

Université Libre de Bruxelles

Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

Faculté des Sciences

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

**Performances techniques et environnementales de
la construction en ballots de paille.
État des lieux et perspectives en Région wallonne**

Mémoire de Fin d'Etudes présenté par

D'URSEL, Boris

En vue de l'obtention du grade académique de

Master en Sciences et Gestion de l'Environnement

Finalité Gestion de l'environnement ENVI5G-M

Année Académique : 2018-2019

Directeur : Prof. Pierre Cornut

*« L'essentiel, comme disait saint Exupéry, est invisible aux yeux.
C'est ça le problème dans la construction, l'essentiel est invisible. »*

Hervé-Jacques Poskin, 2018, BU2 ; P24

Remerciements :

Je voudrais d'abord remercier mon promoteur, Pierre Cornut, d'avoir accepté de m'encadrer dans le cadre de ce mémoire. Je le remercie pour sa disponibilité, ses conseils et sa considération tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je tiens également à remercier vivement toutes les personnes qui ont eu la gentillesse de répondre à mes questions lors des entretiens. Sans elles, je n'aurais pas pu recueillir des expériences proches du terrain.

Je remercie particulièrement Marion Forrest pour son aide précieuse et pour son soutien indéfectible, mon père et Jacques Forrest pour leurs relectures. Merci à ma famille, à mes amis et à mes colocos pour leur présence et leurs encouragements.

Enfin, je remercie l'Université Libre de Bruxelles, tous ses professeurs, ses assistants, son personnel administratif et technique. Ils m'ont permis de réaliser un parcours universitaire stimulant dans un climat chaleureux.

Abstract

Le secteur de la construction et du logement est à l'origine de nombreux impacts environnementaux : consommation d'énergie, pressions sur les ressources et émissions de gaz à effet de serre. Pour diminuer ces impacts, de nombreuses innovations ont été développées, dont la construction de type écologique, utilisant des matériaux biosourcés peu transformés. La construction en ballots de paille en fait partie. Nous avons cherché à déterminer si l'utilisation de ballots de paille comme matériau de construction permet de diminuer les impacts environnementaux tout en répondant aux exigences de la construction en Région wallonne.

Pour ce faire, nous avons d'abord analysé la littérature consacrée au secteur de la construction en Région wallonne et à la construction en ballots de paille pour juger si ce système constructif est adapté au cadre législatif et aux critères de la construction wallons. Ensuite, nous nous sommes rendus sur le terrain pour mener des entretiens semi-directifs avec 11 acteurs qui occupent une place privilégiée dans le milieu de la construction traditionnelle et dans le secteur de la construction en ballots de paille. Nos recherches nous ont permis de comprendre que la construction en ballots de paille répond aux exigences techniques du secteur, tant au niveau de la disponibilité en matériau qu'au niveau de ses caractéristiques physiques. Elle s'accorde également avec la volonté politique de réduire les impacts environnementaux du secteur de la construction en Région wallonne

Nous avons alors pu mettre en lien ces résultats avec notre étude de terrain empirique pour tenter de dégager l'état des lieux et les perspectives de l'utilisation du ballot de paille en construction en Région wallonne. Nous avons appris que c'est un marché de niche comportant peu de bâtiments et en dépit de performances techniques et environnementales intéressantes. Le développement de la construction en ballots de paille semble freiné, principalement par un coût élevé, une perception sociale du matériau assez négative, une sous-représentation par rapport aux autres matériaux, une absence de normalisation au niveau des performances techniques et environnementales. Malgré cela, nous avons identifié des leviers qui permettraient à la construction en ballots de paille de se développer davantage : une plus grande sensibilisation du public, l'intégration de ce matériau dans des outils d'aide à la décision, le recours accru à ce matériau dans les projets immobiliers publics, un développement de la filière permettant une diminution des coûts.

Mots clés : construction durable, construction écologique, bioconstruction, Région wallonne, paille, ballots de paille, matériaux biosourcés, impacts environnementaux, analyse exploratoire

Table des matières

Table des figures	3
Introduction	6
1 Méthodologie	7
2 Partie 1 : La construction et le logement en Wallonie	10
2.1 Contexte.....	10
2.2 Impacts environnementaux de la construction et du logement.....	11
2.3 Acteurs, stratégies et instruments	15
2.3.1 Les acteurs politiques et leurs compétences.....	16
2.3.2 Stratégies et instruments wallons pour un développement durable du secteur de la construction	21
2.4 Construction durable ou construction écologique ?	30
2.4.1 Construction durable	30
2.4.2 Construction écologique.....	32
3 Partie 2 : La construction en ballots de paille	34
3.1 La paille, un matériau de construction.....	34
3.1.1 De la paille au ballot comme matériau de construction	34
3.1.2 Historique de la construction en paille	36
3.1.3 Faisabilité de l'utilisation du ballot de paille pour la construction en Wallonie	39
3.1.4 Constructions en ballots de paille en Wallonie	41
3.2 Techniques de construction intégrant des ballots de paille comme isolant de façade	44
3.3 Caractéristiques techniques de la construction en ballots de paille.....	52
3.3.1 Performance thermique	52
3.3.2 Résistance à l'humidité	57
3.3.3 Résistance au feu	59

3.3.4	Résistance aux parasites	61
3.3.5	Isolation acoustique.....	61
3.3.6	Qualité de l'air intérieur	63
3.3.7	Conclusions sur les caractéristiques techniques de la construction en ballots de paille	64
3.4	Impacts environnementaux de la construction en ballots de paille	65
3.5	Conclusions générales sur la construction en ballots de paille.....	74
4	Partie 3 : Etat des lieux et perspectives en Wallonie.....	76
4.1	Perception sociale de la construction en ballots de paille.....	76
4.2	Aspects économiques de la construction	81
4.2.1	Prix de la construction d'une maison en ballots de paille en comparaison avec le prix d'une maison traditionnelle	81
4.2.2	Rentabilité des entreprises qui construisent en paille.....	85
4.2.3	Économie locale et emploi	87
4.3	L'influence des lobbys.....	89
4.4	La recherche sur le matériau ballot de paille	93
4.5	Reconnaissance technique de la construction en ballots de paille.....	97
4.5.1	Normalisation technique : l'ATG et le BIM	97
4.5.2	Normalisation environnementale : l'ACV et l'EPD	101
4.6	Évolution législative & politique.....	103
5	Conclusion.....	108
6	Bibliographie.....	112

Table des figures

Figure 1 : Evolution de la consommation de ciment gris sur la période 1950-2017.....	12
Figure 2 : Production d'acier brut – Indice 100 en 1950.....	12
Figure 3 : Les matériaux de construction dominant la consommation de matériaux en 2011 et en 2060.....	13
Figure 4 : Emission sectorielle de gaz à effet de serre en 2013.....	15
Figure 5 : Evolution de la superficie au sol moyenne des parcelles bâties pour les maisons unifamiliales en Wallonie.....	22
Figure 6 : Echelle des labels PEB par rapport à la consommation spécifique d'énergie primaire.....	25
Figure 7 : Répartition des bâtiments résidentiels wallons selon leur label PEB.....	26
Figure 8 : Schéma du cycle de vie des bâtiments	28
Figure 9 : Composition de la paille selon la céréale	35
Figure 10 : Schéma de construction avec la technique des ballots porteurs.....	46
Figure 11 : Schéma de construction avec une ossature en bois.....	47
Figure 12 : Schéma de construction avec la technique CST.....	48
Figure 13 : Schéma de construction avec la technique GREB.....	49
Figure 14 : Schéma sur l'orientation du flux de chaleur par rapport à la pose de la botte.....	54
Figure 15 : Tableau récapitulatif sur les performances de matériaux conventionnels et alternatifs.....	55
Figure 16 : Evolution de la consommation d'énergie en fonction de l'année de construction du bâtiment de référence.....	69
Figure 17 : Analyse d'impacts environnementaux de la paille en fonction de son allocation....	70
Figure 18 : Graphique des impacts de la production de différents matériaux pour une isolation d'1m ² avec une résistance thermique de 6.53 m ² . K / W.....	71
Figure 19 : Graphique des de coût de réparation des dommages environnementaux de la construction de 1m ² de différents murs.....	73

Table des abréviations

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
AiSBL	Association internationale sans but lucratif
ASTM	American society for testing and materials
ATG	Agrément Technique/Technische Goedkeuring
BIM	Building Information Model
CC	Confédération construction
CCW	Confédération construction wallonne
CoDT	Code de Développement Territorial
COP	Conférence des parties
COV	Composé organique volatile
CSTC	Centre scientifique et technique de la construction
DD	Développement durable
DG Environnement	Direction générale environnement
DGO4	Direction générale opérationnelle 4 : aménagement du territoire, logement, patrimoine et énergie
EPD	Déclaration environnementale de produit
GES	Gaz à effet de serre
GREB	Groupe de Recherches Ecologiques de la Baie
ISIB	Institut de sécurité incendie belge
ISO	Organisation internationale de normalisation
NBN	Norme Belge/Belgische Norm
NDC/CPDN	Contributions prévues déterminées au niveau national
NZEB	Nearly Zero Energy Building
OCDE	Organisation de Coopération et de développement économiques
ODD	Objectif de développement durable
ONG	Organisation non gouvernementale
ONU	Organisation des Nations unies
PEB	Performance énergétique des bâtiments
PME	Petites et moyennes entreprises
RFCP	Réseau français de la construction paille
RW	Région wallonne
SDT	Schéma de développement territorial
SPF	Service Public Fédéral
SPW	Service Public de Wallonie
TOTEM	Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials
UBAtc	Union belge pour l'Agrément technique de la construction

Introduction

Les propriétés techniques de la paille et son abondance ont justifié son utilisation comme matériau de construction pendant des millénaires. Ce matériau a pourtant été délaissé au profit de matériaux modernes produits industriellement : béton, acier, isolants synthétiques...

Aujourd'hui, en raison de la crise environnementale, nous observons un regain d'intérêt pour les constructions *naturelles*. L'utilisation de ballots de paille s'inscrit dans un mouvement qui ne cherche pas à retourner vers des constructions précaires mais tend à concevoir des bâtiments performants répondant aux standards de construction actuels. Cette utilisation permet de développer des techniques de construction facilement maîtrisables, en accordant une attention particulière envers l'environnement.

On dénombre actuellement, sur tous les continents, des milliers de bâtiments intégrant des ballots de paille. Ce matériau et les diverses techniques de sa mise en œuvre s'applique par exemple à des résidences privées, des magasins, des restaurants, des écoles, des bâtiments multiétages.

La Région wallonne a la responsabilité d'encourager le développement de solutions pérennes permettant de répondre aux exigences du secteur de la construction tout en limitant l'impact de ce secteur sur l'environnement. À ce titre, l'utilisation du matériau de ballots de paille mérite d'être envisagée.

« {...} Je dirais pour la construction paille c'est intéressant de ne pas y arriver par l'architecture ou par la construction mais y arriver par l'environnement car c'est quelque chose qui n'est pas suffisamment mis en avant, le service on va dire systémique que rendent les constructions paille. Pour moi l'avenir il est là, bien plus que dans les aspects constructifs. Les aspects constructifs pour moi on est déjà compétitif, on a aucun défaut et donc ça se sait, ça se vulgarise tout doucement mais le fait qu'en plus on rend un service de société et qu'on a un impact environnemental qui est très, très différent de tout le reste de la construction ça, c'est très peu valorisé. C'est un argument marketing à l'heure actuelle mais ça doit être un argument de société. {...} » (Daniel Fabian, agriculteur et auto-constructeur, BU3 ; P05)

Problématique et questions de recherche

Nous analysons dans ce travail l'éventuel intérêt de l'utilisation, en Région wallonne, du matériau *ballot de paille* lorsqu'il s'agit de répondre aux exigences techniques du secteur de la construction ainsi qu'au besoin de limiter les impacts environnementaux de celui-ci. Trois questions traduisent notre cheminement :

1. Quels sont le contexte, le cadre et les stratégies qui façonnent et orientent le secteur de la construction en Région wallonne ?
2. Les caractéristiques intrinsèques du matériau ballot de paille présentent-elles un intérêt technique et environnemental ?
3. Au regard du contexte, du cadre et des stratégies en Région wallonne et de l'éventuel intérêt de l'utilisation du ballot de paille en construction, où en est le secteur de la construction en ballots de paille actuellement et quelles sont ses perspectives de développement ?

Ces trois questions correspondant aux trois parties de ce travail.

1 Méthodologie

Nous avons réalisé une recherche exploratoire qualitative sur le ballot de paille en Wallonie. Nos études en Gestion de l'environnement nous ont conduit à développer notre recherche de manière interdisciplinaire. Nous traitons la construction en ballots de paille en étant attentif aux aspects politique, technique, social et économique. Pour ce faire, nous avons analysé la littérature traitant ce sujet et mené des entretiens qualitatifs.

La littérature sur la construction en ballots de paille se répartit en deux catégories. La première est constituée des livres et articles de type « how to » ou « comment procéder ». Ce sont des guides de construction proposant des informations techniques et pratiques sur les designs, les matériaux et les méthodes de construction. Ces ouvrages contiennent également des conseils avisés de constructeurs expérimentés. La deuxième catégorie regroupe les articles scientifiques et les rapports publiés par les universités et les groupes de recherche. Nous avons utilisé ces deux types de sources pour développer une analyse la plus complète possible, en choisissant le type de source en fonction de la question traitée.

Deux sources se sont révélées particulièrement utiles. La première est constituée des trois vadémécums de l'étude aPROpaille rédigés en 2015 par des universités wallonnes (UCL, ULG). La rigueur scientifique de cette étude et son ancrage sur le territoire wallon en ont fait

une source particulièrement riche pour traiter nos questions de recherche. La deuxième est le livre « *Concevoir des bâtiments en bottes de paille* » rédigé par d'André de Bouter. Cet ouvrage est l'adaptation au cadre français et européen du livre de l'américain Bruce King et al. (ingénieurs, architectes, chercheurs, etc.), intitulé : « *Design of Straw Bale Buildings* ». Le contenu du livre se situe à la frontière entre le « how to » et la recherche scientifique.

Nous avons conduit des entretiens qualitatifs avec des acteurs issus du secteur de la construction en Région wallonne. Nous avons sélectionné ces acteurs sur base d'un échantillonnage empirique : plutôt que de choisir une parfaite représentativité statistique, nous avons choisi des personnes volontaires et représentatives des divers secteurs concernés par notre sujet (cf. profession dans le tableau suivant). Notre guide d'entretien est disponible en annexe 2. Nous l'avons utilisé avec souplesse pour permettre de développer des réflexions et des sujets propres à chaque acteur et de laisser celui-ci orienter l'entretien vers ses préoccupations. Nous avons retranscrit nos entretiens *verbatim* pour réaliser une analyse thématique, que nous avons mise en rapport avec nos recherches théoriques. Ainsi, nous avons pu développer une réflexion personnelle pour répondre à nos questions de recherche.

Nous avons choisi de travailler sur le territoire de la Région wallonne. En raison de notre approche interdisciplinaire, notre étude transversale aborde de nombreuses thématiques : nous avons voulu rester concis afin de donner une place à chacune d'entre elles. Nous nous sommes intéressé à l'utilisation de la paille comme structure, isolant et support d'enduit pour les murs extérieurs de l'habitation. Nous n'avons pas étudié son utilisation dans les murs intérieurs, comme isolant de toiture et comme couverture de toit.

Il aurait probablement été préférable d'anonymiser nos entretiens : les premiers acteurs que nous avons rencontrés souhaitent que leur nom apparaisse dans notre travail. Nous avons choisi d'être constant et de poursuivre de cette façon. Nous pouvons supposer que l'anonymat aurait permis de libérer davantage la parole sur certaines questions. Par ailleurs, il aurait pu être intéressant de réaliser un questionnaire afin d'explorer l'opinion du grand public au sujet de la construction en ballots de paille.

Enfin, nous sommes conscient que nous portons un intérêt particulier pour le matériau ballot de paille. Nous avons veillé à faire abstraction de nos préconceptions favorables pour mener une analyse exploratoire la plus objective possible.

Liste des entretiens

Référence de l'entretien	NOM	Prénom	Institution/ Entreprise	Profession	Site internet	Date et lieu de l'entretien
BU1	Mestdagh	Vincent	EcoLodge	Coordinateur et administrateur	https://waldcube.be/	8 octobre 2018, Hannut
BU2	Poskin	Hervé-Jacques	Cluster Eco-Construction	Directeur	http://clusters.wallonie.be/ecoconstruction-fr/	4 octobre 2018, Namur
BU3	Daniel	Fabian	Société Agricole Raymakers et Daniel	Agriculteur et auto-constructeur	http://www.ballots.be/index.htm	1 octobre 2018, Héliécine
BU4	Maggiordomo	Teresa	Collège Notre-Dame de Bon Secours	Directrice	https://www.cndbsbinche.be/	5 novembre 2018, Binche
BU5	D'Huyvetter	Benjamin	Made in Chénou	Artisan et auto-constructeur	http://www.madeinchenu.be/	5 septembre 2018, Beauraing
BU6	Deproost	Magali	SPW, Direction du Développement durable	Attachée	http://developpementdurable.wallonie.be/	29 octobre 2018, Namur
BU7	Dehaye	Jean-Marie	AiSBL "Bâtisseurs accueillants", ARTerre	Architecte	https://jmdelhayewixsite.com/architecte	16 septembre 2018, Liège
BU8	Bourgeois	Anne	Architecture 4 Harmony	Architecte	https://archiharmony.wordpress.com/	27 septembre 2018, Gelbresse
BU9	de Barquin	Fabrice	Centre scientifique et technique de la construction	Responsable du département recherche et innovation	https://www.cstc.be/homepage/	8 novembre 2018, Limelette
BU10	Argeles	Aymé	Confédération Construction Wallonne	Manager Environnement & Technologies, Coordinateur des Projets Transversaux	https://www.confederationconstruction.be/wallonie/Home.aspx	29 octobre 2018, Bruxelles
BU11	Lefrancq	Julien	Paille-Tech	Administrateur, directeur commercial	http://www.pailletech.be/	18 janvier 2019, Floreffe
BU12	Debue	Valérie	Gouvernement wallon	Ministre des Pouvoirs locaux, du Logement et des Infrastructures Sportives	https://debue.wallonie.be/home.html	19 octobre 2018, Salon Energie & Habitat

2 Partie 1 : La construction et le logement en Wallonie

Dans cette partie, nous analysons le contexte de la construction et du logement en Région wallonne pour décrire ensuite les impacts environnementaux du secteur de la construction. Nous présentons également les stratégies et les instruments développés par les acteurs politiques en matière d'environnement et de construction. Enfin, nous nous intéressons aux paradigmes de la construction durable et de la construction écologique.

2.1 Contexte

En Région wallonne (RW), le secteur de la construction est fort développé¹. Il est composé de plus de 30.000 entreprises : environ 20.000 indépendants et de 10.000 entreprises qui emploient au minimum 5 personnes (Confédération Construction Wallonne 2018, p.26).

En 2017, le parc de logement wallon comprend près de 1.7 million de bâtiments dont 79.7% sont des maisons unifamiliales et 14.8% des appartements. Les bâtiments sont relativement âgés : 25.2% ont été construits avant 1900, 17.9% entre 1919 et 1945 et 33,9% entre 1946 et 1980 (Anfrie et al. 2017, pp.21-25). Cela signifie que 77% des logements en RW ont plus de 40 ans.

En 2017 en RW, 10.500 permis de bâtir ont été octroyés pour des rénovations dans des bâtiments résidentiels et non résidentiels (Confédération Construction Wallonne 2018, p.26). En raison de l'augmentation démographique, de l'augmentation du nombre de ménages isolés et de familles monoparentales (Anfrie et al. 2017, pp.18-20), de nouveaux logements doivent être construits. En 2018, 28.649 nouveaux permis de bâtir ont été octroyés en Belgique dont 6.496 en RW (Statbel 2019). Des prévisions réalisées par le Service Public de Wallonie (SPW) montrent qu'il faudra construire en RW, environ 13.000 nouveaux logements par an jusqu'en 2020 (appartements ou maisons), puis 11.000 jusqu'en 2030, ensuite 10.000 jusqu'en 2040 et enfin 7.000 jusqu'en 2050 (SPW: DGO4 2018, p.55). Au vu de ces prévisions, le besoin en nouveaux logements est important : environ 300.000 nouveaux logements d'ici 2050.

Le secteur de la construction est un des multiplicateurs d'emploi les plus importants (Scourneau et al. 2017, p.36). C'est un secteur qui emploie 80.584 personnes en RW (Institut des comptes nationaux 2016, p.102). Le secteur de la construction en RW connaît une diminution importante du nombre de travailleurs salariés sur la période 2008-2016 de 10.4% (IWEPS² 2018, Fiche

¹ « Les secteurs de l'industrie et de la construction ont une plus grande importance relative qu'ailleurs. » (Conseil supérieur de l'emploi 2018, p.76)

² Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique

L026-POS.TRAV.SAL). Malgré une légère création d'emploi entre 2016 et 2017 (Conseil supérieur de l'emploi 2018, p.25), il y reste plus 3.034 places vacantes lors du 1^{er} trimestre 2018 (*Ibidem*, Fiche L001-TX.VAC). Selon le Conseil supérieur de l'emploi, ces places vacantes sont dues au fait qu'en Wallonie les métiers de la construction sont les postes les plus difficiles à pourvoir (Conseil supérieur de l'emploi 2018, p.46) en raison de l'inadéquation entre la technicité de la construction qui augmente et le faible bagage technique des demandeurs d'emploi.

Le secteur de la construction en RW fait donc face à des enjeux majeurs (rénovation, construction, emploi).

2.2 Impacts environnementaux de la construction et du logement

Le secteur de la construction et du logement a un impact sur l'environnement à plusieurs moments de son cycle de vie :

- Production de matières premières pour la construction du bâtiment
- Construction et utilisation du bâtiment
- Rénovation ou démolition du bâtiment en fin de vie avec traitement des déchets

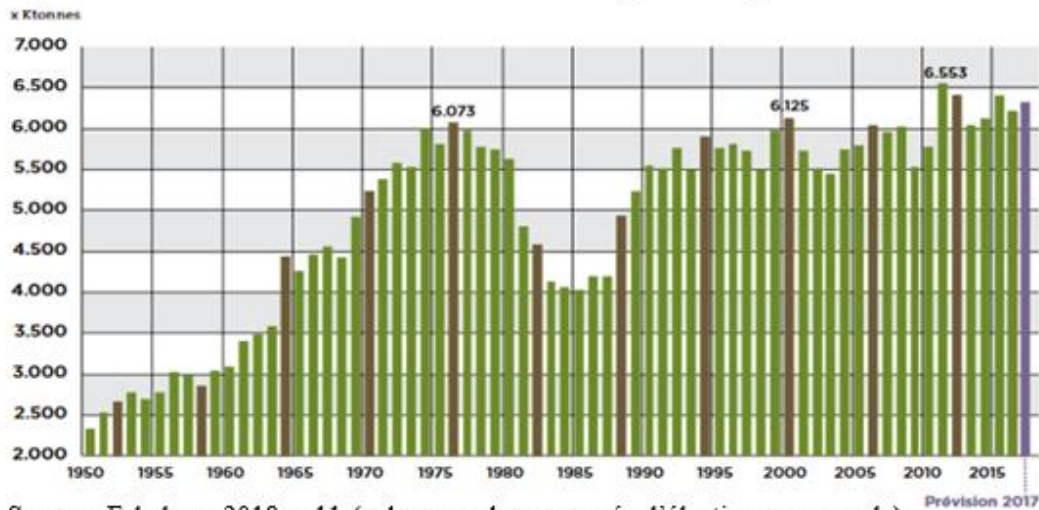
Nous avons analysé les coûts environnementaux de ces différentes étapes à l'aide de statistiques produites au niveau mondial, européen et régional.

Production de matières premières

Le secteur de la construction consomme énormément de matières premières. L'extraction de ces ressources naturelles (renouvelables ou non) a un coût environnemental important. Depuis les années 1950, on observe une augmentation importante de la production de matériaux de construction stratégiques. Actuellement, 50% de la masse totale des ressources extraites de la terre sont à destination du secteur de la construction (SPW 2016, p.47). Analysons deux graphes qui illustrent les variations dans la production de matériaux stratégiques pour la construction : le graphe (A) concerne la consommation de ciment en Belgique et le graphe (B) concerne la production d'acier en Europe et dans le monde.

(A) Le ciment

Figure 1 : Evolution de la consommation de ciment gris sur la période 1950-2017.



La consommation de ciment en Belgique a doublé entre les années 1950 et 1975. Cette augmentation est soutenue d'une part par une production locale importante grâce à des sous-sols riches en matières premières et d'autre part par le large domaine d'utilisation du ciment (febelcem 2018, p.5 et p.13). Depuis les années 1975, la consommation de ciment sur le territoire belge est stable (sauf entre 1981 et 1990). Les projections économiques du secteur cimentier belge sont optimistes en raison de la place centrale occupée par le ciment dans le secteur de la construction belge (*Ibidem*, pp.8-10).

(B) L'acier

Figure 2 : Production d'acier brut – Indice 100 en 1950

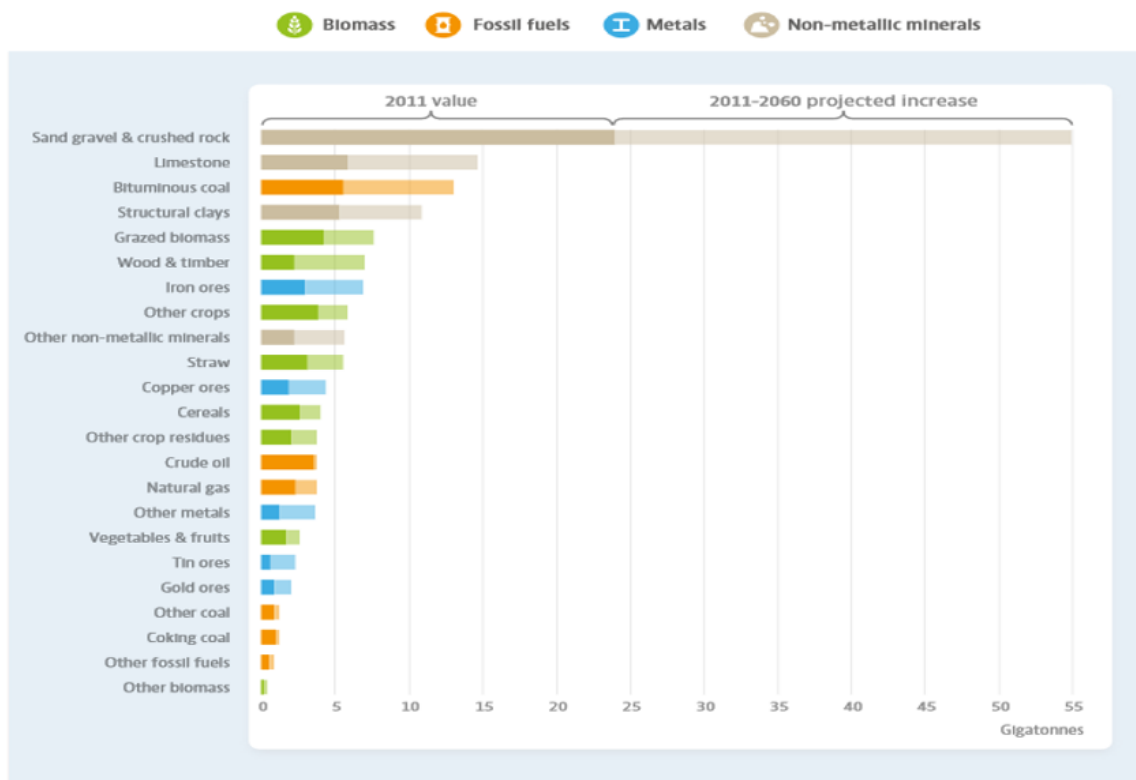


Source : Fédération Française de l'Acier 2011, p.62

La production d'acier brut a également augmenté depuis les années 1950. Le secteur de l'acier est aussi un secteur clé de la construction car ce matériau présente de nombreuses applications : squelette des bâtiments, béton armé, etc. La production d'acier a triplé entre 1950 et 1975. Depuis, elle continue d'augmenter rapidement dans le monde alors qu'elle se stabilise en Europe. Cette diminution au niveau de la production européenne ne signifie pas une baisse de son utilisation en Europe mais un recours croissant à l'importation et au recyclage.

Cette croissance de la production de matériaux de construction ne montre pas de signe de recul. L'OCDE a réalisé des projections concernant les futures consommations mondiales de ressources matérielles ; son rapport prévoit que la consommation de toutes les ressources augmentera à l'horizon 2060 (comme la production de gaz à effet de serre donc). Comme l'indique le graphique ci-dessous, il est estimé que la consommation de matériaux de construction (sable, gravats, etc.) doublera et maintiendra les matériaux de construction à la première place des ressources consommées en 2060 (OECD 2019b, p.15).

Figure 3 : Les matériaux de construction dominent la consommation de matériaux en 2011 et en 2060



Source : OECD 2019, p.15

Nous pouvons observer que les matières premières (sable, pierre concassée, calcaire, charbon bitumineux et argile) pour la production de matériaux de construction traditionnels comme le

béton, le bitume ou les briques sont dans le top 4 de l'extraction de matière première. Cela démontre l'importance que ces matériaux ont actuellement mais aussi, selon les prévisions, pour l'avenir du secteur de la construction.

Production de gaz à effet de serre

La production de matériaux de construction est en augmentation. Or, cette activité est émettrice d'une quantité importante de gaz à effet de serre (GES). Par exemple, la production mondiale de béton, qui nécessite l'extraction, le transport et la transformation de sable, de gravier, de calcaire, d'argile et d'eau, est responsable de 9% du total des émissions totales de GES. De même, la production de sept métaux largement utilisés en construction (fer, aluminium, cuivre, zinc, plomb, nickel et manganèse) est responsable de 7% du total des émissions de GES (OECD 2019b, p.18). Selon les projections de l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE), les émissions de GES relatives à la gestion de tous les matériaux augmenteront (production, transformation et fin de vie) vont continuer à augmenter jusqu'en 2060 comme les émissions relatives à l'ensemble des activités humaines (OECD 2019a, p.183).

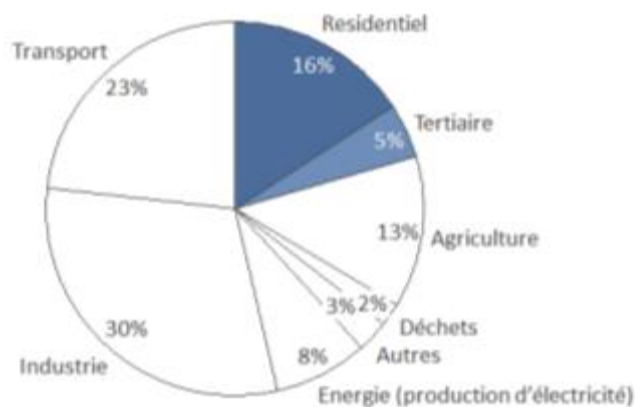
De façon globale, ces tendances s'accroissent puisqu'entre 2010 et 2016, les émissions de CO2 concernant la construction et l'utilisation des bâtiments en Europe ont augmenté de 1% chaque année (Health and Environment Alliance 2018, p.8).

Utilisation du bâtiment

L'utilisation du bâtiment a également un coût environnemental. Ce coût est en baisse pour les nouvelles constructions et les constructions rénovées en raison du développement des techniques d'isolation et de régulation de la température et de l'humidité dans les bâtiments. Ce coût reste important en raison de la vétusté du parc immobilier, en RW par exemple.

En 2018, le parc immobilier européen représente environ 36% des émissions de CO2 (Parlement européen et Conseil européen 2018, vol. (UE) 2018/844, paragr. 6). En 2013, comme l'illustre le graphique ci-dessous, en RW les secteurs résidentiels et tertiaires émettent ensemble 21% des GES wallons.

Figure 4 : Emission sectorielle de gaz à effet de serre en 2013



Source : Gouvernement wallon et SPW: DGO4 2017, p.14

Environ 23% de l'énergie finale³ en RW est consommée par les logements durant l'utilisation du bâtiment, principalement pour le chauffage (Gouvernement wallon et SPW: DGO4 2017, p.18). Cette consommation énergétique élevée s'explique en partie par les faibles performances énergétiques des bâtiments wallons (cf. 3.3.2 PEB).

Production et gestion des déchets

L'utilisation de tous ces matériaux de construction produit un nombre important de déchets lors de la construction et de la fin de vie du bâtiment. Les déchets de construction représentent 40% des déchets européens (Gouvernement Wallon et SPW 2016, p.47). En Wallonie, les déchets de construction représentent 18% des déchets totaux (*Ibidem*) et 46% des déchets industriels (Confédération Construction Wallonne 2018, p.29). Ces « montagnes de déchets » représentent en Wallonie, chaque année, 4 à 5 millions de tonnes de déchets inertes (gravats) de construction et environ 0.7 à 0.9 million de tonnes de déchets non dangereux (non explosifs, non corrosifs, non toxiques, etc.). Ces chiffres sont d'autant plus importants qu'ils ne prennent pas en compte la terre excavée sur chantier (SPW: DGO4 2018, p.125). Ces déchets peuvent suivre différentes phases de fin de vie mais le Plan wallon des déchets-ressources prévoit dans l'ordre : d'éviter la création du déchet (prévention), de le réutiliser, de le recycler, de le valoriser et puis seulement de l'éliminer (Gouvernement wallon et SPW 2018, p.22)

2.3 Acteurs, stratégies et instruments

À l'heure de la crise environnementale et de l'anthropocène, des solutions doivent être trouvées et déployées pour limiter les effets destructeurs sur l'environnement et sur les populations

³ Énergie disponible pour les consommateurs

(GIEC 2018; Bonneuil et Fressoz 2016). Pour mettre en œuvre des solutions, les acteurs politiques internationaux, nationaux et régionaux et des groupes locaux tentent d'instaurer un cadre. Nous reprenons ici les acteurs, les stratégies et les instruments qui influencent le secteur de la construction et du logement en RW. Dans une optique top-down, nous nous intéressons d'abord au niveau de pouvoir le plus global avant de nous rapprocher peu à peu du niveau de pouvoir local.

2.3.1 Les acteurs politiques et leurs compétences

Au niveau international

Les relations entre les Etats et les organisations internationales sont régies par le droit international (Traités, conventions). Le concept de développement durable est entré dans le droit international à la fin du siècle dernier. Il est créé par l'Organisation de Nations Unies (ONU) qui a mis en place la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. Celle-ci a rédigé le rapport Brundtland afin de trouver des solutions à long terme en matière d'environnement (Brundtland Commission 1987). C'est dans ce rapport que le développement durable (DD) est mentionné et défini pour la première fois. Il est défini comme le fait de « *répondre aux besoins du présent sans compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs* » (*Ibidem*, p.14). Le DD se base sur trois piliers : social (santé et démocratie), économie (productivité, innovation et recherche) et environnement (ressources et changement climatique). Trouver l'équilibre entre les trois piliers constitue le DD (Zaccai 2011, p.45). Suite au rapport Brundtland, lors du Sommet de la Terre de Rio en 1994, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques a été ratifiée par les membres de l'ONU (ONU s.d.). Cette convention reconnaît que les changements climatiques sont une menace pour l'humanité et la planète et qu'il est nécessaire d'agir. Aujourd'hui, 197 pays ont ratifié la convention et se réunissent tous les ans lors de Conférences des Parties (COP) pour aborder différents sujets concernant l'environnement (*Ibidem* et Nations unies 1992). La 21^e Conférence des Parties (COP21) sur le climat s'est tenue à Paris en 2015 ; elle s'est terminée par la signature de l'Accord de Paris qui est le premier accord universel sur le climat qui soit juridiquement contraignant. Cet accord a pour objectif d'intensifier les réponses face au changement climatique et de maintenir l'augmentation du réchauffement climatique en dessous des 2°Celsius. Durant la COP21, les pays ont présenté leur plan climat national : les contributions prévues déterminées au niveau national (NDC en anglais) (Nations unies 2015; ONU 2018). Ces NDC sont contraignantes et doivent être actualisées pour répondre à l'évolution des enjeux nationaux (*Ibidem*).

La même année, après deux ans de négociations, le « Programme de développement durable à l'horizon 2030 » développé lors de la Conférence de Rio sur le développement durable (2012) a été accepté par les membres des Nations Unies (Programme des Nations Unies pour le développement s.d.). Ce programme comprend 17 objectifs de DD qui sont transversaux et qui réaffirment la volonté mondiale de « *bâtir un monde plus durable, sûr et prospère, pour l'humanité toute entière* » (*Ibidem*). Ces objectifs de développement durable (ODD) ont intégré le discours et les prises de décisions de toutes les institutions partenaires de l'ONU. L'Union européenne joue un rôle de relais pour les Etats membres en ce qui concerne les ODD. En Belgique, les ODD ont été intégrés dans les discours et les activités de tous les niveaux de pouvoirs (fédéral, régions, communautés, provinces et communes) mais aussi des acteurs privés, nous y reviendrons.

