son incorporation à un ouvrage.

4.2. Pour la gamme de cloisons

4.2.1. Référence du classement

Le présent classement a été prononcé conformément au paragraphe 7.5.2.3 de l'EN 13501-2 : 2016-07.

4.2.2. Classement

L'élément est classé selon les combinaisons de paramètres et de performances décrites ci-dessous. **Aucun autre classement n'est autorisé.**

CLASSEMENT DE RESISTANCE AU FEU : EI 120 / E 120

NOTA 1 : Pour conserver la validité du classement ci-dessus, aucune modification dimensionnelle ou de configuration ne pourra être appliquée et aucune modification de constitution de l'élément ne pourra être faite sans la délivrance d'une extension de classement ou d'un avis de chantier émis par un laboratoire agréé.

NOTA 2 : Ces conclusions ne portent que sur les performances de résistance au feu de l'élément objet du présent procès-verbal de classement. Elles ne préjugent en aucun cas des autres performances liées à son incorporation à un ouvrage.

5. Domaine d'application directe des résultats

5.1. Pour la gamme de murs porteurs

Pour conserver la validité des classements, les extensions de réalisation ne peuvent être faites qu'en application du domaine d'application directe de la norme NF EN 1365-1 (décembre 2012) ou conformément à des extensions formulées par le laboratoire.

Généralités

Conformément au paragraphe 13.1 de la norme NF EN 1365-1 (décembre 2012), les résultats de l'étude sont directement applicables aux constructions similaires lorsque l'une ou plusieurs des modifications ci-dessous ont été apportées et que la construction demeure conforme au code de conception correspondant du point de vue de sa rigidité et de sa stabilité :

- Diminution de la hauteur du mur : ≤ 3000 mm.
- Augmentation de l'épaisseur du mur (hors finition extérieure) : ≥ 410 mm.
- Augmentation de l'épaisseur des matériaux constitutifs :
 - Epaisseur de l'isolant en paille : ≥ 370 mm.
 - Epaisseur de l'enduit intérieur : ≥ 40 mm.
 - Epaisseur de l'enduit extérieur : ≥ 40 mm.
 - Epaisseur de l'enduit plâtre : ≥ 450 mm.
- Diminution de l'espacement entre montants : ≤ 61 cm.
- Diminution de la charge appliquée : ≤ 6 t/m².
- Augmentation de la largeur du mur : ≥ 3000 mm (largeur maximale d'un module limitée à 3000 mm).

Ossature en bois

Les murs porteurs sont constitués d'une ossature traversante telle que décrite dans le paragraphe 1.1.1.

Enduit intérieur

Deux types d'enduits intérieurs peuvent être mis en œuvre sur les murs porteurs précédemment décrits : enduit à base d'argile et enduit à base de plâtre. Quel que soit l'enduit, son épaisseur minimale est de 40.

Les compositions d'enduit pouvant être appliqués sur les murs porteurs objets de cette appréciation de laboratoire sont détaillées dans le tableau 1 du paragraphe 1.3.2.

5.2. Pour la gamme de cloisons

Pour conserver la validité des classements, les extensions de réalisation ne peuvent être faites qu'en application du domaine d'application directe de la norme NF EN 1364-1 (août 2015) ou conformément à des extensions formulées par le laboratoire.

Généralités

Conformément au paragraphe 13.1 de la norme NF EN 1364-1 (août 2015), les résultats de l'étude sont applicables directement aux constructions similaires lorsque l'une ou plusieurs des modifications ci-dessous ont été apportées et que la construction continue à être conforme aux règles de conception correspondantes, du point de vue de sa rigidité et de sa stabilité :

- Diminution de la hauteur de la cloison : ≤ 3000 mm.
- Augmentation de l'épaisseur de la cloison (hors finition extérieure) : ≥ 410 mm.
- Augmentation de l'épaisseur des matériaux constitutifs :
 - Epaisseur de l'isolant en paille : ≥ 370 mm.
 - Epaisseur de l'enduit intérieur : ≥ 40 mm.
 - Epaisseur de l'enduit extérieur : ≥ 40 mm.
 - Epaisseur de l'enduit plâtre : ≥ 3000 mm.

Extension en largeur

La largeur de la cloison n'est pas limitée.

Extension en hauteur

La hauteur maximale de la cloison est limitée à 4,00 mètres.

Ossature en bois

Les cloisons peuvent être constituées des ossatures suivantes :

- Sans ossature avec isolation en boîtes de paille disposées en quinconce et dont le maintien est assuré par la compression des boîtes.
- Ossature traversante telle que décrite dans le paragraphe 2.1.2 : montants et traverses de section minimale 350 x 65 avec entraxe maximal entre montants intermédiaires de 3000.
- Simple ossature :
 - o Centrée dans l'épaisseur de la cloison,
 - o Excentrée côté intérieur,
 - o Excentrée côté extérieur.
- Double ossature externe (en tunnel).

Quelle que soit la configuration, la mise en œuvre de la cloison (avec ou sans ossature bois) doit respecter les Règles professionnelles de construction en paille [2]. La section et l'entraxe des montants et traverses de l'ossature bois sont déterminés en fonction des contraintes de dimensionnement de l'ouvrage et de la nature des parements employés.

Enduit intérieur

Deux types d'enduits intérieurs peuvent être mis en œuvre sur les cloisons précédemment décrites : enduit à base d'argile et enduit à base de plâtre. Quel que soit l'enduit, son épaisseur minimale est de 40.

Les compositions d'enduit pouvant être appliqués sur les cloisons objets de cette appréciation de laboratoire sont détaillées dans le tableau 1 du paragraphe 1.3.2.

5.3. Isolation des parois par l'intérieur

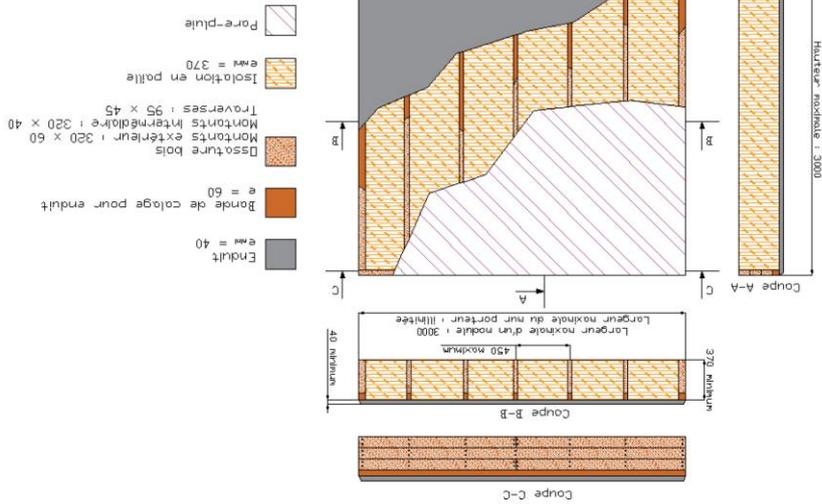
La gamme de murs porteurs et de cloisons à ossature bois et isolation en paille enduite objet de la présente appréciation de laboratoire est équipée d'un écran thermique intérieur constitué d'un enduit à base d'argile ou de plâtre d'épaisseur minimale 40 mm (compositions d'enduit données au paragraphe 1.3.2) est conforme :

- A l'article 16 de l'arrêté du 31 janvier 1986 modifié relatif à la protection contre l'incendie des Bâtiments d'Habitation.
- Et à l'article AM 8 de l'arrêté du 25 juin 1980 modifié portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les Etablissements Recevant du Public (ERP).

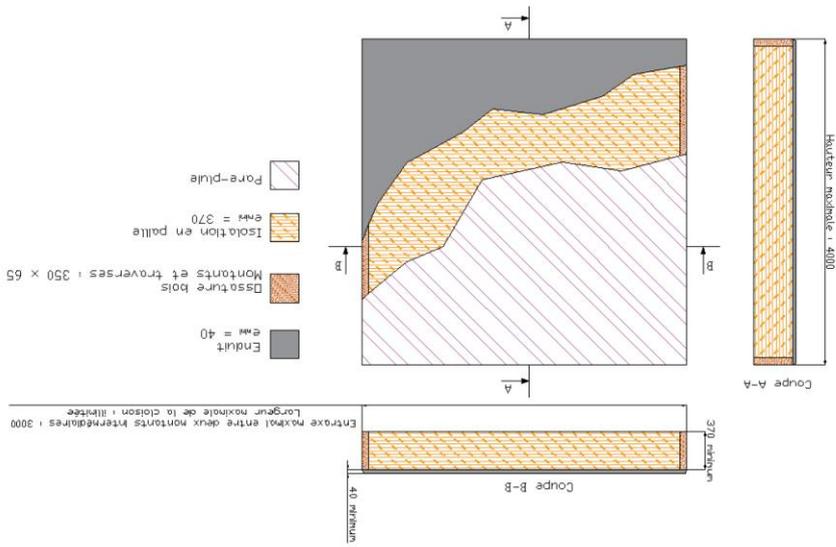
Avertissement

« Ce procès-verbal de classement ne représente pas l'approbation de type ou la certification de l'élément. »

Rédacteur(s)	Vérificateur	Approbateur	Version	Date
Karine JACQUEMET 	Pauline ANEST-BAVOUX 	Olivier CHEZE 	1.	06/01/2020



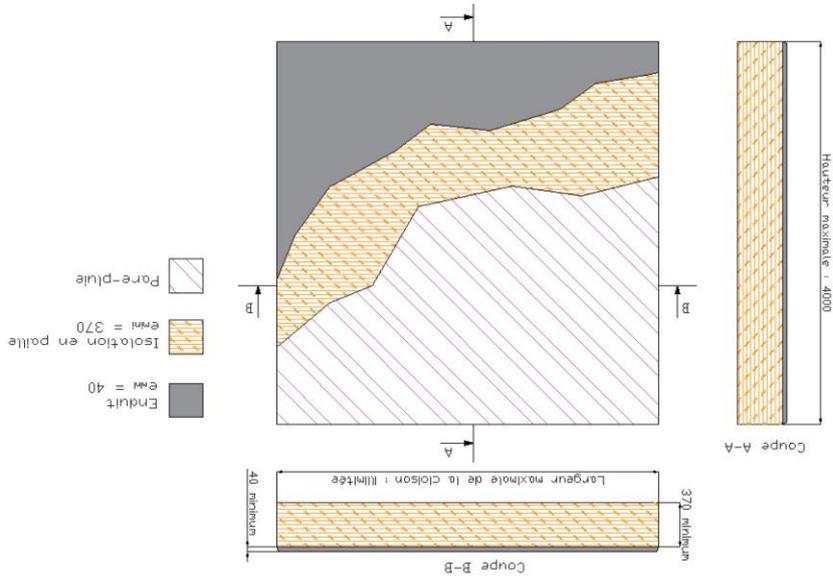
Annexe 1 : Plans de la configuration « mur porteur »



Annexe 2 : Plans de la configuration « cloison » avec ossature traversante

N°Réf : 26071001 – KJ-MT

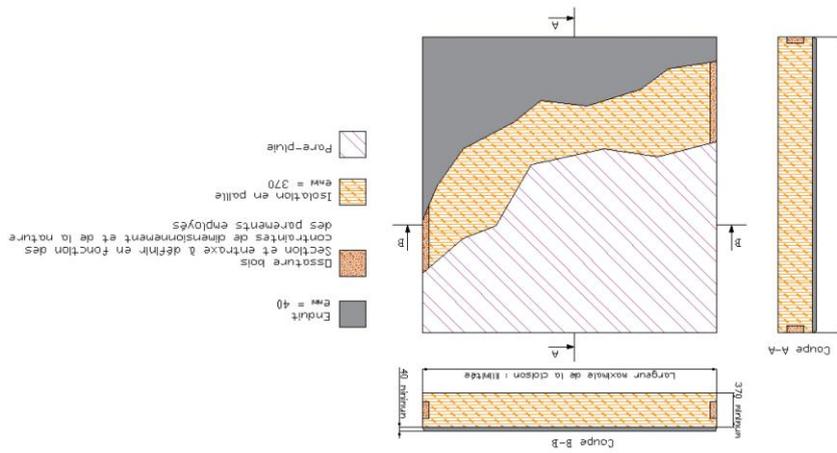
16/46



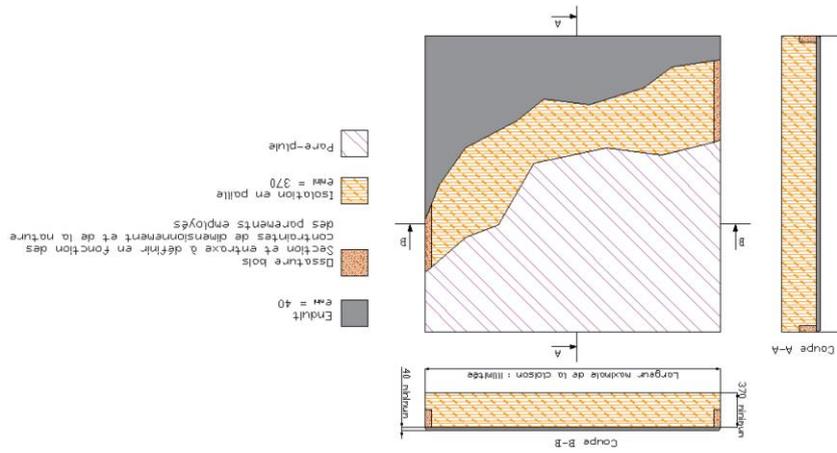
Annexe 3 : Plans de la configuration « cloison » sans ossature

N°Réf : 26071001 – KJ-MT

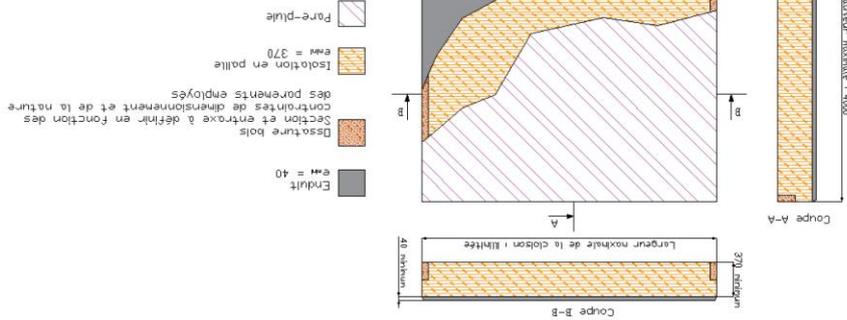
17/46



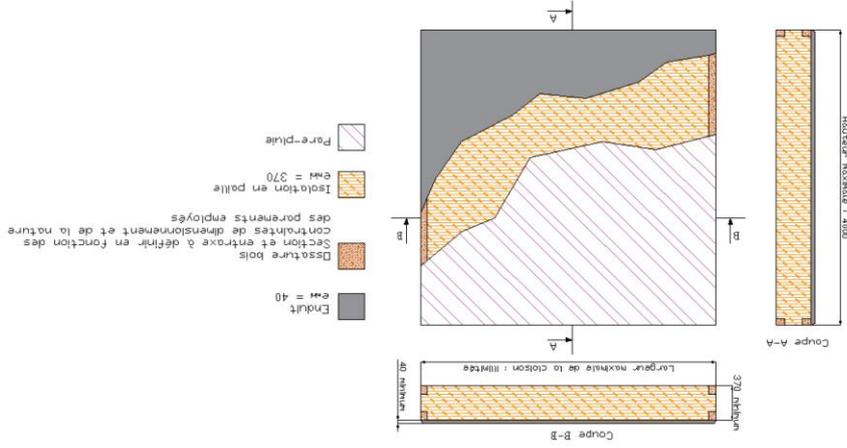
Annexe 4 : Plans de la configuration « cloison » avec simple ossature centrée



Annexe 5 : Plans de la configuration « cloison » avec simple ossature excentrée côté intérieur



Annexe 6 : Plans de la configuration « cloison » avec simple ossature excentrée côté extérieur



Annexe 7 : Plans de la configuration « cloison » avec double ossature externe (en tunnel)

Tab. 4.2. Taux minimal de compression et maintien des boîtes

Type de paroi	Type de pose	Masse volumique minimale des boîtes (kg/m ³)	Nombre minimal de dispositifs de maintien des boîtes au minimum du taux de compression	Taux minimal de compression des boîtes en paroi (% de la hauteur comprimée)
Paroi enduite	À plat	≥ 80	À chaque rangée de boîtes	0
		≥ 110	Toutes les 7 rangées de boîtes au minimum	2
		≥ 100		4
		≥ 80		7
	Sur chaut	≥ 80	À chaque rangée de boîtes	0
Paroi non enduite	Sur chaut	≥ 100	Toutes les 6 rangées de boîtes au minimum	3
	Verticale	≥ 80	À chaque rangée de boîtes	0
	Verticale	≥ 80	Toutes les 3 rangées de boîtes au minimum	3
	Tous types de pose	≥ 80	Sans objet	2

Annexe 8 : Taux de compression des boîtes de paille

Appréciation de laboratoire n° RS20-012

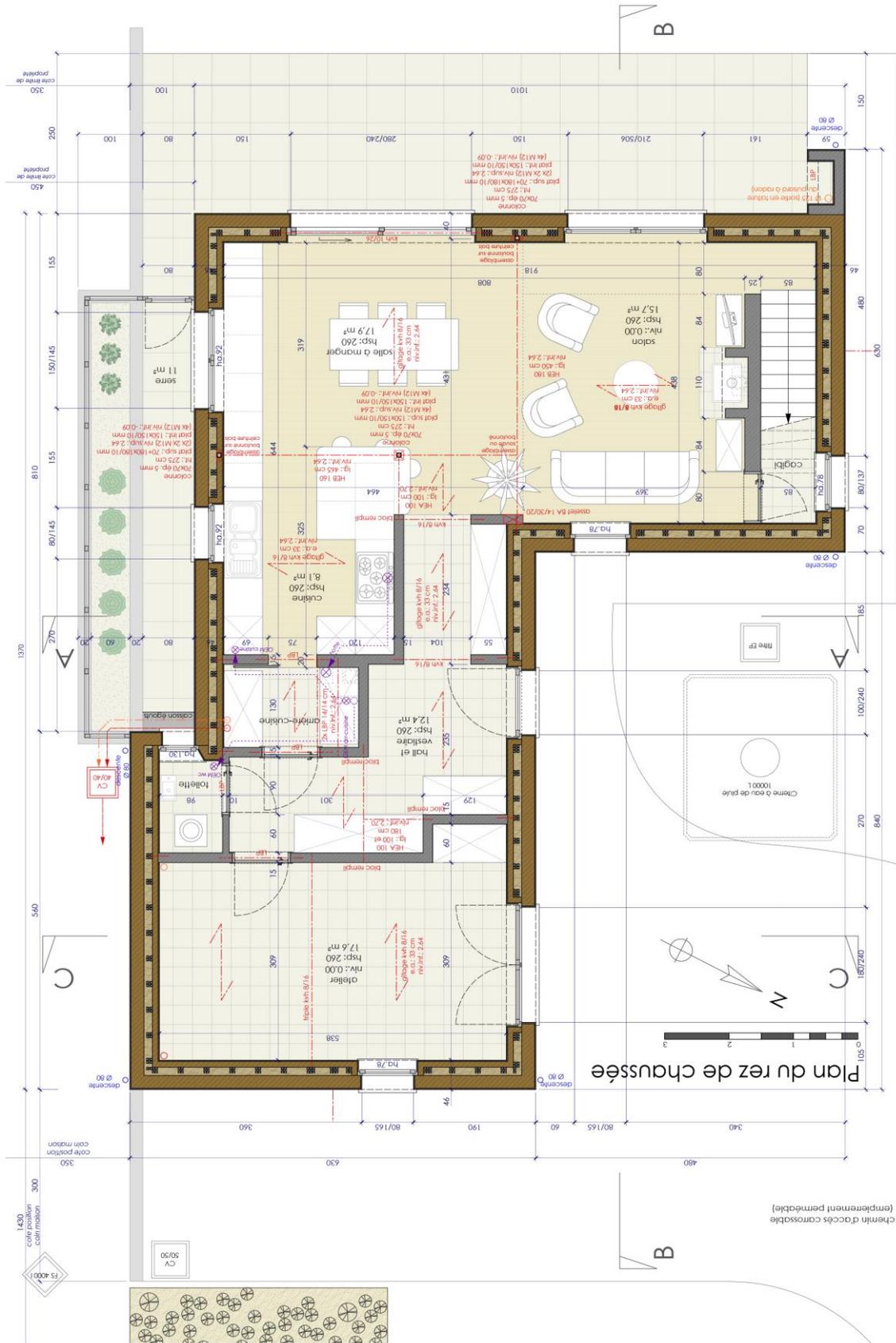
Gamme de murs porteurs et de cloisons à ossature bois et isolation en paille enduite