Au niveau international, l'Organisme ISO (Organisation Internationale de Normalisation) joue un rôle clé dans le secteur de la construction. ISO est une ONG internationale créée en 1947 et regroupe 164 organismes nationaux de normalisation (ISO s.d.). Cet organisme établit des normes, qui constituent des « *spécifications de premier ordre pour les produits, les services et les systèmes dans une optique de qualité, de sécurité et d'efficacité* » (*Ibidem*). Ces normes sont reprises dans des documents qui « *définissent des exigences, des spécifications, des lignes directrices ou des caractéristiques à utiliser systématiquement pour assurer l'aptitude à l'emploi des matériaux, produits, processus et services.* » (*Ibidem*). Cette normalisation est d'abord développée pour répondre aux besoins des acteurs économiques. Peu à peu les préoccupations environnementales ont été intégrées dans les normes. À ce jour, plus de 22.607 normes et publications ont été produites par l'ONG.

Dans le secteur de la construction, des normes ISO définissent des spécifications concernant les Analyses du Cycle de Vie (ACV), les Déclarations Environnementales de produits (EPD) et les agréments techniques. En suivant ces normes ISO, l'organisme qui réalise l'ACV, l'EPD ou l'agrément technique peut certifier que son produit répond à certains standards. Nous verrons plus en détail le cadre théorique des ACV, EPD et agréments techniques dans le point 3.3.2 (instruments) et nous verrons dans la partie 3 (cf. 5.5) que ces cadres normatifs sont au cœur d'enjeux importants.

Au niveau européen

L'Union européenne traduit les prises de décisions internationales, dans 7 « programmes d'actions pour l'environnement » qu'elle a publiés depuis 1972 (European think & do tank

2013). Ces programmes ont une valeur indicative, ils définissent des intentions larges non chiffrées. En parallèle, l'Union européenne développe un cadre normatif propre pour la construction durable à travers des directives et des règlements.

Par exemple, via la directive sur « la performance énergétique des bâtiments » (Parlement européen et Conseil européen 2010, (UE) 2010/31), l'Union européenne contraint les États membres à développer un outil de mesure de la performance énergétique des bâtiments (PEB). La PEB ne se focalise pas uniquement sur l'enveloppe du bâtiment ; elle prend en compte la performance des systèmes techniques du bâtiment comme le chauffage, la climatisation, la ventilation et éclairage (*Ibidem*, Article 11). L'UE prévoit que tous les nouveaux bâtiments ainsi que les bâtiments subissant de lourdes rénovations devront avoir une consommation d'énergie quasi nulle d'ici 2020. Pour les bâtiments publics, cette obligation est valable dès le 1er janvier 2019 (*Ibidem*, Article 9). À travers la PEB, l'Europe invite aussi les États membres à « {...} encourager l'installation de systèmes de substitution à haute efficacité, dans la mesure où cela est techniquement, fonctionnellement et économiquement réalisable, tout en prenant également en compte la question des conditions d'un climat intérieur sain, de la sécurité incendie {...} » (*Ibidem*, paragr. 19).

Au niveau national

Les politiques nationales belges sont influencées par les normes et les principes internationaux (Accord de Paris, Rapport Brundtland, ISO) et européens (PEB). En tant qu'État fédéral, l'État belge est composé de communautés et de régions qui disposent de compétences spécifiques. Les compétences des Régions et des Communautés sont attribuées par la loi spéciale du 8 août 1980 (modifié plusieurs fois par la suite) qui stipule que les Régions sont compétentes en ce qui concerne : l'aménagement du territoire, la protection de l'environnement, la rénovation rurale et la conservation de la nature, le logement, l'agriculture, l'économie, l'énergie, la gestion des pouvoirs subordonnés (province et commune), l'emploi, et les travaux publics (Parlement fédéral 1980, Art.6)

Les compétences des Régions sont établies de façon à ne pas interférer avec celles du fédéral ni avec celles des communes et provinces. Les compétences des communes et provinces sont régies par des décrets régionaux dans le « code de la démocratie locale et de la décentralisation ». L'article L1122-30 de ce code assure que les communes sont autonomes pour gérer ce qui dépend de « l'intérêt communal ». D'autres lois et codes attribuent des compétences spécifiques aux communes (en coordination avec les Régions). C'est le cas du

Code de Développement Territorial (CoDT) qui les désigne « *gestionnaires et garantes* » d'un « *développement durable et attractif du territoire* » « *dans le cadre de ses compétences et en coordination avec la Région* » (CoDT, Art. D.I.1).

Malgré la régionalisation des compétences relatives à la gestion de l'environnement, le Service public fédéral de la santé publique, de la sécurité de la chaîne alimentaire et de l'environnement exerce des compétences concernant les thématiques de l'environnement et de la construction à travers la Direction Générale (DG) Environnement. Cette Direction travaille sur des « *sujets qui relèvent de sa seule compétence ou coordonne la préparation et certains aspects de la mise en œuvre des matières de compétence mixte en collaboration avec les Régions* » (SPF Santé publique 2016b). Elle participe au développement d'instruments que nous développons dans le point suivant (3.3.2, instruments).

Au niveau de la Région wallonne

Pour rappel, nous posons la focale sur la Région wallonne (RW). La RW dispose d'une assemblée législative : le Parlement wallon et d'un pouvoir exécutif : le Gouvernement wallon. Le Service public de Wallonie (SPW) est l'administration wallonne qui soutient le Gouvernement et le Parlement wallon dans l'exercice de leurs fonctions. Le SPW est composé de 8 Directions générales qui lui permettent de répondre aux besoins des citoyens, des entreprises et des pouvoirs locaux (Portail Wallonie s.d.). Deux Directions générales sont transversales : le SPW Secrétariat général, qui s'occupe du DD, et le SPW qui s'occupe du budget, de la logistique et des TIC⁴. Les six autres Directions générales ont des compétences spécifiques : SPW Mobilité et Infrastructure, SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, SPW Territoire, Logement, Patrimoine et Energie (DGO4), SPW Intérieur et Action sociale, SPW Economie, Emploi et Recherche et SPW Fiscalité (Portail Wallonie s.d.).

Lobbys et centre de recherche

Nous présentons ici des lobbys et des centres de recherche en raison de leur influence sur les décisions politiques dans le secteur de la construction en RW. Cette brève présentation est complétée au cours du travail, en particulier dans la partie 3, dans laquelle nous mettrons en évidence les tensions et les affinités entre les différents acteurs (cf. 5.3).

⁴ TIC : Technologies de l'information et de la communication

En Wallonie, les lobbys et les clusters de la construction représentent les entreprises de la construction auprès des pouvoirs publics. Ces lobbys entretiennent des liens étroits avec le Service Public Wallon en échangeant des informations. Nous avons identifié trois lobbys principaux - la Confédération Construction, le cluster CAP Construction et le Cluster Eco-construction - et un centre de recherche, le Centre Scientifique et Technique de la Construction.

La Confédération Construction (CC), fondée en 1946, est composée de trois Confédérations régionales, 12 fédérations locales et 18 Fédération professionnelles (Confédération Construction s.d.). Elle cherche à « *se positionner comme interlocuteur privilégié des gouvernements wallon, germanophone et de la Fédération Wallonie-Bruxelles* » (Confédération Construction Wallonne 2018, p.7). La CC représente 15.000 entreprises à travers la Belgique. La Confédération Construction Wallonne (CCW), créée en 1990, représente 9.342 entreprises en Wallonie (*Ibidem*). Les Confédérations représentent différents métiers au travers de quatre fédérations principales : gros œuvre, finition, parachèvement complémentaire et techniques spéciales (*Ibidem*, pp.14-15). Ces fédérations regroupent des fédérations ou associations d'entreprises qui utilisent des matériaux ou des techniques semblables (*Ibidem*).

Pour aller plus loin, à l'heure du développement durable, la CCW et d'autres fédérations (celle des architectes, celle des producteurs de matériaux et celle du secteur immobilier) ont participé activement à la création d'un nouveau lobby : CAP Construction (CAP Construction s.d.). Ce lobby représente les intérêts des entreprises qui veulent s'orienter vers un développement durable.

La CCW a aussi participé à la création du Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC). Le CSTC est le centre scientifique de référence concernant la construction en Belgique. Il est le résultat de la mutualisation des moyens pour la recherche et le développement de plus de 90.000 entreprises, dont la majorité sont des PME (chauffagistes, couvreurs, sanitaires, entreprises générales, etc.) (CSTC 2019). Le CSTC se donne pour objectif principal l'amélioration de la compétitivité et de la qualité du secteur de la construction grâce à la recherche et au développement (*Ibidem*). La moitié de ses revenus provient des redevances de ses membres, l'autre moitié provient de subsides et de contrats de recherches publics ou privés (*Ibidem*).

Le Cluster Eco-construction est un cluster qui représente les entreprises d'écoconstruction en Wallonie. Il est créé en 2003 et depuis il est reconnu et subsidié par la RW pour continuer ses

activités de représentation des 270 entreprises et experts actifs dans l'écoconstruction (Cluster Eco-construction s.d.).

2.3.2 Stratégies et instruments wallons pour un développement durable du secteur de la construction

Stratégies

Nous analysons ici les stratégies de la RW et les outils qu'elle utilise afin d'atteindre ses objectifs.

De manière générale, l'objectif de « développement durable » est largement présent dans les discours et dans les stratégies du Gouvernement wallon.⁵ Le Gouvernement wallon s'est donné pour objectif la réduction de sa production de gaz à effet de serre, par rapport à l'année de référence 1990, de 30% d'équivalent CO2 d'ici 2020 et de 80 à 95% d'équivalent CO2 d'ici 2050 (Gouvernement Wallon 2014, p.2).

Nous nous intéressons à trois stratégies en particulier : le Schéma de développement territorial wallon (A), la Stratégie wallonne de développement durable (B), le Plan Marshall 4.0 et l'Alliance emploi-environnement (C).

(A) Le Schéma de développement territorial wallon

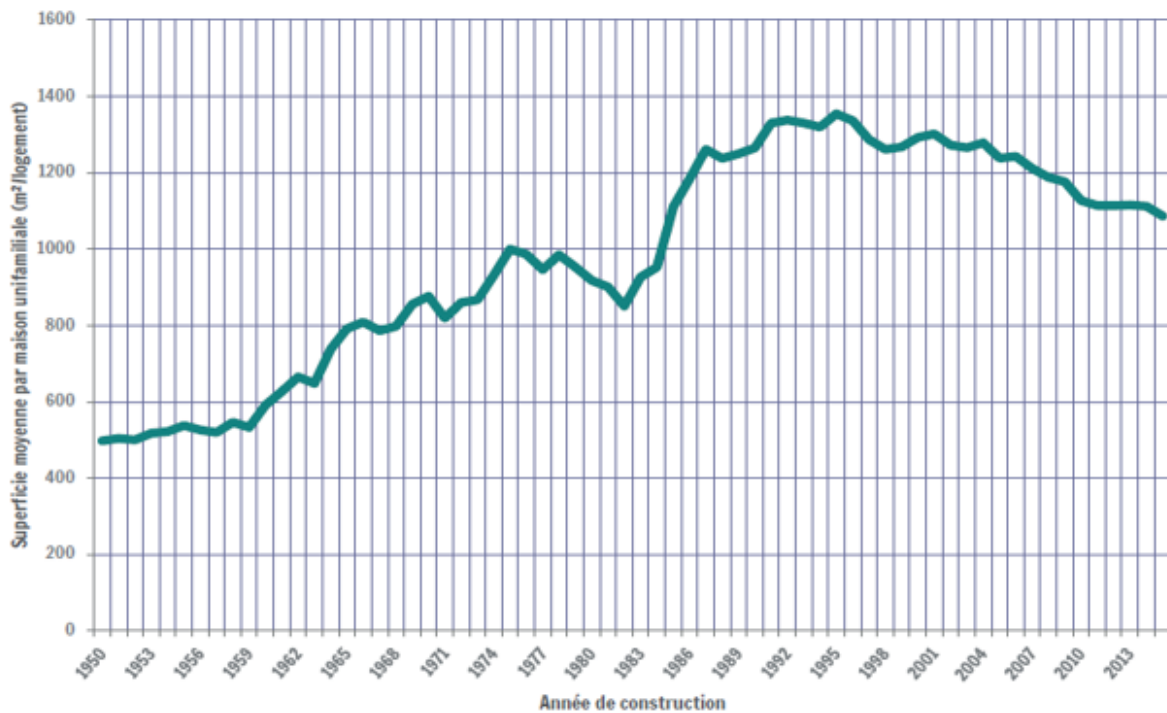
Le Schéma de développement territorial (SDT) wallon est « *l'outil de nature juridique à travers lequel les autorités régionales peuvent définir la stratégie qu'elles comptent mettre en œuvre pour traduire concrètement le projet qu'elles proposent sur le territoire (...)* » (SPW: DGO4 2018, p.5). Le SDT ne remplace pas le Code du développement territorial (CoDT), le CoDT reste l'outil normatif pour le développement du territoire dans la RW, le SDT ne possède qu'une valeur indicative. Les quatre objectifs régionaux du SDT sont :

- La lutte contre l'étalement urbain et l'utilisation rationnelle des territoires et des ressources
- Le développement socio-économique et de l'attractivité territoriale
- La gestion qualitative du cadre de vie
- La maîtrise de la mobilité (SPW: DGO4 2018, p.8).

⁵ Par exemple, dans l'article 1^{er} du CoDT, dans la Stratégie wallonne de DD, dans le décret relatif à la Stratégie wallonne de développement durable (réf. : M.B. 09.07.2013), etc.

Le premier objectif concerne directement le secteur de la construction. L'étalement urbain est l'un des défis auxquels la RW doit faire face. Le graphique ci-dessous montre une croissance de la superficie des habitations depuis les années 1950 jusqu'à 1995 (jusqu'à 1300m² en moyenne). Depuis, la superficie des habitations décroît légèrement.

Figure 5 : Evolution de la superficie au sol moyenne des parcelles bâties pour les maisons unifamiliales en Wallonie



Source : Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique 2018, Fiche T006-SUPERF.RESID

Afin de poursuivre cette réduction de la consommation des sols, plusieurs principes de mise en œuvre ont été identifiés dans le SDT wallon : l'application d'une densité raisonnée pour les zones destinées à l'urbanisation, la réutilisation, la rénovation et la réaffectation du bâti, la valorisation des friches et la promotion de la mitoyenneté et de la compacité du bâti. De même, afin d'exploiter les ressources du territoire de manière raisonnée, « *l'utilisation de ressources durables ou recyclables est encouragée* » (SPW: DGO4 2018, p.126).

(B) La Stratégie wallonne de développement durable

La Stratégie de DD adoptée par la RW rassemble les stratégies et les actions que la Région s'engage à mettre en œuvre afin de répondre aux défis environnementaux. En 2013 la RW adopte sa première Stratégie de DD et en juillet 2016 elle adopte sa deuxième Stratégie. Ces textes présentent les objectifs wallons de manière très générale. Le Gouvernement wallon

souhaite « *une prospérité durable et équitable* », qui se base sur les engagements nationaux, européens et internationaux en matière de développement durable (Gouvernement Wallon 2016, p.10). Les objectifs (chiffrés pour certains) sont larges et ambitieux. Cette Stratégie wallonne s'inscrit dans les ODD adoptés par les Nation Unies en 2015. Par exemple, dans sa Stratégie de 2016, en lien avec l'ODD 11 (« *Faire en sorte que les villes et les établissements humains soient ouverts à tous, sûrs, résilients et durables* »), la RW se donne notamment l'objectif suivant : « *D'ici 2030, renforcer l'urbanisation durable pour tous et les capacités de planification et de gestion participatives, intégrées et durables des établissements humains dans tous les pays* » (Gouvernement Wallon 2016, p.42).

Afin de concrétiser ces objectifs généraux, la RW a réalisé un plan d'action en quatre axes : l'alimentation, les ressources, l'énergie et les actions transversales (*Ibidem*, p.47). La construction et le logement s'inscrivent dans l'axe ressources et dans l'axe énergie. Les actions phares de l'axe ressources sont :

- la création d'un label « local »,
- la création d'un outil d'évaluation des performances environnementales des éléments de constructions et des bâtiments afin qu'il serve d'aide à la décision,
- le développement de la demande de matériaux dotés d'une déclaration environnementale pour les marchés publics,
- le développement d'un diagnostic de l'utilisation des ressources agricoles
- la rationalisation de l'utilisation de la biomasse. La rationalisation de la biomasse est définie comme l'utilisation de la biomasse d'abord pour l'alimentation humaine, ensuite pour l'alimentation animale, puis en tant que fibre (en construction par exemple) et enfin en tant qu'énergie (*Ibidem*, pp.57-58).

Actuellement, la majorité des actions entreprises font l'objet d'un suivi : 80% d'entre elles commencent à être implémentées.

(C) Le Plan Marshall 4.0 et l'Alliance emploi-environnement

Le secteur industriel possède une stratégie propre pour la période 2015-2019 : le Plan Marshall 4.0. La RW définit ce Plan comme « *le cœur d'une dynamique de redéploiement socio-économique* » (Région wallonne 2015, p.5). Cette stratégie est constituée de 5 axes prioritaires :

la formation et l'orientation (1), l'innovation et la croissance (2), le développement territorial (3), l'énergie et l'économie circulaire (4) et enfin l'innovation numérique (5).

L'Alliance Emploi-Environnement (dans sa 2e version, 2016-2019) est une stratégie intégrée au Plan Marshall 4.0 qui a pour ambition de « *Faire de l'amélioration de l'environnement une source d'opportunités économiques et de création d'emplois (...)* » (Gouvernement Wallon et SPW 2016, p.10). Cette stratégie se concentre sur la construction et la rénovation du bâti au travers de 4 axes : Définir les normes et références applicables aux constructions / rénovations durables (1), Promouvoir la construction / rénovation durable (2), Stimuler la réalisation de projets de construction / rénovation durable (3) et Mettre en œuvre des formations dans les métiers de la construction / rénovation durable (4) (Gouvernement Wallon et SPW 2016, pp.15-16). Des actions sont définies au sein de chaque axe. L'action 15, par exemple, entend renforcer la résilience des PME wallonnes durables et innovantes qui produisent des matériaux et des systèmes constructifs dans une logique d'économie locale et circulaire (*Ibidem*, p.50). L'Alliance emploi-environnement entend aussi « *développer de nouvelles filières de production de matériaux et de systèmes constructifs innovants et durables* » et « *boucler les filières existantes* » pour qu'elles soient pérennes (*Ibidem*, p.51).

(D) Circuits courts et économie circulaire

De nombreux acteurs et programmes wallons (Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme, 2^{ème} Stratégie de développement durable, Plan Marshall 4.0, Plan wallon des déchets ressources)⁶ s'accordent sur le fait qu'intensifier les circuits courts et l'économie circulaire sont des actions pérennes qui peuvent améliorer la gestion des ressources en Wallonie. De nouveaux secteurs se développent tels que le recyclage des matériaux et la valorisation des déchets de construction dans une optique d'économie circulaire qui favorise les circuits courts. (SPW: DGO4 2018, p.125).

De plus, « *le territoire wallon est riche en ressources primaires et naturelles* » (SPW: DGO4 2018, p.125) et il est aussi capital d'exploiter les ressources du territoire wallon de manière raisonnée en favorisant la production durable et l'utilisation de matériaux durables et recyclables. (*Ibidem*, p.126)

⁶ Dans l'ordre : Gouvernement wallon et SPW: DGO4 2017; Gouvernement Wallon 2016; Région wallonne 2015; Gouvernement wallon et SPW 2018)

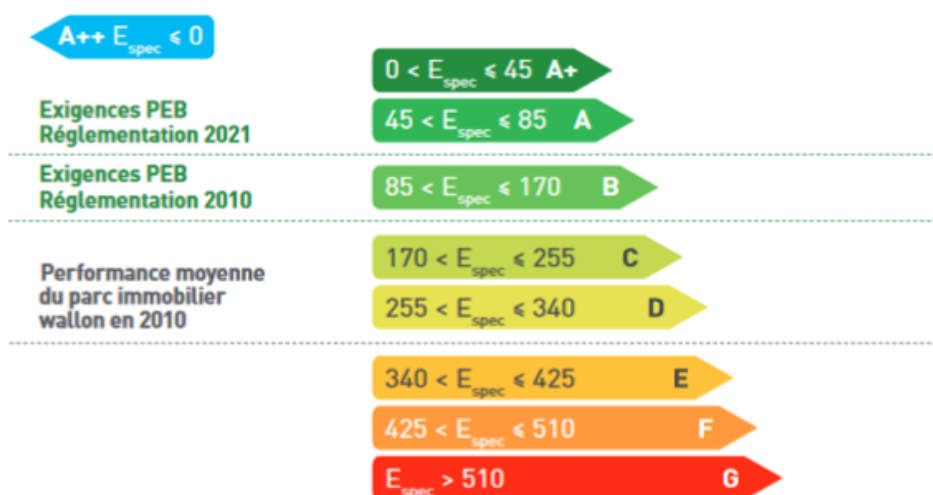
Instruments

La mise en œuvre de ces stratégies internationales, européennes et régionales au niveau local passe par l'utilisation d'une série d'instruments et d'outils. Ces instruments techniques sont pour certains pleinement intégrés dans les procédures et dans les pratiques locales. Pour d'autres, leur utilisation est plus sporadique. D'autres encore sont seulement au stade de développement mais les enjeux dont ils sont déjà porteurs nous amènent à les inclure dans l'analyse. Nous présentons et analysons 6 instruments, dont certains ont été brièvement évoqués auparavant.

(A) La Performance énergétique du bâtiment

Pour appliquer la directive européenne sur la performance énergétique du bâtiment (PEB)⁷ la RW a mis en place un système de certification pour la PEB. Les bâtiments doivent respecter une valeur maximale pour tous les critères contrôlés. L'un des critères contrôlés est la consommation spécifique d'énergie primaire (Espec⁸) : la consommation totale d'énergie du bâtiment sur une année est rapportée à la surface du bâtiment (kWh/m².an) (SPW: DGO4 2016, pp.3-4). Sur base de cette valeur, des catégories d'émission (labels) sont construites pour former une échelle.

Figure 6 : Echelle des labels PEB par rapport à la consommation spécifique d'énergie primaire



Source : SPW: DGO4 2016, p.5

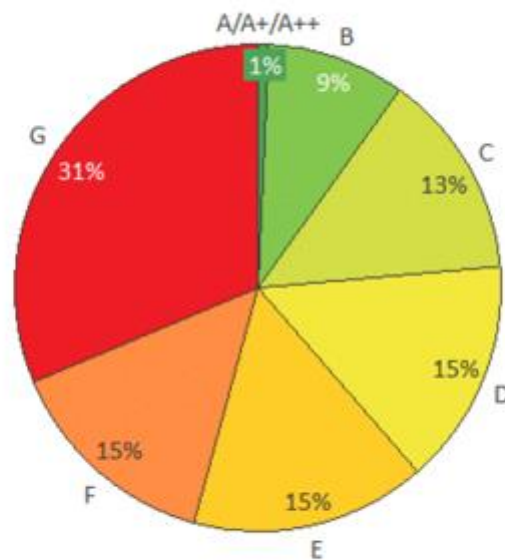
⁷ Parlement européen et Conseil européen 2010, (UE) 2010/3 et Parlement européen et Conseil européen 2018, vol. (UE) 2018/844

⁸ La consommation spécifique d'énergie primaire (Espec) est le « rapport entre la consommation annuelle d'énergie primaire et la surface totale de plancher chauffée ou climatisée » pour un bâtiment, un appartement, un commerce, etc. (SPW énergie 2016, pt. 04.08)

La réglementation actuelle oblige les nouvelles constructions à avoir une consommation spécifique d'énergie primaire inférieure à 130 kWh/m² par an (label B) (SPW: DGO4 2016, p.4). Cette réglementation évolue avec le temps : si l'habitation consomme 85 kWh/m² par an ou moins (label A), elle sera encore aux normes en 2021 (Gouvernement wallon 2015, M.B. du 30/07/2014, p. 56172:Art. 10/1). Depuis le 1^{er} janvier 2019, les bâtiments publics doivent montrer l'exemple en adoptant déjà les mesures de 2021 avec un standard NZEB (Nearly Zero Energy Building) pour que la consommation des bâtiments publics soit inférieure ou égale à 85 kWh/m² par an (label A) (*Ibidem*, Art. 13).

Cet outil est aujourd'hui largement utilisé. L'utilisation généralisée de cet outil permet d'avoir un regard global sur la qualité du bâti belge.

Figure 7 : Répartition des bâtiments résidentiels wallons selon leur label PEB



Source : Gouvernement wallon et SPW : DGO4 2017, p.19

Ce diagramme circulaire montre qu'une majorité (61%) de bâtiments consomment plus de 340 kWh/m² par an et obtiennent donc des labels entre E et G.

(B) TOTEM

Concernant la diminution de l'empreinte écologique des bâtiments, l'organisme public pour la gestion des déchets en Région flamande a lancé en 2011 la création du projet TOTEM. L'outil TOTEM (Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials) permet d'analyser le cycle de vie des éléments de construction d'un bâtiment ou du bâtiment entier (Totem 2018). Il est disponible gratuitement en ligne et permet d'aider à la décision en étant adapté au secteur

belge de la construction (*Ibidem*). Cet outil sera appliqué en amont de la construction ou de la rénovation afin de quantifier et diminuer l’empreinte écologique des bâtiments. Aujourd’hui, ce projet est porté par les trois régions en collaboration avec le SPF Santé publique (Bruxelles Environnement 2017). Des experts du secteur et des partenaires de recherches (Université de Leuven, CSTC, VITO) collaborent également à la réalisation de ce projet. Bien que l’outil ne soit pas encore parfaitement finalisé, les acteurs du secteur de la construction semblent être au courant du développement d’un tel outil. Nous verrons que cet outil est déjà au cœur d’enjeux importants.

(C) Analyse de cycle de vie

La méthode de l’analyse de cycle de vie (ACV), basée sur les normes ISO 14040 et ISO 14044, est développée et utilisée dans le monde entier. L’ACV compile et évalue les phases de production, de construction (ou d’assemblage), d’utilisation et de déconstruction/destruction d’un objet, d’un matériau ou encore d’un assemblage de matériaux. Cette analyse se réalise en 4 étapes⁹.

La première étape est la description de l’objectif de l’étude, de l’objet étudié et des limites/frontières du système étudié. La deuxième étape est la réalisation d’un inventaire et d’une quantification de tous les flux qui sont à l’intérieur du système étudié. La troisième étape est l’évaluation des impacts environnementaux du cycle de vie de l’objet étudié (comprenant tous les intrants et sortants). Les impacts sont regroupés en indicateurs « midpoint » et « endpoint ». Les indicateurs midpoints concernent des problèmes environnementaux spécifiques comme : la destruction de l’ozone stratosphérique, l’utilisation des terres, l’acidification des océans et des sols, l’eutrophisation, etc. Les indicateurs endpoints sont des agrégats de plusieurs indicateurs midpoints correspondant à des catégories de dommages, comme : la santé humaine, les services écosystémiques et les ressources, le réchauffement climatique. À chaque catégorie d’impact, une valeur chiffrée est attribuée afin de comparer des systèmes qui ont la même fonction. Ces indicateurs peuvent ensuite être agrégés à la suite d’une normalisation, d’un regroupement et d’une pondération en indicateurs uniques comme l’émission de gaz à effet de serre en équivalent CO₂, le coût monétaire pour la réparation des dommages sur l’environnement ou encore la consommation d’énergie. Cette agrégation permet

⁹ Synthèse basée sur les travaux de : Hellweg et Mila i Canals 2014, pp.1109-1111 et European Commission et Joint Research Centre 2010, pp.29-30, 51-52, 153-154, 275-281, 285.

la comparaison en même temps qu'elle conduit inévitablement à une perte d'informations (Janssen, Delem, et Dessel 2012, pp.26-27). La quatrième et dernière étape d'une ACV est l'interprétation des résultats.

Figure 8 : Schéma du cycle de vie des bâtiments



Source : Société IZUBA s. d.

Le schéma ci-dessus, réalisé par la société IZUBA, illustre les étapes du cycle de vie d'un bâtiment, de l'extraction des ressources à la fin de vie du bâtiment. Les flèches en pointillés qui quittent le cycle de vie du bâtiment signifient qu'il y a des impacts environnementaux à chacune des étapes.

(D) Les déclarations environnementales des produits

La déclaration environnementale des produits (en anglais EPD) est un système de déclaration volontaire que les sociétés productrices de produits de construction effectuent afin de quantifier les impacts environnementaux de leurs produits (International Organization for Standardization 2006). Les EPD sont basées sur la norme ISO 14025 (série des labels et déclaration environnementale). La méthode utilisée pour réaliser cette déclaration est basée sur l'analyse de cycle de vie du produit en question (SPF Santé publique 2017, p.3). Ces déclarations environnementales permettent alors de comparer entre eux des produits qui ont la même fonction, par exemple une brique venant de deux fournisseurs différents (International

Organization for Standardization 2006). L'objectif des EPD en Belgique est de permettre aux autres entreprises, aux consommateurs et à toute organisation intéressée d'obtenir de l'information concernant l'impact environnemental d'un produit avant de l'utiliser ou de le commander (SPF Santé publique 2017, pp.3-4) mais aussi de connaître la chaîne de fabrication, d'utilisation et de fin de vie du produit et donc de pouvoir agir sur une diminution des coûts ou des impacts à certains endroits de la chaîne (SPF Santé publique 2016a). Il faut être prudent lors de la comparaison entre deux EPD car un mur peut avoir un impact plus faible sur l'environnement mais il sera peut-être nécessaire de l'entretenir plus souvent ou de le combiner à certains types d'installation (*Ibidem*). Une base de données nationale (B-EPD) est en cours de développement pour être consultable. Cette base de données pourrait être intégrée dans l'outil d'aide à la décision TOTEM. L'intégration des EPD dans l'outil TOTEM augmenterait la précision des calculs réalisés par l'outil TOTEM, ce qui permettrait de baser les décisions sur des données plus représentatives des impacts des matériaux belges (Totem 2018, 2.6 Bases de données et données spécifiques).

(E) Les agréments techniques

Pour un matériau de construction donné, l'agrément technique (ATG¹⁰) (comme l'agrément technique européen nécessaire pour obtenir le marquage CE) « *donne un avis technique* » « *incluant une description et des caractéristiques techniques* » (Union belge pour l'Agrément technique de la construction s.d.). Les ATG sont des marquages volontaires. Les entreprises choisissent de demander ou non l'agrément à l'UBAtc (Union belge pour l'Agrément technique de la construction) qui est l'organisme belge de référence pour les matériaux, les produits et les systèmes de construction.

L'agrément constitue un avis sur un matériau ou un produit de construction spécifique, provenant d'un fabricant donné et pour une utilisation définie. L'ATG est valable uniquement sur le territoire belge. L'ATG permet à l'entrepreneur, à l'architecte ou au consommateur de vérifier la conformité du produit (*Ibidem*). C'est donc souvent pour des produits innovants, nouveaux ou composés de plusieurs produits que les entreprises ont recours à l'ATG (*Ibidem*).

(F) Le BIM

Le BIM (Building Information Modeling – réalisation de maquettes numériques), développé par l'Union européenne, est un nouveau système intelligent de représentation numérique 3D

¹⁰ ATG signifie : « Agrément Technique/Technische Goedkeuring »

des bâtiments. Cet outil est développé afin d'analyser le bâtiment comme un tout, en prenant en compte chacun de ses composants (EUBIM taskgroup 2018, p.4). Le BIM est un outil stratégique d'aide à la décision pour les nouvelles constructions mais aussi pour les rénovations et l'entretien des bâtiments (EUBIM taskgroup 2018, p.4). Le BIM a la possibilité d'« engendrer des bénéfices environnementaux » (*Ibidem*, p.18) en réduisant les déchets sur chantiers, en rationalisant la maintenance et l'utilisation d'énergie (via des simulations pour optimiser la consommation du bâtiment), en évaluant l'analyse de cycle de vie complet et en favorisant une utilisation efficace des ressources. De manière générale, le BIM permettrait de réaliser « des projets mieux conçus et adaptés aux besoins » (*Ibidem*, pp.18-19).

Selon l'EUBIM taskgroup, deux éléments sont nécessaires si l'on entend généraliser l'utilisation du BIM dans le secteur de la construction : un soutien de la part du secteur public qui pourrait rendre l'outil incontournable en rendant son utilisation obligatoire dans le cadre des marchés publics (*Ibidem*, p.17) et l'intégration des informations techniques de chaque matériau (ATG et EPD) afin qu'elles soient utilisables dans le modèle numérique du bâtiment (*Ibidem*, pp.26-27 et p.48).

Ainsi, la RW s'inscrit dans les stratégies internationales et européennes en matière de construction et d'environnement en même temps qu'elle se les approprie et les adapte à son contexte. Des outils (PEB, TOTEM, ACV, EPD, ATG, BIM) sont mis en place et sont de plus en plus utilisés. Ces stratégies et ces instruments constituent le cadre dans lequel les acteurs du secteur de la construction évoluent. Dans une certaine mesure, ces instruments façonnent le secteur. Nous verrons aussi comment certains acteurs influencent en retour ce cadre, s'en saisissent ou s'en distancient (partie 3).

2.4 Construction durable ou construction écologique ?

Construction écologique ? Construction durable ? Ces concepts apparemment proches font en réalité référence à des conceptions différentes de la construction. Le concept de construction durable est celui que l'on retrouve le plus fréquemment dans les textes internationaux et européens mais aussi wallons. Nous nous intéressons à sa définition pour ensuite nous intéresser à celle de la construction écologique afin de déterminer les différences fondamentales qui les distinguent.

2.4.1 Construction durable

La construction durable renvoie d'abord au concept de développement durable tel qu'il est défini et utilisé par les Nations Unies depuis 1987 : « répondre aux besoins du présent sans

compromettre la possibilité pour les générations à venir de satisfaire les leurs » (Brundtland Commission 1987, p.14). L'histoire de la construction durable est donc relativement récente et étroitement liée aux objectifs de développement durable. Appliqué à la construction, cela signifie chercher un équilibre entre les dimensions économiques, sociales et environnementales de la construction. La construction durable renvoie également à la résistance au temps des matériaux. Dans ce cas, un matériau durable est celui qui résistera le plus longtemps aux effets du temps et ce même si son empreinte écologique est supérieure.

ISO propose une définition des objectifs de la construction durable dans la norme ISO 15392:2008 « Développement durable dans la construction -- Principes généraux » (ISO 15392 2008, p.9) :

- Une amélioration du secteur de la construction et de l'environnement du construit
- La réduction des impacts tout en favorisant la valeur écologique, économique et sociale
- La stimulation d'approches proactives
- La stimulation d'innovations
- Le découplage de la croissance économique sur le social et/ou l'environnement.
- Une réconciliation des intérêts contradictoires et des besoins entre le court terme et le long terme.

Au niveau wallon, le SPW définit également la construction durable dans son plan pluriannuel Alliance-emploi d'ailleurs intitulé « Construction durable » (SPW 2016, p.10):

- Réduire les consommations énergétiques des ménages en améliorant la performance énergétique globale.
- Limiter la consommation de ressources naturelles non renouvelables.
- Réduire les émissions de gaz à effet de serre et les déchets non valorisables.
- Dynamiser l'économie grâce aux petites entreprises locales.

Ces définitions du développement durable sont relativement larges. Le concept de construction durable est devenu un terme générique qui perd peu à peu de son sens face à l'ampleur des enjeux que doit relever le secteur de la construction s'il entend diminuer son impact environnemental.

Finalement, la construction « traditionnelle » est devenue de la construction « durable » dans le sens où elle applique les principes énoncés dans les stratégies de développement durable au niveau international, européen, national et wallon. Les acteurs de la construction traditionnelle

appliquent d'ailleurs les instruments développés comme la PEB, les EPD, les ACV, le BIM. L'utilisation de ces outils tend à légitimer leurs systèmes constructifs en raison des efforts réalisés au niveau du recyclage, de la conception, de l'innovation, de l'utilisation et de la démolition.

2.4.2 Construction écologique

Bioconstruction, construction bioécologique, construction avec des écomatériaux, écoconstruction ou encore construction naturelle, la construction écologique a plusieurs dénominations en raison du large panel de constructions auxquelles elle renvoie. La construction écologique « moderne » est née de la réinterprétation de l'habitat par des mouvements naturalistes durant l'urbanisation des années 1960-1970 (Némoz 2010, p.18). Le mouvement de la construction écologique trouve son essor lors des crises pétrolières des années 70, soit une quinzaine d'années avant la construction durable.

La construction écologique est en accord avec les ODD mais va plus loin que la construction durable. Selon King et Bouter (2009, p19), « (la construction écologique) *désigne la conception, la réalisation et la maintenance de bâtiments qui utilisent de façon raisonnée les ressources matérielles, humaines et énergétiques pour créer un abri, avec beaucoup d'égard pour ses occupants, mais aussi pour l'environnement local et global dont il dépend* ».

Selon de Ferran, Lallement et Sueur, l'écoconstruction renvoie aussi « *à une relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat, un choix intégré des procédés et produits de construction, et un chantier à faibles nuisances.* » (de Ferran, Lallement, et Sueur 2012, p.57).