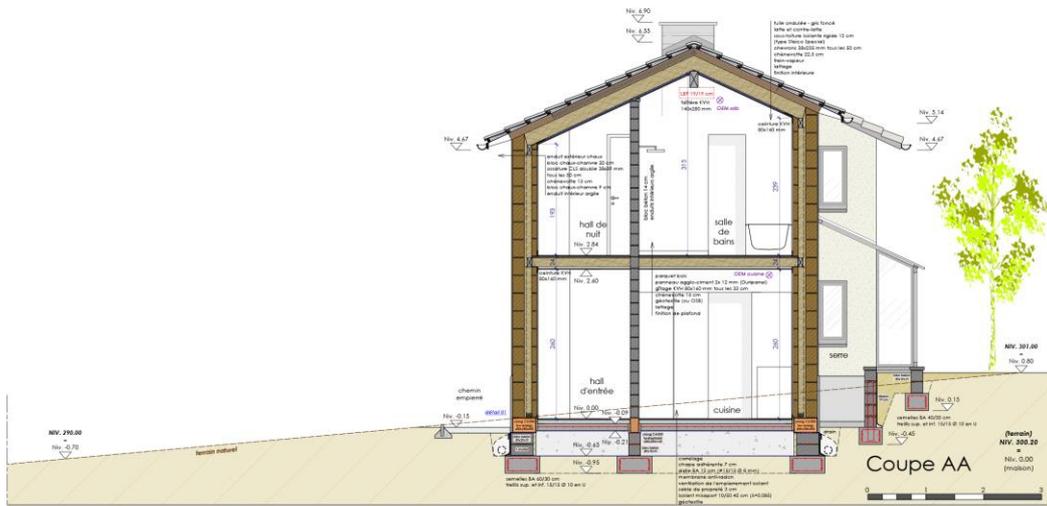
La reproduction de cette appréciation de laboratoire n'est autorisée que sous sa forme intégrale. Elle comporte 16 pages et 8 pages d'annexe.

A LA DEMANDE DE :
Direction de l'Habitat, de l'Urbanisme et des Paysages (DHUP)
Tour SEQUOIA
92055 PARIS LA DEFENSE Cedex

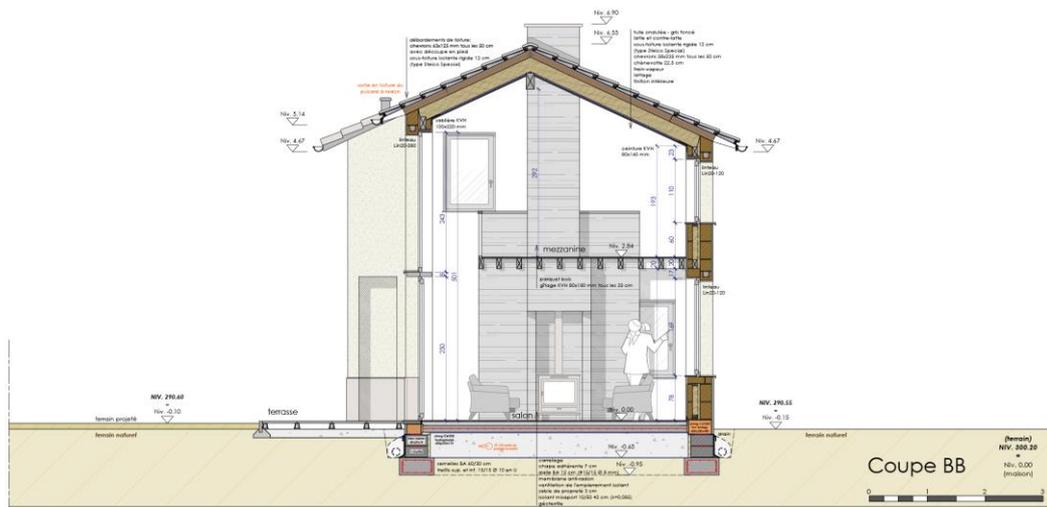
En collaboration avec le Réseau Français de la Construction Paille (RFCP)

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BÂTIMENT
Siège social : 84 avenue Jean Jaurès – Champs-sur-Marne – 77447 Marne-la-Vallée cedex 2
Tél. : +33 (0)1 64 68 83 33 – es2@cstb.fr – www.cstb.fr
MARNE-LA-VALLÉE / PARIS / GRENOBLE / MANTES / SOPHIA ANTIPOLIS





SOUSSION: Construction d'une habitation M. et Mme Halkin - Hayghe Route de la Croix de Fays, 4 bte 1 à 4910 Fays	Stephen Troumpen - Ir arch - Rue Walleffe, 1 à 4101 Jemeppe/Meuse tél. 047469 20 37 - mail. stephen.troumpen@hotmail.com	Site: Rue Armand Enkant à 4910 Fays cadastre: 2ème DIV. S.C.N.E. n° 1406 I	1/50 30/10/2020	
---	---	---	--------------------	--



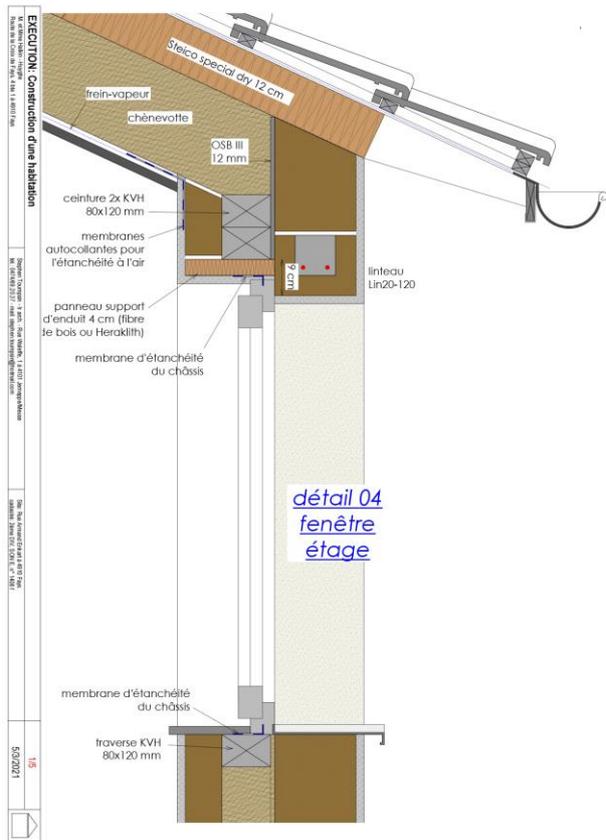
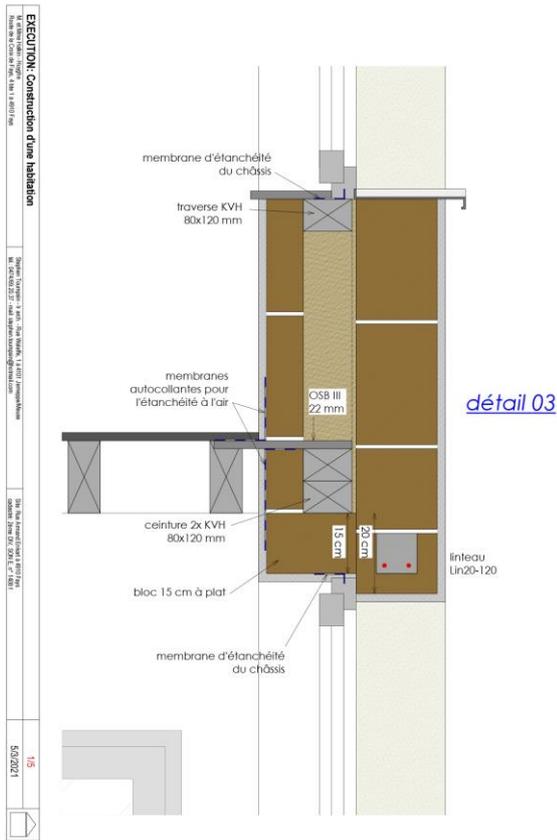
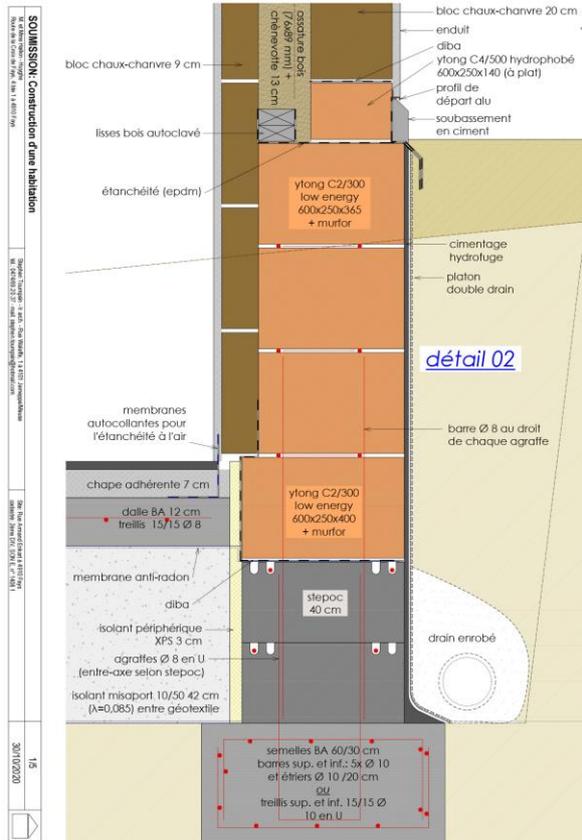
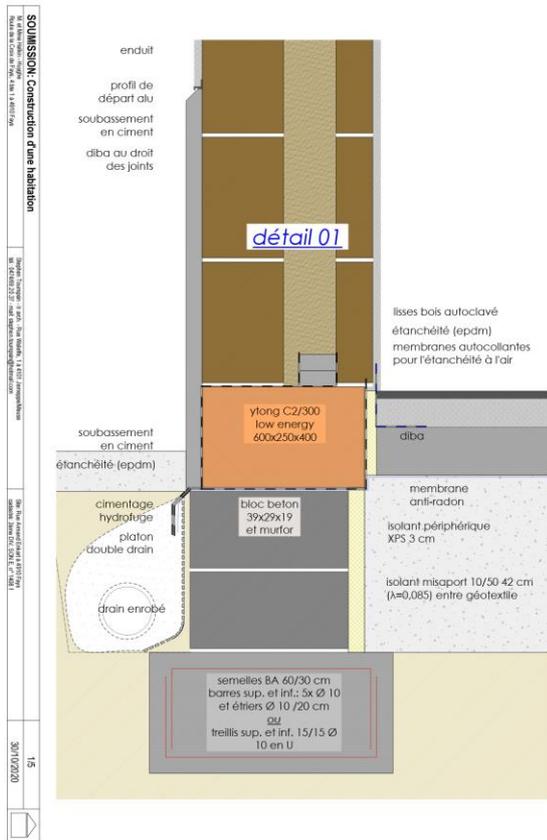
SOUSSION: Construction d'une habitation M. et Mme Halkin - Hayghe Route de la Croix de Fays, 4 bte 1 à 4910 Fays	Stephen Troumpen - Ir arch - Rue Walleffe, 1 à 4101 Jemeppe/Meuse tél. 047469 20 37 - mail. stephen.troumpen@hotmail.com	Site: Rue Armand Enkant à 4910 Fays cadastre: 2ème DIV. S.C.N.E. n° 1406 I	1/50 30/10/2020	
---	---	---	--------------------	---