Là où la construction durable met l'accent sur l'équilibre entre l'environnement, le social et l'économie, la construction écologique donne la priorité à l'environnement. La construction écologique suppose de développer une réflexion holistique sur la mise en place d'une construction qui impacte le moins possible l'environnement et l'humain grâce à des techniques utilisant des ressources locales renouvelables et cela en pensant à l'insertion de l'habitat dans l'environnement proche et lointain. La construction durable laisse penser que le modèle économique actuel et la préservation de l'environnement ne sont pas incompatibles. Comme dérivée du développement durable, elle prévoit de « *découpler la croissance économique et les impacts environnementaux grâce à un arsenal de changements technologiques et institutionnels* » (Zaccai 2011, p.220). La construction écologique souligne au contraire cette incompatibilité et s'oriente vers « {...} *des modifications radicales, non prévues dans le*

mainstream du développement durable {...} » (*Ibidem*, p.221). La construction durable ne remet pas fondamentalement en question les principes constructifs établis, comme l'utilisation de minerais et de pétrole. La construction écologique remet en question le paradigme dominant en s'inscrivant dans des dynamiques locales, holistiques et soutenables.

3 Partie 2 : La construction en ballots de paille

Dans cette deuxième partie de notre travail, nous présentons le matériau ballot de paille. D'abord, nous proposons une présentation générale de la construction intégrant ce matériau (définitions, historique, usages en RW et ailleurs). Ensuite, nous examinons les différentes techniques de construction intégrant le matériau ballot de paille avant d'analyser les caractéristiques techniques de ce système constructif. Nous étudions les impacts environnementaux de cette technique de construction afin de les comparer à ceux associés à la construction dite traditionnelle. Nous présentons enfin nos conclusions sur les qualités techniques et les avantages environnementaux de ce type de construction.

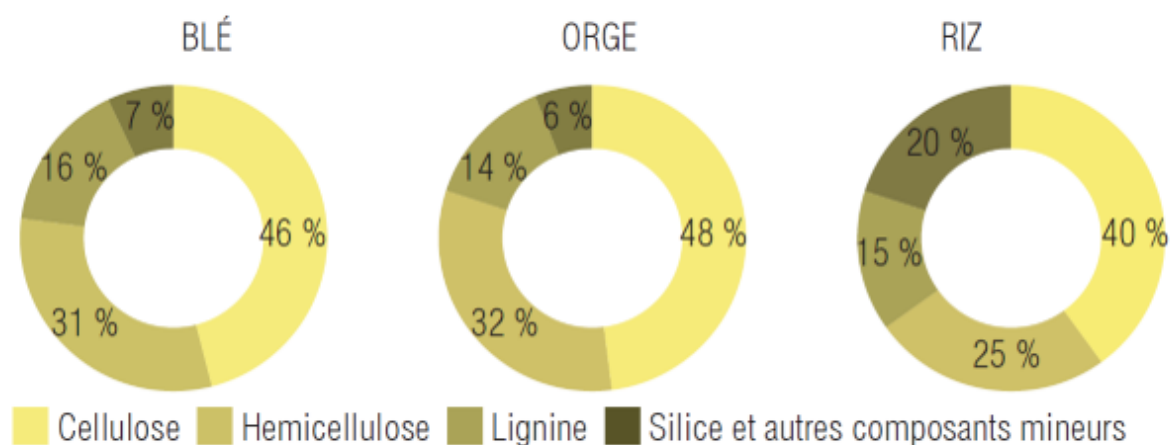
3.1 La paille, un matériau de construction

3.1.1 De la paille au ballot comme matériau de construction

La paille est la tige des graminées qui se trouve entre les racines (rhizome) et l'épi (King et de Bouter 2009, p.26). Alors que le foin est utilisé comme fourrage pour le bétail, la paille, qui ne possède donc pas de grains, est principalement enfouie directement dans le sol après la récolte du grain. Elle peut aussi être sortie du champ afin de servir de litière pour les élevages ou comme matériau de construction (Minke et Mahlke 2005, p.19; RFCP 2014b, p.10).

Actuellement, la paille la plus utilisée en construction est la paille provenant de la culture céréalière, par opposition à celle provenant d'autres types de plantes et d'herbes sèches. Nous concentrons notre analyse sur la paille céréalière qui est plus répandue et plus accessible, elle possède aussi des propriétés physiques particulièrement avantageuses, qui se rapprochent de celle du bois (King et de Bouter 2009, pp.26-27). La structure creuse de la paille offre une grande résistance et une bonne élasticité pour construire. Elle possède par ailleurs une fine couche de cire hydrophobe (Minke et Mahlke 2005, p.19). La paille est composée, en quantité variable selon le type de céréales, de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de silice (*Ibidem* et Gruber et Gruber 2003, p.11). Les céréales qui produisent une paille de bonne qualité pour la construction sont le blé, l'épeautre, l'orge, l'avoine, le seigle et le riz (King et de Bouter 2009, p.27; Gruber et Gruber 2003, p.11). Plus le taux de silice est élevé dans la paille, plus elle résiste au feu et se décompose lentement (King et de Bouter 2009, pp.26-27; Gruber et Gruber 2003, pp.11-12).

Figure 9 : Composition de la paille selon la céréale



Source : King et de Bouter 2009, p.26 In Evrard et al. 2015a, p.72

Nous observons que la composition de ces différentes pailles céréalières (blé, orge, riz) est à première vue sensiblement identique. Toutefois, le taux de silice est plus de deux fois plus élevé dans la paille de riz, ce qui la rend plus résistante et donc plus intéressante du point de vue de la construction.

La paille est une ressource renouvelable, inépuisable car elle se reproduit continuellement. La production de céréale est la culture dominante en Wallonie. Le froment d'hiver (blé) et l'orge d'hiver sont les plus répandus (STATBEL 2018, p.16 et Wallonie agriculture SPW 2018 p.7). Le secteur agricole belge produit entre 730.000 et 1.300.000 tonnes de paille par an (entre 2007 et 2012) pour les céréales les plus utilisées en construction en Belgique, à savoir le froment d'hiver, l'épeautre, le seigle et l'orge d'hiver et le triticale (Evrard et al. 2015a, p.93). La récolte des céréales se fait grâce à des moissonneuses batteuses, qui récoltent le grain en le séparant de la paille. La machine dépose ensuite la paille en andain¹¹ dans son sillon (Aissaoui 2015, pp.5-9). Si l'andain n'est pas directement broyé sur site pour nourrir la terre, une machine qui forme des ballots (une ramasseuse-presse) suit la ligne d'andain pour récolter cette paille. Elle devient alors un « ballot » de paille, que la machine dépose derrière elle dans le champ. Les ballots ont généralement une densité qui varie entre 80kg/m³ et 220kg/m³ (J.M. Suttie 2004, p.33).

Afin d'avoir un ballot de paille qui est idéal pour la construction, il faut être particulièrement vigilant lors de la récolte de l'andain car la qualité des ballots dépend principalement de

¹¹ Andain : l'andain est la ligne de paille en vrac laissée après le passage de la moissonneuse batteuse. (Evrard et al. 2015a, p.28)

l'attention qui est portée à la paille à cette étape. Nous avons rassemblé les conseils de plusieurs sources¹² :

- Prévoir une longueur de paille de plus de 25 cm
- Éviter les plantes étrangères dans l'andain
- Alimenter la presse de manière constante grâce à un andain régulier
- Presser les ballots en fin de journée avec une légère humidité afin d'éviter que la paille ne se brise dans la presse
- Produire des ballots d'une densité entre 90 et 110 kg/m³
- Prévoir un stockage immédiat hors sol (sur palette ou remorque, bien protégé)
- Produire des ballots dont la teneur en eau n'excède pas 25%.

En Belgique, il n'y a pas de normes à respecter pour produire un ballot de paille destiné à la construction. Chaque producteur de ballot produit des ballots de construction en fonction de critères qu'il définit lui-même ou avec ses clients.

3.1.2 Historique de la construction en paille

Les premiers habitats intégrant la paille

La construction d'habitat avec des fibres végétales est plus âgée que l'humanité ; des singes s'abritent avec des feuillages, les castors construisent des niches dans des barrages. L'Homme a fait de même en construisant ses premiers refuges avec les matériaux se trouvant à proximité de son lieu d'installation : du bois, de la matière végétale, des pierres, de la terre (Rudofsky 1964, p.3). La construction avec des matières végétales comme la paille prend des formes différentes selon les époques et selon les lieux. Au cours du temps, les savoirs empiriques se sont développés. Les régions se sont spécialisées en développant un habitat adapté aux conditions climatiques et aux matières premières disponibles localement (Evrard et al. 2015c, p.10). La construction en pisé¹³ et la construction en pierre se sont développées dans les zones chaudes. Le bois massif était utilisé dans les zones froides et l'utilisation du torchis¹⁴ s'est développée dans les zones tempérées (*Ibidem*).

¹² Suttie 2004; King et de Bouter 2009; Evrard et al. 2015a,

¹³ La construction en pisé est une construction en terre crue : ses murs massifs sont réalisés par « *compactage de terre argileuse graveleuse et humide dans de solides coffrages* ». Cette terre à pisé est damée en couche successive (Morel, Fabbri, et Soudani 2015, p.1)

¹⁴ Le torchis est un mélange de terre argileuse et de paille hachée qui est utilisé dans des constructions avec une ossature en bois (Guille 1951, pp.120-121)

Le matériau paille, avant d'être utilisé sous forme de ballots, se retrouvait dans les maisons en torchis, à colombage, sur les toitures en chaume et dans le grenier des maisons de fermiers pour garder la chaleur dans les pièces à vivre (Evrard et al. 2015c, p.10). La paille, en association avec la terre, permet de fabriquer des briques. La brique en terre-paille la plus ancienne date de 9.500 ans (Berge 2009, p.124). Ces briques sont d'ailleurs mentionnées dans l'Ancien Testament (Exodus, Ch.5, v.7 In Berge 2009, p.124). La construction d'époque est composée de murs massifs qui gèrent toutes les fonctions que l'on répartit aujourd'hui entre de multiples couches (structure, isolation, membranes en plastique, finition extérieure et intérieure) (Evrard et al. 2015c, p.10).

Des origines de la construction en ballots de paille à son déclin

De nombreux chercheurs ¹⁵ s'accordent pour dire que les premiers bâtiments intégrant des ballots de paille sont originaires du Nebraska en Amérique du Nord et datent de la fin du 19^{ème} siècle. Dans cette région agricole, les ressources en bois sont rares alors que la paille est abondante. Les premières presses servant à comprimer la paille en ballot sont développées afin de transporter la paille et le foin. Le système est rudimentaire : les premières presses sont à pression humaine ou animale. Afin de pallier au manque de matériaux de construction, les habitants de la région imaginent de créer des bâtiments avec ces blocs de paille en posant les ballots les uns sur les autres. Cette technique est encore utilisée aujourd'hui à travers le monde. Deux bâtiments emblématiques de cette époque, « the Burke House » et une église (the Pilgrim Holiness Church) sont encore debout aujourd'hui. Ces premières utilisations de ballots de paille en construction donnent une première idée de la durabilité de ce système constructif.



À gauche : the Burke House, construite en 1903 (Beyond Architecture Group 2014, p.2)

À droite : the Pilgrim Holiness Church, construite en 1928 (« Photos à Pilgrim Holiness Church - Arthur, NE » s. d.)

¹⁵ (Wishart 2004, p.68; de Bouter 2006, p.1; Minke et Mahlke 2005, p.13; RFCP 2014b, pp.9-10; Rijven 2008, p.6; King et de Bouter 2009, pp.17-18; Evrard et al. 2015c, p.11)

En Europe, la maison en ballots de paille la plus connue et la plus emblématique est la « Maison Feuillette », construite en France en 1920. Elle est aujourd'hui le Centre National de la Construction en Paille. Elle possède un étage et une structure en bois.



Source : RFCP 2015

Après la Seconde Guerre mondiale, la construction en paille est peu à peu oubliée pour laisser place à d'autres matériaux et méthodes de construction. En raison du nombre d'artisans morts au combat et de la nécessité de reconstruire rapidement les bâtiments détruits, l'usage déjà généralisé des matériaux industriels standardisés comme l'acier et le ciment s'est imposé (Evrard et al. 2015c, p.12).

Le regain d'intérêt pour la construction en ballots de paille

Dans le dernier quart du 20^{ème} siècle, le mouvement écologiste se développe en réaction à plusieurs événements : le nucléaire, la guerre du Vietnam, des naufrages de pétroliers et les crises pétrolières. Des publications sur l'environnement, des conventions internationales et la première conférence mondiale sur l'environnement en 1972 (Matagne 2003, pp.27-30) donnent une visibilité grandissante aux enjeux environnementaux. Dans ce cadre, un regain d'intérêt apparaît pour les systèmes constructifs « oubliés ». Des recherches sur la construction en ballots de paille sont publiées aux USA, en particulier le livre emblématique « Shelter » de Kahn et Easton 1990 (Minke et Mahlke 2005, p.15). Le journal « The Last Straw » est créé en 1983 et publie des articles sur la paille et d'autres matériaux écologiques (Evrard et al. 2015c, p.15). Ces écrits participent au renouveau du matériau paille en même temps qu'ils le confirment. Depuis, des pays comme le Canada, l'Allemagne, l'Autriche et la France ont développé un cadre réglementaire pour la construction en ballots de paille (RFCP 2014b, pp.9-10). En France par exemple, le Réseau Français de la Construction en Paille (RFCP) a développé un cadre

réglementaire entré en vigueur en 2012. Il rassemble les règles professionnelles de la construction en ballots de paille comme isolant de façade et support d'enduit. Ces règles sont présentées sous la forme d'un document technique unifié (DTU) qui est le document officiel applicable au secteur de la construction en France. Le RFCP a également produit des études sur diverses thématiques : l'analyse environnementale, analyse de la qualité de l'air intérieur, etc. Cela afin d'intégrer les normes générales de la construction en France.

3.1.3 Faisabilité de l'utilisation du ballot de paille pour la construction en Wallonie

Cadre légal pour la rénovation et la construction

Le Code de Développement territorial wallon (CoDT) prévoit que pour construire une nouvelle habitation ou réaliser des rénovations importantes, il est nécessaire d'obtenir un permis d'urbanisme, ce qui passe obligatoirement par le dépôt d'un dossier signé par un architecte (SPW : DGO4, p.290). Le CoDT ne prévoit pas de contrainte particulière associée à la construction en ballots de paille ; l'architecte crée le dossier et s'engage pour la construction du nouveau bâtiment. En revanche, pour être accepté, le projet de construction ou de rénovation doit s'inscrire dans le guide régional d'urbanisme, dans le plan de secteur, dans le Schéma d'orientation local et dans le Schéma de développement communal/pluricommunal lorsque ces cadres existent pour le territoire (*Ibidem*, pp.85-86 et p.118).

Disponibilité du matériau paille pour la construction

Il est donc autorisé de construire en ballot de paille en RW. Pour autant, le matériau paille est-il disponible pour cette utilisation ?

Selon la Stratégie de développement durable wallonne, la biomasse doit être utilisée de manière rationnelle. Cela signifie que la paille doit d'abord servir à l'alimentation humaine, ensuite à l'alimentation animale, puis en tant que fibre (litière, matériau de construction, etc.) et enfin en tant qu'énergie (Gouvernement Wallon 2016, pp.57-58). Dans ce cadre, l'utilisation de la paille en construction porte-t-elle préjudice à sa valorisation en litière pour les élevages ou à son enfouissement dans le sol pour dynamiser la terre de culture sur laquelle elle a poussé ?

Afin de vérifier la possibilité d'utiliser la paille dans le secteur de la construction, des estimations du « *potentiel paille pour la construction* » en Belgique ont été réalisées dans le cadre de l'étude aPROpaille. Suite à une étude de terrain, ils ont émis l'hypothèse qu'un tiers (33%) de toute la paille produite en Belgique est exportée hors du champ et que deux tiers de

la paille produite est directement restituée à la terre par broyage (Evrard et al. 2015a, p.87). Actuellement, la paille exportée du champ est majoritairement utilisée sous forme de litière pour les élevages (Evrard et al. 2015a, p.93).

La paille destinée à la construction ne peut être prélevée que sur le flux sortant du champ. Selon les estimations de l'étude aPROpaille, il est possible de couvrir la totalité des bâtiments résidentiels individuels avec seulement 50% de la paille exportable des sols, soit avec 16.5% de toute la paille produite en Belgique (Evrard et al. 2015a, p.105). Ces estimations mériteraient d'être approfondies et vérifiées. La comparaison avec les chiffres avancés par le RFCP pour la France semble soutenir la qualité des estimations réalisée par aPROpaille. En France, 5% de la production annuelle de paille (qui est d'environ 50 millions de tonnes par an) permettrait de construire 500.000 logements. Ce nombre est supérieur au nombre de logements construits tous les ans en France (RFCP 2014b, p.10).

Que la paille soit un coproduit¹⁶ de l'agriculture ou un déchet, il reste possible d'utiliser une part de la production de ce matériau pour construire un pourcentage important des bâtiments en Belgique et donc en Wallonie. Il est à noter que la paille peut être réutilisée une fois le bâtiment déconstruit, soit en l'intégrant à nouveau dans la filière agro (litière par exemple), soit en valorisation énergétique. Cela a déjà été réalisé : en 1980 au Nebraska, un bâtiment construit 75 ans auparavant fût déconstruit et la paille était suffisamment fraîche que pour être utilisée comme litière pour le bétail (Berge 2009, p.284).

Nous soulevons deux points d'attention pour le futur de la paille. Premièrement, la qualité de la paille a tendance à se détériorer. Les machines qui récoltent le grain le font sans considération pour la paille. Celle-ci est rendue plus fragile et donc moins adaptée à la construction (Daniel Fabian, agriculteur, BU3 ; P49). Deuxièmement, la pulvérisation d'intrants chimiques servant à contrôler la hauteur des plants de céréales apporte des risques pour l'utilisation de la paille en construction. Une mauvaise gestion des quantités pulvérisées peut mener à une paille trop petite qui compromet l'intégrité du ballot mais une utilisation raisonnée peut renforcer la paille, ce qui augmente la résistance du ballot (Daniel Fabian, BU3 ; P39 et Evrard et al. 2015a, pp.70-71)

¹⁶ « *Produit associé obtenu lors de la fabrication industrielle d'un produit noble, destiné le plus souvent à l'alimentation humaine, à partir d'une production agricole originelle (végétale ou animale).* » (Larousse 2002)

3.1.4 Constructions en ballots de paille en Wallonie

Il n'y a pas de recensement officiel des bâtiments en ballots de paille en Belgique. Toutefois, H.-J. Poskin, directeur du Cluster Eco-construction, propose une estimation sur base de sa connaissance du secteur. Il estime que chaque année, entre 50 et 100 maisons et annexes en ballots de paille sont construites en Belgique (BU2 ; P11). Rapportées aux 28.649 nouveaux permis de construire et de rénovation octroyés en Belgique en 2018 (Statbel 2019), cela représente environ 0.26% des nouveaux bâtiments et bâtiments rénovés¹⁷. En 2010, environ 700 bâtiments intégrant des bottes de paille ont été recensés en France. Le RFCP considère toutefois que leur nombre réel était à l'époque plus proche de 3.000 bâtiments (RFCP 2014b, p.10).

En RW, les bâtiments en ballots de paille sont construits en auto-construction ou par le recours à une entreprise de construction.

« {...} Moi ce que j'aime bien dans la construction paille, c'est qu'au jour d'aujourd'hui, depuis l'auto-construction, donc 100% indépendante, jusqu'à la construction clé sur porte avec Paille-Tech, tu as la possibilité de faire un peu tous les intermédiaires. Tu as des accompagnants à l'auto construction dorénavant {...} parce que tout le monde n'a pas la capacité financière de faire du clé sur porte, mais pas toujours les capacités non plus de tout faire lui-même {...}, c'est possible en paille mais pas possible en béton. {...} » (Daniel Fabian, BU3 ; P101)

Les auto-constructeurs

La faible technicité de la construction en ballots de paille permet facilement le recours à l'auto-construction (Chaussinand, Scartezzini, et Nik 2015, p.302). En RW, les premières constructions en ballots de paille sont le résultat de chantiers en auto-construction ; la première entreprise de construction en paille n'est apparue qu'il y a dix ans. L'auto-construction demeure aujourd'hui une source importante du développement de la construction en ballots de paille en Wallonie.

Nous avons rencontré deux auto-constructeurs wallons, Anne Bourgois et Benjamin D'Huyvetter, et un architecte, co-fondateur de l'AiSBL « bâtisseurs accueillants », Jean-Marie Delhaye, qui nous ont partagé leurs expériences. Ces expériences individuelles nous ont permis

¹⁷ Nous avons fait le calcul en considérant que 75 maisons et annexes en ballots de paille étaient construites annuellement.

de dégager quelques tendances, qui mériteraient d'être approfondies dans le cadre d'une étude sur l'auto-construction.

L'architecte A. Bourgois construit sa maison depuis plusieurs années à Gelbressée, dans la région namuroise. Elle travaille souvent seule, mais elle engage des corps de métier de temps à autre pour réaliser certaines tâches et elle a déjà réalisé quelques chantiers participatifs sur son terrain. Elle explique que la gestion d'un chantier participatif n'est pas toujours facile car il faut conseiller et vérifier le travail de chacun mais elle les apprécie car ils se déroulent dans le partage et dans la bonne humeur (BU8 ; P49 et P50). B. D'Huyvetter a construit un local technique de 20m² principalement seul sur son terrain à Beauraing, dans les Ardennes belges. Il a construit de cette manière pour des raisons financière et esthétiques mais aussi par envie d'expérimenter et d'apprendre de nouvelles choses (BU5 ; P05 et P06). Il a engagé un professionnel pour une seule journée car il voulait être certain de ne pas commettre d'erreur lorsqu'il a posé les ballots. (BU5 ; P12). B D'Huyvetter a été impressionné par la simplicité du procédé de construction (BU5 ; P23). Nous avons également mené un entretien avec J.-M. Delhaye qui a pris part à de nombreux chantiers participatifs, ce qui l'a conduit à prendre part à la création de l'AiSBL « Bâtitseur accueillant ». Cette AiSBL apporte un soutien logistique et administratif aux chantiers (BU7 ; P34). Elle propose aussi des assurances et de la formation pour les volontaires. J.-M Delhaye souligne que les motivations des volontaires sont : le partage, l'apprentissage et l'entraide (BU7 ; P37). Il met en évidence que peu importe l'âge du bâtisseur, celui-ci peut participer à la construction d'une maison en auto-construction. Cuisiner pour nourrir les autres volontaires, c'est participer à la construction de la maison : « *Elle fait sa maison, elle fait la soupe !* » (BU7 ; P31).

Selon les auto-constructeurs que nous avons interrogés, le recours à l'auto-construction est un moyen de réduire les dépenses de construction, de contrôler tous les aspects du chantier, de développer une connaissance approfondie de sa maison et d'acquérir de nouvelles connaissances techniques. L'auto-construction ne signifie pas que tout est fait par une seule personne. L'auto-constructeur peut faire appel à des professionnels selon les étapes du chantier ou se faire aider par des chantiers participatifs qui recèlent une dimension sociale au travers de l'apprentissage et de l'entraide. Donc échange de savoir, création de liens, valorisation des compétences, partage et entraide font partie intégrante du procédé.

Entreprises de construction

Nous avons rencontré les deux entreprises wallonnes spécialisées dans la construction en ballots de paille : EcoLodge et Paille-Tech. Ces deux coopératives réalisent des bâtiments préfabriqués dans leurs ateliers selon des processus constructifs innovants (Lefrancq Julien, BU11 ; P51).

La société **EcoLodge**, créée en 2017 à Hannut, produit des « WaldCube » en partenariat avec le bureau d'architecture ALTAR (Image à droite : WaldCube, EcoLodge 2019). La société a pour ambition la démocratisation de l'accès à l'habitat écologique passif



au travers de ses cubes en ballots de paille à bas prix (Mestdagh Vincent, coordinateur et administrateur de la société EcoLodge, BU01 ; P01). La société entend démocratiser l'accès au logement écologique via des prix réduits mais aussi via des délais de livraison très courts. Elle réalise le plan, le suivi et l'installation du WaldCube en seulement deux mois (BU01 ; P02 et P20). Pour arriver à cette rapidité de livraison, les WaldCube sont construits avant d'avoir trouvé un acquéreur. La société en a actuellement deux en attente. Un mois est nécessaire pour construire un WaldCube avec l'équipe actuelle. Il est monté en un jour (BU01 ; P06 et P26). Les WaldCubes ont des fondations sur pilotis : des vis sont ancrées plus ou moins profondément dans le sol. Ce type de fondation a été choisi afin de réduire l'impact sur le milieu et pour faciliter l'enlèvement ou le déplacement de la construction (BU01 ; P16). Les cubes sont fabriqués en série dans l'atelier. Les matériaux sont locaux. Toutes les parois (mur, toiture et sol) ont une composition identique : du bois et des petits ballots de paille (système ALTAR, cf. 4.2). Une bâche est ajoutée à la toiture pour l'étanchéité (BU01 ; P20 et P28). Le public cible de l'entreprise est sensible aux valeurs écologiques et environnementales. Elle recherche aussi des promoteurs immobiliers qui seraient prêts à installer des WaldCubes dans des écoquartiers afin d'éviter aux particuliers de devoir trouver un terrain et obtenir l'approbation de la commune (BU01 ; P08).

La société **Paille-Tech**, créée en 2009 et établie à Franière, a été la première société wallonne à construire des bâtiments en ballots de paille préfabriqués (Image à droite : maison Paille-Tech à Gentinne, Paille-Tech 2017). Elle privilégie les circuits courts et locaux. Par exemple, elle utilise les ballots de paille de F. Daniel, achète son bois en



Allemagne et utilise de la terre locale, etc. (Paille-Tech 2018, pp.4-8). Paille-Tech travaille en collaboration avec la coopérative d'architecte Karbon' (*Ibidem*, p.4). Les maisons qu'elle construit sont écologiques et « modernes ». Moderne dans le sens où il y a une volonté de les faire ressembler aux maisons traditionnelles contemporaines (*Ibidem*, p.11). Paille-Tech propose des maisons 4 façades ou mitoyennes, de deux ou trois étages, préfabriquées en trois semaines et montées en une semaine (*Ibidem*). L'entreprise propose différentes enveloppes extérieures : bardage en bois, enduit, ardoise, pierre ou brique (*Ibidem*, p.21).

Le marché de la construction en ballots de paille en Wallonie est un micromarché. On y trouve des auto-constructeurs et des sociétés de construction, qui se développent depuis une dizaine d'années. La construction en ballots de paille est un marché de niche au sein du secteur de la construction wallonne.

3.2 Techniques de construction intégrant des ballots de paille comme isolant de façade

« {...} pour moi le plein potentiel du matériau c'est un ballot de paille avec un enduit respirant de part et d'autre. Le plus massif possible, c'est là qu'on rencontre pour moi le matériau vraiment à son plein potentiel. À savoir, il est isolant, il fait de la régulation hydrothermique et là il n'y a aucune paroi sur le marché qui le fait, ni synthétique ni naturel et moi j'insiste sur le ballot de paille quand je le vends, je ne le vends pas parce qu'il est local, parce qu'il est bio, parce qu'il est écologique, parce qu'il est alternatif, pour moi tout ça c'est très secondaire. La première raison d'acheter et de construire en paille c'est parce que c'est le matériau et l'habitation la plus confortable sur le marché. » (Daniel Fabian, agriculteur et auto-constructeur, BU3 ; P61).

Fondations, lisse basse et lisse haute

Un bâtiment en ballots de paille est constitué des mêmes éléments constructifs que les autres constructions : des fondations, une lisse basse et haute, un élément structurel, un isolant, un parement et un toit. Les fondations sont nécessaires pour garantir la stabilité de l'habitation. Il

peut s'agir d'une dalle en béton, de pilotis, de pierres, de béton de chanvre, etc. Une lisse basse (dans le bas du mur) et une lisse haute (dans le haut du mur) doivent également être installées. La lisse basse est une bande ancrée aux fondations qui sert à stabiliser et à surélever le mur afin de l'isoler des remontées capillaires, des infiltrations d'eau et des inondations légères (Myhrman et MacDonald 1997, 47; RFCP 2014b, pp.44-46). La lisse haute est la bande fixée au sommet du mur qui sert à supporter le toit ou le plancher s'il y a un étage (Evrard et al. 2015b, p.250).

Les murs

Le ballot de paille a une particularité: c'est le seul matériau biosourcé à pouvoir être un élément structurel, un support d'enduit et un isolant (Evrard et al. 2015c, p.22; King et de Bouter 2009, chap. 4.Structure; Maraldi et al. 2018, p.82). Ces multiples propriétés permettent de le mettre en œuvre dans différents systèmes constructifs et donc de l'intégrer à des murs de différents types. La terre et le bois sont les matériaux les plus communément associés aux ballots de paille pour la construction d'un mur mais le béton et la brique peuvent également être utilisés. Nous analysons les différents systèmes constructifs comprenant des ballots de paille : la technique des ballots porteurs (A), le système non porteur (B) et des systèmes mixtes (C).

(A) Technique des ballots porteurs

Dans la technique des ballots porteurs (aussi appelé technique Nebraska), le ballot de paille joue un rôle structurel, il est l'élément porteur qui permet au mur de supporter la charpente. C'est la façon la plus ancienne de réaliser un habitat avec des ballots de paille (cf. 4.1.2). Les ballots sont disposés en quinconce sur toute la hauteur du mur. Ils sont maintenus ensemble (ou non) par des pieux plantés à travers les ballots. Une fois que les murs sont érigés, ils doivent être pressés intensément afin que la paille puisse supporter le toit. Lorsque les ballots se sont tassés, un enduit est appliqué sur les deux faces des ballots (Myhrman et MacDonald 1997, pp.57-64). C'est la combinaison de ballots pressés et de l'enduit qui permettent au mur d'être « porteur ». La qualité de la maison dépend fortement du type de ballots utilisés : des ballots homogènes en pression et suffisamment denses empêchent le mur de se déformer.

Figure 10 : Schéma de construction avec la technique des ballots porteurs



Source : RFCP 2014a

(B) Système non porteur : ossature bois avec isolation en ballots de paille

Le ballot de paille peut être utilisé en construction pour ses qualités d'isolant. Dans un système non porteur, le ballot est l'isolant et l'élément structurel est une ossature en bois. Celle-ci est réalisée de la même façon que pour une maison en bois « classique ». Au lieu de remplir l'ossature d'un isolant conventionnel, des ballots de pailles y sont insérés. Les murs sont dimensionnés expressément pour les ballots (Gruber et Gruber 2003, p.80). L'ossature bois et l'isolation peuvent être réalisées directement sur le chantier (ci-dessous figure de gauche) ou bien préfabriquées en atelier puis érigées sur le chantier à l'aide d'une grue (figure de droite). Un enduit ou un bardage vient recouvrir le mur (Fruchard et Piaud 2015, p.15).

Figure 11 : Schéma de construction avec une ossature en bois



À gauche : une structure porteuse en bois remplie de ballots de paille pour l'isolation.

À droite : un module préfabriqué composé de mêmes éléments.

Source : RFCP 2014a

La technique ALTAR est une technique belge de préfabrication. C'est la technique inventée par le bureau d'architecture ALTAR qui travaille avec EcoLodge. Ici, des montants en bois forment une ossature dans laquelle des ballots de 30 cm d'épaisseur sont insérés de force. Un pare-vapeur, des panneaux en fibre de bois et un bardage viennent compléter le mur (Evrard et al. 2015b, pp.42-44). Cette technique belge répond au critère « passif » ou basse énergie selon la surface du cube (EcoLodge 2019). Paille-Tech n'a pas souhaité dévoiler les détails de son procédé de construction mais il est globalement très proche de celui d'EcoLodge (Paille-Tech 2018). La paroi de Paille-Tech est également un module préfabriqué composé d'une ossature bois et d'un isolant en ballots de paille.

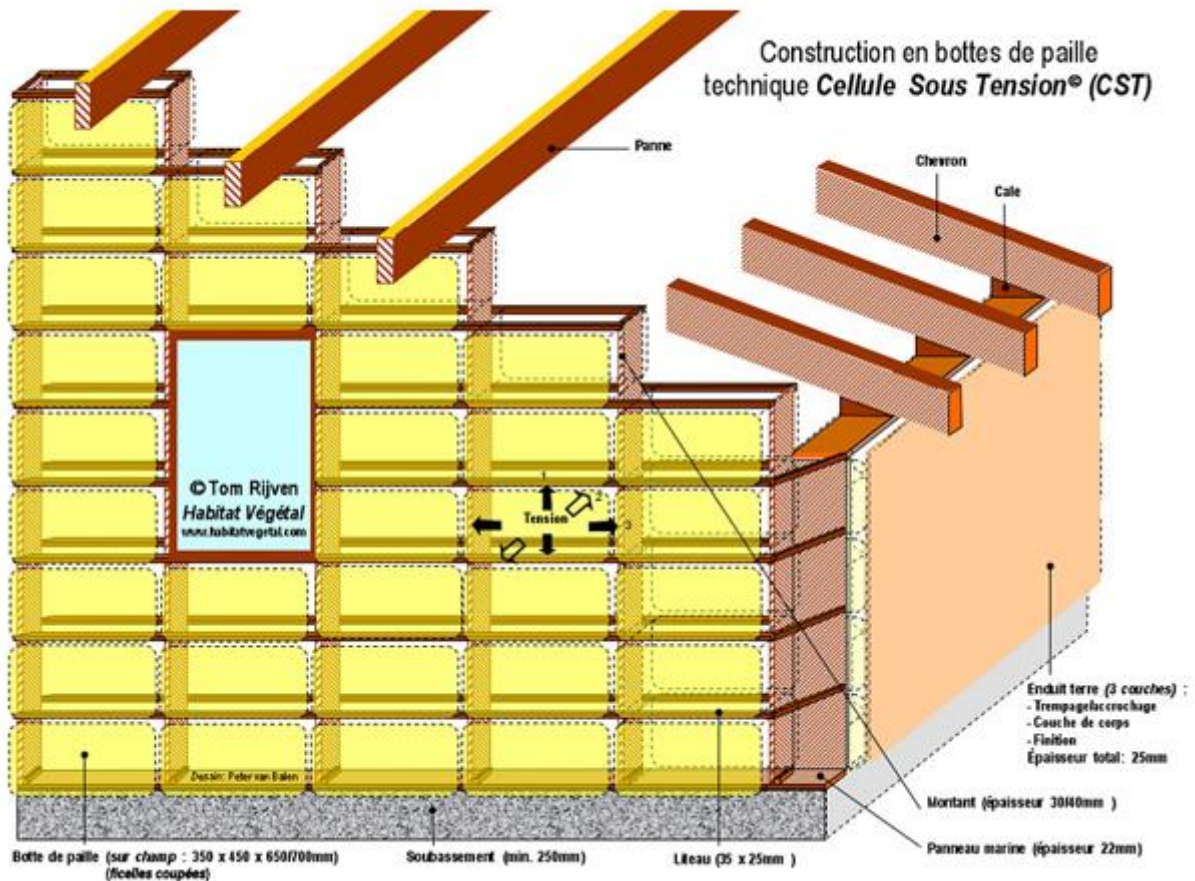
(C) Systèmes mixtes

Dans un système mixte, les ballots de paille sont associés à un ou plusieurs autres matériaux ou éléments pour former la structure porteuse du bâtiment. Le rôle structurel peut être assuré par exemple par les ballots de paille et par des murs intérieurs (en bois, en terre, en brique, etc.) ou

par une ossature légère en bois ou encore par des portes et des fenêtres soutenues par des poteaux fixés aux fondations (Gruber et Gruber 2003, p.78; Minke et Mahlke 2005, p.38 et Daniel Fabian, BU3 ; P67). Nous présentons deux systèmes mixtes qui associent les ballots de paille et le bois : la CST et le GREB.

La cellule sous tension (CST)

Figure 12 : Schéma de construction avec la technique CST

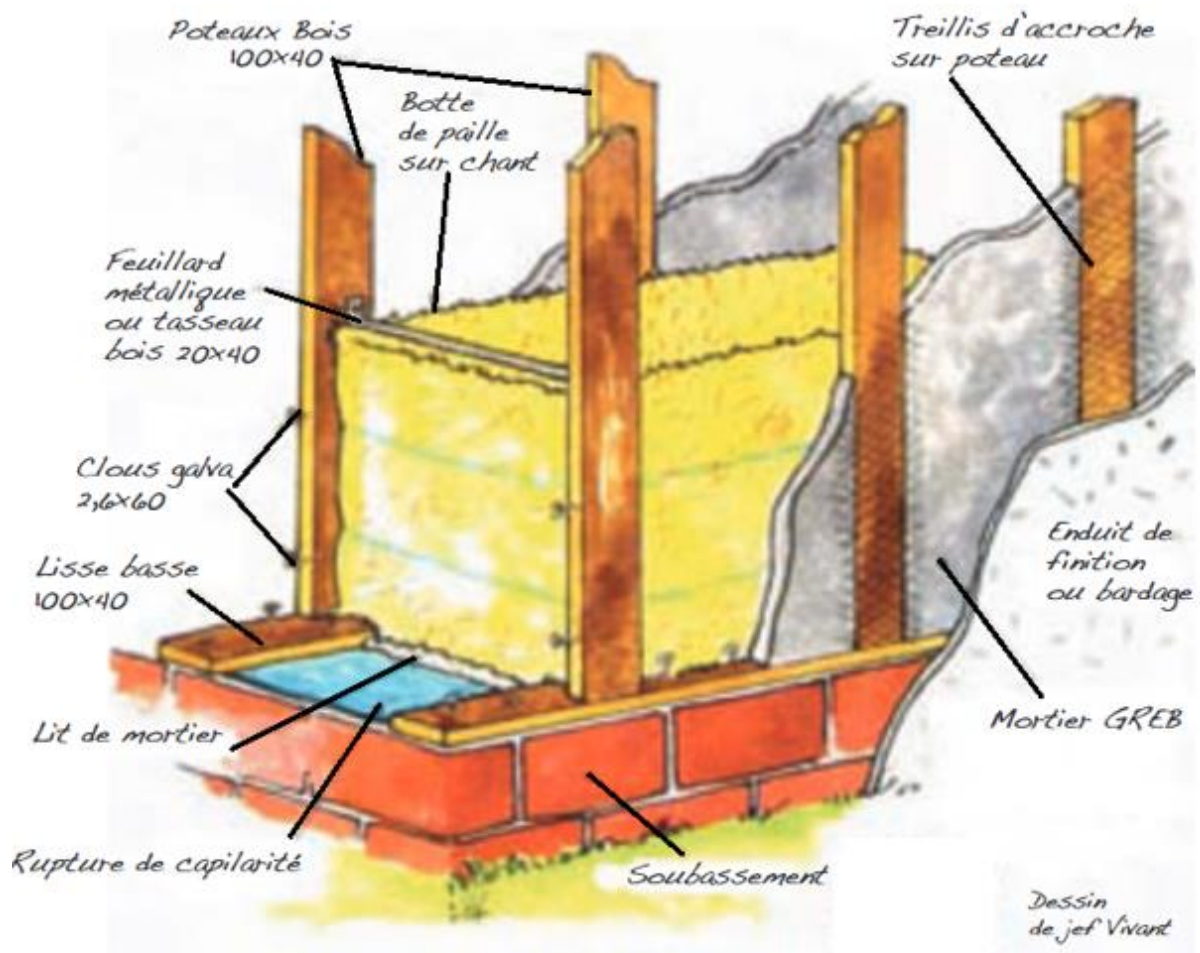


Source : schéma de Peter van Balen dans Rijven 2008, p.14

Dans son livre « *Entre paille et terre* » (2008), Tom Rijven décrit un système constructif qu'il a inventé : « la cellule sous tension » (CST). Les ballots sont comprimés verticalement par des montants et horizontalement par des liteaux en bois. Les ballots sont donc comprimés dans des « cellules » trop étroites. La ficelle du ballot est alors coupée, ce qui libère la tension et donne sa résistance au mur. Un enduit est ensuite appliqué sur les faces intérieures et extérieures des murs.

La technique du GREB

Figure 13 : Schéma de construction avec la technique GREB



Source : Approche-Paille 2012, p.4

La technique du GREB (Groupe de Recherches Ecologiques de la Baie) a été développée au Canada au milieu des années 90. La combinaison particulière de la structure légère en bois, des ballots de paille et de l'enduit permet d'assurer le rôle structurel. Les ballots de paille sont insérés dans une double ossature en lattes de bois. Un mortier allégé à la sciure de bois est coulé des deux côtés, entre les lattes de bois. Cette technique mixte est particulièrement simple, ce qui la rend très appréciée des auto-constructeurs.

Nous proposons une synthèse des avantages et désavantages des systèmes avec ballots porteurs et des systèmes avec des ballots non porteurs sur base des travaux de Myhrman et MacDonald (1997, p.21) et de Jones (2001, pp.8-10).

	Avantages	Désavantages
Ballots porteurs	Principes de construction simples et rapides	Attente avant la pose du toit et de l'enduit pour que les ballots se tassent
	Design simple	Contraintes dans le design : éviter les grandes ouvertures et un toit lourd
	Répartition égale de la charge sur les fondations	Besoin de ballots denses et uniformes
	Economies de matériaux et d'argent	Sensible aux chocs et aux charges importantes
		Obligation de poser les ballots à plat
Ballots non porteurs	Système constructif plus connu et reconnu	Coût plus élevé
	Protection de la paille par le toit durant le chantier	Chantier plus long
	Pas d'attente pour poser l'enduit	Besoin de compétences élargies en menuiserie
	Possibilité d'utiliser des ballots moins denses	Besoin de fondations plus résistantes
	Possibilité de poser les ballots sur la tranche	Utilisation de beaucoup de bois
	Design moins contraint au niveau des ouvertures	
	Préfabrication possible	

Les enduits et les bardages

Les enduits et les bardages jouent un rôle capital dans la construction en ballots de paille. Leur fonction est de protéger la paille de l'humidité et des parasites. L'enduit sert également à apporter une inertie thermique au bâtiment. Il existe différents types d'enduits et de bardages, porteurs chacun d'avantages et d'inconvénients spécifiques. Un enduit se compose de quatre éléments principaux : un liant (du ciment, de la chaux, de l'argile ou encore du plâtre) pour rendre l'enduit collant (1), de l'eau (2), une charge pour donner du volume à l'enduit (du sable ou de la roche concassée) (3) et des fibres (paille hachée, chanvre, etc.) ou un treillis (métal ou plastique) pour renforcer la cohésion et l'élasticité de l'enduit et pour pouvoir l'étaler plus

finement (4) (King et de Bouter 2009, pp.48-50). Un bardage est une couche extérieure qui protège le bâtiment. Il peut être en bois, en métal ou en tôle par exemple.

L'enduit à base de ciment est peu perméable à la vapeur d'eau. Il a donc tendance à enfermer l'humidité dans les murs. Produit industriellement, d'autres types d'enduits lui sont souvent préférés en association avec la paille (Minke et Mahlke 2005, p.52). L'enduit à base de chaux est aussi produit industriellement mais son procédé est moins complexe (King et de Bouter 2009, p.54). Moins rigide et moins friable que l'enduit de ciment, il est facile à appliquer. Son séchage est toutefois plus complexe (*Ibidem*, pp.54-55 et Minke et Mahlke 2005, p.50). L'enduit à base de chaux est très perméable à l'eau, ce qui est à la fois un avantage (séchage) et un inconvénient (absorption). Le temps a tendance à renforcer les qualités de l'enduit en chaux : sa résistance augmente par l'absorption naturelle de carbone (King et de Bouter 2009, p.55).

« {...} on étudie la terre depuis longtemps, {...} on n'a pas fini de tout comprendre, comment ça marche. Et si on était au moyen âge en train d'écrire ça, on dirait que ça serait magique parce qu'on n'a pas encore fini de tout comprendre. Pourquoi ça a autant de bienfaits {...} mais on ne connaît pas tout » (Delhaye Jean-Marie, BU7 ; P69

Les enduits à base d'argile sont les premiers à avoir été utilisés. La seule transformation dont l'argile a besoin pour devenir un enduit est la déshydratation. L'argile est hydrophile : *« elle absorbe l'humidité déjà présente dans les matériaux puis (une fois arrivée à saturation) empêche toute nouvelle humidification »* (King et de Bouter 2009, p. 59). Tous les enduits de terre sont différents, c'est pourquoi il est important de les tester si la terre locale est utilisée (*Ibidem*). L'application d'un enduit à base d'argile est très facile pour les auto-constructeurs, il peut être posé directement sur la paille en couches successives. (*Ibidem*, p.61 et Réseau français de la construction en paille 2014b, p.113 et pp.116-117). Le problème principal de cet enduit est qu'il s'érode avec le temps s'il n'est pas bien protégé par le toit ou par un bardage (King et de Bouter 2009, p.59).

L'enduit à la terre et à la chaux sont les plus performants pour un mur en ballots de paille car ils permettent de réguler l'humidité contenue dans le mur en absorbant par capillarité la vapeur d'eau contenue dans une pièce et en la faisant migrer vers l'extérieur. Les règles professionnelles de la construction en paille française expliquent d'ailleurs en détail comment poser ces deux enduits alors qu'elles ne mentionnent pas les enduits à base de ciment (RFCP

2014b, pp.106-117). Tom Rijven préconise l'utilisation d'un enduit terre-argile ou d'un enduit chaux et déconseille également un enduit en ciment car il empêche le mur de respirer (Rijven 2008). Les enduits peuvent être complétés par des membranes ou films protecteurs en plastique synthétique (pare-vapeur, frein-vapeur, pare-pluie) afin de réguler sur des zones murales à haut risque d'infiltration. Ces membranes doivent être utilisées avec parcimonie afin de permettre le séchage des murs (King et de Bouter 2009, pp.201-203 et Minke et Mahlke 2005, p.50).

3.3 Caractéristiques techniques de la construction en ballots de paille

Quelques recherches scientifiques se sont donné pour objet de déterminer les caractéristiques techniques du matériau ballot de paille. Les chercheurs ont cherché à définir ses performances thermiques, sa résistance à l'humidité, au feu et aux parasites ainsi que ses performances acoustiques et ses effets sur la santé. Ces recherches donnent des « fourchettes » et non des chiffres précis et arrêtés. Selon D'Alessandro, Sciavoni et Bianchi (2017), cela est dû à deux raisons en particulier. La première est que les ballots de paille, à l'inverse des autres matériaux de construction, sont vendus par des agriculteurs, qui ne sont pas des marchands de matériaux. Ils ne disposent donc pas de fiches techniques qui détaillent précisément les performances du matériau. Les données techniques ne sont donc pas disponibles à priori. La deuxième raison est qu'il n'y a pas un ballot de paille qui est identique à un autre. Les performances du ballot dépendent du type de céréale, du processus de séchage et de récolte, de l'humidité contenue dans le ballot, du processus de production du ballot, etc. Des ballots produits différentes années par un même agriculteur ont des propriétés différentes (D'Alessandro, Schiavoni, et Bianchi 2017, p.2).

Nous présentons une analyse succincte de ces premières recherches afin d'évaluer si le matériau ballot de paille permet de construire des parois et des bâtiments qui répondent aux critères de la construction traditionnelle en Wallonie. Nous intégrons également quelques éléments issus de nos entretiens. Nous décrivons le cadre théorique de chaque caractéristique technique, nous analysons les performances de la paille en la matière et nous les comparons alors brièvement avec les performances d'un ou plusieurs matériaux traditionnels.

3.3.1 Performance thermique

La performance thermique d'un matériau s'évalue via sa conductivité thermique λ (lambda). La conductivité thermique est la capacité du matériau à laisser passer la chaleur. Plus la valeur lambda est faible, plus le matériau est isolant, plus elle est élevée, plus le matériau est

conducteur. L'inverse de la conductivité thermique est la résistance thermique (R). Elle correspond à la capacité du matériau ou de la paroi à ralentir le transfert de la chaleur. Le coefficient de transmission thermique (U) est inversement proportionnel à la résistance thermique (R).

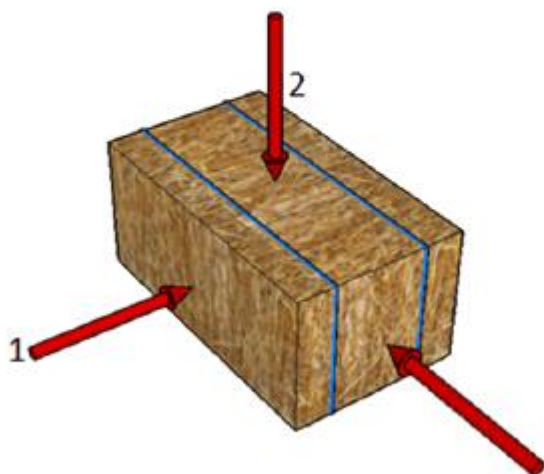
	Formules
Conductivité thermique (λ)	$\lambda = W / m \cdot K$ (W = Watt, m = mètre, K = degré Kelvin)
Résistance thermique (R)	$R = e / \lambda$ S'exprime en $m^2 \cdot K / W$ (e = épaisseur du matériau)
Transmission thermique (U)	$U = 1/R$ S'exprime en $W / m^2 \cdot K$

Les recherches attribuent aux ballots de paille et aux parois composées de ballots de paille des valeurs λ variables et donc des valeurs R et U variables. Ces écarts peuvent s'expliquer par différents paramètres : le type de paille utilisée, l'humidité contenue dans celle-ci, la densité et l'épaisseur des ballots, la quantité d'air contenue dans et entre les ballots, l'orientation des fibres du ballot, l'épaisseur de l'enduit, la présence d'enduit entre les ballots (D'Alessandro et al. 2017, p.58).

Selon l'étude aPROpaille menée en Belgique, la densité du ballot est l'élément qui impact le plus la conductivité thermique. Une densité plus faible permettra d'avoir un meilleur isolant à condition de maintenir une densité suffisamment importante pour que la structure du ballot ne soit pas compromise. L'étude estime que la densité la plus courante est d'environ 100kg/m^3 . Une densité inférieure à 90kg/m^3 fragilise le ballot alors qu'une densité supérieure à 110kg/m^3 augmente sensiblement la conductivité thermique et occasionne des difficultés pour la manipulation des bottes (Evrard et al. 2015, p.77).

Un autre paramètre qui influence la conductivité thermique du mur en botte de paille est la façon dont les ballots sont disposés : à plat (quand les ballots sont posés sur leur face la plus large, sur la face 2 de la figure ci-dessous) ou sur chant (quand les ballots sont posés sur la tranche, sur la face 1 de la figure ci-dessous).

Figure 14 : Schéma sur l'orientation du flux de chaleur par rapport à la pose de la botte



Source : Evrard et al. 2015b, p.105 3

De nombreux travaux relèvent que les ballots de paille posés sur chant ont un pouvoir isolant supérieur à celui des ballots posés à plat¹⁸. Cela s'explique par l'orientation des fibres de la paille : lorsque l'orientation de la paille est parallèle à l'orientation du flux de chaleur, la conductivité thermique augmente. Selon l'étude comparative de B. King et A. de Bouter sur le comportement

thermique de ballots de paille de blé à travers l'Europe (Allemagne, Autriche, France, Danemark), les ballots de paille posés à plat (45 cm d'épaisseur) ont une conductivité thermique (λ) allant, de 0.06 W/m.K à 0.1 W/m.K. Les ballots posés sur chant (35 cm d'épaisseur) ont une conductivité thermique (λ) inférieure, 0.062 W/m.K et donc un pouvoir isolant supérieur. La résistance thermique (R) d'un mur sans ossature en bois ni pont thermique, avec des bottes de 45 cm d'épaisseur posées à plat est de 5.9 m². K/W. Si le mur est construit avec des bottes sur chant (35cm d'épaisseur), la résistance thermique est aussi de 5.9 m². K/W ($U=0.169$ W/m². K). Cela signifie que les bottes posées sur chant permettent de construire un mur plus étroit pour une résistance thermique égale (King et de Bouter 2009, p. 230).

L'étude aPROpaille en revanche ne conclut à aucune différence de conductivité thermique que les ballots soient posés sur chant ou à plat (Evrard et al. 2015b, p.105). Elle estime que la conductivité moyenne est de 0.071 W/m.K dans les deux cas.

Schiavoni et al. (2016) ont réalisé une étude comparative des caractéristiques techniques de différents matériaux isolants « commerciaux » et « non conventionnels ». Voici leur tableau récapitulatif :

¹⁸ Sabapathy et Gedupudi 2018, p.193; F. D'Alessandro et al. 2017, p.58; Costes et al. 2017, p.5; Shea, Wall, et Walker 2013, p.3; King et de Bouter 2009, p.230

Figure 15 : Tableau récapitulatif sur les performances de matériaux conventionnels et alternatifs

Table 6
Thermal insulation performance, reaction to fire classification and μ -value of commercial and unconventional products.

	Density (kg/m ³)	Thermal conductivity (W/m.K)	Specific heat (kJ/kg.K)	Fire classification	Water vapor diffusion resistance factor, μ -value	References
Commercial materials						
Stone wool	40–200	0.033–0.040	0.8–1.0	A1–A2-B ^a	1–1.3	[63–68]
Glass wool	15–75	0.031–0.037	0.9–1.0	A1–A2	1–1.1	[63,65,67,69,70]
Expanded Polystyrene	15–35	0.031–0.038	1.25	E	20–70	[63,65,66,67,69,72,73,74]
Extruded Polystyrene	32–40	0.032–0.037	1.45–1.7	E	80–150	[65,67,69,73,75,76]
Phenolic foam	40–160	0.018–0.024	1.3–1.4	B–C	35	[77–81]
Polyurethane	15–45	0.022–0.040	1.3–1.45	E	30–170	[65–67,69,76,100]
Polysiocyanurate	30–45	0.018–0.028	1.4–1.5	B	55–150	[76], [78], [88]
Cellulose	30–80	0.037–0.042	1.3–1.6	B–C–E	1.7–3.0	[89–92]
Cork	110–170	0.037–0.050	1.5–1.7	E	5–30	[66,95–98]
Wood fibers	50–270	0.038–0.050	1.9–2.1	E	1–5	[66,102–105]
Mineralized wood fibers	320–600	0.060–0.107	1.8–2.1	B	5	[66,97,98,104,108]
LECA	290–750	0.08–0.200	0.9–1.0	A1	5.0–8.0	[66,67,111]
Expanded vermiculite	30–150	0.062–0.100	0.8–1.1	A1	2.0–3.0	[80,98,112,113]
Expanded perlite	80–150	0.040–0.052	0.9–1.0	A1	2.0–3.0	[116,118–120]
Hemp fiber	20–90	0.038–0.060	1.6–1.7	E	1.0–2.0	[98,125,126]
Hemp fiber and chips	29–82	0.039–0.049	N.A.	N.A.	2.1–4	[66,131–134]
Kenaf	30–180	0.034–0.043	1.6–1.7	D–E ^b	1.2–2.3	[137]
Flax	20–100	0.038–0.075	1.4–1.6	E	1.0–2.0	[104–142]
Sheep wool	10–25	0.038–0.054	1.3–1.7	E	1.0–3.0	[98,125]
Coir fiber	75–125	0.040–0.045	1.3–1.6	D–E ^b	5.0–30	[119,139,148–150]
Recycled rubber	500–930	0.100–0.140	N.A.	D–E ^b	14	[104,119]
Jute fiber	35–100	0.038–0.055	2.3	E	1–2	[156–159]
VIP	160–230	0.0035–0.008	0.8	A1 ^c	Up to 340,000	[98,119,134,141]
GFP	N.A.	0.010 (Krypton)–0.035 (air)	N.A.	N.A.	Very high	[78,166–171]
Aerogel (rolls, panels)	70–150	0.013–0.015	1.0	C	5.0–5.5	[174–176]
Aerogel (granular)	120–180	0.022	N.A.	N.A.	N.A.	[67,177–179,191]
Unconventional materials						
Bagasse	70–350	0.046–0.055	N.A.	N.A.	N.A.	[153–155]
Cotton (recycled denim)	NA	0.036–0.038	N.A.	N.A.	N.A.	[197]
Cotton (stalks)	150–450	0.059–0.082	N.A.	N.A.	N.A.	[198]
Cotton (recycled)	25–45	0.039–0.044	1.6	E	1–2	[199]
Date palm	187–389	0.072–0.085	N.A.	N.A.	N.A.	[200,201]
Durian	357–907	0.064–0.185	N.A.	N.A.	N.A.	[202]
Oil palm	20–120	0.055–0.091	N.A.	N.A.	N.A.	[154]
Pineapple leaves	178–232	0.035–0.042	N.A.	N.A.	N.A.	[203]
Reeds	130–190	0.045–0.056	1.2	E	1–2	[204–207]
Recycled glass fiber	450	0.031	0.83	N.A. (probably A1 or A2)	N.A.	[208]
Recycled glass fiber (commercial)	100–165	0.038–0.05	1.0	A1	Very high	[209,210]
Recycled PET	30	0.036	N.A.	N.A.	N.A.	[211]
Recycled PET (commercial)	15–60	0.034–0.039	1.2	B	3.1	[139]
Recycled textile (commercial)	30–80	0.036–0.042	1.2–1.6	E, F	2.2	[139,140,212,213]
Recycled textile fibers (polyester and polyurethane)	440	0.044	N.A.	N.A.	N.A.	[214]
Recycled textile fibers (synthetic)	200–500	0.041–0.053	N.A.	N.A.	N.A.	[215]
Rice	154–168	0.046–0.566	N.A.	N.A.	N.A.	[216]
Sunflower (pith)	36–152	0.039–0.050	N.A.	N.A.	N.A.	[217]
Straw bale	50–150	0.038–0.067	0.6	N.A.	N.A.	[218–220]

NA, not available.

^a Class B assigned to stone wool mixed with other material (aerogel, mineralized wool).

^b Uncertain classification: original class given in compliance with another standard (DIN 4102).

^c The majority of manufacturers declare A1 class, but some research works such as [192] observe that the incombustible silica may be covered by highly inflammable multi-layered polymer film.

Source : Schiavoni et al. 2016, p.994

La deuxième colonne compile la performance thermique des matériaux isolants. Le ballot de paille (straw bale - tout en bas du tableau) a une conductivité thermique allant de 0.038 à 0.067 W/m.K. Cette estimation plus faible octroie donc un pouvoir isolant supérieur au ballot de paille. En comparaison avec d'autres matériaux traditionnels, à épaisseur égale, l'utilisation de ballots de paille pour l'isolation est moins performante : 0.036 W/m.K pour la laine de roche, 0.034 W/m.K pour la laine de verre, 0.031 W/m.K pour le polyuréthane et 0.039 W/m.K pour la cellulose.

Depuis 2017, la réglementation de la PEB impose un coefficient de transmission thermique (U) maximum 0.24 W/m².K pour les murs extérieurs (SPW: DGO4 2016, p.4). Cette exigence sera maintenue après 2021. Nous avons réalisé des calculs afin d'estimer l'épaisseur d'isolation nécessaire pour répondre à cette exigence selon le type de matériau¹⁹. Nous avons sélectionné les valeurs de conductivité thermique (lambda) dans le programme PEB version 10.0.3 (mis à disposition gratuitement sur le site energie.wallonie.be) pour la paille, le polyuréthane, la laine minérale et la cellulose.

En Belgique, dans le logiciel PEB, on retrouve un seul ballot de paille flamand certifié dont le lambda est de 0,06. Cela signifie que ce lambda a été utilisé lors du calcul de la PEB pour toutes les constructions en ballots de paille construites en RW. Paille-Tech par exemple, utilise ce lambda (Lefrancq Julien, Paille-Tech, BU11 ; P31). Nous avons pourtant montré que les variations sont relativement importantes selon les ballots utilisés.

Pour arriver à $U_{max} = 0.24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, avec $U = 1/R$

alors, $R = 1/0.24 = 4.17 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Or, $R = \text{épaisseur}/\lambda$,

donc $4.17 = \text{épaisseur}/\lambda$. Pour calculer l'épaisseur du mur, il faut réaliser l'équation :

Épaisseur du mur = $4.17 \times \lambda$.

	Paille	Polyuréthane	Laine minérale	Cellulose
Lambda dans le programme PEB (W/m.K)	0.06	De 0.019 à 0.04	De 0.03 à 0.045	De 0.037 à 0.041
Lambda retenu pour les calculs (W/m.K)	0.06	0.029	0.037	0.039
Épaisseur du mur (centimètre)	25	12	14	16

Ces calculs sont des estimations, elles n'ont vocation qu'à donner une idée générale des ordres de grandeur. La pose des matériaux, le choix précis du fournisseur de matériau, la combinaison

¹⁹ Pour ces calculs, nous n'avons pas pris en compte les associations avec d'autres matériaux.

avec d'autres matériaux, etc. influencent les valeurs obtenues. Nous pouvons néanmoins émettre l'hypothèse qu'il faut une épaisseur de paille deux fois plus importante que l'épaisseur de polyuréthane, de laine de verre voir de cellulose pour arriver aux mêmes coefficients de transmission thermique.

Il est important de préciser qu'un ballot de paille ne fait pas 24 cm d'épaisseur mais 35 ou 45 cm. Cette épaisseur permet d'atteindre un coefficient de transmission thermique (U) avec le lambda de la PEB (0.06) de seulement 0.17 et 0.13 W/m². K, ce qui est bien inférieur de la limite fixée par la PEB (0.24 W/m². K). Par conséquent, les variations du lambda restent trop faibles pour faire basculer les conclusions sur la qualité thermique de la paille. Tant que le lambda ne dépasse pas 0.1 W/m.K, le bâtiment répondra aux exigences de la PEB concernant l'enveloppe extérieure ($U \leq 0,24$).

L'étude aPROpaille met aussi en évidence que l'épaisseur des murs en ballots de paille, associée à un enduit en terre de 4 cm de chaque côté du mur, peut représenter un avantage en termes d'inertie thermique (Evrard et al. 2015b, pp.147-150). L'équilibre entre la masse du bâtiment et son isolation permet une plus grande stabilité de la température et donc un confort supérieur (Evrard et al. 2015b, pp.147-150). Cette épaisseur de mur conséquente peut représenter un désavantage en raison de la perte de place qu'elle occasionne principalement lorsque la construction est destinée à la ville ou à un terrain exigu.

3.3.2 Résistance à l'humidité

L'humidité est la présence d'eau (sous forme liquide ou sous forme de vapeurs) dans un corps. Si un certain taux d'humidité est recommandé pour l'air de la maison, il n'est en revanche pas souhaitable que de l'humidité soit présente dans les murs. Elle a tendance à les faire vieillir prématurément et à rendre l'habitation insalubre. Pour les maisons construites avec des matériaux biosourcés comme les ballots de paille, la question de l'humidité est d'autant plus importante qu'elle peut faire moisir les murs qui petit à petit vont se décomposer à cause de l'activité microbienne. L'humidité doit être contrôlée à plusieurs moments : lors de la fabrication des ballots, lors de l'élaboration des plans de construction et lors de la pose sur chantier.

Pour que des microorganismes se développent et décomposent la paille, quatre conditions doivent être réunies : ils doivent avoir accès à des nutriments, à de l'oxygène, à une température adéquate (de 10 à 70°C) et à de l'eau libre. Dans un ballot, l'humidité est le facteur déclencheur de la décomposition de la paille (King et de Bouter 2009, pp.161-162). Selon le RFCP, la teneur

en eau sur poids sec de la paille (mesurée à l'aide d'un humidimètre) ne doit pas dépasser les 20% (RFCP 2014b, p.22). Selon King et de Bouter (2009), le taux de croissance microbienne commence lorsque la paille dépasse une teneur en eau de 30%. Si la teneur en eau dépasse les 60%, un second pic de croissance microbienne est observé (King et de Bouter 2009, p.169). Selon l'étude de Thomson et Walker, après une première croissance de moisissure, les futures croissances de moisissure n'auraient plus d'impact significatif sur la structure de la paille car la première croissance limite les ressources nécessaires aux croissances suivantes. Ils estiment donc que la paille est capable de résister périodiquement à des teneurs en humidités relativement élevées sans compromettre la structure du bâtiment. L'étude ne dit cependant pas combien de temps le mur en ballots de paille peut contenir des valeurs élevées d'humidité sans que la structure soit compromise (Thomson et Walker 2014, pp.139-141).

Au moment de l'élaboration des plans, il est essentiel d'adapter le bâtiment à sa situation géographique afin d'éviter les infiltrations d'eau dans les murs en ballots de paille au cours de la vie du bâtiment. La météorologie, les eaux de ruissellement, les vents dominants doivent être étudiés et le bâtiment doit y être adapté : il faut empêcher la pluie battante d'atteindre le cœur du mur, canaliser les eaux de ruissellement, empêcher les remontées capillaires causées par des contacts entre le mur et le sol, etc. (RFCP 2014b, pp.48-49). Ces précautions doivent être prises afin d'assurer la résistance à l'humidité d'un bâtiment en ballot de paille. Dans le cadre de l'étude wallonne « aPROpaille », différents murs en ballots de paille exposés aux pluies battantes ont été testés. Les murs protégés par un bardage résistent bien à l'humidité à condition que la perméabilité à la vapeur d'eau soit plus importante du côté extérieur du mur que du côté intérieur du mur. Cet écart permet le séchage du mur par la migration de l'humidité de l'intérieur du bâtiment vers l'extérieur. Cette condition est identique pour les murs enduits de terre ou de chaux (Evrard et al. 2015b, pp.121-125).

Selon King et de Bouter, les risques d'infiltration d'eau dans la paroi et les bottes de paille sont plus importants au moment de la construction du bâtiment car la paille n'est pas protégée à ce moment-là. Néanmoins, si le toit est déjà posé sur une ossature en bois, les ballots de paille peuvent être insérés dans les murs à l'abri des intempéries (King et de Bouter 2009, pp.204-205).

Afin de comparer la résistance de la paille à l'humidité à celle d'autres matériaux, nous avons utilisé le comparatif de la société Homeco, experte dans la rénovation du bâti et dans l'étude des nouvelles constructions. Selon Homeco, les isolants naturels sont sensibles à l'humidité alors que les isolants à base minérale, comme la laine de roche et la laine de verre, y résistent

bien. Les isolants synthétiques comme le polyuréthane et le polystyrène sont encore plus résistants, voir non altérables (Homeco s. d.). Les bottes de paille sont sensibles à l'humidité. Des précautions et une planification rigoureuse permettent toutefois d'accroître la résistance du bâtiment.

3.3.3 Résistance au feu

L'incendie est un danger que l'on cherche à contrôler lorsqu'on construit une habitation. La plupart des matériaux sont inflammables, on cherche donc moins à empêcher tout incendie de prendre qu'à maîtriser le feu rapidement et à permettre aux personnes de sortir avant que l'habitation ne se transforme en brasier. Les tests cherchent donc à évaluer la résistance au feu et la réaction au feu du bâtiment (Martin, Eeckhout, et Lassoie 2017, p.10). C'est bien la façade ou le mur dans son intégralité qui doit répondre aux exigences de résistance au feu et non les matériaux indépendamment les uns des autres (*Ibidem*, p.24).

En Belgique, l'arrêté royal de 1994 (modifié plusieurs fois depuis) fixe les normes de base pour la prévention incendie. Ces normes ont force de loi pour les bâtiments publics et les « grands » bâtiments, comme les usines. Elles ne s'appliquent pas aux maisons unifamiliales et aux bâtiments ayant une superficie inférieure ou égale à 100m² et ayant maximum 2 étages. C'est le Service incendie de la commune ou de la province qui délivre l'avis concernant la conformité d'un bâtiment public. En RW, un avis favorable a été octroyé au nouveau bâtiment du Collège Notre-Dame de Bon Secours, qui a pu être construit en ballots de paille par la Société Paille-Tech. Cette autorisation atteste que le Services incendie reconnaît la bonne résistance des murs en ballots de paille aux incendies.

Des tests standardisés existent afin de vérifier la résistance et la réaction au feu des matériaux et ensemble de matériaux. L'UE reconnaît notamment deux tests, chacun standardisé par une norme : la norme ISO 834-1 : 1999, « *Fire Resistance Tests* »²⁰, pour le premier et la norme ASTM E119 - 18ce1 « *Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials* »²¹, pour le second. De nombreux tests ont été réalisés sur des parois intégrant la paille. Les tests montrent que lorsque les bottes de pailles sont enduites des deux côtés, les murs sont très résistants au feu (King et de Bouter 2009, pp.217-218).

Bob Theis (2003) relève deux tests qui ont été effectués sur des murs en paille enduits entre 1993 et 2002 sur base de la norme ASTM et trois tests non normalisés. Les 5 tests donnent des

²⁰ (ISO 834-1:1999 1999)

²¹ (ASTM E119 - 18ce1 2018)

résultats probants : le premier mur (1993) a tenu 30 minutes car les flammes se sont introduites dans une jointure. Le deuxième mur (1996) a résisté aux flammes durant une heure. Selon l'expert sur place, le mur aurait pu tenir deux heures. Le troisième mur (2001) a résisté pendant 90 minutes. Le quatrième test (2001) a été réalisé sur un mur avec des poutres apparentes qui a résisté une heure aux flammes. La température de l'autre côté du mur n'a augmenté que de 1°C. Le cinquième et dernier test (2003) analysé par Theis a consisté en la simulation d'un feu de forêt avec des ballots de paille enduits au centre : aucun ballots n'a montré un signe de fissure (Theis 2003, p.2).

Ces résultats sont confirmés par d'autres plus récents. En 2006, deux tests réalisés par « The Ecological Building Network », basés sur la norme ASTM ont montré une résistance au feu d'une heure pour un mur non porteur avec un enduit en terre et de deux heures pour un mur non porteur avec un enduit au ciment et plâtre (Džidić 2017, pp.426-427). En 2011, un test basé sur la norme ISO-834 a révélé une résistance de 2h26 pour un mur porteur enduit des deux côtés (*Ibidem*, p.429).

L'avis du Service incendie wallon et les tests standardisés ou non semblent conclure que les murs en ballots de paille offrent une bonne résistance au feu. Les murs en ballots de paille enduits offrent surtout un avantage par rapport aux autres matériaux. D'une part, l'enduit en terre, en chaux ou en ciment est ignifuge (comme le béton). D'autre part, le ballot de paille est un isolant, qui empêche la chaleur de se propager. Lorsque la chaleur finit par se propager, la paille est un isolant qui ne fond pas et qui ne brûle que très lentement en raison de la très faible quantité d'oxygène présente dans les ballots compressés.

Lorsque le mur en ballot de paille finit par brûler, une étude réalisée par Omega Point en 2000 montre que le taux de propagation des flammes reste bon (10, là où la limite est définie à 25 par la norme ASTM) et la densité de fumée est inférieure à la limite définie par la norme ISO (350, là où la limite est de 450) (King et de Bouter 2009, p.211). Theis a analysé les causes de quatorze incendies déclarés dans des bâtiments en ballots de paille. Les causes principales sont la paille qui jonche le sol durant la phase de construction et les outils de travail. Le feu se propage plus rapidement lorsqu'il y a des interstices et lorsque les ballots ne sont pas encore enduits (Theis 2003, p.4; King et de Bouter 2009, pp.212-222).

Le béton quant à lui est incombustible et non inflammable. Par contre, il est un conducteur de chaleur et la transmet aux autres matériaux qui sont en contact avec lui (febelcem 2015, pp.46-48), par exemple à la structure en acier, aux isolants, aux câbles et mobiliers. À mesure que la

température augmente, la résistance résiduelle du béton diminue (35% à 750°Celsius) et celle de l'acier diminue encore plus rapidement (10% à 750°Celsius) (*Ibidem*). En ce sens, une paroi homogène en ballots de paille enduits offre une très bonne résistance et réaction au feu. Ces propriétés sont intéressantes bien que différentes de celles des murs en béton.

3.3.4 Résistance aux parasites

Lorsque l'on évoque la construction avec des matières organiques tels que la paille, les insectes et autres nuisibles peuvent être une source d'inquiétude. Bien qu'il n'y ait pas d'étude scientifique ni de rapport officiel sur le sujet, l'analyse de King et de Bouter apporte quelques informations générales.

Selon l'analyse de King et de Bouter (2009) sur « *les insectes et autres invités indésirable* », il n'y aurait pas de problème récurrent. Il n'y a pas eu d'expérimentation officielle mais les retours d'expérience des constructeurs et habitants de bâtiments en ballots de paille à travers le monde semblent indiquer que ces « invités » se montrent très discrets. Aucun parasite n'est particulièrement friand de murs en botte de paille. Les rongeurs ne peuvent se mouvoir dans un mur en ballots de paille en raison de la densité des ballots. Pour ce qui est des insectes, la protection par un enduit rend l'intrusion dans le mur très compliquée. Par ailleurs, la paille n'est pas particulièrement nutritive en raison de sa composition (King et de Bouter 2009, pp.243-248).

Dans le cadre de nos entretiens, les interviewés n'ont pas évoqué la présence d'« indésirables » à l'exception d'A. Bourgeois qui raconte un incident qui a eu lieu lors du stockage de quelques ballots :

« {...} *j'avais des ballots stockés en bas, ils ont été bouffés. C'est pour ça que je mets de la chaux aussi. À part ça une fois que c'est enduit...* » (Bourgeois Anne, BU8 ; P19)

Ses ballots, posés au sol sous une bâche à côté du chantier, ont été quelque peu endommagés. King et de Bouter estiment qu'un mur en paille est moins exposé qu'un mur en bois (King et de Bouter 2009, p.243).

3.3.5 Isolation acoustique

La qualité de l'isolation acoustique d'un matériau est un critère important afin d'éviter les nuisances sonores de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment et inversement. Des normes belges existent afin de définir les critères que doivent rencontrer différents types de bâtiments (NBN

S 01-400-1:2008 pour les immeubles d'habitation, NBN S 01-400-2:2012 pour les établissements scolaires et NBN S 01-400:1977 pour les autres types de bâtiments).