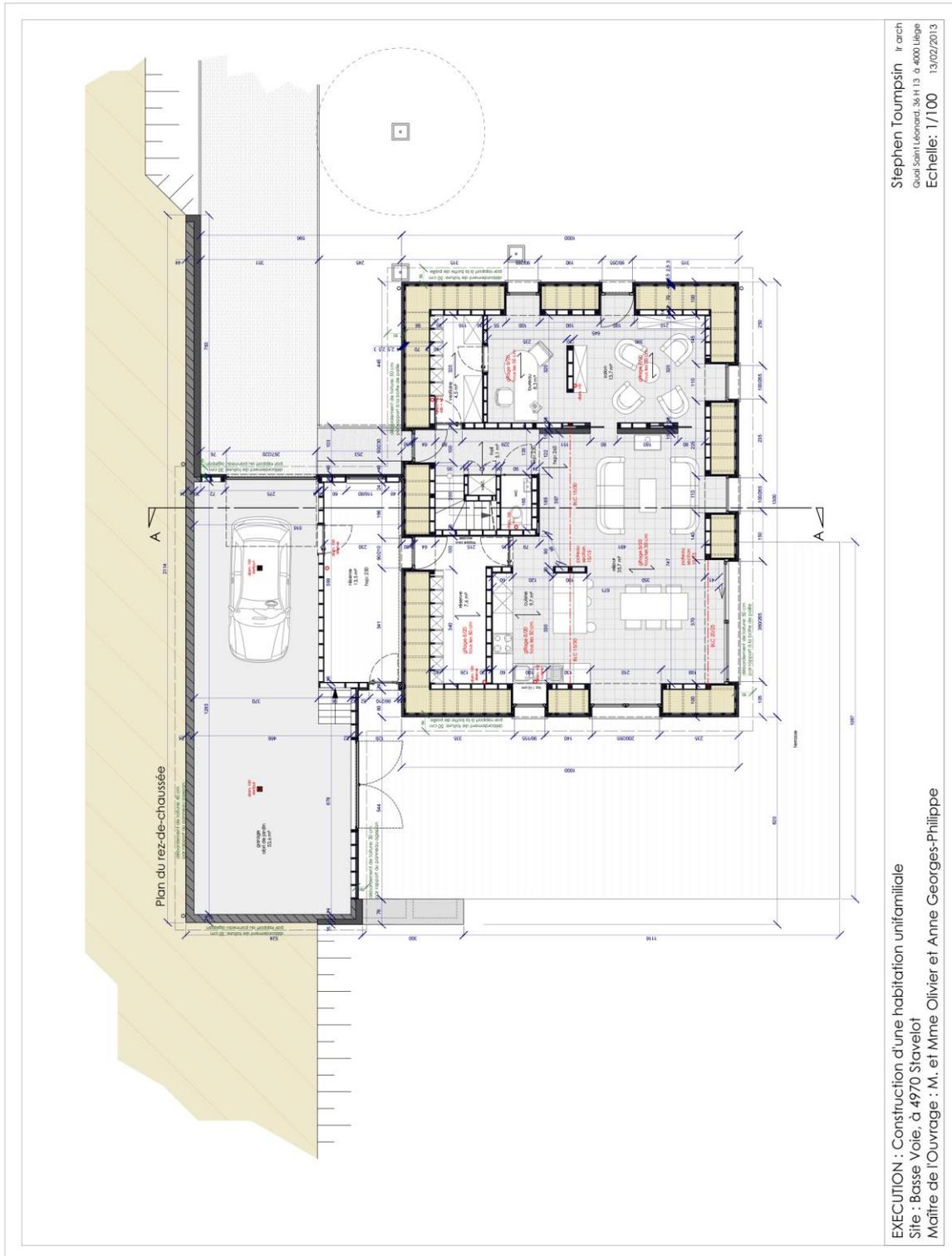
SOUSSION: Construction d'une habitation			1/50	
M. et Mme Hakim - Hayghe Route de la Croix de Fays, 4 bte 1 à 4910 Fays	Stephen Toumpain - Ir arch - Rue Walleffe, 1 à 4101 Jemeppe/Meuse tél. 0474/69 20 37 - mail. stephen.toumpain@hotmail.com	Site: Rue Armand Enkart à 4910 Fays cadastre: 2ème DIV, SON E, n° 1408 f	30/10/2020	

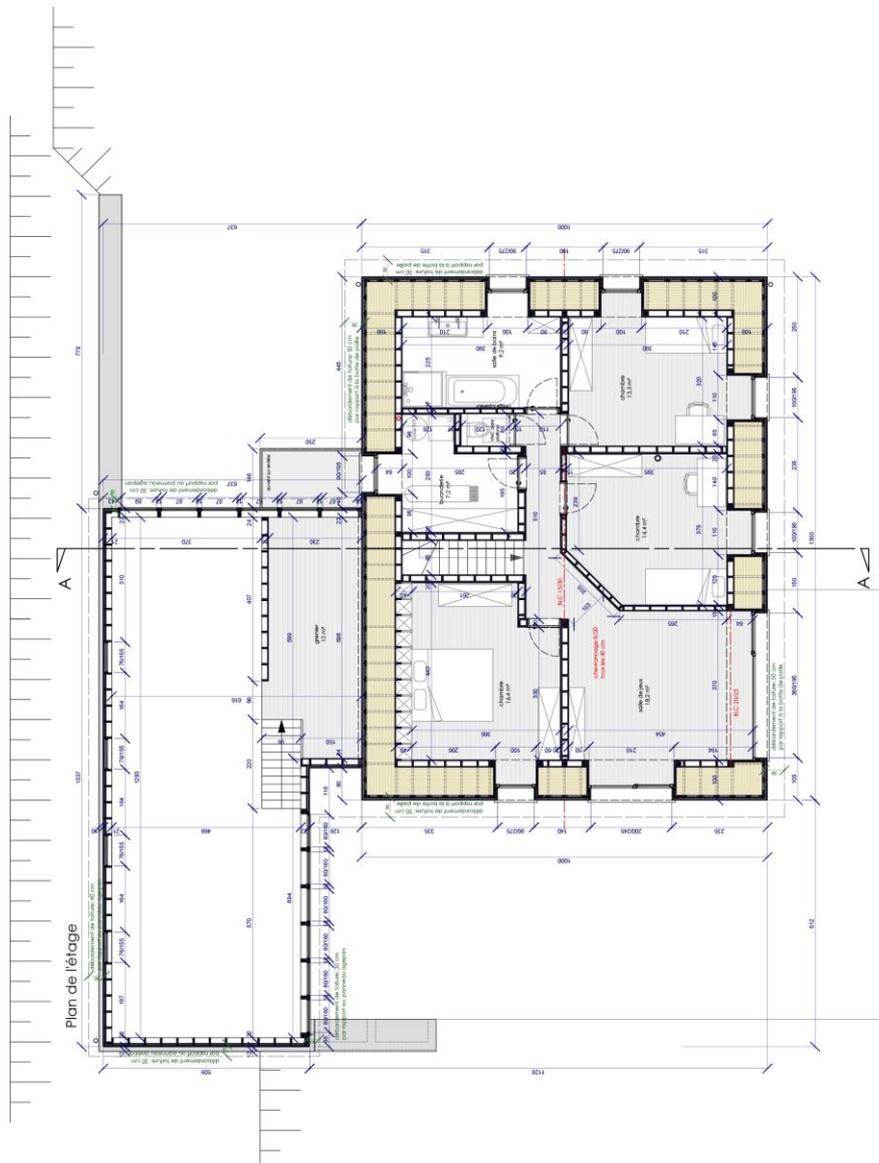


SOUSSION: Construction d'une habitation			1/50	
M. et Mme Hakim - Hayghe Route de la Croix de Fays, 4 bte 1 à 4910 Fays	Stephen Toumpain - Ir arch - Rue Walleffe, 1 à 4101 Jemeppe/Meuse tél. 0474/69 20 37 - mail. stephen.toumpain@hotmail.com	Site: Rue Armand Enkart à 4910 Fays cadastre: 2ème DIV, SON E, n° 1408 f	30/10/2020	