En règle générale, pour une bonne isolation acoustique quelques critères simples sont à prendre en compte. C'est principalement la masse importante de la paroi qui permet d'avoir une isolation acoustique de qualité (Minke et Mahlke 2005, p.35). Une bonne isolation acoustique se rapporte à la masse mais également à des « *épaisseurs souples et dissociées les unes des autres sur le plan acoustique* », où aucun vide n'est présent (King et de Bouter 2009, p.239). Selon King et de Bouter (2009), la paroi en ballots de paille avec un enduit en terre de chaque côté est un excellent isolant acoustique. Les éléments qui peuvent diminuer la qualité de l'isolation acoustique (comme pour l'isolation thermique, l'humidité et la résistance au feu) sont les connexions entre les murs et les éléments incorporés ou accolés au mur : « *les finitions et assemblages ont autant (voir plus) d'importance que le mur en lui-même* » (King et de Bouter 2009, p.240).

Selon Dance et Herwin, il existe un large consensus sur les excellentes qualités d'isolants acoustiques des bâtiments en ballots de paille enduits. Il convient toutefois de rester prudent par rapport à ces conclusions puisque ces habitats se trouvent majoritairement dans un environnement rural et sont rarement des logements multiples (appartements, maisons mitoyennes) (Dance et Herwin 2013, p.5).

D'autres études indiquent que les murs en ballots de paille rencontrent difficilement les critères d'isolation acoustique (Dance et Herwin 2013, p.4; Francesco D'Alessandro, Schiavoni, et Bianchi 2017, pp.7-8). La masse du mur ne permettrait pas de bloquer les bruits de manière satisfaisante. Selon Berardi et Iannace, les fibres végétales ont de bonnes performances à hautes et moyennes fréquences mais moins que d'autres matériaux utilisés pour l'isolation acoustique comme la laine de roche et la mousse (Berardi et Iannace 2015, p.850).

Une étude réalisée dans une école montre qu'un mur de 63cm, associé à trois couches d'enduit à la chaux à l'extérieur et une planche de lin à l'intérieur, satisfait aux exigences minimales d'isolation acoustique dans une école (Deverell et al. 2009, p.39). En Wallonie, la directrice du Collège Notre-Dame de Bon Secours n'a signalé aucun problème avec les parois préfabriquées de 50 cm de Paille-Tech.

Les études apportent des résultats relativement contrastés. L'étude des propriétés acoustiques de bâtiments en ballots de paille mériterait d'être poursuivie afin d'apporter des éléments de compréhension supplémentaires.

3.3.6 Qualité de l'air intérieur

Plusieurs facteurs peuvent influencer la santé des personnes qui occupent un bâtiment : la température, l'humidité, le bruit, l'éclairage, etc. « *Un.e Européen.ne sur six [...] vit dans une habitation qui rend malade, les bâtiments malsains sont un problème répandu qui requièrent l'attention publique et politique.* » (Health and Environment Alliance 2018, p.3). Selon HEAL, le facteur le plus insidieux et le plus important est la qualité de l'air intérieur (Health and Environment Alliance 2018, p.3). Nous nous focalisons sur cette propriété car lors de nos entretiens, de nombreux acteurs de la construction en ballots de paille ont mis en évidence les spécificités de la paille (et des écomatériaux) en la matière.

De nombreuses études ont été réalisées sur la qualité de l'air intérieur ces dernières années. Il y existe trois sources de pollution intérieure : les activités humaines dans l'habitation (appareils à combustion, utilisation de produits d'entretien, etc.), la pollution provenant de l'extérieur du bâtiment (particules fines, radon, etc.) et la pollution provenant des matériaux de construction et du mobilier (colles, peintures, moquette, matelas etc.) (SPF Santé publique 2016c; Katsoyiannis et Cincinelli 2019, pp.7-8). Les études ont mené à la détection de nombreux composants chimiques présents dans les habitations et issus de ces trois sources de pollution (Katsoyiannis et Cincinelli 2019, p.6). Parmi les composés chimiques, les composés organiques volatiles²² (COV) sont une préoccupation grandissante car ils peuvent être nocifs pour la santé.

En Europe, les nouveaux matériaux ne font pas l'objet d'une classification, ni de certification concernant leurs émissions de COV (Conseil Supérieur de la Santé 2017, p.59). Or, plus les produits et les matériaux sont testés, plus on détecte de substances chimiques différentes. « *Les listes prioritaires (COV) ne couvrent pas toujours l'ensemble de ces substances, en particulier dans le cadre des tests de ces dernières années.* » (Conseil Supérieur de la Santé 2017, p.59). La tendance actuelle est de réduire ou d'éliminer certains COV spécifiques des matériaux de construction, des meubles ou encore des produits d'entretien. Toutefois, la quantité globale de COV rejetée par ceux-ci augmente (Conseil Supérieur de la Santé 2017, p.56).

²² COV : « *Les Composés Organiques Volatils (COV) constituent un ensemble de substances appartenant à différentes familles chimiques. Leur seul point commun est de s'évaporer rapidement à la température ambiante. Ils sont composés notamment de carbone et d'hydrogène* ». Ils peuvent être d'origine naturelle ou anthropique. « *Les COV totaux sont un indicateur de la pollution organique des milieux intérieurs. Mais, contrairement à l'idée reçue, il n'y a pas d'effet direct des COV dans leur ensemble sur la santé. Ce sont en premier lieu, les effets des substances individuelles qui doivent être examinés.* » (SPF Santé publique 2016a).

La lutte contre la présence de COV nocifs est un argument phare de la construction écologique. Celle-ci prône un environnement intérieur sain dans le respect de la santé des habitants, mais aussi de tous ceux qui participent à la construction des habitations. Une étude française de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) a comparé les émissions de COV des matériaux biosourcés avec celles des matériaux traditionnels. L'Agence conclut que les « *les produits biosourcés n'émettent pas à première vue nécessairement moins de COV que leurs équivalents fossiles ou minéraux* » (Bonnain et al. 2016, p.15). Elle précise que les détails des ACV réalisées par les producteurs de matériaux pétrosourcés ont été difficiles à obtenir : moins de 60% d'entre eux ont accepté de partager leurs ACV complètes. L'Agence explique aussi que les producteurs de matériaux traditionnels ont eu le temps de réaliser de nombreuses optimisations de leurs produits alors que les matériaux biosourcés plus récents n'ont pas encore profité de cette marge d'innovation (*Ibidem*, pp.14-15).

Selon le RFCP, la construction en ballots de paille avec un enduit de terre peut avoir un impact positif sur les émissions de COV. L'utilisation de la paille en isolation est labélisée A+, soit la catégorie qui émet le moins de polluants volatils (Réseau Français de la Construction en Paille et Inies 2011). Il faut néanmoins préciser que la paille n'est pas en contact direct avec l'air pendant l'utilisation du bâtiment ; l'éventuelle réduction des émissions de COV n'est donc un avantage que dans la phase de construction, durant laquelle les ballots sont manipulés. Une fois le mur terminé, les émissions de COV vont dépendre du parement choisi.

En Belgique, aucune base de données ne recense les émissions des matériaux et des produits utilisés dans les habitations en Belgique (Conseil Supérieur de la Santé 2017, p.59). La mise en place d'une telle base de données via la réalisation d'études nationales et européennes permettrait d'identifier les matériaux à faibles émissions afin de promouvoir leur utilisation. Selon F. de Barquin (CCW), les pouvoirs publics, en particulier au niveau européen, ont un rôle essentiel à jouer dans le développement de bases de données et de réglementations associées (de Barquin Fabrice, BU9 ; P31). En attendant, l'utilisation de ballots de paille avec un enduit naturel comme la terre apparaît être une solution intéressante concernant les émissions de COV.

3.3.7 Conclusions sur les caractéristiques techniques de la construction en ballots de paille

Les études présentées ci-dessus démontrent les qualités techniques des ballots de paille pour la construction. L'isolation en paille permet d'atteindre une faible transmission thermique grâce à une conductivité faible et une épaisseur de ballot importante. Pour répondre aux exigences PEB,

une épaisseur de paille plus importante que pour d'autres isolants est nécessaire. Toutefois, la dimension standard des ballots permet de dépasser les exigences. Les murs en ballots de paille sont peu résistants à l'eau et à l'humidité. Cette faiblesse peut être maîtrisée par la mise en place de stratégies pour éviter le contact avec l'eau lors de la production des ballots, du transport et du chantier. La construction en ballots de paille avec un enduit résiste bien aux incendies grâce au caractère ignifuge de l'enduit associé à la très faible quantité d'air à l'intérieur d'un ballot. La résistance des ballots satisfait les exigences des Services incendies en RW. Les parasites comme les rongeurs et les insectes ne présentent pas de danger particulier pour l'intégrité du mur en ballots de paille. L'absence d'air et de grain rendent le milieu peu hospitalier pour les parasites. Concernant l'isolation acoustique, les recherches sont plus mitigées. Des recherches supplémentaires mériteraient d'être menées afin de pouvoir trancher et déterminer les conditions d'une isolation acoustique suffisante. Pour terminer, nous avons abordé la question de la qualité de l'air dans une construction en ballots de paille. Les données que nous avons analysées ne permettent pas de dégager un avantage de la construction en ballots de paille en la matière.

3.4 Impacts environnementaux de la construction en ballots de paille

« {...} sur les matériaux, dans l'idéal c'est celui qu'on n'utilise pas, donc de pouvoir utiliser davantage de matériaux de réemploi, qu'on peut réutiliser, qu'on peut démonter et réutiliser, qu'on peut adapter facilement sans devoir tout péter dans un container puis rechercher des matériaux neuf. {...} » (Deproost Magali, BU6 ; P95)

Si l'utilisation de ballots de paille en construction offre des avantages techniques comparables à ceux offerts par les autres matériaux de construction, permet-elle de diminuer l'impact environnemental associé à la construction et au logement ?

Les réglementations PEB ont pour effet l'amélioration de la performance énergétique du bâti et donc une diminution des impacts environnementaux durant la phase d'utilisation. Les nouveaux bâtiments et les bâtiments rénovés devront présenter un label A à partir de 2021 (2019 pour les bâtiments publics). On peut donc considérer que l'utilisation d'énergie durant la phase d'utilisation du bâtiment est arrivée au plus bas. Dès lors, pour diminuer l'impact environnemental des bâtiments, il reste à agir sur la consommation d'énergie grise et sur le traitement de fin de vie des bâtiments. Une étude de la cellule de recherche Architecture et Climat indique que pour construire du passif, les matériaux faiblement transformés (le bois, la

fibre de bois et des blocs de béton) émettent 6 fois moins de CO₂ durant leur cycle de vie que les matériaux fort transformés (la laine de roche, les blocs silico-calcaires, du polystyrène et du zinc). Pour construire un bâtiment basse énergie, les matériaux faiblement transformés émettent 3 fois moins de CO₂ durant leur cycle de vie (Opdebeek et De Herde 2014, p.78). Si l'analyse de cycle de vie (ACV) des ballots de paille montre que ses impacts environnementaux sont faibles, ses qualités structurelles et isolantes lui permettraient de remplacer l'utilisation de matériaux fort transformés pour la structure et l'isolation (acier, brique, laine de roche, polystyrène, etc.) (Chaussinand, Scartezzini, et Nik 2015, p.302).

Nous analysons les résultats de quatre ACV. Nous avons d'abord utilisé une ACV française afin de dégager les impacts environnementaux de la construction en paille. Nous avons ensuite utilisé l'ACV réalisée par Chaussinand, Scartezzini, et Nik (2015) pour comparer les impacts des constructions en ballots de paille avec ceux des constructions traditionnelles. Nous avons également analysé l'ACV réalisée dans le cadre de l'étude aPROpaille. Nous avons enfin réalisé notre propre comparaison à l'aide de l'outil TOTEM afin de compléter ces informations. Nous présentons d'abord quelques éléments de réflexions sur l'enjeu de l'allocation des impacts.

Allocation des impacts

De nombreuses variables influencent les résultats des ACV : les objectifs de l'étude, les postulats de départ (hypothèses) sur le système étudié, les programmes utilisés, les frontières du système, les catégories d'impacts sélectionnées, etc. Les choix méthodologiques influencent fortement les résultats, il faut donc être particulièrement attentif lors de l'interprétation des résultats. Dans le cas de la paille, le procédé d'allocation des impacts entre le produit et les coproduits est un enjeu de taille. La question de l'allocation des impacts est d'ailleurs la question la plus controversée dans le développement de la méthodologie de l'ACV (Weidema 2000, p.12; European Commission et Joint Research Centre 2010, p.265).

La paille et les grains sont tous deux issus de la culture céréalière. Ils sont des produits indissociables l'un de l'autre : là où il y a des grains, il y a de la paille. Le même système mène donc à la création de deux produits. Dans le cadre d'une ACV, on cherche à mesurer les ressources nécessaires à la production d'un produit. Quelle proportion des impacts environnementaux du système faut-il allouer à la paille et aux grains ? La paille est-elle un coproduit de la production de grains ou les grains sont-ils un coproduit de la culture de la paille ? Pour allouer les impacts entre les coproduits, plusieurs méthodes peuvent être utilisées

(European Commission et Joint Research Centre 2010, pp.174-175; Schrijvers, Loubet, et Sonnemann 2016, p.981) :

- (1) en fonction de la masse : par exemple, 1 hectare de champs produit X tonnes de paille et X tonnes de grains et le rapport entre les deux donne la part de chaque produit dans les impacts environnementaux,
- (2) en fonction des prix du marché : par exemple 1 tonne de paille = X euros et 1 tonne de grains = Y euros donc la paille entraîne $(X/(Y+X)).100 = Z\%$ des impacts de la culture de céréale,
- (3) en fonction de l'énergie de combustion que le produit contient
- (4) ne rien alloué à l'un d'entre eux : par exemple ne rien attribuer à la paille, car elle est considérée comme un déchet qui n'est pas souhaitable et dont il faut se débarrasser (*Ibidem*).

Ces choix à poser impliquent qu'il n'existe pas un résultat unique immuable. Les choix posés sont lourds de conséquences : une ACV n'est en soi pas meilleur qu'une autre, elle dépend des choix méthodologiques posés en raison de l'interprétation qui a été faite du système. Les acteurs que nous avons rencontrés ont des avis divergents à ce sujet. Selon F. Daniel, « {...} *la paille n'est pas un déchet et ne le sera jamais et chaque jour un peu moins.* » (Daniel Fabian, Agriculteur et auto-constructeur, BU3 ; P09). Pour V. Mestdagh d'EcoLodge, {...} *C'est une valorisation d'un déchet de l'agriculture et économiquement c'est très intéressant {...}* (Mestdagh Vincent, BU01 ; P11). Pour M. Deproost, « {...} *C'est des choses qui changent tout le temps, si demain tout le monde se met à construire en paille, la paille va devenir le produit et le blé le sous-produit.* {...} » (Deproost Magali, SPW, BU6 ; P15).

L'ACV réalisée en France par le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA)

L'unité fonctionnelle de l'ACV réalisée par le CEREMA est un mur de paille d'1m² de mur dans lequel la paille est utilisée comme isolant et associée à des liteaux de compression, sans ossature et sans enduit (CEREMA 2015, p.6). Dans cette étude, la paille est considérée comme un déchet. Un épandage de fertilisants a été compté afin de compenser le non-retour de la paille à la terre. En fin de vie, la paille est enfouie en tant que déchet non dangereux ou incinérée. La CEREMA note qu'il n'y a actuellement pas de circuit de revalorisation de ce matériau (CEREMA 2015, pp.35-36). Les conclusions de l'étude sont les suivantes :

- la paille et les liteaux sont renouvelables et peu de ressources sont nécessaires à leur production
- la production du mur nécessite l'utilisation de 104 litres d'eau : 63% pour le traitement de fin de vie et 36% pour la production des fertilisants
- le cycle de vie du mur entraîne une pollution de 1110m³ d'air par m² isolé (59% en fin de vie, 32% en raison des fertilisants et 8% pour la mise en œuvre)
- le cycle de vie du mur entraîne une pollution de 23m³ d'eau par m² isolé (47% en fin de vie et 46% pour la production de carburant pour le tracteur)
- le cycle de vie engendre peu ou très peu d'impacts sur l'acidification atmosphérique, la destruction de la couche d'ozone, l'eutrophisation et la formation d'ozone photochimique (*Ibidem*, p.36).

Le CEREMA conclut en signalant que « *la paille n'est pas produite au détriment de la l'agriculture alimentaire* » et que les matériaux biosourcés permettent de stocker du CO₂ pendant leur durée de vie et donc de ne pas avoir d'impacts sur le changement climatique (*Ibidem*).

A regard des impacts importants du traitement de fin de vie du mur, il apparaîtrait intéressant de créer un circuit de revalorisation de la paille en fin de vie. Utiliser la paille dans un réseau de chauffage ou la renvoyer dans la filière agro permettrait de diminuer les impacts environnementaux de l'utilisation de la paille comme isolant.

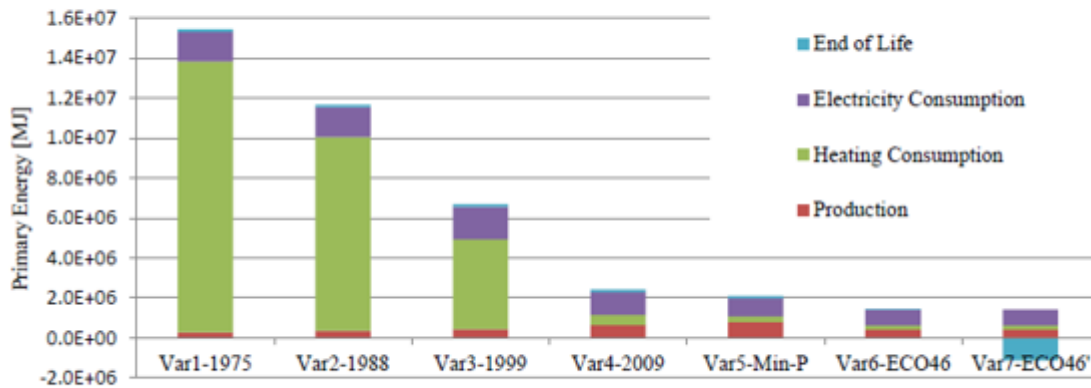
Chaussinand, Scartezzini, et Nik 2015

Chaussinand, Scartezzini, et Nik (2015) ont comparé sept scénarios de construction sur base de plans identiques à l'aide du programme SimaPro et de la base de données EcoInvent v2. Leur analyse de cycle de vie distingue quatre types d'émissions sur une durée de vie de 60 ans : le traitement en fin de vie, la consommation électrique, la consommation de chauffage et la production du bâtiment (extraction, transformation, transport). L'étude ne prend pas en compte l'énergie dépensée et la perte de matériaux lors de la phase de chantier.

Les impacts d'un bâtiment de référence (VAR6-ECO46) construit en ballots de paille associé à d'autres matériaux locaux (bois et terre) sont d'abord comparés à ceux de 4 bâtiments construits selon les méthodes utilisées en Suisse en 1975, 1988, 1999 et 2009. Les impacts de VAR6-ECO46 sont ensuite comparés à ceux d'un bâtiment à performances égales construit en matériaux traditionnels (béton, polystyrène, triple vitrage) selon les méthodes actuelles (VAR5-

Min-P). Une septième variante est réalisée dans laquelle la paille est incinérée en remplacement de combustibles conventionnels dans un système de chauffage urbain (Var7-Eco46’).

Figure 16 : Evolution de la consommation d’énergie en fonction de l’année de construction du bâtiment de référence.



Source : (Chaussinand, Scartezzini, et Nik 2015, p.301)

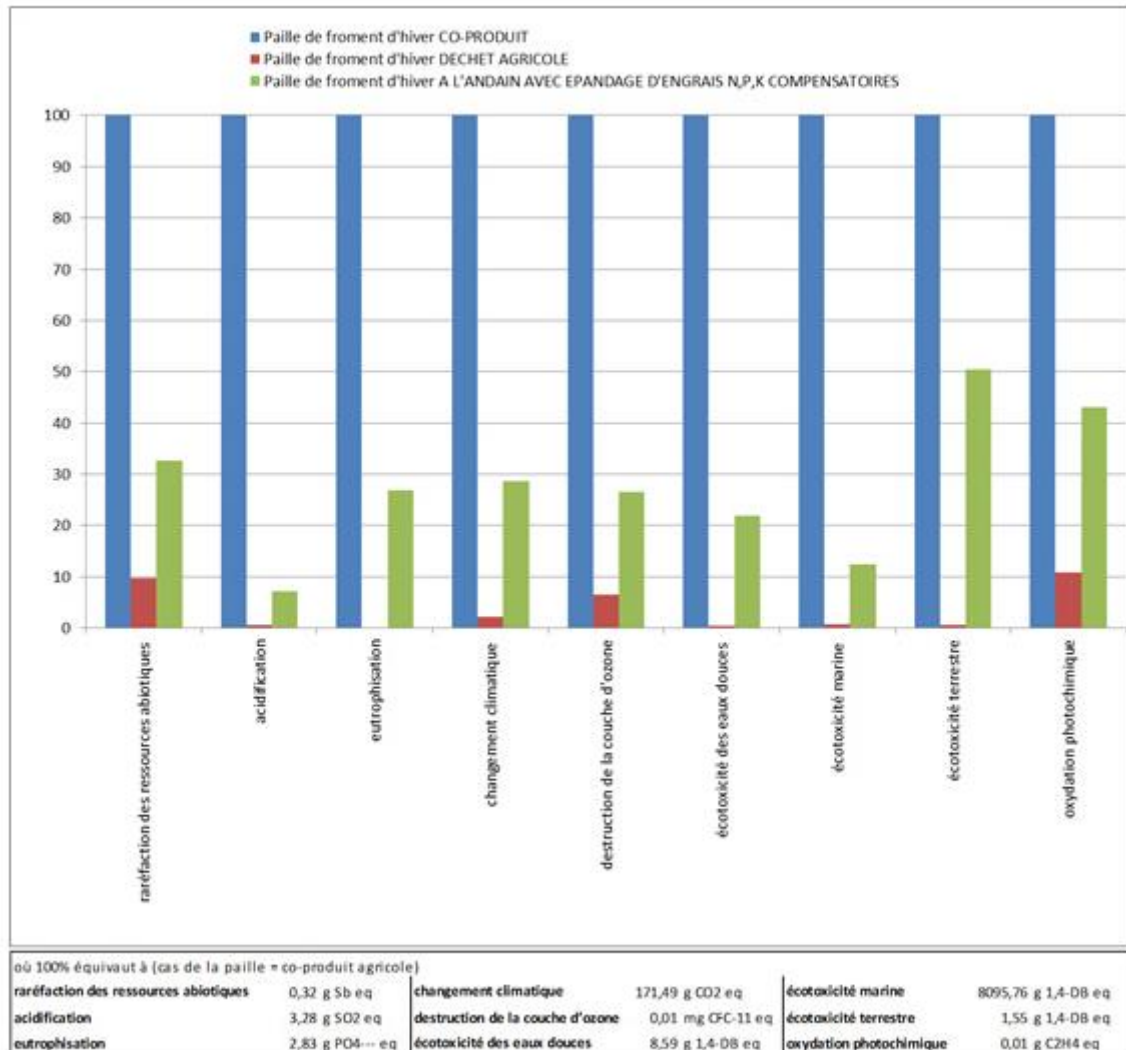
Nous observons une évolution importante des impacts environnementaux de la construction depuis 1975. Les impacts liés à la consommation d’énergie pour le chauffage ont été divisés par 7 entre 1975 et 2009. La consommation d’électricité a légèrement diminué sur la même période alors que les impacts de la production ont légèrement augmenté. Un bâtiment en matériaux traditionnels (VAR5) consomme une énergie primaire d’environ 2 millions de MJ alors que le bâtiment de référence en paille passe sous la barre des 2 millions de MJ. Le bâtiment en matériaux traditionnels (VAR5) engendre des impacts plus lourds que le bâtiment en ballot de paille (VAR6), à performances égales. Les impacts de la production augmentent fortement entre VAR4 et VAR5 alors qu’ils diminuent entre VAR 5 et VAR6. La combustion de la paille en fin de vie, VAR7, permet de diminuer encore les impacts environnementaux de la construction en ballots de paille alors que le traitement de fin de vie des bâtiments traditionnels va alourdir les impacts. Chaussinand, Scartezzini, et Nik concluent ainsi à réduction de moitié de l’impact de la production de matériaux pour la construction grâce à l’utilisation de ballots de paille (Chaussinand, Scartezzini, et Nik 2015, p.302).

aPROpaille 2015

L’ACV réalisée dans le cadre de l’étude wallonne aPROpaille (Evrard et al. 2015b, pp.248-267) est une ACV comparative des impacts de la paille comme isolant selon des allocations différentes. Trois possibilités sont envisagées :

- la paille est un coproduit : tout l'amont de la récolte pris en compte (bleu)
- la paille est un déchet agricole (rouge)
- la paille est un coproduit seulement à partir de l'andain mais un épandage d'engrais (azote, phosphore et potassium) est effectué pour compenser le non-retour au sol de la paille (vert)

Figure 17 : Analyse d'impacts environnementaux de la paille en fonction de son allocation



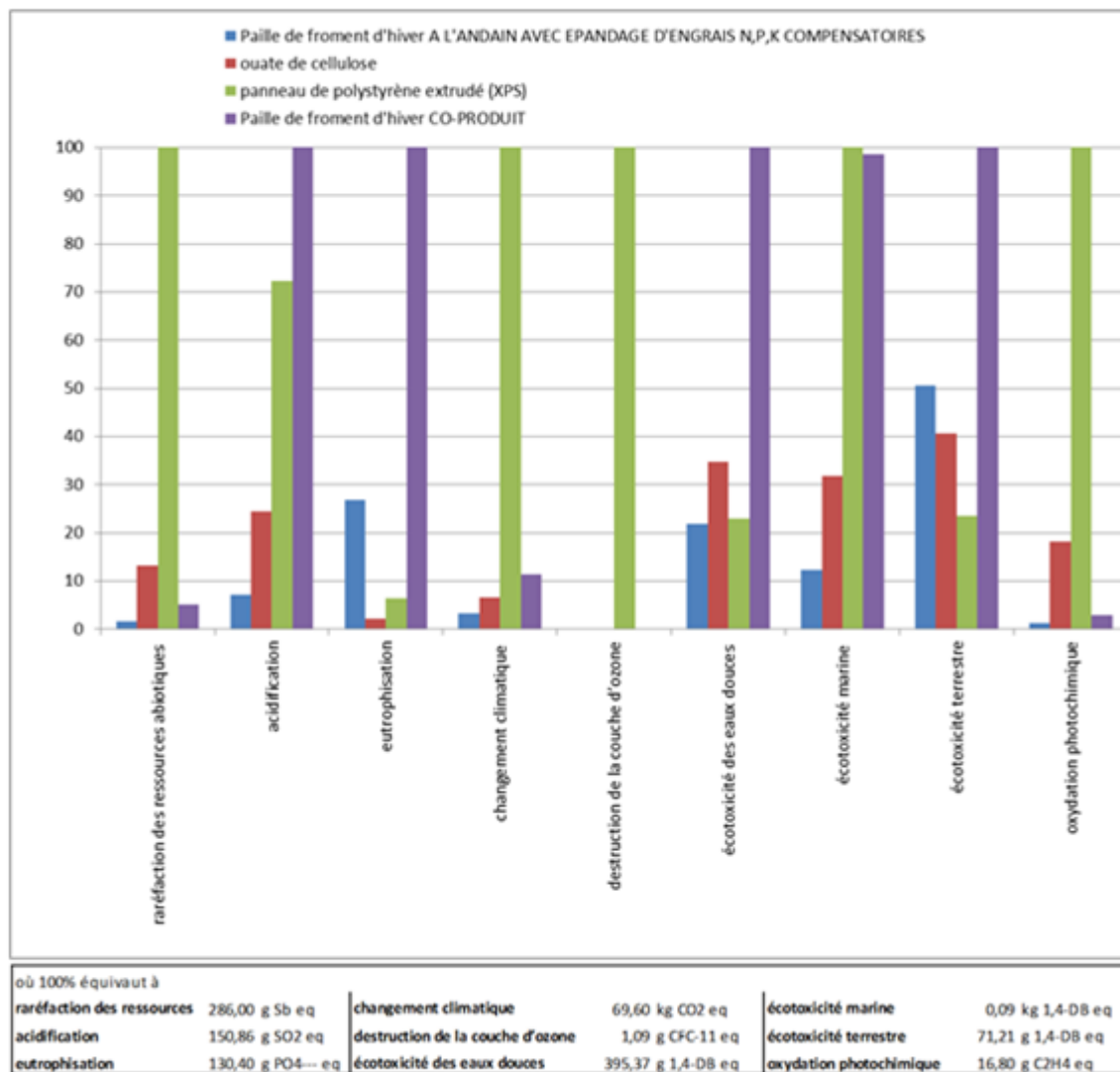
Source : Evrard et al. 2015b, p.253

Nous observons que si la paille est considérée comme un déchet son impact devient minime. Si la paille est considérée comme un coproduit dont les impacts comprennent tout l'amont du processus de culture son impact est le plus élevé. Si elle est un coproduit à partir de l'andain avec un épandage d'engrais, son impact augmente mais il reste en moyenne 60% plus faible que si l'on considère la paille comme un coproduit depuis le début du processus de culture. Ce

graphique met bien en évidence les différents impacts que la paille peut avoir selon les choix méthodologiques.

Le graphique ci-dessous compare les impacts environnementaux de trois matériaux (ouate de cellulose, polystyrène, paille) pour l'isolation d'une paroi d'1m² avec une résistance thermique de 6.53 m². K / W. Ici, la paille n'est plus envisagée comme un déchet.

Figure 18 : Graphique des impacts de la production de différents matériaux pour une isolation d'1m² avec une résistance thermique de 6.53 m². K / W



Source : Evrard et al. 2015b, p.255

Le panneau de polystyrène extrudé est le matériau qui a le nombre d'impacts le plus élevé mais la paroi en paille en tant que coproduit de la culture a des impacts élevés dans plus de la moitié des indicateurs d'impacts environnementaux. L'ouate de cellulose et la paille en coproduit à l'andain représente maximum 50% des impacts des autres isolants (Evrard et al. 2015b, p.256). La paille a des impacts élevés sur l'écotoxicité terrestre, marine et des eaux douces mais aussi

sur l'acidification et l'eutrophisation par l'utilisation de pesticides, d'insecticides, de fongicides et d'engrais minéraux et naturels (Evrard et al. 2015b, p.254).

TOTEM 2019

Le programme TOTEM permet notamment de comparer les impacts environnementaux de différents types de murs. Parmi les 83 murs extérieurs proposés dans le programme, le mur 64 est le seul qui intègre des ballots de paille. Il est composé d'un enduit extérieur à la chaux, d'une ossature en bois, de paille comme isolant et d'un enduit intérieur à base d'argile. Il est possible de classer les murs selon trois critères : le coût environnemental, le pouvoir isolant et la largeur. Le mur 64 est le mur qui possède l'impact environnemental le plus faible. Son impact environnemental est de 9,348 euros/FU²³, le mur qui le suit est un mur en brique et en laine de roche dont l'impact est de 15,110 euros/FU. Concernant le pouvoir d'isolation, le mur 64 est le 5^{ème} mur le plus performant avec une valeur de U de 0.14 W/m²K²⁴. Concernant la largeur du mur, le mur 64 le cinquième mur le plus large avec une épaisseur de 0.54 mètre. La majorité des murs extérieurs (49 d'entre eux) ont une épaisseur allant de 0.35 mètre à 0.54 mètre.

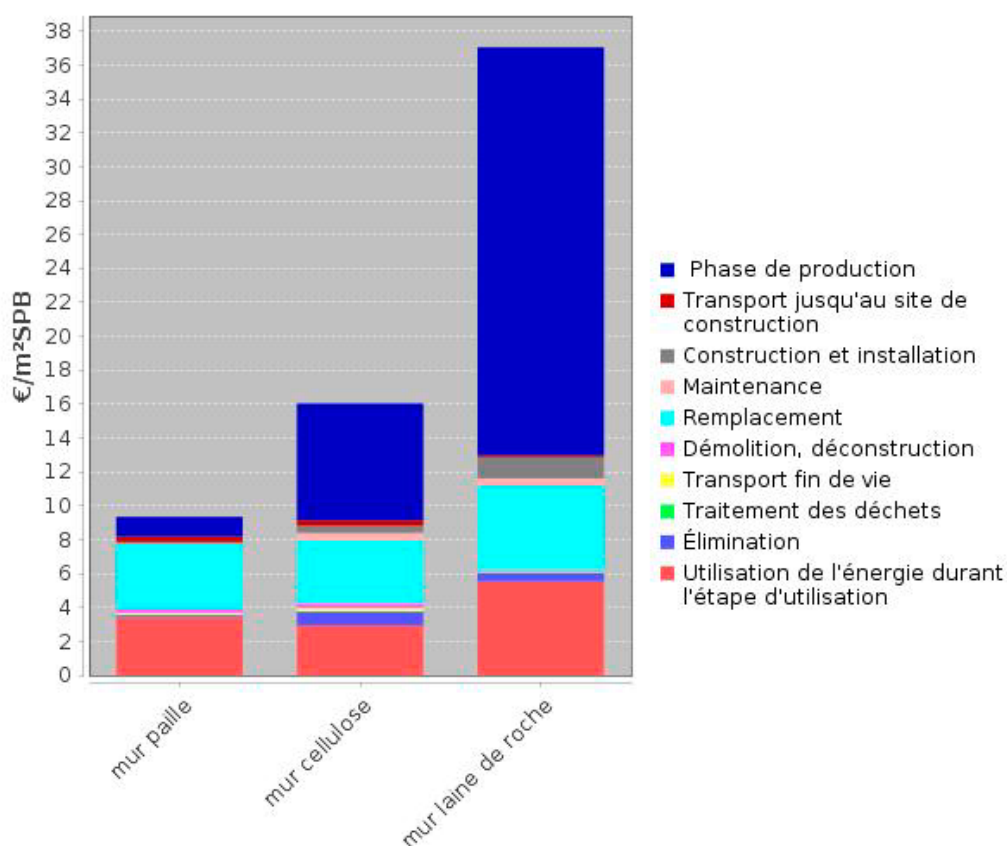
Nous avons effectué des simulations avec l'outil TOTEM afin de comparer le coût environnemental de trois murs composés de trois isolants différents : la paille, la cellulose et la laine de roche. Les résultats de TOTEM sont pondérés selon la méthode de la monétarisation : €/m² de surface de plancher brute. Cet indicateur correspond au « *coût financier qu'engendrerait la « réparation » des dommages causés à l'environnement. {...} ils prennent en compte les coûts qui sont, indirectement, répercutés sur la société (par exemple, les effets néfastes sur la biodiversité)* » (Totem 2018, 3.4 Monétarisation et résultat agrégé).

Nous avons créé trois murs de surface identique composés d'une ossature bois sensiblement identique et d'isolants différents.

²³ FU : Unité fonctionnelle

²⁴ Ce chiffre vient confirmer les résultats de nos calculs dans la partie 5.3.1

Figure 19 : Graphique des coûts de répartition des dommages environnementaux de la construction de 1m² de différents murs



Source : Rapport de l'outil TOTEM, projet « comparaison de murs » réalisé par Boris d'Ursel, disponible en annexe 3

Le mur en laine de roche possède la valeur la plus importante en termes de coût de réparation des dommages environnementaux avec 37€/m² de surface de plancher brute : la phase de production des matériaux augmente son coût de manière importante (environ 24€/m²SPB). Le mur en cellulose atteint un coût de 16€/m² de surface de plancher brute, soit plus de deux fois moins que le mur en laine de roche. Le mur en ballots de paille possède le coût de réparation le moins élevé avec 10€/m² de surface de plancher brute. Malheureusement, nous n'avons pas la connaissance de l'allocation faite à la paille (a-t-elle été considérée comme un coproduit ou comme un déchet ?). Ce résultat doit donc être interprété avec précaution.

Les études analysées ci-dessus donnent des résultats complémentaires. Chaussinand, Scartezzini et Nik donne un indicateur énergétique (MJ), l'étude aPROpaille et le CEREMA donne des indicateurs midpoints et l'outil TOTEM donne le coût des réparations. Il semble en tout cas se dégager que la construction en ballots de paille impacte moins l'environnement que la construction traditionnelle.

3.5 Conclusions générales sur la construction en ballots de paille

Nous avons vu dans cette partie que le ballot de paille est un matériau de construction écologique et renouvelable. Ce matériau peut légalement être utilisé pour construire des bâtiments en Région wallonne. Suffisamment de paille est produite sur le territoire belge que pour pouvoir utiliser ce matériau pour construire ou rénover une part significative des bâtiments. Les auto-constructeurs ont lancé le mouvement de l'utilisation des ballots de paille en construction. Ils ont été rejoints par de jeunes sociétés innovantes.

Il existe différentes techniques de construction intégrant le ballot de paille : du mur en ballots porteurs aux ballots de paille comme isolant dans une paroi préfabriquée avec une ossature en bois. Chaque technique présente des avantages et des inconvénients propres. L'utilisation d'un enduit en terre (ou à la chaux) est recommandée afin d'obtenir de meilleures performances en termes d'inertie thermique et de régulation de l'humidité dans le bâtiment et les parois. Ces différents murs en ballots de paille répondent aux exigences techniques de la construction : la thermicité de ces parois répond aux critères de la PEB, elles résistent à l'humidité si la construction suit des règles strictes et elles résistent au feu et aux parasites. Des études supplémentaires devraient être menées concernant l'isolation acoustique et la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments en ballots de paille pour mieux évaluer ces éléments.

L'utilisation de ballots de paille permet de diminuer les impacts environnementaux de la construction. Elle permet en effet de diminuer l'impact de la phase de construction tout en maintenant des impacts faibles dans la phase d'utilisation du bâtiment. Les ACV que nous avons considérées dans notre recherche ont démontré que la paille possède un impact sur l'environnement, qu'elle soit un déchet (en raison de sa fin de vie et de l'éventuel épandage pour compenser son prélèvement) ou un coproduit. Les impacts les plus importants sont sur la consommation d'eau, la pollution de l'air et de l'eau. Les autres types d'impacts sont très faibles voir nul. L'impact environnemental d'un mur en paille et en bois est moins important que celui d'un mur composé de matériaux traditionnels. Selon les trois ACV comparatives que nous avons analysées, la paille est un matériau de construction qui permet de réduire significativement les impacts environnementaux de la construction. Le secteur de la construction paille reste encore peu développé, son impact environnemental pourrait encore être réduit via des innovations.

Enfin, il nous semble important de rappeler que notre revue de la littérature scientifique se base sur des études académiques, du secteur public et du secteur associatif mais aussi pour certains

points sur des ouvrages à destination des auto-constructeurs et sur des retours d'expérience. Nous avons sélectionné les sources les plus fiables, qui répondent au mieux aux questions et aux besoins d'informations. Nous avons néanmoins constaté un manque d'informations concernant l'isolation acoustique et l'impact sur la santé.

4 Partie 3 : Etat des lieux et perspectives en Wallonie

Au vu de nos premières conclusions, nous avons considéré qu'il était pertinent d'examiner la situation actuelle et les perspectives pour le développement de la construction en ballots de paille en Wallonie. Nous abordons la perception sociale de ce type de construction (5.1), la question du prix de la construction, le développement de jeunes entreprises de construction paille et les possibilités de développement de l'emploi et de l'économie locale (5.2). Nous analysons ensuite le rôle des lobbys (5.3) et les recherches qui sont menées sur le matériau paille (5.4). Nous explorons enfin les enjeux liés à la reconnaissance technique du matériau (5.5) et les évolutions législatives et politiques concernant ces constructions (5.6).

Il y a peu d'études sociopolitiques sur le sujet de la construction en ballots de paille en RW. Nous n'avons donc pas pu confronter nos entretiens à la littérature de manière systématique. Nous proposons un raisonnement basé principalement sur nos entretiens et sur les textes législatifs et politiques. Nous analysons les contradictions et les accords entre les différents acteurs que nous avons rencontrés et nous les mettons en liens avec le contexte wallons développé dans la partie 1. Cette analyse exploratoire a pour ambition de dégager les pistes et les hypothèses propres au développement de la construction en ballots de paille en RW. Ces pistes et hypothèses se basent sur le discours des acteurs que nous avons rencontrés, elles ne sont dès lors pas généralisables telles quelles à l'ensemble du secteur de la construction en paille ou du secteur de la construction écologique.

4.1 Perception sociale de la construction en ballots de paille

De manière générale, le matériau ballot de paille est relativement peu connu, surtout du grand public. Selon le directeur du Cluster Eco-construction, « *bien souvent, c'est l'ignorance totale, les gens ne connaissent pas. Ou ils ont des à priori. C'est en train de diminuer mais ça reste la grande majorité.* {...} » (Poskin Hervé-Jacques, BU2 ; P24).

La fable des trois petits cochons

Lors de nos entretiens, de nombreux acteurs ont abordé la fable des trois petits cochons. Cette fable semble constituer un point de départ dans les à priori négatifs sur le matériau paille en raison de son influence sur l'imaginaire collectif. Il existe de nombreuses variantes à cette fable, la plus connue étant probablement celle de Walt Disney, qui a réalisé un dessin animé de 8 minutes en 1933 (disponible sur YouTube, avec plus de 32 millions de vues). Cette version montre comment trois petits cochons construisent chacun leur maison en utilisant des

techniques différentes. Le premier « *s'amuse tout le jour*²⁵ », chante, joue de la flûte et construit sa maison en paille sans difficulté en jetant négligemment de la paille sur une armature légère en bois. Le deuxième chante, joue du violon et construit sa maison en bois à l'aide de quelques outils. Le troisième travail dur pour construire sa maison en brique et en ciment « *de chants et danse je n'ai pas loisir, travail et jeu ne vont* ». Son ciment est certifié « anti-loup » (« *wolf proof cement* ») tout comme sa peinture. Les deux premiers cochons finissent rapidement de construire leur maison et poussent une chansonnette alors que le troisième travaille encore sur le toit de sa maison « *de jouer il n'a pas le temps, pas le temps, il travaille constamment* ». Le travailleur les met en garde contre le grand méchant loup alors que les deux premiers rigolent et dansent jusqu'à ce que le loup se présente face à eux. Ils se réfugient alors dans leurs maisons respectives. Le loup souffle sur la maison en paille, qui s'envole et le cochon se réfugie dans la maison en bois. Celle-ci s'envole à son tour lorsque le loup souffle dessus. Terrorisés, les deux premiers cochons trouvent refuge dans la maison de brique. Le troisième cochon annonce qu'ils sont protégés par les briques et se met à jouer du piano. Le loup use de stratagème pour entrer dans la maison mais se fait dérouter. Il souffle et souffle encore sur la maison de brique qui résiste sans trembler. Le troisième cochon s'en amuse en jouant du piano alors que les deux autres sont toujours terrorisés. Le loup tente alors de rentrer par la cheminée mais le troisième petit cochon avait tout prévu puisqu'il ouvre la marmite d'eau bouillante sur le feu de la cheminée : le loup se brûle et part à tout jamais. Dans une autre variante de la fable, les deux premiers cochons se font manger et le troisième mange le loup.

Selon l'agriculteur et auto-constructeur F. Daniel, « *les trois petits cochons, qui sont tout sauf anecdotiques, c'est quelque chose qui est très, très ancré et qui est bien plus vicieux que ce qu'on ne pense* » (Daniel Fabian, BU3 ; P71). Il explique : « (le premier cochon) *c'est un gros fainéant et si tu regardes, pendant que l'autre travaille durement à la construction de sa construction en brique, lui qu'est-ce qu'il fait ? Il gambade et il ne fout rien ! Ça c'est très, très inscrit dans l'inconscient collectif et personne ne s'en rend vraiment compte.* » (BU3 ; P72). Le directeur du Cluster Eco-construction rejoint l'avis de F. Daniel : « {...} *c'est passé à travers les générations et en plus de ça (la maison en paille) c'est la première qui est détruite. On est vraiment sûr de la psychologie qui va très loin : la psychologie car on voit celui qui ne fait rien et la psychologie car ce n'est pas durable, ce n'est pas solide ! Et donc depuis le début*

²⁵ Ici les citations sont les paroles des chants des trois petits cochons dans la version de Walt Disney.

ça pèse. {...} On se pose la question chez nous, qui est le grand méchant loup ? » (Poskin Hervé-Jacques, Cluster Eco-construction, BU2 ; P10).

Cette représentation négative du matériau paille affecterait l'inconscient de ceux qui connaissent cette histoire. La paille est associée à la précarité, à la fragilité et mais aussi de manière plus insidieuse à la fainéantise. Le grand méchant loup peut être vu comme une métaphore pour les aléas de la vie. Cette représentation mène à des inquiétudes qui constitueraient de réels freins pour le développement de la construction en ballots de paille. Elles peuvent conduire à un rejet catégorique du matériau.

Il semblerait toutefois qu'il soit possible d'informer et de sensibiliser le public. La directrice du Collège Notre-Dame de Bon Secours qui a fait construire un bâtiment scolaire en ballots de paille a d'abord été confrontée aux à priori négatifs des parents. Elle y a répondu par des séances d'informations : *« Oui ça bien sûr ! C'est le syndrome des trois petits cochons, il est bien présent. Grâce à ces séances d'informations, on a pu montrer les essais feux qui ont été faits et qui sont indiscutables. »* (Maggiordomo Teresa, directrice, BU4 ; P13). Apporter des informations scientifiques comme des résultats d'études et de tests a permis de modifier les représentations des parents.

Le poids de la tradition

Nous avons tous une idée de ce qu'est une maison et de à quoi elle devrait ressembler. Le secteur de la construction est un secteur relativement traditionnel. Lorsqu'on développe de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de construction, on est donc confronté au poids de la tradition. Le mot « tradition » ou « traditionnel(le) » apparaît d'ailleurs dans 9 des 11 entretiens que nous avons réalisés. Dans 8 des entretiens, l'interviewé utilise ce mot en premier lieu²⁶.

L'usage du mot « traditionnel » n'est pas anodin. On parle généralement de construction « durable » et « écologique » par *opposition* à la construction « traditionnelle », comme l'illustre cette citation de F. de Barquin du CSTC *« (l') entreprise du traditionnel, qui utilise du béton, du bois enfin les matériaux habituels {...} »* (BU9 ; P45). Selon le Cluster Eco-construction, le premier frein au développement de l'écoconstruction est l'habitude : *« {...} on*

²⁶ Mestdagh Vincent, EcoLodge, (BU01 ; P18) ; Poskin Hervé-Jacques, Cluster Eco-construction, (BU2 ; P09) ; Daniel Fabian, agriculteur et auto-constructeur, (BU3 ; P103) ; Maggiordomo Teresa, directrice, (BU4 ; P03) ; Deproost Magali, architecte, attachée à la Direction du Développement durable du SPW, (BU6 ; P45) ; Bourgeois Anne, architecte et auto-constructrice, (BU8 ; P42) ; de Barquin Fabrice, CSTC, (BU9 ; P45) ; Argeles Aymé, CCW, (BU10 ; P45)

peut aussi s'orienter sur les freins à l'écoconstruction. Les freins à l'écoconstruction, c'est quoi ? C'est d'abord on a toujours bien fait comme ça chez nous, donc pourquoi changer, ça fonctionne bien ? {...} Ça, c'est vraiment le milieu de la construction qui est un milieu traditionnel » (Poskin Hervé-Jacques, Cluster Eco-construction, BU2 ; P09).

Les habitudes et les traditions freinent l'entrée de nouveaux systèmes de construction dans le marché de la construction. Le passage suivant, qui concerne les premiers contacts entre la société Paille-Tech et les sociétés de la construction traditionnelle, illustre ce frein : « {...} *Les premiers salons qu'on faisait, on s'est parfois fait insulter par la profession ; avec des gens qui arrivaient d'entreprises plus conventionnelles et qui disaient : « Mais enfin, qu'est-ce que vous faites dans ce salon ? Ici, c'est sérieux : on construit des maisons. Arrêtez avec vos cabanes ! ». Même à la Confédération de la construction, il y a une quinzaine d'années, ils n'étaient pas très, très chauds là-dessus {...} : « La construction, c'est des ingénieurs, des archis, du béton et arrête avec tes trucs de beatnik²⁷ quoi ». » (Lefrancq Julien, Paille-Tech, BU11 ; P25).*

Ces tensions montrent bien la force du lien entre le type de matériaux utilisés et le type de constructions qu'il évoque : « avec du béton et des briques, on fait des maisons ; avec de la paille, on fait des cabanes ». Les matériaux « durs » comme la brique, le béton, l'acier rassurent. Ce qui s'en éloigne génère des peurs parfois irrationnelles du neuf et de l'inconnu, que même les rapports scientifiques peinent à apaiser (Minke et Mahlke 2005, p.11).

Par ailleurs, le développement du matériau paille amène l'entrée de nouveaux acteurs dans le secteur. Ces nouveaux acteurs viennent bousculer les représentations que les acteurs traditionnels ont d'eux-mêmes. F. de Barquin du CSTC dit d'ailleurs en parlant des acteurs du secteur de la construction : « *Voilà, il ne faut pas nous considérer comme un secteur de bricolos. On n'est pas ça. Un architecte, c'est quelqu'un qui a fait 4 ou 5 ans d'étude. Un entrepreneur, un ingénieur civil en construction aussi.* » (de Barquin Fabrice, CSTC, BU9 ; P50). L'acte de construire serait réservé aux professionnels or, construire en paille serait un travail de « bricolage ». On peut supposer que cette tension au niveau des représentations vient également freiner l'entrée du matériau ballot de paille dans le secteur.

Visibilité de la construction en ballots de paille

La perception sociale du matériau paille est aussi influencée par la façon dont le matériau est présenté dans les médias. La construction en paille, comme la construction écologique de

²⁷ Beatnik : « *Jeune homme ou jeune fille manifestant, par leur tenue délibérément négligée, par leur vie errante, par leur conception générale du bonheur, leur révolte contre la société dite de consommation* » (CNRTL s.d.)

manière plus large, est souvent présentée comme une construction « insolite » destinée à un public particulier de « bobos écolos » et de « hippies ». Selon F. Daniel, agriculteur et auto-constructeur dans le milieu de la paille depuis plus de dix ans, cet angle empêche monsieur et madame tout le monde de se sentir concerné : « {...} *les médias aiment bien présenter quelque chose de spécial et ils vont se tourner vers des gens, je vais dire, parfois un peu allumés {...} qui font des bâtiments parfois très, très typés paille, avec des formes biscornues, avec une finition qui n'a pas du tout le niveau attendu par monsieur et madame tout le monde et ça c'est dommage. {...} L'opinion publique dit : « Ah c'est sympa, ça fonctionne, ça permet aux zozos de s'amuser ». Mais jamais ils vont imaginer que c'est une solution pour eux. Ça, c'est une discussion qu'on a eue avec le cluster, ça, c'est le travail d'aujourd'hui. C'est faire passer la construction paille comme un matériau standard, hyper performant et moderne. » (Daniel Fabian, BU3 ; P86)*

Un des enjeux actuels pour les acteurs du secteur de la construction en ballots de paille et pour le Cluster Eco-construction semble donc être de proposer un autre discours sur la paille. On voit naître ici un paradoxe : d'une part, la paille est perçue comme archaïque, dans le sens où elle précède les matériaux modernes comme le béton, il faut donc lui donner une image moderne. D'autre part, la paille est perçue comme « en avance » sur la construction traditionnelle, elle serait donc trop moderne et il faudrait alors lui donner une image plus traditionnelle. Un autre paradoxe transparait dans ce que F. Daniel explique concernant un autre défi inattendu qu'il rencontre : « {...} *une des choses qui pour moi pénalise le plus la construction paille, c'est que c'est tellement supérieur, sans technologie et sans prix élevé, que ça paraît faux. Sur salon, c'est parfois un peu difficile car des gens à un moment s'arrêtent : « On vous suit sur l'ensemble mais c'est tellement performant que ça ne peut pas être vrai ou sinon tout le monde le ferait ». L'argument se vaut, c'est quand même bizarre d'avoir un système à ce point supérieur et meilleur et qui si soit peu répandu. {...} » (Daniel Fabian, BU3 ; P70).* La performance de la construction en ballots de paille deviendrait une sorte de mythe sans fondement, voire un mensonge.

Malgré tout, les acteurs observent un changement dans la façon de percevoir la construction en ballots de paille : les acteurs du secteur de la construction se sont habitués à voir des constructions en paille sur les salons et les médias commencent à changer leur façon de présenter les maisons en ballots de paille. Ce changement est probablement dû au fait qu'il y a de plus en plus de preuves des réussites de la construction en ballots de paille (cf. partie 2). En outre, de nombreux projets de maisons de style « classique » sont réalisés avec ce matériau.

Autrement dit, les maisons en paille ressemblent de plus en plus aux maisons traditionnelles, ce qui a tendance également à rassurer le grand public. Le témoignage de la société Paille-Tech illustre l'évolution progressive des perceptions du matériau paille (Lefrancq Julien, BU11 ; P25 et P26). La société existe depuis 10 ans. Sa clientèle évolue en même temps que le type de construction que la société réalise : atelier, maison, bâtiment public, école, restaurant.

Ainsi, le développement de l'utilisation du matériau ballot de paille en RW est freiné par le poids des à priori négatifs et de la tradition et par une représentation étroite dans les médias. Pourtant, les perceptions sociales évoluent grâce à une information de qualité, des retours d'expérience positifs et une diversification des types de constructions.

4.2 Aspects économiques de la construction

L'achat d'un logement ou la construction d'une habitation est un investissement important. Construire et rénover coûte de plus en plus cher, notamment pour répondre aux exigences de la PEB (SPW: DGO4 2018, p.55), ce qui empêche certains publics d'acquiescer. Afin de réduire les coûts et les risques, les particuliers font attention aux prix des maisons et à qui ils font appel pour les construire. Recourir à une jeune entreprise innovante peut donc faire peur. Au regard de ce contexte économique, nous avons d'abord analysé les prix des constructions en ballots de paille par rapport à ceux des autres types de construction. Nous avons ensuite examiné la rentabilité des entreprises qui utilisent le matériau ballot de paille. Nous avons enfin élargi notre analyse à l'emploi wallon et aux dynamiques d'économie locale et circulaire.

4.2.1 Prix de la construction d'une maison en ballots de paille en comparaison avec le prix d'une maison traditionnelle

Selon les estimations du portail d'information « Livios » (site internet indépendant pour les bâtisseurs et les renovateurs), au sein du gros œuvre, la construction de la façade, le parement et l'isolation représentent environ 31% du prix total de la construction (Livios 2015). Dans ce cadre, utiliser des ballots de paille comme structure, comme isolation et/ou comme support d'enduit peut permettre de réduire fortement le coût total de la construction, si le matériau ballot de paille est moins cher que les autres. Le prix peut être un argument déterminant dans le choix de construire avec des ballots de paille ou non.

Nous avons analysé les tarifs que propose la société Thomas & Piron, qui est leader du marché de la construction d'habitation en Wallonie avec 2.200 collaborateurs (Thomas & Piron 2019b),

afin de les comparer aux tarifs que proposent les jeunes entreprises Paille-Tech et EcoLodge. Nous avons comparé ces prix avec ceux de bâtiments construits en auto-construction.

Construire avec une entreprise

Thomas & Piron proposent un large catalogue de maisons, décliné en 148 projets. Ils produisent des maisons à haute performance énergétique (label PEB B) grâce à une épaisseur de 10 centimètres de polyuréthane²⁸ dans les murs. Ils proposent une option « Optimum+ » et une option « Optimax » dont les performances énergétiques sont supérieures (labels non précisés) notamment grâce à une épaisseur de 18 centimètres de polyuréthane dans les murs (Thomas & Piron 2019a). Les premiers prix pour les maisons classiques sont compris entre 150.000 et 200.000 euros (TVAC) pour une superficie de 120m², soit entre 1.250 et 1.665 € le mètre carré. Les maisons de standing plus important vont jusqu'à 350.000 euros et les maisons à option sont plus chères.

Paille-Tech propose un catalogue de maisons catégorisées basse énergie (label A ou A+). Certaines ont le label « maison passive » (Paille-Tech 2018, p20). La société propose 4 tailles différentes : 96m², 128m², 160m² et 180 m² aux prix respectifs de 230.779 - 272.240 - 317.230 et 353.763 euros TVAC. Leur maison de 128 m² (272.240 euros TVAC) revient donc à 2.127€/m² (*Ibidem*, pp.13-14). Selon nos calculs, les maisons Paille-Tech sont donc entre 27 % et 70% plus chères que les maisons Thomas & Piron.

La société EcoLodge propose des Wald-Cube de 25 à 70 m² (EcoLodge 2019). Leur performance énergétique est proche de celle des maisons de Paille-Tech, selon les premiers tests. La société est en procédure de labélisation. Le Wald-Cube de 25m², sans terrasse, coûte 39.325 euros TVAC soit 1.573 €/m² de surface intérieure utile. Celui de 48m², avec 14m² de terrasse, coûte 78.650 euros TVAC, soit 1.638 €/m² de surface intérieure utile. Celui de 70m², avec 6m² de terrasse, coûte 102.850 TVAC, soit 1.469 €/m² de surface intérieure utile (EcoLodge 2019). Selon nos calculs, les maisons EcoLodge sont donc entre 2 % et 30% plus chères que les maisons Thomas & Piron.

Ces écarts de prix s'expliquent en partie par les économies d'échelle que la société Thomas et Piron peut réaliser en tant que plus grande entreprise de construction de logement individuel en Wallonie. Paille-Tech et EcoLodge sont des sociétés récentes et de petites tailles, ce qui ne leur permet pas (encore) de réaliser ce type d'économie. Face à ces écarts, les deux sociétés

²⁸ Le polyuréthane est un plastique (dérivé du pétrole).

soulignent la différence de produit qu'elles offrent par rapport à Thomas & Piron. C'est la différence de performance énergétique qui expliquerait l'écart de prix :

« {...} si on compare à une maison, Phénix, Thomas & Piron, Blavier, ou ce genre de constructeur, qui est tout juste en répondant à la PEB et qui a vendu une maison sur catalogue sans option, on va être plus cher. C'est clair, mais ça ne va pas du tout être la même maison. Le coefficient de performance, il est trois fois supérieur quand on le fait chez nous. Donc ce n'est pas comparable. Maintenant je crois que si on demande à Thomas & Piron, Blavier, de faire une maison de la même qualité énergétique que la nôtre, on devrait être à peu près similaire » (Lefrancq Julien, Paille-Tech, BU11 ; P29).

Le prix à lui seul apparaît donc plutôt comme un frein au développement de l'utilisation de ballots de paille.

L'auto-construction

La construction en ballots de paille, de par son histoire et sa faible technicité (cf. 4.1, 4.2), est un type de construction aussi réalisé par des auto-constructeurs. Si les marges bénéficiaires et la main d'œuvre sortent des coûts de construction, une économie importante peut être réalisée. Nous proposons des estimations sur base de nos propres calculs et sur des calculs effectués par des auto-constructeurs eux-mêmes. Bien que très imprécises puisque nous ne disposons pas du détail de ces estimations, elles donnent une première idée d'un ordre de grandeur.

L'agriculteur F. Daniel vend ses ballots à 3 euros pièce HTVA. Il vend ses ballots en paille biologique à 3,5 euros HTVA. Pour construire 1m² de mur, il faut 3 à 4 ballots (Evrard et al. 2015a, p.98). Pour une maison de 160m², il faut environ 324 m² de murs, soit près de 1.134 ballots. Cela représente environ 4.116 euros (TVAC) en paille non biologique et 4.800 euros (TVAC) pour des ballots en paille biologique. Si la terre est gratuite (car récupérée sur le terrain de construction ou sur un autre chantier - terre excavée), et sans compter l'éventuelle menuiserie pour la structure, le coût des murs de la maison est inférieur à 5.000 euros.

Selon l'architecte et auto-constructrice A. Bourgeois, faire construire sa maison en ballots de paille par une entreprise lui aurait coûté 550.000 euros pour 300m². Elle a décidé de la construire elle-même et selon ses calculs, cela lui coûterait 300.000 euros, soit 1.000 euros par m². (Bourgeois Anne, BU8 ; P52-P54).

La diminution du coût est bien marquée aussi dans la construction du local technique de B. D'Huyvetter. Il a cherché à construire ce local en dépensant le moins d'argent possible. Il estime

que la construction du local de 20m² lui a coûté entre 1.500 et 2.000 euros, soit 100 euros par m² (D'Huyvetter Benjamin, BU5 ; P16). Les chiffres annoncés ne s'appliquent bien entendu pas à toutes les constructions en ballots de paille. C'est d'ailleurs là que réside aussi l'intérêt de l'auto-construction : chaque projet est différent puisque chacun l'adapte à ses besoins.

L'auto-construction en ballots de paille apparaît donc moins chère que la construction d'une maison clé sur porte de Thomas & Piron. Toutefois, il faut ajouter au coût de la construction le temps de travail de l'auto-constructeur. Par exemple, pour la construction de son local technique, B. D'Huyvetter a travaillé sur son projet pendant 1 mois à raison de 5 jours par semaine. Si l'on se base sur un salaire de 15€ par heure qu'il aurait pu gagner s'il travaillait ailleurs, la construction lui a coûté 235€/m² au lieu de 100€/m². Malgré cette augmentation significative du coût de construction, il reste bien moindre que celui d'une construction via une entreprise de construction quelle qu'elle soit.

Entreprise	Prix au m² (TVAC)
Thomas & Piron	1.250 à 1.665 €
Paille-Tech	2.127 €
EcoLodge	1.469 à 1.638 €
Auto-construction (Local technique - maison)	100 - 1.000 €

Projections et limites

Un autre coût n'a pas été relevé dans le prix de la construction en ballots de paille : l'épaisseur de murs en ballots de paille (de 43 à 53 centimètres, cf. partie 2). Cette épaisseur des murs vient directement « mordre » sur l'espace à vivre. F. de Barquin (BU9 ; P68) considère que la réduction de la surface habitable entre indirectement dans les coûts de la construction. Néanmoins, les murs Optimax et Optimum+ réalisés par Thomas & Piron et qui ont des performances énergétiques semblables à celles d'un mur en ballot de paille (label A, A+, A++) ont une épaisseur d'environ 45 cm²⁹. Il convient donc de relativiser la réduction potentielle de la surface habitable.

²⁹ Pour les murs en ballots de paille : 35 ou 45 cm de ballots + 4 cm d'enduit intérieur + 4 cm d'enduit extérieur = Pour les murs Thomas & Piron : 14 cm de béton cellulaire + 3cm de vide ventilé + 18 cm d'isolant + 10 cm de brique de parement = 45 cm sans compter les finitions intérieures (Thomas & Piron s.d.).

Selon Chaussinand, Scartezzini et Nik, à performances énergétiques égales, la construction en ballots de paille n'est pas plus chère que la construction utilisant des matériaux traditionnels. Ils prévoient que ce prix pourrait même diminuer dans les années à venir grâce à l'augmentation du nombre de professionnels dans le domaine de la construction en ballots en paille (Chaussinand, Scartezzini et Nik 2015, p.302). De plus, les exigences des labels PEB vont tendre vers le « basse énergie » ou le « passif »³⁰ d'ici 2021 pour les maisons unifamiliales (SPW: DGO4 2016, pp.4-5), ce qui devrait faire augmenter le prix des constructions neuves et des rénovations. Il faudra une quantité de matériaux de construction traditionnels plus importante pour atteindre le label A, A+ ou A++. Par contre, les constructions en ballots de paille répondent déjà à cette future réglementation. Il ne faudra donc pas modifier les standards de construction ni les prix.

Enfin, les matériaux classiques sont issus de ressources non renouvelables dont les prix vont augmenter à mesure que les réserves s'amenuisent. La paille en tant que matériau renouvelable ne devrait pas connaître une telle évolution. Le discours de F. Daniel se fait particulièrement fort à ce sujet : les atouts de la paille en construction (isolant, structure et support d'enduit), le peu de techniques et d'énergie nécessaire à son utilisation, sa performance énergétique et son prix en feront un matériau incontournable à l'avenir :

« {...} Au fur et à mesure que le temps passe, tous les matériaux augmentent de prix ce qui ne sera jamais le cas de la paille de façon disproportionné. L'écart se creuse, chaque jour qui passe. Chaque jour qui passe est à l'avantage de la paille, tous les autres étant liés au pétrole ils ont vraiment une espérance de vie limitée que la paille n'a pas. On sait donc que paille, à long terme, c'est la seule chose qui va rester. Même d'autres matériaux comme le chanvre, etc. n'étant pas du tout structurel, ils font que du remplissage, la paille on ne peut pas faire plus simple que ça. À part devoir la fauchée à la main et devoir la mélanger à l'argile directement parce qu'on ne veut pas presser, même la presse on peut la faire tourner à la main s'il faut ou avec un cheval. C'est vraiment un matériau avec une résilience hors du commun et d'ailleurs c'est l'un des plus anciens. {...} » (Daniel Fabian, BU3 ; P91).

4.2.2 Rentabilité des entreprises qui construisent en paille

Nous nous penchons maintenant sur la façon dont un agriculteur, spécialisé dans la production de ballots de paille pour la construction, et des entreprises qui les utilisent, envisagent le

³⁰ Labels : A, A+ et A++ pour le passif

développement de leurs activités. Nous tentons de dégager les enjeux auxquels ils font face pour leur développement futur.

L'agriculteur : concurrence et marketing

F. Daniel, agriculteur et auto-constructeur, actif dans le milieu de la construction en paille depuis plus de dix ans, vit de deux activités : la culture céréalière et la production de ballot pour le secteur des entreprises de construction. La deuxième vient en soutien de son activité première. Il ne pourrait actuellement pas vivre de la production de ballot de paille. Pour en vivre mieux, il avait choisi d'augmenter ses prix de 15%. Il explique : « {...} *On n'a pas nous ce levier-là parce qu'en agriculture la concurrence est très rude. Mon ballot, déjà si je le bouge de 15%, j'avais déjà commencé à avoir plus de concurrence et il commence de fait à y en avoir.* {...} » (Daniel Fabian, BU3 ; P76). Tant que les marges restent faibles, la production de ballots pour la construction intéresse peu les autres agriculteurs et F. Daniel garde ses parts de marché.

Il envisage une autre façon de développer son activité : faire du marketing autour de la construction en ballots de paille. Toutefois, il ne génère pas de bénéfices suffisant pour investir dans la publicité car ses marges sont très faibles : « *Quand je laisse tomber 5 cents, ma marge est partie.* » (BU3 ; P52). Il compare sa situation à celle des producteurs de matériaux traditionnels : « *Ils vont faire une plus-value colossale et donc générer une publicité et un lobby important* ». (BU3 ; P76).

L'agriculteur souligne que sa priorité reste la culture céréalière car c'est ce qui lui permet de vivre actuellement.

Les entreprises de construction : préfabrication, marchés publics et modèles d'expansion

Après l'agriculteur, la société de construction prend la main dans la chaîne de la production de bâtiments en ballots de paille. Nous développons le cas des deux sociétés wallonnes : Paille-Tech et EcoLodge. Ces deux sociétés sont des coopératives et se fournissent en matériaux localement.

Malgré des débuts difficiles, Paille-Tech est aujourd'hui une société rentable et bien établie. Elle produit une dizaine de constructions par an depuis 10 ans. EcoLodge, créée en 2017, est optimiste sur ses perspectives : « *On essaye de viser une vingtaine de cubes par année en sachant qu'on a déjà plusieurs permis d'urbanisme en cours avec un tel nombre de cubes. Il y a des chances que ce chiffre soit facilement atteint voir dépassé et donc il faudra augmenter les équipes de productions* {...} » (Mestdagh Vincent, BU01 ; P39). La société cherche

principalement des promoteurs immobiliers pour qu'ils accueillent ses constructions (BU01 ; P04-P08).

EcoLodge et Paille-Tech font toutes les deux de la préfabrication en atelier. Les murs réalisés sous forme de modules sont créés dans des hangars et montés en quelques jours sur chantier. Selon la CCW, la préfabrication est devenue capitale pour le développement d'une société de construction : « *On maîtrise les coûts et on maîtrise la qualité. On maîtrise les risques aussi de la construction sur chantier donc c'est une tendance qui est en train de se développer* » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P16). Si la construction en ballots de paille « {...} *passé le défi de la préfabrication, c'est déjà très important {...}* » (BU10 ; P59). L'étape suivante selon la CCW est de réaliser de la préfabrication complète, qui intègre directement toutes les installations techniques (plomberie, électricité, etc.) dans ses murs. Cela leur donnerait l'occasion de se développer plus largement et de percer dans les marchés urbains (*Ibidem*).

La réalisation de marchés publics semble également être un objectif central pour les deux sociétés. J. Lefrancq de la société Paille-Tech note l'enjeu que représente un marché public pour une jeune entreprise innovante : « *faire du marché public {...} c'est idéal pour plomber ta boîte si ça se plante mais c'est aussi idéal pour lui donner des lettres de noblesses* » (BU11 ; P50). Nous reviendrons sur les marchés publics au point 5.6.

Les deux sociétés envisagent de manière différente le développement de leurs activités. L'option privilégiée par Paille-Tech est la franchise. Cette option permet le déploiement des activités et des associations momentanées entre les franchises pour des grands projets tout en gardant des entreprises à taille humaine. L'option privilégiée par EcoLodge est l'agrandissement de la structure et l'augmentation du nombre de travailleurs.

Ainsi, ces deux sociétés de construction semblent viables sur le plan économique. Elles rencontrent leurs objectifs par rapport au nombre de constructions réalisées. Elles considèrent néanmoins que leur modèle va devoir évoluer afin de permettre à leur business et à la construction en ballots de paille de progresser.

4.2.3 Économie locale et emploi

Nous pouvons maintenant mettre notre analyse des caractéristiques techniques et des impacts environnementaux de la construction en ballots de paille en parallèle avec certaines dimensions des stratégies et des plans wallons analysés en partie 1. Nous constatons que la construction en ballots de paille s'inscrit dans plusieurs stratégies et plans wallons (Gouvernement wallon et

SPW: DGO4 2017; Gouvernement Wallon 2016; Région wallonne 2015; Gouvernement wallon et SPW 2018)³¹.

La construction en ballots de paille intensifie le recours aux circuits courts locaux et à l'économie circulaire mis en avant dans ces stratégies et plans. Étant donné la production très locale de la paille et la possibilité de rendre la paille à la filière agro en fin de vie (cf. 4.1.3, 4.1.4), ce matériau s'inscrit parfaitement dans les objectifs wallons. Il faut néanmoins être vigilant à privilégier l'utilisation de paille locale et non importée. Le recours à l'importation augmente les impacts environnementaux et ne permet plus de s'inscrire dans les circuits courts.

La construction en ballots de paille s'inscrit aussi dans la Stratégie wallonne de développement durable. En particulier, l'utilisation de la paille en construction répond à l'objectif de l'utilisation rationnelle de la biomasse. Actuellement, la paille est principalement broyée sur champ pour aérer et nourrir la terre, ce qui permet de meilleures récoltes pour l'alimentation humaine. Cette opération est une priorité et l'utilisation de la paille en construction n'y fait pas obstacle (cf. 4.1.3). Contrairement au foin, elle n'est pas utilisée pour l'alimentation animale. Stockée dans les murs pendant la durée de vie du bâtiment, elle peut potentiellement retourner dans les filières agro lors de la démolition (cf. 4.1.3, 4.3.2 et 4.4).

La construction en ballots de paille peut aussi représenter une opportunité pour l'emploi en Wallonie. En ce sens elle répond aux objectifs de deux plans. En effet, la production étant locale, la construction en ballots de paille accroît la demande en main-d'œuvre locale. A. Argelès affirme en parlant de l'écoconstruction que c'est un secteur qui se développe petit à petit : « *On voit les tendances et c'est des marchés qui se développent* » (BU10 ; P47). Comme nous l'avons déjà énoncé plus tôt, le secteur de la construction est l'un des multiplicateurs d'emplois les plus importants. Le secteur emploie quelque 80.000 travailleurs et subit actuellement une pénurie de main d'œuvre : 3.034 places vacantes début 2018. Ces places sont difficiles à pourvoir en raison de la technicité grandissante du travail et de la pénibilité du travail. Le développement de la construction en ballots de paille peut se présenter comme une solution à ce problème. La construction en paille nécessite peu de bagage technique, n'implique pas d'utiliser de machinerie lourde et aurait un impact plus faible sur la santé (cf. 4.1 et 4.3.7). Cette amélioration du cadre de travail permettrait d'augmenter l'attractivité du secteur. Le développement de la construction en ballots de paille s'inscrit donc également dans les objectifs

³¹ Dans l'ordre : Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme, 2^{ème} stratégie de développement durable, Plan Marshall 4.0 et Plan wallon des déchets ressources

de l'Alliance emploi-environnement développée par le Plan Marshall 4.0 (cf. 3.3.2). Celle-ci a effectivement pour objectif de « *Faire de l'amélioration de l'environnement une source d'opportunités économiques et de création d'emplois (...)* » (Gouvernement Wallon et SPW 2016, p.10).

En revanche, la construction en ballots de paille entre en tension avec d'autres dimensions des plans et stratégies régionaux. Premièrement, la construction en ballots de paille peut être en contradiction avec l'objectif de limitation de l'étalement urbain défini dans le Schéma de développement territorial. Elle nécessite en effet de s'implanter sur de nouveaux terrains ou de rénover des maisons en augmentant la largeur des murs (car il faut ajouter la paille à la structure existante). Deuxièmement, malgré des impacts environnementaux réduits, la construction en ballots de paille n'en est pas exempte surtout dans le cas d'une mauvaise gestion du matériau en fin de vie. Comme nous l'avons mentionné, la paille pourrait pourtant retourner dans la filière agro au lieu d'être incinérée ou enfouie hors champ.

Les avantages économiques de la construction paille peuvent être un levier important dans le développement de ce système constructif. M. Deproost du SPW indique en effet que la priorité politique semble être le développement des circuits courts et locaux.