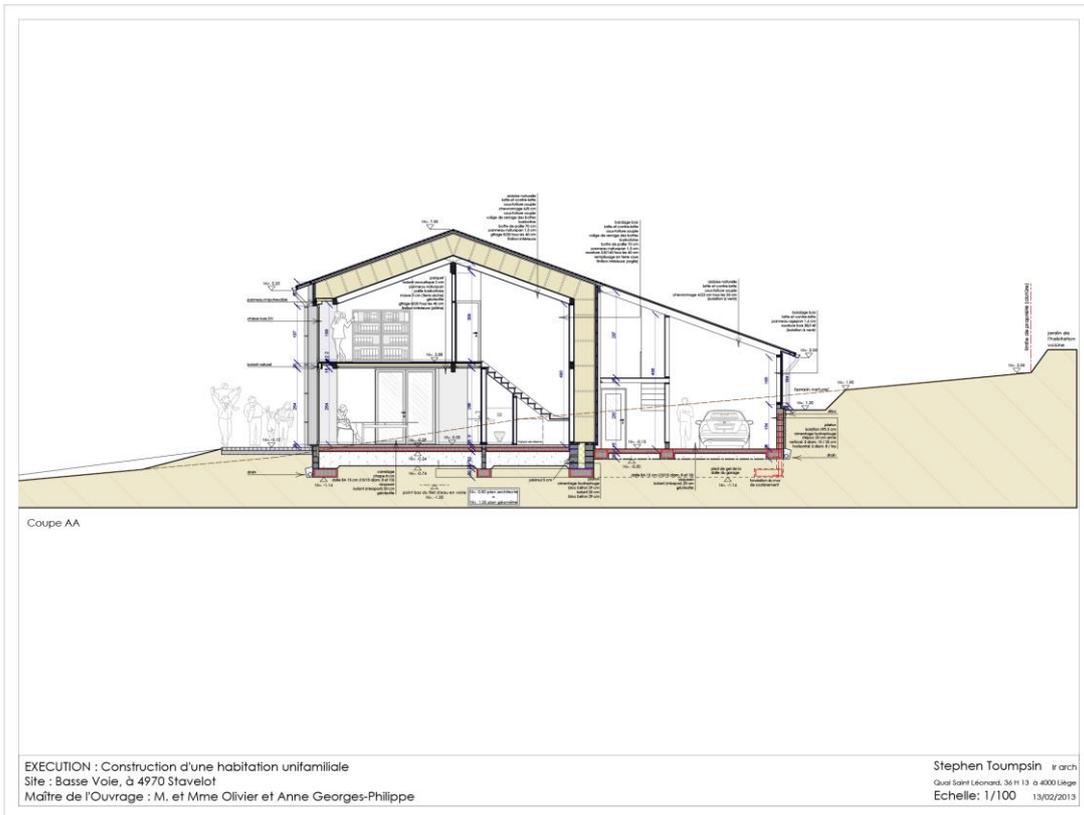
6.5. Documents relatifs au projet GEORGES (Toumpsin, 2013)





EXECUTION : Construction d'une habitation unifamiliale
 Site : Basse Voie, à 4970 Stavelot
 Maître de l'Ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne Georges-Philippe

Stephen Toumpsin - Ir arch
 Quai Saint Léonard, 36/H 13 - 4000 Liège
 Echelle: 1/100 13/02/2013

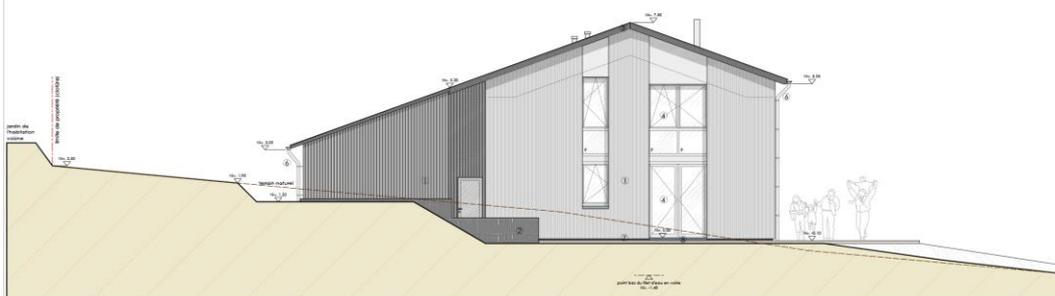




Façade sud

SOUSSION : Construction d'une habitation unifamiliale
 Site : Basse Voie, à 4970 Stavelot
 Maître de l'Ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne Georges-Philippe

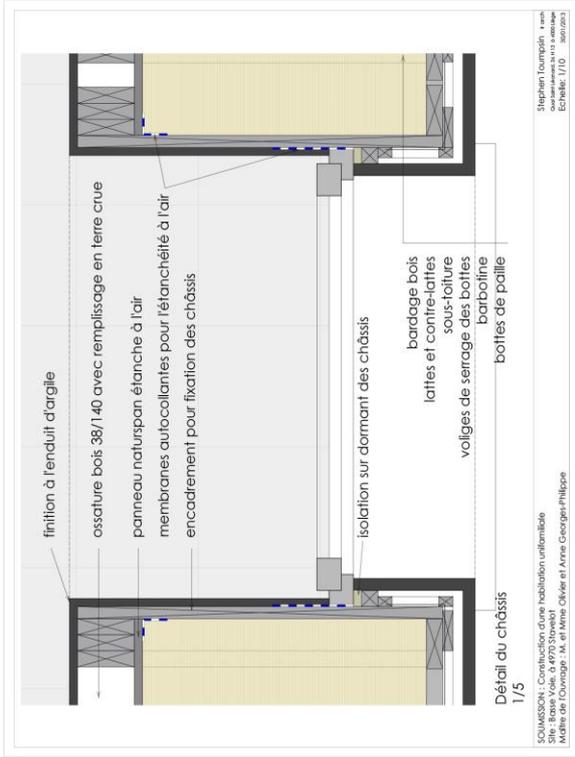
Stephen Toumpsin Ir arch
 Quai Saint Léonard, 3611 13 à 4000 Liège
 Echelle: 1/100 30/01/2013



Façade ouest

SOUSSION : Construction d'une habitation unifamiliale
 Site : Basse Voie, à 4970 Stavelot
 Maître de l'Ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne Georges-Philippe

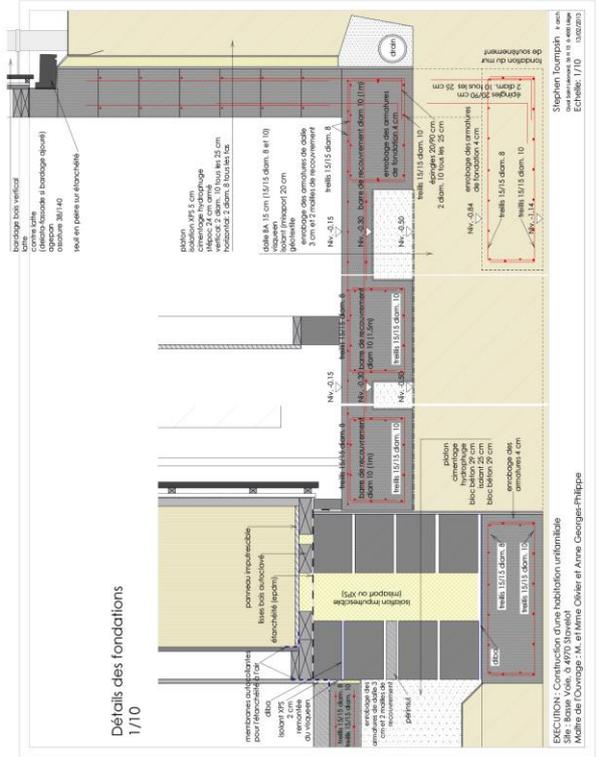
Stephen Toumpsin Ir arch
 Quai Saint Léonard, 3611 13 à 4000 Liège
 Echelle: 1/100 30/01/2013



Détail du châssis
1/5

SOUSSION : Construction d'une habitation unifamiliale
Site : Basses-Vosges, 0 4970 Stavelot
Maître de l'ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne-Georgine-Philipppe