« {...} *Et puis il peut y avoir un coup d'accélérateur ou pas donc en fonction de ça les priorités sont là ou pas. Pour l'instant on n'a pas spécialement de demandes par rapport aux produits naturels, on a surtout une demande pour avancer sur les circuits courts, sur des produits locaux. Ça tout le monde s'accorde à le dire et pour nous c'est une aubaine car dans les matériaux de construction locaux c'est principalement des matériaux écologiques.* » (Deproost Magali, SPW, BU6 ; P49)

4.3 L'influence des lobbys

En Région wallonne, il n'existe pas de lobby dédié à la paille ou à la construction ballots de paille. Nous avons présenté au point 3.3.1 les différents lobbys actifs dans le secteur de la construction. Pour rappel, les trois lobbys principaux sont : la Confédération Construction Wallonne (CCW), qui représente des entreprises de construction traditionnelles, CAP Construction, qui est un cluster d'entreprises traditionnelles pour le développement durable et le Cluster Eco-construction, qui est un cluster qui représente les entreprises d'écoconstruction. Nous allons analyser les objectifs de chacun de ces lobbys, leurs moyens et leurs modes d'organisation afin de comprendre leur positionnement face à l'émergence d'un nouveau système constructif sur le marché.

Objectifs

Un lobby est une organisation qui a pour vocation la représentation et la défense des intérêts de ses membres. Les différents lobbys du secteur de la construction cherchent à créer un cadre stable pour favoriser la croissance et la compétitivité des entreprises qu'ils représentent. Ils relaient les intérêts des entreprises de construction auprès des décideurs politiques.

Les objectifs de la CCW entrent tout à fait dans ce cadre : « {...} *les entreprises nous paient pour les représenter dans les différentes matières {...}* » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P01). « {...} *Notre job est de faciliter un cadre de marché qui permet la croissance et le développement de nos entreprises. {...}* » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P30). La CCW devance et influence les évolutions de la réglementation pour répondre aux besoins des entreprises qu'elle représente sur le plan administratif, social, économique, financier, juridique, technique, de gestion de la qualité et formatif (Confédération Construction Wallonne 2018, p.8). Puisque la CCW représente des entreprises de construction traditionnelle, elle défend leurs intérêts particuliers auprès des acteurs et des organes politiques (Confédération Construction Wallonne 2018, p.7). En l'occurrence, la CCW représente des producteurs et des utilisateurs de matériaux qui sont dérivés du pétrole et de minéraux, elle cherche donc à maintenir leur position dominante et à développer la compétitivité de ce type de produit sur le marché. A. Argeles de la CCW explique : « {...} *Il faut bien comprendre qu'ici nous sommes en contact avec des producteurs issus de la pétrochimie* » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P44) et « *Il y a une grosse culture du béton en Belgique c'est clair parce qu'on est des producteurs de béton, parce qu'on a les matières premières pour le béton et le béton restera important.* » (BU10 ; P46).

Face aux développements des enjeux environnementaux, les entreprises traditionnelles ont dû s'adapter pour répondre aux exigences politiques. Dans cette optique, CAP Construction, un lobby consacré au développement durable a été créé par des acteurs du secteur de la construction traditionnelle. Ce lobby est composé de huit partenaires principaux, dont Knauf, Isover, Derbigum, Foamglas (CAP Construction s.d.) qui sont quatre multinationales consommatrices de matériaux non renouvelables : sable, pétrole, gypse, basalte, etc. L'orientation défendue est une construction durable « smart », c'est-à-dire axée sur les nouvelles technologies pour diminuer les impacts environnementaux : smart building, internet des objets, numérique, domotique (*Ibidem*). Elle encadre ses membres pour qu'ils entrent dans le cadre de la construction durable et pour qu'ils montent en compétences sur ce sujet. Le lobby ne soutient pas de changement radical dans les méthodes de construction : en tant que représentant de

producteurs et utilisateurs de matériaux non renouvelables, le lobby cherche plus à adapter son discours pour répondre aux enjeux actuels.

Le Cluster Eco-construction représente et défend les producteurs et utilisateurs d'écomatériaux. Leur objectif est que toutes les filières qu'ils représentent voient la même évolution que le bois, qui est passé de 3% à 10% du total des constructions (Poskin Hervé-Jacques, BU2 ; P20). Le Cluster cherche à développer l'utilisation des écomatériaux et souhaite faire de la RW une référence dans le cadre de la construction écologique (*Ibidem*, BU2 ; P16). Le Cluster a pour objectif que ses sociétés membres « {...} *se connaissent, qu'elles connaissent le marché, qu'elles puissent attaquer des marchés supérieurs à leur propre marché intrinsèque, pouvoir répondre à des appels d'offres qui sont supérieurs à simplement les premiers appels d'offres auxquels on répond mais ça sert aussi pour innover, monter en compétences {...}* » (*Ibidem*, BU2 ; P01). En tant qu'acteur relativement nouveau, le Cluster cherche surtout à se faire une place et à gagner en visibilité et en influence.

Ces trois lobbys ont donc des objectifs similaires mais orientés vers les conceptions spécifiques que les acteurs qu'ils représentent ont de la construction. Leur capacité à atteindre leurs objectifs respectifs dépend de leurs moyens et de leurs modes d'organisation.

Modes d'organisation

La CCW est le plus grand lobby de construction en Wallonie. Financée en partie par les cotisations des membres, ses moyens sont conséquents. Elle est en outre épaulée par la CC qui représente ses intérêts au niveau national. La CCW est divisée en plusieurs départements et confédérations locales. Tous les thèmes approchant de près ou de loin la construction y sont discutés afin de garantir la pérennité des entreprises représentées. De plus chaque métier de la construction possède sa propre fédération afin de soulever des questions spécifiques. CAP Construction s'est spécialisé sur la question du développement durable. À l'inverse du CCW, elle n'est formée que d'une seule branche. Le Cluster Eco-construction représente des jeunes et des petites entreprises qui ne peuvent se permettre de payer des cotisations importantes. Leur budget est donc principalement issu des subventions : « {...} *on est un organe subventionné par la Région. Si on regarde notre budget il est comparable, je dis comparable mais il est vraiment inférieur, au budget d'une grosse multinationale simplement pour sa com. {...}* » (Poskin Hervé-Jacques, BU2 ; P05). Ce budget ne leur permet pas de créer des subdivisions spécialisées au sein du Cluster.

Ce mode d'organisation rend la représentation des entreprises membres plus compliquée. Lorsque le Cluster engage des discussions avec le politique, c'est en tant que représentant de tous les écomatériaux (le chanvre, la laine de mouton, le bois, la paille, etc.). De même, le rôle de promotion et de publicité exercé par le Cluster est rendu compliqué par cette absence de subdivision. H-J Poskin insiste : « (la mission du Cluster) {...} est vraiment transversale dans toutes les techniques et donc on a vraiment une réflexion transversale, c'est-à-dire qu'on va défendre les écomatériaux et on va dire : « Prenez le meilleur écomatériau par rapport à votre situation », ce qui est un discours qui est beaucoup plus réaliste. {...} « Vous avez une série d'écomatériaux, prenez le meilleur dans votre situation », ce qui est plus respectueux et qui correspond mieux à la situation réelle mais qui est beaucoup plus difficile à faire passer. » (Poskin Hervé-Jacques, BU2 ; P15). Avec un organe pour assurer la représentation de chaque matériau, la CCW semble posséder un avantage non négligeable.

Résultats pour la paille

En ce qui concerne la construction en ballots de paille en particulier, seul le Cluster Eco-construction assure un rôle de représentation du matériau auprès des politiques. La CCW et CAP Construction représentent des entreprises qui ont recours à d'autres techniques et matériaux mais surtout qui se réfèrent à une autre conception de la construction durable. La CCW se contente d'informer ses membres des opportunités économiques à saisir : « {...} « il y a des nouveaux matériaux, il y a du nouveau marché qui se présente » voilà sans prendre position. {...} » (Argeles Aymé, BU10 ; P38). Forte de sa supériorité numérique, de son ancienneté et du soutien de la CC, la CCW a su s'établir comme l'interlocuteur privilégié des politiques régionales. Selon H-J Poskin, « {...} CAP Construction a été créée en opposition avec le Cluster Eco-construction par les majors qui voulaient avoir un esprit vert, une peinture verte sur leur façade {...} » (Poskin Hervé-Jacques, BU2 ; P06). Nous identifions un paradoxe en ce qui concerne la relation avec le politique. Le développement durable concerne à la fois l'économie et l'environnement. Le poids économique de la CCW et de CAP Construction leur donne le « lead » concernant les orientations du secteur. Pourtant, les stratégies et les plans régionaux prétendent soutenir les systèmes de construction innovants et durables, ce qui correspond plutôt au travail mené par le Cluster Eco-construction. Selon nous, ce paradoxe est causé par la position ambiguë du politique en ce qui concerne la relation entre la croissance économique et la préservation de l'environnement. Le politique parle d'ailleurs de construction durable et non de construction écologique. La construction en ballots de paille, qui n'est

représentée que par le Cluster Eco-construction, n'a pour l'instant pas un espace suffisant pour démontrer les solutions à la fois économiques et environnementales qu'elle apporte.

Néanmoins, malgré ces tensions essentielles, la CCW entretient des liens avec le Cluster Eco-Construction. A. Argeles de la CCW est aussi administrateur du Cluster Eco-Construction. On voit donc que les frontières ne sont pas aussi marquées qu'elles le semblent. Les deux lobbys s'adressent même parfois ensemble au politique pour certaines questions (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P30). Pour le CSTC, la frontière entre ces deux sous-secteurs du secteur de la construction devrait être abolie : « {...} *il faut arrêter d'opposer les écoconstructeurs avec les constructeurs plus traditionnels. Ça n'a plus de sens, il faut que maintenant tout le monde se donne la main et agisse dans la même direction. Ce ne sont plus des concurrents, ils peuvent être partenaires. {...}* » (de Barquin Fabrice, BU9 ; P46)

4.4 La recherche sur le matériau ballot de paille

Nous l'avons mentionné au début de ce travail, les sources d'informations qui traitent de la construction en ballots de paille sont de deux types : des manuels « how to » et des recherches scientifiques. Nous analysons le passage entre ces deux types de travaux avant de nous concentrer sur les acteurs de la recherche scientifique wallons et européens et les orientations que semblent prendre leurs travaux afin de déterminer l'influence qu'ils peuvent avoir sur le développement de la construction en ballots de paille.

Guides et manuels

En RW, les premières maisons en ballots de paille ont été construites par des auto-constructeurs. Les premières connaissances locales se sont développées avec « *l'intelligence des mains sur le chantier* » (Delhaye Jean-Marie, BU7 ; P10 et P18). Le perfectionnement des techniques s'est effectué par essais-erreurs et via les retours d'expérience. Les erreurs ne sont pas dissimulées, elles servent de levier pour des améliorations et des innovations (King et de Bouter 2009, p.20). Grâce au développement d'internet, la communication et l'échange d'informations entre auto-constructeurs du monde entier se sont développés (King et de Bouter 2009, p.20). Selon l'architecte J.-M. Delhaye, ce « *brassage de savoir* » a orienté les évolutions de la construction en ballots de paille en RW (Delhaye Jean-Marie, BU7 ; P12). Des ouvrages et des guides pour l'auto-construction ont été publiés.

Les premières entreprises de construction en ballots de paille se sont approprié ces savoirs via ces ouvrages. Ces ouvrages proposent des informations brutes qui ne donnent pas les garanties

de la recherche appliquée. Elles ne permettent pas de répondre aux exigences normatives (ATG, PEB, ACV, EPD, etc.) du secteur de la construction. Pour s'insérer et se développer dans le marché de la construction, la construction paille a donc besoin de produire des données scientifiques qui évaluent et garantissent les propriétés du matériau.

Les premières recherches

Depuis une petite dizaine d'années, les premières études sont réalisées en Wallonie et en Europe pour tenter de répondre à la nécessité d'avoir des informations fiables sur la construction en ballots de paille.

La recherche sur la construction en paille est plus développée dans d'autres pays. Les acteurs wallons de la construction traditionnelle sont peu enclins à utiliser les résultats qui en sont issus. Lorsqu'on évoque les données françaises par exemple, le CSTC souligne la spécificité des matériaux belges : « {...} *c'est leurs réflexions propres et puis nos habitudes constructives, nos matériaux ne sont pas tout à fait les mêmes. On ne peut pas simplement se contenter de faire du copier-coller. {...}* » (de Barquin Fabrice, BU9 ; P32). Les acteurs de la construction paille soulignent au contraire l'absurdité de la multiplication des études locales. Ils considèrent que les variations dans la qualité de la paille sont minimales et ne justifient pas des investissements financiers aussi conséquents.

En Wallonie, une seule étude dédiée à la paille a été menée. La recherche « aPROpaille » a été menée entre 2011 et 2015. Elle a été réalisée dans l'optique de développer une filière de production de bâtiments durables constitués d'une ressource naturelle locale et intégrant une expertise et une main d'œuvre locale (aPROpaille s.d.). Ce projet s'inscrit dans le développement de bâtiment zéro-énergie durant la phase d'utilisation, de production des ressources et de construction du bâtiment. Des tests en laboratoires, des simulations numériques, du monitoring et des recherches sur les origines et son potentiel de développement ont été effectués. Trois vadémécums ont été publiés afin de présenter les résultats (*Ibidem*). Cette recherche complète analyse toutes les questions relatives à l'utilisation du matériau paille en construction : résistance thermique, méthodes de construction, potentiel paille de la Belgique, etc.

L'entreprise Paille-Tech a participé à cette étude en tant qu'entreprise locale innovante. L'entreprise s'est montrée déçue de certains résultats de l'étude qu'elle estime imprécis. Par exemple, elle estime que le monitoring du bâtiment a été effectué sur une période de temps trop courte pour donner des résultats fiables. Paille-Tech regrette qu'il se soit terminé sur des

simulations réalisées sur ordinateur. De même, l'entreprise estime que les choix méthodologiques posés pour l'ACV ont impacté de manière trop négative les résultats du matériau paille et ne reflètent ainsi pas correctement la réalité (Lefrancq Julien, Paille-Tech, BU11 ; P57 et P58). Néanmoins, cette première recherche en Wallonie permet de donner une certaine visibilité au matériau et fournit de nombreuses informations de qualité.

Au niveau européen, le projet de recherche « UPstraw » initié en 2017 est financé à hauteur de 3.8 millions d'euros par l'Union européenne pour un budget total de 6.4 millions d'euros (UPSTRAW 2019b). Ce projet doit présenter ses résultats en 2020. L'objectif général de cette recherche est de répondre aux besoins locaux de connaissance sur la construction en ballots de paille et de mettre en avance l'utilisation de la paille comme matériau de construction pour répondre aux enjeux du logement, de la construction et de l'environnement dans le nord-ouest de l'Europe (*Ibidem*). Les objectifs spécifiques de l'étude sont : intégrer les PME dans le marché de la construction, instruire sur la construction paille, intégrer les résultats scientifiques dans le BIM, créer une méthodologie pour une ACV, informer grâce à des publications et réaliser des constructions exemplaires publiques et urbaines (UPSTRAW 2019a, p.2). Ce projet de recherche semble répondre effectivement au besoin d'information des entreprises du secteur : « {...} *l'objectif du projet UPstraw c'est de pouvoir mettre en place un cadre technique consolidé pour permettre effectivement d'intégrer le marché en respectant toutes ces prescriptions techniques à respecter. Pour nous ça c'est fondamental.* » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P03). Aucun résultat n'a été publié pour le moment.

Le CSTC

Le Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC) est le centre de recherche le plus important en RW. Nous pouvons rappeler que les entreprises que représente le CSTC sont des entreprises de construction traditionnelle qui utilisent des matériaux de construction pétrochimiques et minéraux. Nous avons rencontré F. de Barquin, responsable au CSTC de la recherche et de l'innovation. Actuellement, le CSTC travaille sur plusieurs thématiques de construction durable : le recyclage des matériaux, l'amélioration de la performance énergétique, l'usage des nouvelles technologies : « {...} *nous en tant que centre de recherche nous tentons de trouver des solutions, que ce soit en termes de recyclage des matériaux, que ce soit en termes d'isolation des maisons pour éviter le chauffage, que ce soit en termes d'inertie thermique pour limiter la climatisation.* {...} » (de Barquin Fabrice, BU9 ; P06).

On remarque que ces propriétés sont des propriétés que l'on peut retrouver dans la construction en paille. Le CSTC a effectivement participé à quelques petits projets d'études sur la construction en ballots de paille : « {...} *d'après les quelques petites études qu'on a pu faire, parce qu'on n'est pas toujours impliqué dans tous les projets, elle a vocation de pouvoir servir effectivement d'isolant de construction, à condition qu'il soit, que la paille soit traitée, soit empaquetée on va dire d'une certaine façon, densifiée, etc. Mais à priori il y a un intérêt environnemental à l'utiliser {...} il n'y a, à priori, pas de problèmes enfin nous on n'a pas détecté de gros problèmes si ce n'est que c'est un matériau assez volumineux.* » (BU9 ; P16). L'intérêt de la paille semble reconnu. Toutefois, cette reconnaissance du potentiel du matériau au niveau constructif et au niveau environnemental est mise à mal par le manque de données fiables et empiriques. Le caractère théorique de ces recherches, que Paille-Tech avait également déploré, freine l'utilisation des données effectivement produites : « {...} *Je sais que vous allez me dire il y a eu des thèses, il y a eu ceci, cela mais c'est resté à niveau très académique et pas appliqué à l'échelle d'un bâtiment enfin, vraiment au concret du problème. {...}* » (de Barquin Fabrice, BU9 ; P18). Les recherches sur la paille peinent à répondre aux demandes du secteur de la construction.

De manière générale, il faut rappeler que le CSTC travaille sur des sujets à la demande de ses affiliés. Ceux-ci étant issu du secteur traditionnel, il n'y pas de réelle demande de recherche sur le matériau paille.

Les études universitaires en architecture

Une autre entrée pour le développement des recherches sur la construction en ballots de paille pourrait se situer dans le discours sur les matériaux biosourcés dans les études d'architectures. Les architectes que nous avons rencontrés indiquent que les matériaux écologiques et innovants n'ont pas été mentionnés dans le cadre du bachelier ni du master (Delhayé Jean-Marie, BU7 ; P09, P14, P15 et Bourgeois Anne, BU8 ; P04, P06). Il y a 10 ans, J-M. Delhayé avait proposé à l'Université de Liège d'insérer l'écoconstruction dans le cursus mais les programmes étaient saturés et la thématique n'avait pas pu être insérée. Des initiations le samedi matin avec des élèves volontaires avaient finalement été organisées. Ce sont principalement des étudiants en Erasmus qui avaient participé aux initiations (Delhayé Jean-Marie, BU7 ; P12).

Nous avons étudié les programmes³² d'architecture de deux des trois universités wallonnes afin de voir s'il y a une évolution : l'Université de Liège (ULg) et l'Université Catholique de

³² (Université de Liège 2018), (Université catholique de Louvain 2017a), (Université catholique de Louvain 2017b)

Louvain (UCL). Aucun cours ne concerne spécifiquement la construction en paille. L'UCL propose en option du bachelier en architecture un cours sur les « *théories du développement durable* » et un cours sur les « *constructions simples* » (Université catholique de Louvain 2017a, p.6). Concernant le master, l'UCL propose un cours en option : « *Architecture durable* » (Université catholique de Louvain 2017b, p.6). A l'ULg, il n'y a pas de cours dédié à la construction « alternative », ni en bachelier ni en master (Université de Liège 2018). Nous n'avons pas analysé les plans de tous les cours suivis en bachelier et en master, il est donc tout à fait possible que les matériaux biosourcés ou écologiques soient abordés dans le cadre de cours généraux (structure, matériaux, projet, etc.). Nous mettons toutefois en évidence que les aspects environnementaux de la construction ne semblent pas faire l'objet d'une attention centrale : les cours qui s'y rapportent directement sont optionnels. On peut faire l'hypothèse que ce manque d'informations ne pousse pas les architectes à s'orienter vers ce type de construction et de matériaux.

4.5 Reconnaissance technique de la construction en ballots de paille

Nous avons déjà évoqué le cadre de certification des matériaux de construction (cf. 3.3.2, 4.4). La certification offre une reconnaissance des caractéristiques techniques du matériau, pour l'ATG et de l'impact environnemental associé à sa production, son utilisation et son traitement, pour l'ACV. Cette reconnaissance favorise l'utilisation du matériau. Les évolutions du secteur de la construction vont vers une normalisation des matériaux afin de faciliter leurs utilisations et d'apporter des garanties aux sociétés de constructions. Nous analysons comme le développement d'outils numériques comme le BIM et TOTEM augmente encore l'importance de ces marquages : « {...} vous vous adressez à des professionnels du bâtiment. Il y a des normes, il y a des certificats, il y a des labels de qualité, utilisez tout ça. Tout ça c'est un ensemble d'outils qui sont à votre service. {...} Voilà, il ne faut pas nous considérer comme un secteur de bricolos {...} » (de Barquin Fabrice, CSTC, BU9 ; P50)

4.5.1 Normalisation technique : l'ATG et le BIM

« {...} le monde de la construction, certainement aujourd'hui et moins que demain, est un monde de professionnel. Les bâtiments deviennent des produits technologiques assez complexes de par la réglementation, de par une série d'évolutions qui font que construire un bâtiment aujourd'hui, c'est une multitude de matériaux qui rentrent dedans : c'est techniquement compliqué. Donc les

nouveaux acteurs qui veulent s'insérer dans tout ce process industriel doivent comprendre qu'il faut montrer patte blanche avant {...} » (de Barquin Fabrice, CSTC, BU9 ; P19)

L'Agrément technique

La spécialisation accrue du secteur de la construction renforce la demande de normalisation des matériaux. L'ATG permet de vérifier la conformité des produits (un matériau ou un assemblage de matériaux) livrés sur chantier (cf. 3.3.2, ATG).

« {...} Ce qu'un entrepreneur de construction recherchera avant tout, c'est aussi une sécurité technique, une conformité technique. {...} que cela soit pour l'incendie, pour l'isolation ». Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P02)

« Il y a quand même un minimum de choses sur le plan technique à démontrer pour prouver que son produit est conforme et de qualité. » (de Barquin Fabrice, CSTC, BU9 ; P19)

Bien qu'elle soit volontaire, la certification du matériau via un ATG est très répandue : les maîtres d'ouvrages, les sociétés de construction et les entrepreneurs utilisent principalement des matériaux certifiés. Les matériaux non certifiés sont donc désavantagés, moins utilisés.

« Effectivement, il y a tout un travail qui doit être fait sur la normalisation de ce type de matériau (les ballots de paille), ce qui est en cours. Cela a un certain coût, c'est parfois même un frein. » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P02)

« On est convaincu que c'est un matériau (la paille), sur le plan environnemental qui a un gros intérêt. Il reste à prouver que sur le plan technique il tient la route. » (de Barquin Fabrice, CSTC, BU9 ; P19)

Le développement de l'utilisation de la paille en construction dépend ainsi fortement de sa certification. Or actuellement en Wallonie, il n'y a pas d'ATG sur le matériau ballot de paille, ni sur les murs en ballots de paille. La paroi Paille-Tech et la paroi ALTAR utilisée par la société EcoLodge, en tant qu'assemblages de matériaux, ne sont pas certifiées. Les entreprises qui produisent des parois en ballots de paille sont donc poussées à normaliser leurs produits. Paille-Tech ou EcoLodge indiquent ne pas avoir un budget suffisant pour investir environ 15.000 euros³³ dans une certification. La société Paille-Tech est consciente qu'un agrément

³³ Nous avons estimé ce montant sur base des frais d'agrément publiés sur le site de l'Union belge pour l'Agrément technique de la construction qui est l'organisme belge de référence pour les matériaux, les produits et les systèmes de construction. (UBAtc 2005, pp.1-4)

technique serait une « *publicité complémentaire* » et un levier pour être sélectionné lors des marchés publics (Lefrancq Julien, BU11 ; P39). Pourtant, ils ne sont pas convaincus par ce système qui ne certifie qu'un produit spécifique, produit par une entreprise particulière. Seuls les murs sortis de l'atelier de Paille-Tech seraient certifiés. Cela obligerait d'autres jeunes entreprises de construction en ballots de paille à certifier leurs propres murs et donc à réaliser également cet investissement. Certifier son mur, revient à s'imposer par rapport aux autres entreprises, or Paille-Tech Paille-Tech insiste : « *la paille, ça doit rester libre à tout le monde.* » (Lefrancq Julien, BU11 ; P34).

En tant que société de construction, Paille-Tech respecte tout de même certaines normes. Les parois en bois respectent les normes de la construction en bois. Les murs sont certifiés par un agrément feu validé par l'Institut de Sécurité Incendie belge. Leur paroi respecte les exigences de la PEB. Cette normalisation apporte les garanties suffisantes pour leur permettre de construire des bâtiments depuis 10 ans, et ce, sans ATG (Lefrancq Julien, BU11 ; P31 et P38). Ce schéma est le même pour l'entreprise de construction EcoLodge. Ils n'ont également pas les moyens de payer un agrément technique, ce qui ne les empêche pas de construire des Wald-Cube depuis 2 ans.

Dans ce schéma de certification des parois en ballots de paille, il viendrait sans doute un moment où les sociétés de construction devraient demander à leur fournisseur de ballots un ATG. Dans le cas de Paille-Tech, cela revient à demander à F. Daniel, qui est le plus grand fournisseur wallon de petits ballots et qui les vend en complément de sa production agricole, de déboursier également 15.000 euros. F. Daniels défend à ce sujet la même position que Paille-Tech, certifier ses ballots revient à obliger les agriculteurs voisins à faire de même. Cette idée semble partagée par les acteurs de la construction en paille et s'oppose à la vision des acteurs du secteur traditionnel : selon les premiers la paille est un matériau naturel qui doit rester libre d'utilisation alors que pour les deuxièmes, la normalisation du produit est inévitable si la construction en ballots de paille veut se développer : « *{...} la priorité c'est de rentrer dans le cadre normatif technique, avoir les ATG et tout ça. C'est une condition nécessaire quand on veut rentrer dans un marché qui n'est pas celui de l'auto-construction en fait.* » (Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P11).

L'absence d'ATG n'empêche pas les sociétés de construction Paille-Tech et EcoLodge de construire des bâtiments. En revanche, elle complique fortement la vente de leurs parois en tant qu'assemblage de matériaux. L'acheteur ne dispose pas d'une fiche technique qui lui permettrait de monter le bâtiment correctement.

Cette absence d'ATG semble tout de même constituer un frein pour le développement de la construction en ballots de paille. Les architectes ont un rôle moteur dans le choix des matériaux : ils portent les projets face aux autorités communales, encadrent leurs clients vers le choix du type de construction et réalisent les plans. Ils sont responsables du projet avec l'entrepreneur de travaux. Or sans, ATG, l'architecte n'a pas de garanties sur le matériau ballot de paille et prend à sa charge plus de risque. La souscription à une assurance³⁴ ne suffit pas forcément à rassurer l'architecte qui s'oriente alors vers des matériaux qui lui apportent plus de garanties. C'est dans ce contexte que certains architectes ou bureaux d'architectes se sont spécialisés dans la construction écologique : Architecture et nature, ALTAR architecture, Atelier Architecture & Développement Durable, La Verte Voie, etc. Une liste de 49 architectes et bureaux d'architecture membres du Cluster Eco-construction est reprise sur leur site (Wallonia Clusters : Cluster Eco-construction 2019).

BIM

L'ATG va prendre de plus en plus d'importance pour les matériaux et pour tous les produits de construction car il sera utilisé dans le cadre du BIM (Building Information Modelling – réalisation de maquettes numériques). Ce nouveau système de représentation numérique du bâtiment est en plein développement. Chaque matériau y est intégré et associé à ses critères techniques. Le programme sera de plus en plus utilisé à mesure qu'il se développe et se professionnalise (Euben 2019, en ligne). Le CSTC anticipe cette évolution : « {...} (Le BIM) ça va remplacer les plans d'architecte. C'est la maquette numérique du bâtiment en fait. Donc fini les plans qui s'étalent sur plusieurs tables, sur plusieurs mètres carrés avec des traits de crayons : on passe au modèle informatique 3D et un modèle intelligent qui n'a pas uniquement des informations justes sur la géométrie du bâtiment mais également sur la composition de ses parois, sur les techniques qui vont être intégrées, chauffage, climatisation. {...} résoudre un problème sur son écran d'ordinateur coûtera moins cher que de le résoudre une fois le bâtiment exécuté. » (de Barquin Fabrice, BU9 ; P07, P11)

Pour qu'un matériau soit utilisé dans le BIM, le programme doit disposer de l'ATG du matériau. Si les systèmes de constructions alternatifs comme la construction en ballots de paille ne possèdent pas d'agréments techniques, ils ne seront pas repris dans le BIM. L'absence de la paille dans ce programme freinera sa crédibilité et son développement : elle ne sera pas

³⁴ L'architecte est couvert par une assurance décennale en cas de dégâts matériels dû aux vices de conceptions et ce jusqu'à 10 ans après la fin de la construction. L'entrepreneur peut également souscrire à une assurance en cas de dégâts sur le chantier (Ordre des Architectes 2014, pp.39-41).

considérée comme une option. La société Paille-Tech a conscience de ce risque : « {...} *si on n'est pas encodé, si on n'existe pas dedans, on ne pourra pas construire, on ne pourra pas être utilisé.* {...} » (Lefrancq Julien, BU11 ; P34).

Ainsi, les entreprises de construction en ballots de paille n'ont pas d'agrément techniques ni pour les murs qu'elles produisent, ni pour les ballots qu'elles utilisent. Ce manque de normalisation ne les empêche pas de construire actuellement. Il freine toutefois la prescription et l'utilisation du matériau paille par les maîtres d'ouvrages et les architectes car ils ne disposent pas d'informations techniques relatives au matériau. Le développement du BIM sera peut-être l'élément déclencheur qui les obligera à réaliser l'ATG pour éviter de rester un marché de niche. Cette normalisation se ferait alors au détriment de petits producteurs et entreprises.

4.5.2 Normalisation environnementale : l'ACV et l'EPD

L'analyse de cycle de vie (ACV) est un autre type de normalisation qui concerne l'impact environnemental d'un produit. Ce type de normalisation apparaît comme une opportunité pour le développement de l'utilisation des ballots de paille en construction en raison de leur impact environnemental moindre (cf. 5.4).

En effet, les ACV permettent d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit. Cette évaluation peut ensuite être intégrée dans une déclaration environnementale du produit (EPD). Cette dernière permet à l'entreprise de communiquer de manière transparente des informations certifiées aux entreprises et aux consommateurs. Les EPD ne sont pas obligatoires. Elles sont toutefois de plus en plus utilisées dans le secteur de la construction. Une EPD certifiant les impacts de la construction en ballots de paille lui permettrait de trouver sa place en tant que matériau de construction innovant et écologique (Chaussinand, Scartezini, et Nik 2015, p.302).

Le secteur de la construction traditionnelle fait également face à cet enjeu. Selon le CSTC : « {...} *On s'attend bien sûr à ce qu'il y ait dans quelques années des réglementations pas uniquement sur l'aspect thermique, énergétique on va dire, du bâtiment mais également sur son poids environnemental. Le jour où il sera interdit de construire un bâtiment qui a plus de X milliers d'équivalent CO2 de poids environnemental, ça va changer les choses forcément. Ça va arriver.* {...} » (De Barquin Fabrice, CSTC, BU9 ; P58). Ces réglementations sont effectivement en cours d'élaboration. Les stratégies et plans régionaux que nous avons mentionnés à plusieurs reprises encouragent le secteur de la construction à réaliser des ACV et des EPD afin de disposer d'informations qui permettraient d'améliorer les impacts environnementaux globaux de la construction (cf. 3.3.2). L'Alliance emploi-environnement

entend : « *inciter ces mêmes fabricants à réaliser des analyses de cycle de vie de leurs produits, aboutissant à des déclarations environnementales des produits (EPD). {...}* (Gouvernement Wallon et SPW 2016, p.51). La Stratégie wallonne de développement durable prévoit de développer les EPD afin de les utiliser dans le cadre des marchés publics au travers de l’outil TOTEM. À terme, il est prévu de lier l’outil TOTEM à la base de données nationale des EPD (B-EPD) (SPF Santé publique 2017). Ce lien permettra d’évaluer précisément l’impact environnemental des produits et matériaux belges et de calculer la performance environnementale des éléments et du bâtiment permettant ainsi d’effectuer des choix pour atteindre un « *optimum performance énergétique - consommation de matière.* » (Deproost Magali, SPW, BU6 ; P75).

En Belgique, il n’y a pas d’ACV reconnue pour les ballots de paille. Il n’existe donc pas d’EPD correspondant à ce matériau ou aux parois intégrant ce matériau. On peut supposer qu’il serait bénéfique pour le secteur de la construction en ballots de paille de réaliser des ACV sur base des normes nationales ou ISO afin de faire reconnaître le bénéfice environnemental qu’elle peut dégager.

Pourtant, selon M. Deproost du SPW : « *c’est eux (les acteurs de la construction paille) qui sont les plus frileux* » (BU6 ; P65). Les acteurs de la construction paille que nous avons rencontrés dans le cadre de nos entretiens ont effectivement souligné la difficulté de réaliser des ACV cohérentes et utilisables pour la construction en ballots de paille.

Premièrement, le secteur de la construction en ballots de paille indique ne pas avoir besoin de réaliser des ACV, qui demandent un certain budget, car ils sont convaincus que leur produit a un impact plus faible que les autres (Mestdagh Vincent, EcoLodge, BU01 ; P09). D’abord, ils considèrent aussi que l’ACV ne prend en compte que certains aspects environnementaux et ne permet pas de voir les liens systémiques entre les dimensions. Elles sont souvent réalisées sur base de simulations informatiques qui ne tiennent pas compte de la réalité du terrain et des services écosystémiques qu’offre la construction en ballots de paille. F. Daniel qui produit des ballots ne juge pas qu’une ACV soit nécessaire, ce qui ne signifie pas qu’il ne réfléchit pas aux impacts de son mode de production. Il envisage actuellement de réaliser ses cordes en chanvre pour remplacer les cordes en nylon et diminuer leur impact environnemental (Daniel Fabian, BU3 ; P11).

Ensuite, les acteurs de la construction en paille que nous avons rencontrés ne croient pas aux ACV parce qu’elles sont subjectives en matière d’allocation d’impact : « {...} *Donc il y a des*

bureaux de recherche énorme, notamment sur l'énergie grise que tout le monde n'a pas encore intégrée. Ils disent ça, on a fait l'écobilan du ciment c'est génial, la paille c'est merdique parce qu'ils introduisent dedans des choses. Voilà c'est un choix {...} ». (Delhaye Jean-Marie, BU7 ; P20). Paille-Tech évoque l'ACV réalisée dans le cadre de la recherche aPROpaille (qui n'est pas utilisable pour être insérée dans une EPD car c'est une recherche d'intérêt public qui ne peut pas privilégier les intérêts d'une société) : « {...} ils mettent des ampèremètres sur les foreuses, ils demandent où on habite, ce qu'on fait, ils considèrent que sur le champ il y a des engrais. Déjà pour nous c'est une hérésie totale, bien oui mais alors fais l'ACV du pain, pas de la construction en paille. {...} » (Lefrancq Julien, BU11 ; P59).

Enfin, trois acteurs ont également souligné le fait que la paille, comme le bois, est un puits de carbone (Lefrancq Julien, BU11 ; P24 et Daniels Fabian, BU3 ; P07 ; Deproost Magali SPW, BU6; P72). Lors de sa croissance, la plante stocke du CO₂ qui n'est relâché dans l'atmosphère que lorsque la plante se décompose ou lorsqu'elle brûle. Ce stockage temporaire de CO₂ dans les murs des bâtiments permet d'apporter un effet tampon qui peut lisser quelque peu les émissions (Evrard et al. 2015b, pp.265-267). Ce service rendu par la paille n'est pas mentionné dans toutes les ACV.

Notre analyse nous amène à conclure que le secteur de la construction paille est en tension avec la normalisation technique et environnementale des matériaux de construction. La normalisation permettrait au matériau paille d'intégrer plus facilement le marché de la construction mais le coût des procédures et le peu d'intérêt qu'ils y trouvent ne les conduisent pas à franchir cette étape. Le politique est conscient qu'il est nécessaire d'inciter le développement des ATG et des EPD auprès de ces jeunes entreprises.

A ce sujet, il pourrait être intéressant de s'inspirer du modèle français qui possède des « règles professionnelles de construction en paille », sans remettre en cause le système des ATG. Ce dernier pourrait être assoupli en ce qui concerne le ballot de paille. Par exemple, l'ATG de la paille pourrait définir des marges pour chaque critère technique (type de paille, dimension des bottes, orientation des fibres, densité de bottes, conductivité thermique, taux d'humidité, etc.) mais aussi pour la mise en œuvre de ce matériau (stockage, stabilité, pose des bottes).