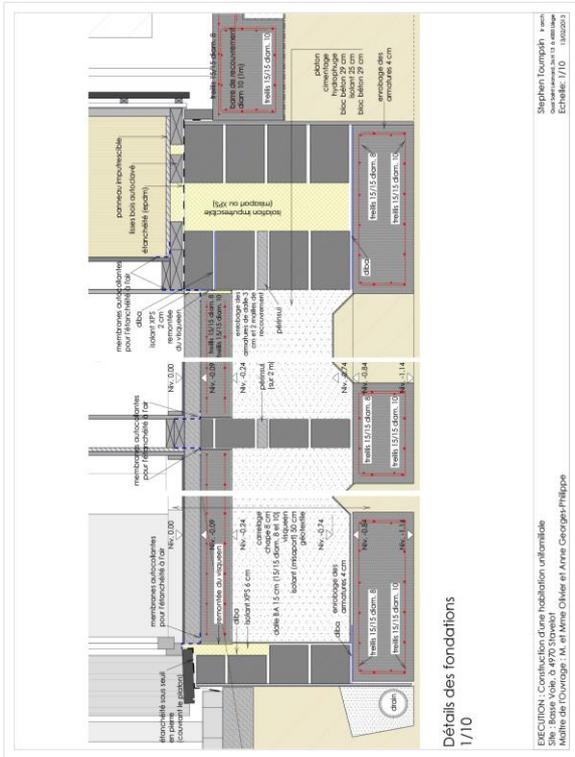
Stephien Toumpain - 1 an
04 77 20 10 00
Echelle: 1/10 (saisonné)



Détails des fondations
1/10

EXÉCUTION : Construction d'une habitation unifamiliale
Site : Basses-Vosges, 0 4970 Stavelot
Maître de l'ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne-Georgine-Philipppe

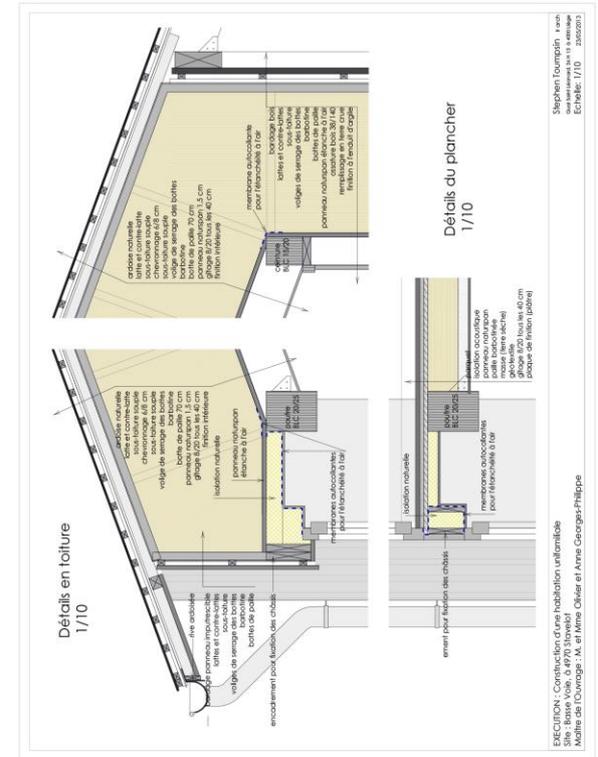
Stephien Toumpain - 1 an
04 77 20 10 00
Echelle: 1/10 (saisonné)



Détails des fondations
1/10

EXÉCUTION : Construction d'une habitation unifamiliale
Site : Basses-Vosges, 0 4970 Stavelot
Maître de l'ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne-Georgine-Philipppe

Stephien Toumpain - 1 an
04 77 20 10 00
Echelle: 1/10 (saisonné)

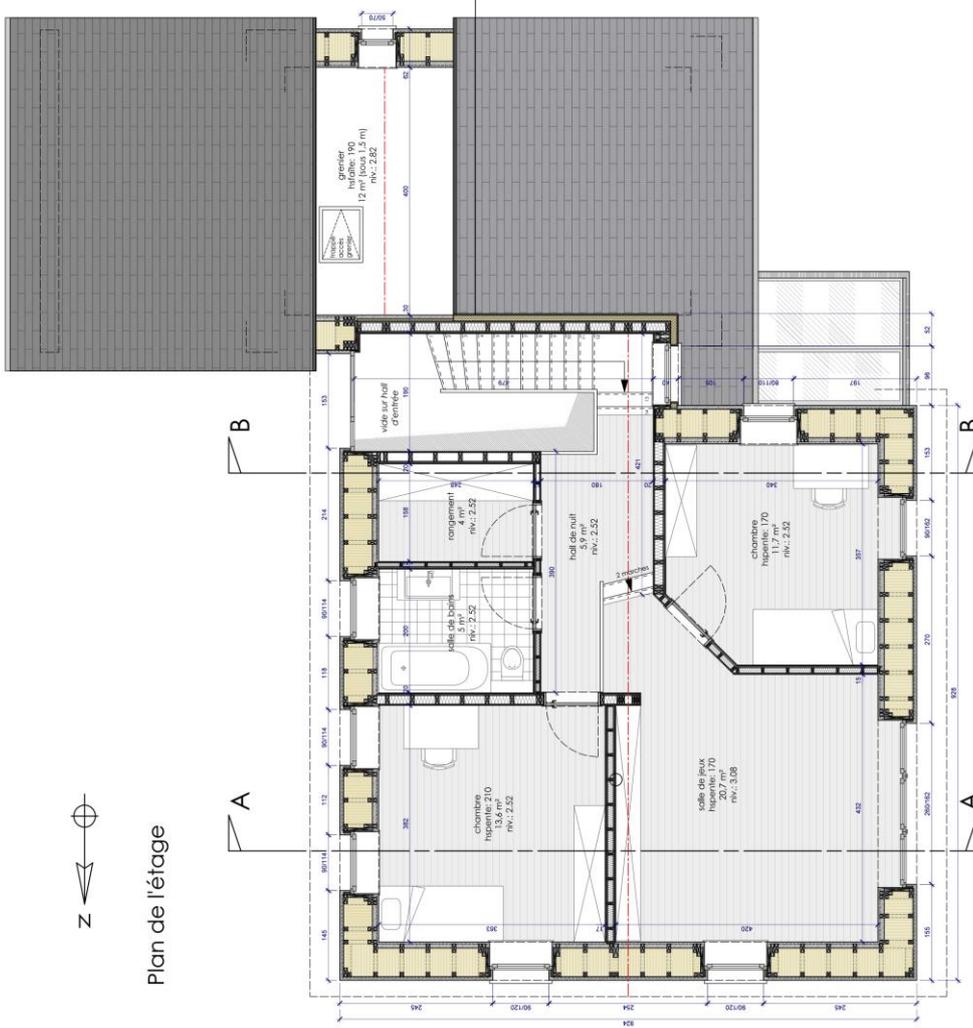


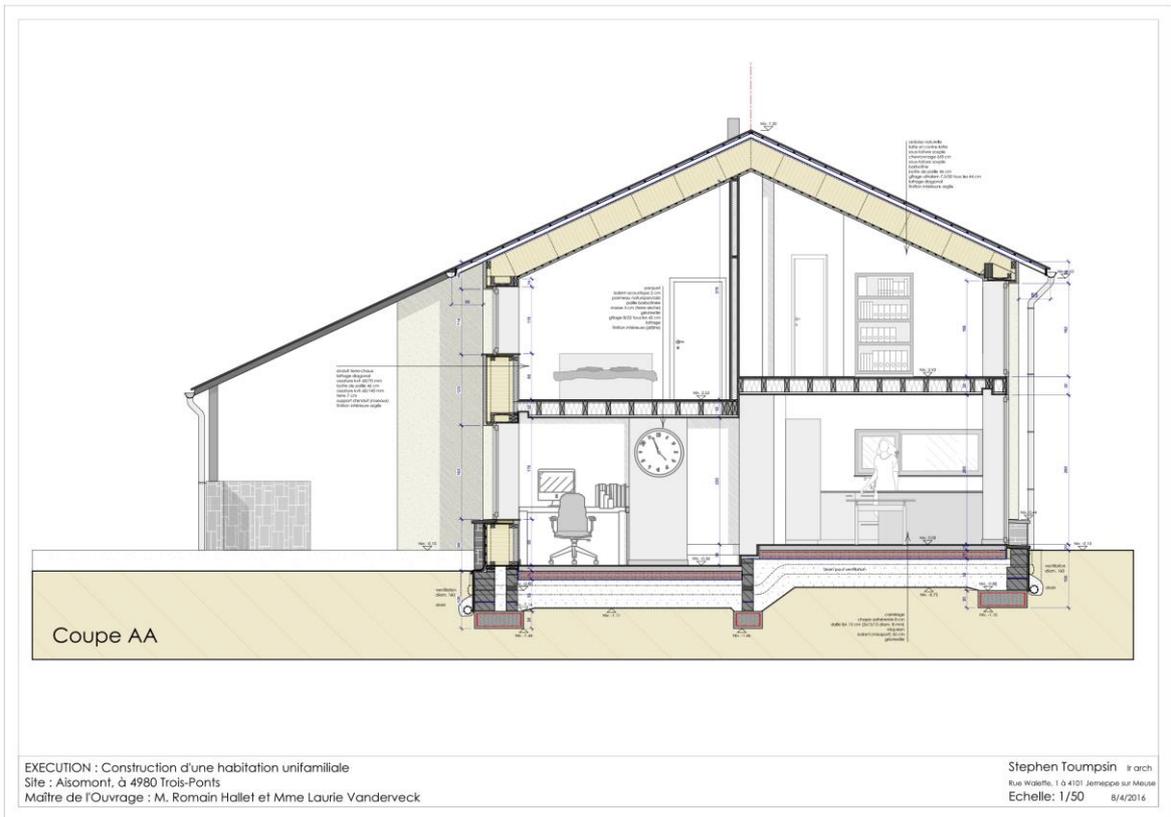
Détails en toiture
1/10

Détails du plancher
1/10

EXÉCUTION : Construction d'une habitation unifamiliale
Site : Basses-Vosges, 0 4970 Stavelot
Maître de l'ouvrage : M. et Mme Olivier et Anne-Georgine-Philipppe

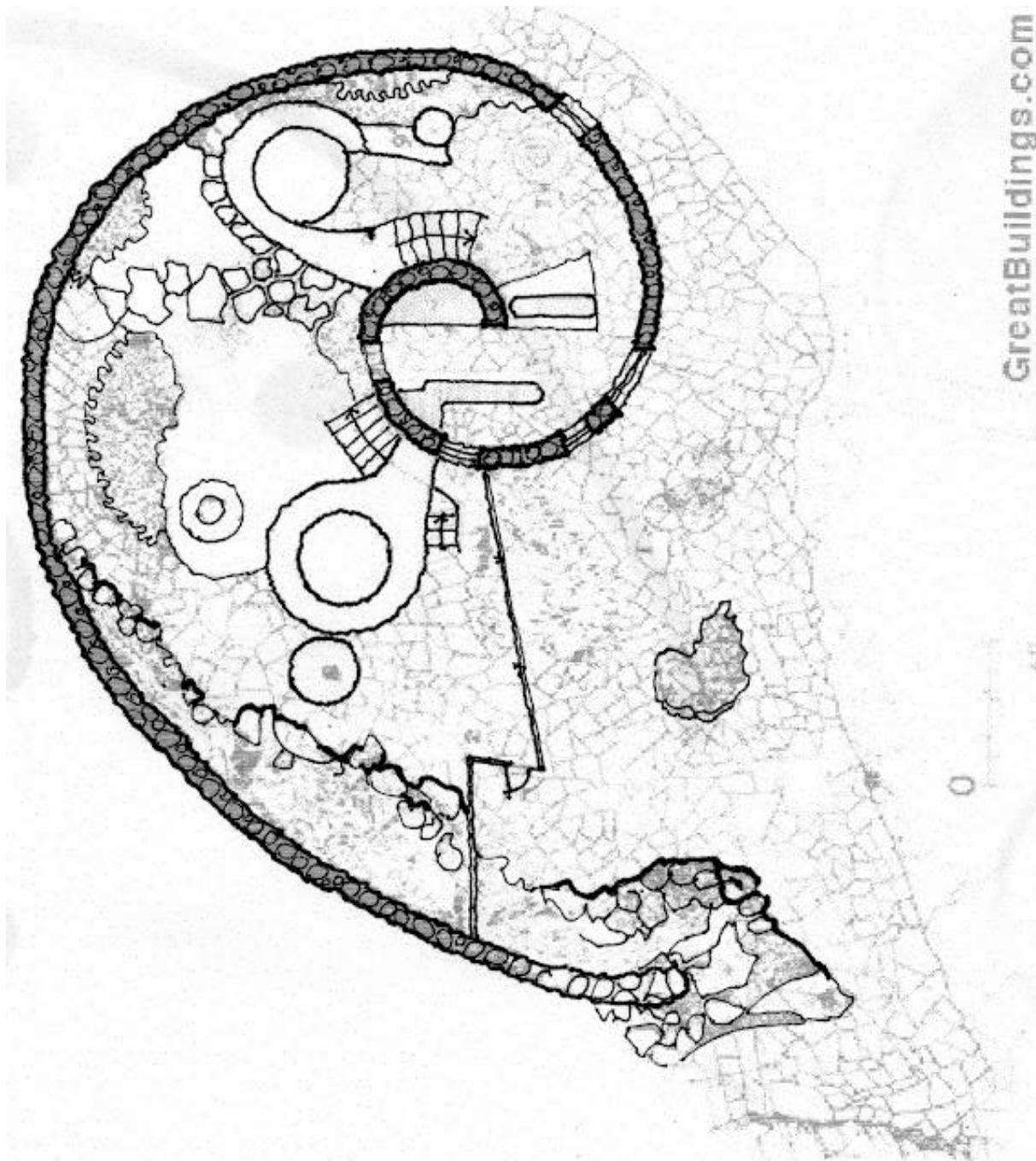
Stephien Toumpain - 1 an
04 77 20 10 00
Echelle: 1/10 (saisonné)

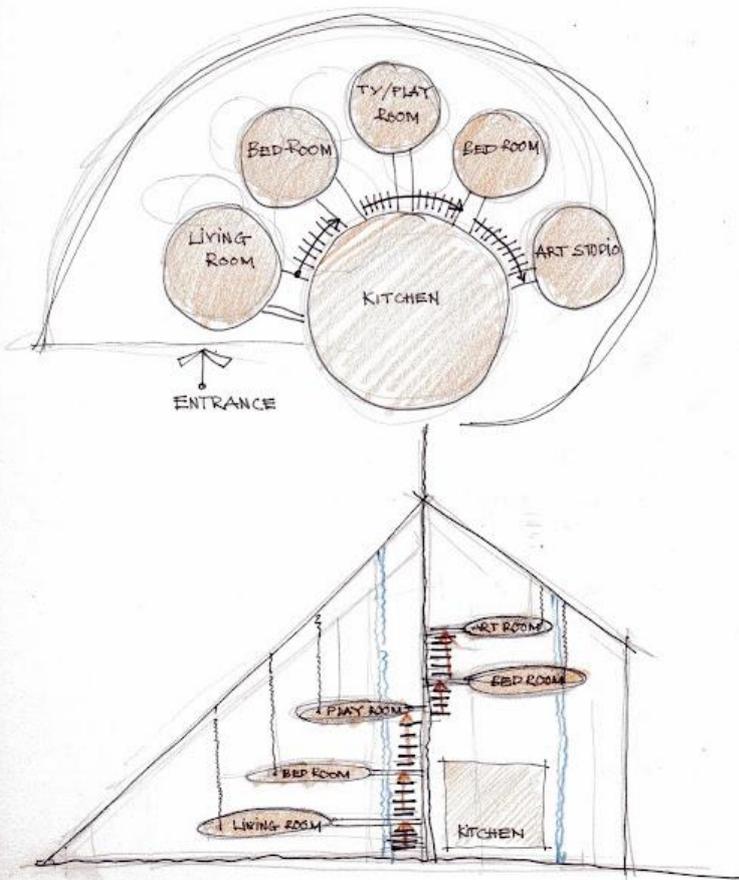
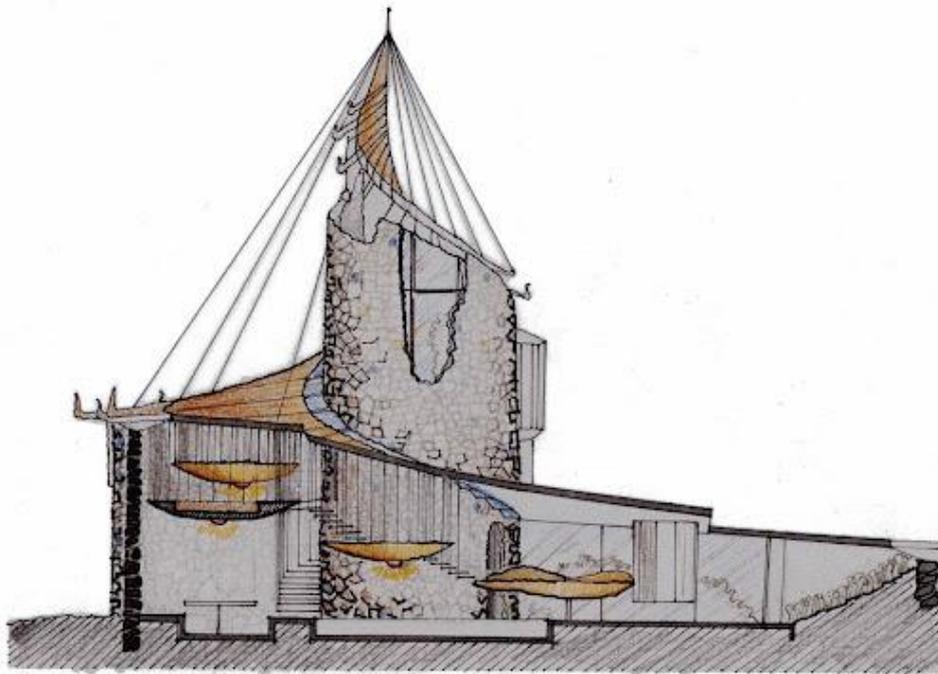




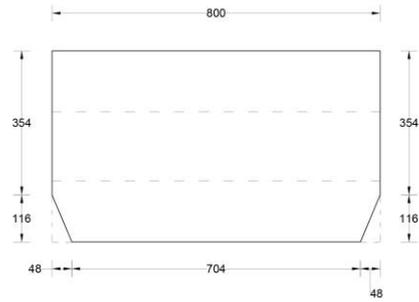
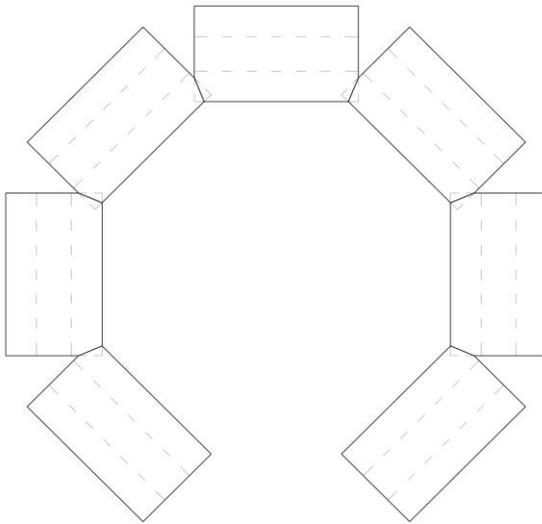


6.7. Documents relatifs à la « Bavinger House » de Mickey Muennig (Architect, 2010)

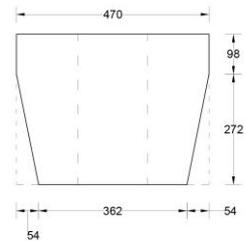
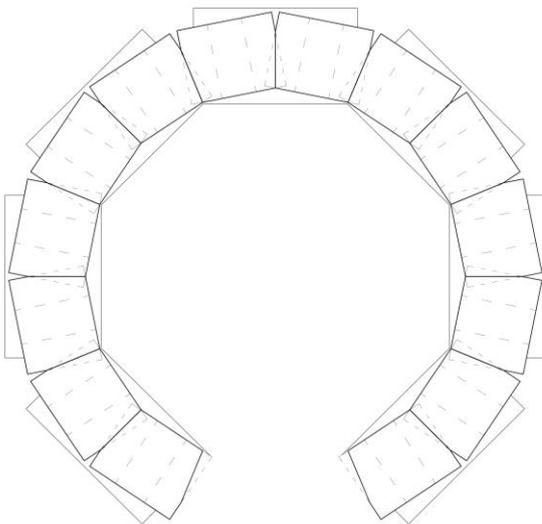




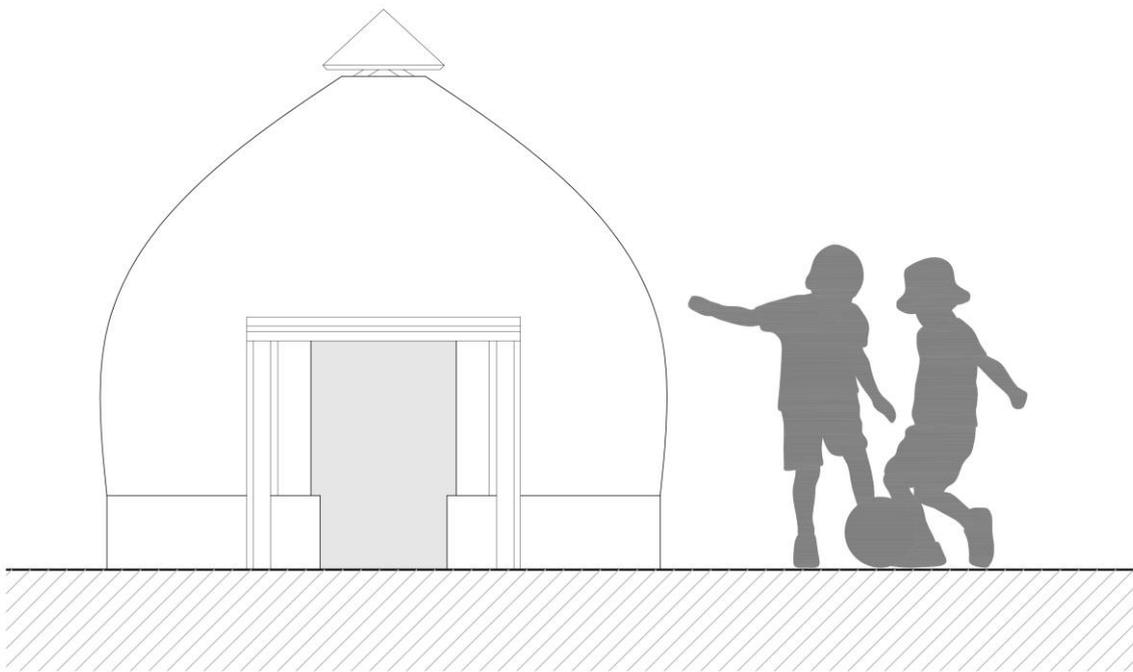
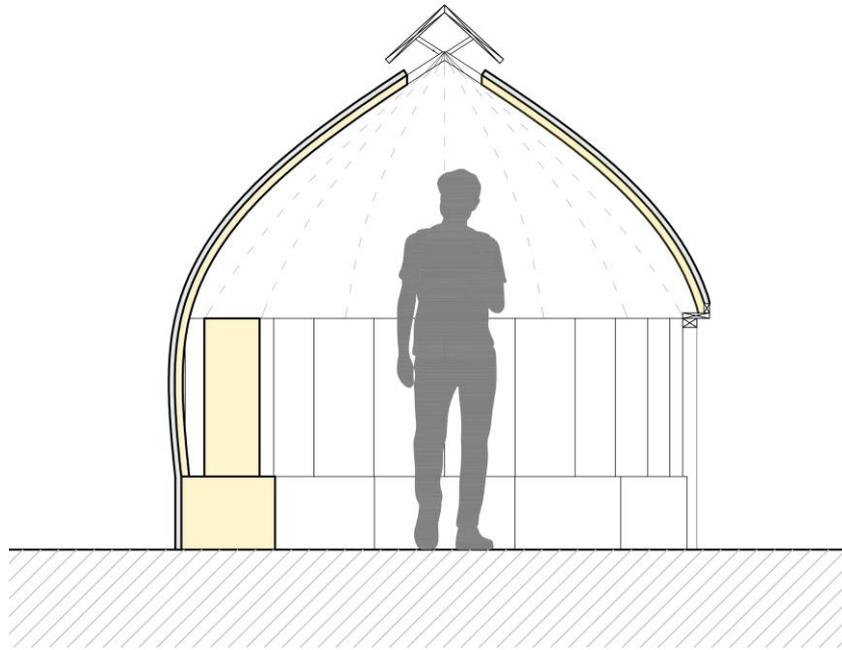
6.9. Recherches concernant le stage de construction terre-paille



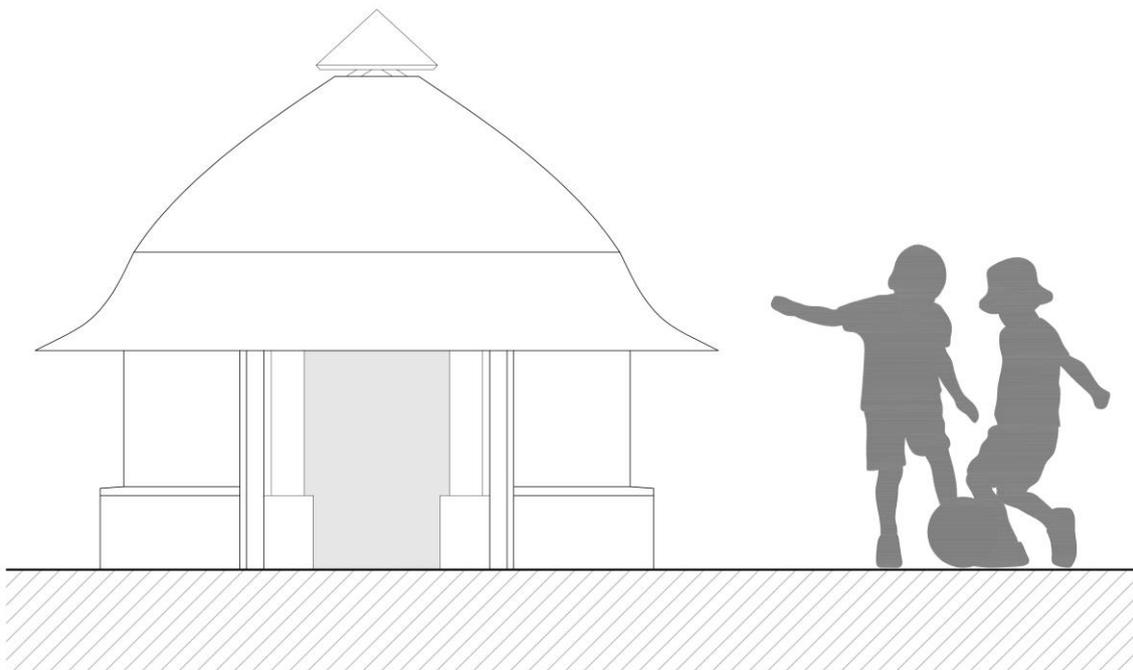
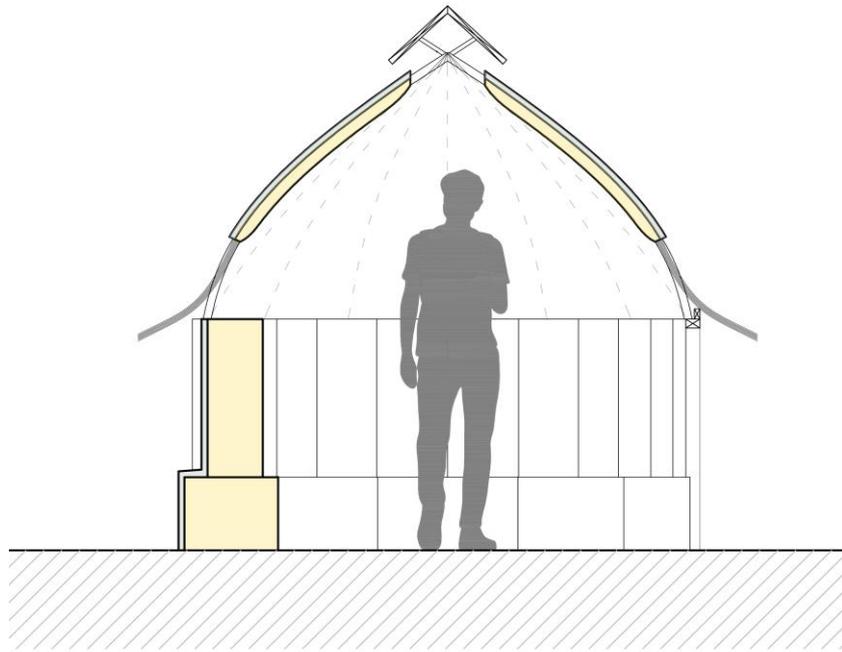
Disposition et dimensions des ballots horizontaux



Disposition et dimensions des ballots verticaux



Variante 2



Variante 3