4.6 Évolution législative & politique

Le discours et les actions politiques wallonnes sont imprégnés du paradigme du développement durable. La construction durable cherche à promouvoir la croissance économique et à préserver l'environnement grâce à des innovations technologiques. Les compétences de la RW en matière

d'économie et d'environnement la situent au cœur de ces enjeux. Son intérêt pour la réduction des impacts environnementaux a été démontré à plusieurs niveaux : les plans et stratégies wallonne pour le développement durable, le financement du Cluster Eco-construction depuis 2003, les primes « matériaux naturels » instaurées par le gouvernement Rudy Demotte II (2009-2014) et supprimées depuis, les primes de recherches accordées pour le projet aPROpaille, l'évolution des exigences PEB, etc.

Malgré ces premiers pas, la construction en ballots de paille reste un secteur niche. Nous émettons l'hypothèse qu'elle a des difficultés à se développer en raison du poids du secteur traditionnel et des liens étroits qu'il entretient avec le politique. Les compétences économiques de la Région l'ont conduite à préserver ses relations de longue date avec les acteurs qui y amènent de la richesse (emploi, investissement). Si la Région entend réellement réduire les impacts environnementaux du secteur de la construction, il apparaît opportun de donner une place aux matériaux écologiques afin qu'ils puissent révéler leur potentiel. La construction en ballots de paille peut entrer dans cette catégorie. Selon les acteurs de ce secteur, elle a besoin d'être mise en avant pour intégrer pleinement le secteur concurrentiel et traditionnel de la construction.

« Le gros levier qui manque, et ça sans appui politique ça ne bougera jamais, parce qu'on a besoin d'être mis en avant, on n'a pas besoin d'argent. On a juste besoin que le système soit mis en avant » (Daniel Fabian, BU3 ; P76).

Sur base de nos entretiens, nous avons imaginé trois hypothèses qui permettraient de participer au déploiement de la construction écologique, dont la construction en ballots de paille. Premièrement, les primes « matériaux naturels » pourraient être réinstaurées afin d'encourager la demande. Des discussions seraient en cours à ce sujet entre la CCW, le Cluster Eco-construction et le politique (Poskin Hervé-Jacques, Cluster Eco-construction, BU2 ; P06 et Argeles Aymé, CCW, BU10 ; P44). Deuxièmement, des taxes ou des amendes pourraient être attribuées aux constructions dont l'impact environnemental dépasse un certain seuil (émission de CO2 par mètre carré, par exemple). L'outil TOTEM pourrait être utilisé afin d'objectiver les calculs. Troisièmement, le politique pourrait investir son rôle d'exemplarité dans le cadre des marchés publics en prenant en compte le cycle de vie *global* du bâtiment et plus seulement la phase d'utilisation. Nous approfondissons cette troisième hypothèse.

Un marché public est un contrat entre un pouvoir adjudicateur, ici la Région, et une personne publique ou privée, ici une entreprise de construction. Dans le secteur de la construction, le pouvoir public passe par un marché public pour sélectionner l'entreprise qui effectuera les travaux pour les bâtiments publics. Les critères définis dans le « contrat », c'est-à-dire dans le cahier de charge induisent fortement le type d'entreprise qui pourra y répondre. Actuellement, la construction en ballots de paille peine à répondre aux marchés publics. Par exemple, dans le cas du Collège Notre-Dame de Bon Secours de Binche, il a fallu quatre ans de procédure de marché public pour un chantier qui a finalement duré trois mois.

« Les marchés publics ce n'est pas simple. C'est vrai qu'on est passé par des phases plus de désespoir à certains moments parce qu'étant pionnier on n'avait pas l'expérience d'autres {...} Ce qui a été très compliqué c'est le marché public {...} Je trouve qu'on n'a pas été très soutenu par rapport à ça. »
(Maggiordomo Teresa, BU4 ; P01).

Les entreprises ont eu des difficultés à répondre au cahier des charges, si bien que la construction en paille n'a été rendue possible que par l'association de la société Paille-Tech avec la société traditionnelle « De Graeve ». Paille-Tech a apporté le savoir-faire relatif aux parois en paille et De Graeve a apporté l'expertise, les financements et les garanties. Les critères et les procédures sont difficiles à tenir pour une jeune société innovante. Pourtant la construction de bâtiments publics comme les écoles est une excellente publicité pour la construction en ballots de paille. Ce type de construction permet de rassurer le public et de légitimer le système constructif : *« {...} Si les pouvoirs publics se mettent à construire des bâtiments comme ça, en fait ça légitime les techniques auprès du public et ça permet d'avoir des vitrines. {...} »* (Deproost Magali, BU6 ; P07).

Afin de rendre ces procédures plus accessibles, voire plus favorables aux acteurs de la construction écologique, certaines solutions peuvent être développées. Nous en développons deux avant de mettre en évidence le risque qui y est associé.

Une première solution est déjà en cours de réalisation par le SPW en collaboration avec le CSTC. Elle consiste à faciliter la rédaction du cahier de charges en intégrant le matériau ballot de paille et les autres écomatériaux au Cahier de Charge Type-Bâtiments 2022 (CCTB 2022). Le CCTB2022 est un recueil d'informations divisé en dix tomes (terrassement/fondation, structure, toiture, finition intérieure, etc.) et compilant environ 9.500 articles. Ce recueil deviendra la référence pour les marchés publics en Wallonie (Lefebvre et Van Dessel s.d.). Il

présente les matériaux existants et les façons de les mettre en œuvre mais les écomatériaux n'y sont pas encore repris. Ces matériaux sont donc peu visibles. Insérer les produits durables, les écomatériaux, locaux et innovants dans le CCTB 2022 devrait : « *faciliter leur acceptation et leur utilisation au quotidien* » (de Barquin Fabrice, BU9 ; P22) dans le cadre des marchés publics.

La deuxième opportunité pour le développement de la construction en ballots de paille est l'augmentation des normes auxquelles les matériaux doivent répondre. Nous avons mentionné que l'utilisation de l'outil TOTEM devrait se développer. Utiliser cet outil dans le cadre des marchés publics pourrait donner un avantage aux matériaux biosourcés ayant un faible impact environnemental car il permet d'évaluer les impacts globaux de chaque système constructif au lieu de s'arrêter à la dénomination « durable ». TOTEM présente une réelle solution afin de révéler quel est le réel coût de la construction durable.

Ces deux opportunités pourraient également être saisies dans le cadre des subsides régionaux aux communes. En effet, lorsque les communes souhaitent construire ou rénover un bâtiment, elles ont souvent recours aux subsides qu'offre la Région. Celle-ci offre un financement pour une construction d'un certain type et la commune saisit cette opportunité et propose un projet qui entre dans les critères définis par la Région. Dans ce cadre, le politique pourrait définir de nouveaux critères plus contraignants en matière d'impact environnemental du cycle de vie *global* du bâtiment. M. Deproost confirme : « *Dans le Plan wallon d'investissement, on a une opportunité de pouvoir imposer des outils. Les projets qui seraient subsidiés dans ce cadre-là, on pourrait imposer nos outils, notamment TOTEM.* {...} (BU6 ; P08).

Toutefois, ces solutions à première vue favorables au secteur de la construction en paille la mettraient en danger tant qu'elle ne se normalise pas. Sans ATG, le ballot de paille pourra difficilement être repris dans le recueil CCTB2022. Sans ACV et sans EPD, il ne pourra être intégré à la base de données de l'outil TOTEM. Sans normalisation, il sera très difficile, voire impossible, au matériau paille de bénéficier de ces deux « solutions ». Il apparaît donc capital de trouver un moyen pour que le processus de normalisation attire le secteur de la construction en ballots de paille et réponde à ses besoins. Cela signifie d'une part, offrir une aide au financement des procédés de normalisation pour le matériau paille (et des autres écomatériaux). D'autre part, cela signifie peut-être assouplir les critères de normalisation : définir des marges pour permettre à la paille, aux ballots et aux murs de différents agriculteurs et entreprises de construction de répondre aux mêmes normes. Ces propositions nous semblent cohérentes avec les objectifs et les plans qui engagent la Région. Leur mise en œuvre dépend alors du politique.

La réponse politique sera-t-elle à la hauteur des enjeux environnementaux ? Les élections du 26 mai pourraient constituer un tournant en faveur de la construction en ballots de paille.

« En fonction des pouvoirs publics, ça va décoller. On n'arrêtera plus la construction paille. C'est facile, de toute façon ce sera la dernière construction qui restera. C'est déjà la dernière solution pour une partie de la population à l'heure actuelle et donc on est déjà, depuis des années, en train de fournir l'habitat léger et alternatif et illégal, parce qu'en fait c'est la seule chose qui est encore accessible et performante. On peut faire des cabanes mais ce n'est pas performant. Par contre, les petites constructions en paille on arrive à faire quelque chose de très confortable, de très performant. {...} Je pense que le temps de réponse du politique est beaucoup trop faible par rapport aux enjeux. La construction paille va juste s'imposer et globalement trop tard. {...} Il ne faudrait pas grand-chose évidemment, un gouvernement qui dit : « OK on prend le côté construction en main et on veut avoir un impact. », c'est très facile. »
(Daniel Fabian, BU3 ; P91 et P92)

5 Conclusion

Notre étude interdisciplinaire nous a permis d'aborder de nombreux axes se rapportant à la thématique de la construction en ballots de paille en Région wallonne.

Dans la première partie de ce travail, nous avons répondu à notre première question recherche : quels sont le contexte, le cadre et les stratégies qui façonnent et orientent le secteur de la construction en Région wallonne ? Nous avons développé le cadre général de la construction en Wallonie et ses impacts environnementaux : la production de déchets, de GES, de consommation de ressources et d'énergie. Nous avons ensuite dégagé les acteurs, les stratégies et les outils développés par la Région pour répondre aux enjeux de l'environnement et à ceux du secteur de la construction, notamment les *acteurs* internationaux, européens, régionaux, les *stratégies* telles que la Stratégie de développement durable wallonne, l'Alliance emploi-environnement et les *outils* comme la PEB, les EPD, les ATG. Nous avons également mis en évidence que le paradigme du développement durable est devenu le paradigme prédominant en Wallonie pour répondre aux enjeux environnementaux. Depuis, toutes les sociétés de construction réalisent de la construction durable. Pourtant le développement durable, nous l'avons vu, ne produit pas les effets escomptés pour diminuer les impacts environnementaux. Seul un changement radical permettrait une réelle amélioration du secteur de la construction. C'est pourquoi nous avons choisi d'analyser un système de construction innovant : la construction en ballots de paille, qui s'inscrit dans le cadre de la construction écologique.

Dans la deuxième partie de notre travail, pour répondre à notre question « Les caractéristiques intrinsèques du matériau ballot de paille présentent-elles un intérêt technique et environnemental ? », nous avons analysé le potentiel de l'utilisation de la paille sous forme de ballots. Un bref historique sur la construction en ballots de paille à travers le monde nous a permis de comprendre le regain d'intérêt envers ce matériau depuis les années 1970. Nous avons ensuite mis en évidence qu'il est tout à fait réaliste de construire des bâtiments en ballots de paille en Wallonie. Les auto-constructeurs dans les années 70 étaient les précurseurs de cette technique de construction. Ils ont été rejoints par deux sociétés de construction wallonnes utilisant le ballot comme isolant et support d'enduit : Paille-Tech et EcoLodge. Le matériau ballot de paille est le seul matériau biosourcé à être à la fois matériau structurel, matériau isolant et support d'enduit. Il peut être utilisé à son plein potentiel (cf. technique des ballots porteurs) ou pour l'une de ses caractéristiques (cf. construction avec une ossature en bois, préfabrifications). Nous avons ensuite brièvement analysé les caractéristiques techniques de la

construction en ballots de paille. Ce matériau offre des avantages et souffre de certains inconvénients. Globalement il répond aux exigences de la construction. L'isolation qu'il procure au bâtiment est excellente en raison de son épaisseur (35 à 45 cm) conjuguée à une conductivité thermique satisfaisante (λ d'environ 0.06). La résistance à l'humidité est satisfaisante si la mise en œuvre est correctement réalisée. Les murs enduits offrent une bonne résistance au feu et aux attaques des parasites. Les données manquent concernant les qualités d'isolation acoustique et concernant les effets sur la qualité de l'air intérieur. Nous avons ensuite comparé des ACV pour déterminer si ce matériau peut réussir à diminuer les impacts environnementaux dans le secteur de la construction. Malgré la diversité des sources, des techniques d'analyse et des données utilisées et le fait que la production de paille a un impact environnemental certain, nous avons conclu que l'utilisation du matériau ballot de paille en construction est d'un grand intérêt au niveau environnemental. De plus, la paille est un puits de carbone. Si elle est utilisée à grande échelle, elle permet de stocker du carbone pendant la durée de vie du bâtiment et donc de lisser les émissions de CO₂ ce qui permet de disposer de temps pour trouver des solutions à long terme pour limiter la diffusion de GES.

Dans notre troisième partie nous avons répondu à la question : « Au regard du contexte, du cadre et des stratégies en Région wallonne et de l'éventuel intérêt de l'utilisation du ballot de paille en construction, où en est le secteur de la construction en ballots de paille actuellement et quelles sont ses perspectives de développement ? ». Nous présentons ci-dessous les conclusions relatives aux thématiques que nous avons dégagées lors de nos entretiens. Nous rappelons que nous présentons une étude exploratoire et que nous ne prétendons pas généraliser nos conclusions. Nous avons mis en évidence certains freins et certaines opportunités par rapport aux cadres social, économique, scientifique, normatif et politique.

La perception sociale de ce type de construction est de prime abord péjorative (fragile, peu durable, précaire, pour les autres) ou inexistante (matériau et constructions inconnues). Les mentalités évoluent toutefois. Les particuliers et les entreprises traditionnelles commencent à voir ce système constructif comme étant innovant et ce grâce à la multiplication des bâtiments, à la promotion faite par le secteur de la construction paille, à l'influence des médias et des lobbys. La perception sociale dans ce domaine est de plus en plus positive. Cette évolution doit être encore encouragée.

Au niveau économique, la construction en ballots de paille est plus coûteuse que celle des maisons traditionnelles préfabriquées proposées par de grandes sociétés. Ce coût est compensé par des performances accrues. L'auto-construction de maisons en ballots de paille est une bonne

solution pour éviter des coûts importants certes elle demande d'acquérir des connaissances et d'avoir du temps. S'il y a une augmentation de la demande de bâtiments en ballots de paille, il est probable qu'une réelle filière se développe, ce qui permettrait de réduire les coûts d'exploitation et de construction. Enfin, dans le cadre du développement de l'emploi, de l'économie locale et circulaire par les autorités wallonnes, l'utilisation de paille sur les chantiers wallons s'inscrit pleinement dans les plans et stratégies développées par la Région : la paille est un matériau local, qui nécessite de la main d'œuvre locale. Elle est une ressource renouvelable. Des débouchés pour la valoriser en fin de cycle de vie doivent être recherchés, par exemple son retour dans la filière agroalimentaire ou dans un circuit de valorisation énergétique.

Les lobbys représentent les intérêts de leurs entreprises respectives. La construction en ballots de paille est soutenue par le Cluster Eco-construction. Cet organisme représente de nombreuses entreprises mais dispose de nettement moins de moyens que les autres lobbys wallons du secteur de la construction. Ce n'est pas ce Cluster qui donne les orientations du secteur au politique mais la CCW, dont le poids économique est bien plus important. Le politique se trouve pris dans un paradoxe : il se doit de privilégier la préservation de l'environnement en soutenant les jeunes entreprises d'écoconstruction mais a l'obligation dans le même temps de soutenir les entreprises de construction traditionnelle, qui sont plus nombreuses et plus développées.

La recherche sur le matériau ballot de paille est peu développée en RW. Le rapport aPROpaille est la première source d'information disponible sur la construction en ballots de paille en Région wallonne. Ses objectifs sont d'améliorer les connaissances locales et de servir de base à de futures recherches. Le projet européen UPstraw poursuit de nombreux objectifs ambitieux afin de promouvoir l'utilisation de la paille en construction en Europe. Les résultats seront disponibles dans un an. Le CSTC, qui joue un rôle majeur dans la recherche wallonne, ne représente cependant aucune entreprise construisant en ballots de paille et porte une attention très limitée au sujet. Les programmes des cours suivis par les futurs architectes donnent à penser que ceux-ci n'abordent que très peu la construction écologique et l'analyse des impacts environnementaux de leurs productions. L'utilisation des ballots ne pourra être améliorée que lorsque la recherche aura suffisamment progressé.

Le secteur de la construction est de plus en plus spécialisé et incite à une normalisation des produits. Il convient de répondre à des normes techniques (ATG) pour la pose des matériaux et de développer une déclaration environnementale (ACV et EPD) qui attestent de la qualité environnementale du produit. Les architectes et les maîtres d'œuvre se basent sur ces normes et déclarations car elles leur apportent des garanties. De plus, elles seront utilisées dans des

outils d'aide à la décision comme le BIM et TOTEM. Sans ces normalisations, la paille restera un matériau utilisé par une petite proportion de constructeurs. Chaque ballot étant particulier, il serait sans doute judicieux de créer un cadre de normalisation général pour l'utilisation des ballots de paille.

Des évolutions législatives et politiques permettraient certainement un développement de la construction en ballots de paille. Nos entretiens et nos recherches nous ont convaincu que l'intérêt du politique pour ce matériau encouragerait l'utilisation des ballots de paille en construction. Cet intérêt est déjà perceptible dans les plans et stratégies politiques promouvant des matériaux *efficaces, locaux, à faible impact environnemental*. Il serait intéressant que le monde politique comprenne que le ballot de paille répond à ces trois exigences. Les politiques peuvent encourager l'utilisation de ce matériau via des primes, via une taxation accrue des matériaux à fort impact et via leur rôle d'exemplarité (des bâtiments publics conçus en ballots de paille). Nous avons développé cette troisième opportunité en évoquant les marchés publics. Ils peuvent présenter des vitrines de constructions alternatives pour le grand public. Le politique peut activer ou/et soutenir les divers canaux que nous avons cités dans cette troisième partie. Un effet de levier serait ainsi obtenu pour le développement de la construction en ballots de paille.

Pour conclure, nos recherches nous permettent d'affirmer que la paille est un matériau innovant et performant. Ce matériau représente une solution prometteuse pour diminuer les impacts environnementaux de la construction tout en promouvant l'économie locale et circulaire. C'est sur ces aspects qu'il convient d'insister en raison de la situation environnementale et économique actuelle. La construction en ballots de paille n'est cependant pas adaptée à tous les projets architecturaux et des connaissances supplémentaires sont certainement à développer pour en exploiter toutes les possibilités. Le politique pourrait être un vecteur de diffusion pour démontrer que techniquement, environnementalement et économiquement la construction en ballots de paille est performante et compétitive.

Cette recherche a mis en évidence que la conception et la construction de bâtiments dépasse le simple assemblage de matériaux. La construction touche à de nombreux domaines comportant chacun de nombreux enjeux. Des études et des recherches faisant appel aux sciences environnementales, sociales, économiques et politiques doivent être encouragées pour permettre une compréhension systémique et par là une meilleure gestion du secteur de la construction en RW.

6 Bibliographie

- Aissaoui, M Abdellah EL. 2015. « La Moissonneuse Batteuse : Principe de fonctionnement et innovations technologiques ».
- Anfrie, MN, S. Cassilde, O. Gobert, M. Kryvobokov, et S. Pradella. 2017. « Chiffres clés du logement en Wallonie - Troisième édition ». Charleroi: Centre d'Etudes en Habitat Durable.
- Approche-Paille. 2012. « Construire selon la technique du GREB - Eco-logis solidaires pour tous ». <http://documents.approchepaille.fr/doc2014/>. Consulté le 09/04/2019.
- aPROpaille. s.d. « La recherche aPROpaille ». s.d. <https://www.belstraw.be/fr/apropaille/la-recherche.html>. Consulté le 19/04/2019.
- Ashour, Taha. 2003. « The Use of Renewable Agricultural By-Products as Building Materials. » Egypt: Zagazig University.
- ASTM E119 - 18ce1. 2018. « Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials ». 2018. <https://www.astm.org/Standards/E119>. Consulté le 26/02/2019
- Berardi, Umberto, et Gino Iannace. 2015. « Acoustic Characterization of Natural Fibers for Sound Absorption Applications ». *Building and Environment* 94 (décembre): 840-52. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.029>.
- Berge, Bjørn. 2009. *The Ecology of Building Materials*. 2ème édition. Oxford: Architectural Press of Elsevier.
- Beyond Architecture Group. 2014. « The Straw Bale House ».
- Bonnain, Charlène, Jérémy Ferrari, Guillaume Galzy, et Blaise Dupré. 2016. « Comparaison des émissions de COV dans l'air intérieur par les produits biosourcés utilisés dans le bâtiment ». Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME).
- Bonneuil, Christophe, et Jean-Baptiste Frescoz. 2016. *L'évènement anthropocène : la Terre, l'histoire et nous*. Éditions du Seuil. Histoire.
- Bouter, André de. 2006. *Bâtir en paille: guide pratique de la construction en bottes de paille*. La Maison en Paille. france.
- Brundtland Commission. 1987. « Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development ». Bruxelles.
- Bruxelles Environnement. 2017. « TOTEM ». Bruxelles Environnement. 2017. <https://environnement.brussels/thematiques/batiment-et-energie/guidance-et-soutien-techniques/totem>. Consulté le 02/05/2019.
- CAP Construction. s.d. « Qu'est-ce que CAP Construction ? » CAP Construction. s.d. <http://clusters.wallonie.be/cap-construction-fr/qu-est-ce-que-cap-construction.html?IDC=6109&IDD=30355>. Consulté le 19/04/2019.
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). 2015. « Rapport d'étude ACV / FDES conforme aux exigences de la norme NF EN 15804 : Remplissage isolant en bottes de paille (issues de l'agriculture conventionnelle) ». Ile-de-France.
- Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales (CNRTL). s.d. « Définition de BEATNIK ». s.d. <https://www.cnrtl.fr/definition/beatnik>. Consulté le 24/05/2019.
- Chaussinand, Adrien, J.L. Scartezzini, et Vahid Nik. 2015. « Straw Bale: A Waste from Agriculture, a New Construction Material for Sustainable Buildings ». *Energy Procedia* 78 (novembre): 297-302. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.646>.
- Cluster Eco-construction. s.d. « Le Cluster Eco-construction, c'est quoi ? » s.d. <http://clusters.wallonie.be/ecoconstruction-fr/presentation.html?IDC=6432>. Consulté le 14/05/2019.
- Confédération Construcion. s.d. « Organisation ». s.d. <http://cms.confederationconstruction.be/Organisation>. Consulté le 11/05/2019.

- Confédération Construction Wallonne. 2018. « Rapport annuel 2017 ». CCW.
- Conseil Supérieur de la Santé. 2017. « Indoor air quality in Belgium ». Avis n°8794. Bruxelles: CSS.
- Conseil supérieur de l'emploi. 2018. « État des lieux du marché du travail en Belgique et dans les régions ».
- CSTC. 2019. « Le CSTC ». Centre Scientifique et Technique de la Construction. 2019. <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=bbri>. Consulté le 19/04/2019.
- D'Alessandro, F., F. Bianchi, G. Baldinelli, A. Rotili, et S. Schiavoni. 2017. « Straw Bale Constructions: Laboratory, in Field and Numerical Assessment of Energy and Environmental Performance ». *Journal of Building Engineering* 11 (mai): 56-68. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.012>.
- D'Alessandro, Francesco, Samuele Schiavoni, et Francesco Bianchi. 2017. « Straw as an Acoustic Material ». *24th International Congress on Sound and Vibration*, 9.
- Dance, Stephen, et Paul Herwin. 2013. « Straw Bale Sound Insulation: Blowing Away the Chaff ». *The Journal of the Acoustical Society of America* 133 (5): 3226-3226. <https://doi.org/10.1121/1.4805125>.
- Deverell, Robert, Steve Goodhew, Richard Griffiths, et Pieter de Wilde. 2009. « The Noise Insulation Properties of Non-Food-Crop Walling for Schools and Colleges: A Case Study ». *Journal of Building Appraisal* 5 (1): 29-40. <https://doi.org/10.1057/jba.2009.11>.
- Džidić, Sanin. 2017. « Fire Resistance of the Straw Bale Walls ». *Zbornik Radova Građevinskog Fakulteta* 33 (30): 423-32. <https://doi.org/10.14415/konferencijaGFS2017.044>.
- EcoLodge. 2019. « Wald-Cube: habitat écologique et modulable ». Wald-Cube - EcoLodge. 2019. <https://waldcube.be/>. Consulté le 23/04/2019.
- Euben, Charlotte. 2019. « Le BIM, c'est quoi ? » BIMportal. 2019. https://www.bimportal.be/fr/bim_fr/general/bim/. Consulté le 16/04/2019.
- EUBIM taskgroup. 2018. « Manuel pour l'introduction du "Building Information Modelling (BIM)" par le secteur public européen ». European Union.
- European Commission, et Joint Research Centre. 2010. *ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment: Detailed Guidance*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/ILCD-Handbook-General-guide-for-LCA-DETAIL-online-12March2010.pdf>. Consulté le 05/05/2019.
- European think & do tank. 2013. « 7ème programme d'action pour l'environnement (PAE) 2013-2020 ». Observatoire européen de la Transition. 2013. <http://www.transition-europe.eu/fr/documentsofficiels/7eme-programme-daction-pour-lenvironnement-pae-2013-2020>. Consulté le 01/05/2019.
- Evrard, Arnaud, André De Herde, Sylvie Rouche, Benjamin Biot, Gauthier Keutgen, Luc Courard, Arnaud Louis, et Antoine Bonnert. 2015a. « La paille matière première: Vers une reconnaissance de la paille comme matériau isolant dans la construction ». Vadémécum 1.
- . 2015b. « La paille parois performantes: Vers une reconnaissance de la paille comme matériau isolant dans la construction ». Vadémécum 2.
- . 2015c. « La paille projets construits: Vers une reconnaissance de la paille comme matériau isolant dans la construction ». Vadémécum 3.
- febelcem. 2015. « La résistance au feu des constructions en béton ». Béton.
- . 2018. « Rapport annuel de l'industrie cimentière belge 2017 ». febelcem.
- Fédération Française de l'Acier. 2011. « L'acier en France en 2010 Rapport annuel de la Fédération Française de l'Acier (FFA) ». *Revue de Métallurgie* 108 (1): 59-66. <https://doi.org/10.1051/metal/2011998>.

- Ferran, Florence de, Jeanne Lallement, et Isabelle Sueur. 2012. « L'éco-construction : quel positionnement pour les artisans ? » *Management & Avenir* 52 (2): 57. <https://doi.org/10.3917/mav.052.0057>.
- Fruchard, Eddy, et Virginie Piaud. 2015. « Technique de construction en paille ». Paris: Eyrolles. http://res.banq.qc.ca/login?url=http://www.numilog.com/bibliotheque/bnquebec/fiche_livre.asp?idprod=779921. Consulté le 24/02/2019.
- GIEC. 2018. « Global Warming of 1.5°C : Summary for Policymakers ». Rapport spécial. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>. Consulté le 30/04/2019.
- Gouvernement Wallon. 2014. *Décret « Climat »*. Vol. 943.
- Gouvernement wallon. 2015. *Arrêté du Gouvernement wallon portant exécution du décret du 28 novembre 2013 relatif à la performance énergétique des bâtiments*. Vol. M.B. du 30/07/2014, p. 56172. https://wallex.wallonie.be/index.php?doc=28448&rev=31550-20376#FR_17006186. Consulté le 09/05/2019.
- Gouvernement Wallon. 2016. « 2ème stratégie wallonne de développement durable ». SPW. http://developpementdurable.wallonie.be/sites/default/files/2017-08/Strat%C3%A9gie%20wallonne%20de%20d%C3%A9veloppement%20durable_0.pdf. Consulté le 12/04/2019.
- Gouvernement wallon, Carlo, et SPW. 2018. « Plan wallon des déchets-ressources », 347.
- Gouvernement Wallon, et SPW. 2016. « Construction Durable - Alliance Emploi-Environnement (2016-2019) ».
- Gouvernement wallon, et SPW: DGO4. 2017. « Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment ». SPW éditions.
- Gruber, Astrid, et Herbert Gruber. 2003. *Construire en paille aujourd'hui - A. Gruber H. Gruber - Librairie Eyrolles*. Terre Vivante. <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/construire-en-paille-aujourd-hui-9782914717014/>. Consulté le 09/04/2019
- Guille, J. 1951. « La maison en torchis (Perthois, Vallage et Der) ». *L'Information Géographique* 15 (3): 120-22. <https://doi.org/10.3406/ingeo.1951.1084>.
- Health and Environment Alliance. 2018. « Des bâtiments sains, des personnes en meilleure santé ».
- Hellweg, S., et L. Mila i Canals. 2014. « Emerging Approaches, Challenges and Opportunities in Life Cycle Assessment ». *Science* 344 (6188): 1109-13. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>.
- Homeco. s. d. « Comparatif des différents isolants ». Homeco. Consulté le 4 mai 2019. <http://www.homeco.be/les-isolants-comparatif/>. Consulté le 04/05/2019.
- Institut des comptes nationaux. 2016. « Comptes régionaux 2016 ». Banque Nationale de Belgique. ISSN 1780-4469 (online). Consulté le 18/04/2019.
- Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique. 2018. « Les chiffres-clés de la Wallonie: Edition 2018 ». Sébastien Brunet. N°ISSN 2506-8164 (en ligne).
- International Organization for Standardization. 2006. « ISO 14025:2006(fr), Marquages et déclarations environnementaux — Déclarations environnementales de Type III — Principes et modes opératoires ». 2006. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14025:ed-1:v1:fr>. Consulté le 24/04/2019.
- ISO. s.d. « À propos de l'ISO ». Organisation internationale de normalisation. s.d. <http://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/home/about-us.html>. Consulté le 30/04/2019.
- ISO 834-1:1999. 1999. « Fire-Resistance Tests - Elements of Building Construction - Part 1: General Requirements ». 1999. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:834:-1:ed-1:v1:en>. Consulté le 26/02/2019.

- ISO 15392. 2008. « Développement Durable Dans La Construction: Principes Généraux ». Organisation internationale de normalisation.
- Janssen, An, Laetitia Delem, et Johan Van Dessel. 2012. « Principes et points d'attention lors du choix de matériaux de construction durable ». *CSTC, labo développement durable*, 53.
- Jones, Barbara. 2001. *Information Guide to Straw Bale Building: For Self-Builders and the Construction Industry*. The Last Straw journal. Todmorden, UK.
- Kahn, Lloyd, et Bob Easton. 1990. *Shelter*. Shelter Publication. <https://www.shelterpub.com/building/shelter>. Consulté le 05/04/2019.
- Katsoyiannis, Athanasios, et Alessandra Cincinelli. 2019. « 'Cocktails and Dreams': The Indoor Air Quality That People Are Exposed to While Sleeping ». *Current Opinion in Environmental Science & Health* 8: 6-9. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.12.005>.
- King, Bruce, et André de Bouter. 2009. *Concevoir des bâtiments en bottes de paille*. Lamaison en paille. Eyrolles.
- Larousse. 2002. « Larousse agricole: contention - coproduit (p.176) ». 2002. <http://www.larousse.fr/archives/agricole/page/176>. Consulté le 17/04/2019.
- Lefebvre, P.-H., et J. Van Dessel. s.d. « CCTB 2022 : le nouveau cahier des charges type de la Wallonie. » Centre Scientifique et Technique de la Construction. s.d. <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact42&art=631>. Consulté le 28/04/2019.
- Maraldi, Mirko, Luisa Molari, Giovanni Molari, et Nicolò Regazzi. 2018. « Time-Dependent Mechanical Properties of Straw Bales for Use in Construction ». *Biosystems Engineering* 172 (août): 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.05.014>.
- Martin, Y, S Eeckhout, et L Lassoie. 2017. « Sécurité incendie des façades de bâtiments multiétagés ». CSTC.
- Matagne, Patrick. 2003. « Aux origines de l'écologie ». *Innovations* 18 (2): 27. <https://doi.org/10.3917/inno.018.0027>.
- Minke, Gernot, et Friedemann Mahlke. 2005. *Building with Straw: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhauser. Princeton Architectural Press.
- Morel, Jean-Claude, Antonin Fabbri, et Lucile Soudani. 2015. « Construction terre l'isolation du pisé: pertinence et principes ». <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.1238.1688>.
- Myhrman, Matts, et S. O. MacDonald. 1997. *Build It with Bales: Version 2 ; a Step-by-Step Guide to Straw-Bale Construction*. Rev. and expanded. Tucson, Ariz: Inhabitation Service.
- Nations unies. 1992. « Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ». ———. 2015. « Accord de Paris ».
- Némoz, Sophie. 2010. « L'habitat écologique: Une construction sociale en voie de développement durable ». *Les Annales de la recherche urbaine* 106 (1): 16-25. <https://doi.org/10.3406/aru.2010.2779>.
- OECD. 2019a. « Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences ». *OECD Publishing*. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- . 2019b. « Highlights: Global Material Resources Outlook to 2060, Economic Drivers and Environmental Consequences ». OECD Edition.
- Offin, Maria. 2010. « Straw Bale Construction: Assessing and Minimizing Embodied Energy. » Kingston, Ontario, Canada: Queen's University.
- ONU. s.d. « Qu'est-ce que la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques? » s.d. <https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-convention/qu-est-ce-que-la-convention-cadre-des-nations-unies-sur-les-changements-climatiques>. Consulté le 30/04/2019.

- . 2018. « L'Accord de Paris ». 2018. <https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-paris-agreement/l-accord-de-paris.30/04/2019>.
- Opdebeek, Marc, et André De Herde. 2014. « Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie ». SPW-DGO4.
- Ordre des Architectes. 2014. « Guide de l'architecte ». Ordre des Architectes.
- Paille-Tech. 2017. « Maison à Gentinnes ». 2017. <http://www.pailletech.be/gentinnes/>. Consulté le 03/05/2019.
- . 2018. « La maison optimale, un concept ».
- Parlement européen, et Conseil européen. 2010. *Directive 2010/31/UE du 19 mai 2010 sur la performance énergétique des bâtiments*. Vol. (UE) 2010/31.
- . 2018. *Directive (UE) 2018/844 du 30 mai 2018 modifiant la directive 2010/31/UE sur la performance énergétique des bâtiments et la directive 2012/27/UE relative à l'efficacité énergétique*. Vol. (UE) 2018/844.
- Parlement fédéral. 1980. *Loi spéciale de réformes institutionnelles*. Vol. 1980080801. http://www.ejustice.just.fgov.be/cgi_loi/change_lg.pl?language=fr&la=F&cn=1980080802&table_name=loi. Consulté le 14/05/2019.
- « Photos à Pilgrim Holiness Church - Arthur, NE ». s. d. Consulté le 5 avril 2019. <https://fr.foursquare.com/v/pilgrim-holiness-church/52c09529498ea26f9a491590/photos>. Consulté le 05/04/2019.
- Portail Wallonie. s.d. « Découvrir le SPW ». s.d. <https://spw.wallonie.be/historique>.
- Programme des Nations Unies pour le développement. s.d. « Objectifs de développement durable: Historique ». UNDP. s.d. <https://www.undp.org/content/undp/fr/home/sustainable-development-goals/background.html>. Consulté le 01/05/2019.
- Région wallonne. 2015. « Plan Marshall 4.0 ».
- Réseau Français de la Construction en Paille, et Inies. 2011. « Les données environnementales et sanitaires de référence pour le bâtiment: remplissage isolant en bottes de paille (issue de l'agriculture conventionnelle) ». 2011. <http://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit>. Consulté le 07/05/2019.
- RFCP. 2014a. « Présentation - les différentes techniques ». *RFCP* (blog). 2014. <https://rfcp.fr/presentation/>. Consulté le 09/04/2019.
- . 2014b. *Règles professionnelles de construction en paille*. 2ème édition. France: Le Moniteur.
- . 2015. « Préserver ». *RFCP* (blog). 27 janvier 2015. <https://rfcp.fr/preserver/>. Consulté le 05/04/2019.
- Rijven, Tom. 2008. *Entre paille et terre*. Goutte de sable.
- Rudofsky, Bernard. 1964. « Architecture without Architects, an Introduction to Nonpedigreed Architecture ». *The Museum of Modern Art*, 137.
- Schiavoni, S., F. D'Alessandro, F. Bianchi, et F. Asdrubali. 2016. « Insulation Materials for the Building Sector: A Review and Comparative Analysis ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62: 988-1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>.
- Schrijvers, Dieuwertje L., Philippe Loubet, et Guido Sonnemann. 2016. « Developing a Systematic Framework for Consistent Allocation in LCA ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (7): 976-93. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1063-3>.
- Scourneau, Vincent, Lionel Artige, Alexandre Reginster, Jérôme Danguy, Florence Hennart, Lionel Persyn, Charles Plaigin, Julien Charlier, et Isabelle Reginster. 2017. « L'investissement résidentiel en Wallonie ». *Dynamiques régionales. Revue interdisciplinaire de l'IWEPS*, n° n°5: 70.

- SPF Santé publique. 2016a. « COV – Les composés organiques volatiles ». SPF Santé Publique. 2016. <https://www.health.belgium.be/fr/cov-les-composes-organiques-volatiles>. Consulté le 18/05/2019.
- . 2016b. « Dans notre pays, qui sont les acteurs de la politique de l’environnement ? » SPF Santé Publique. 2016. <https://www.health.belgium.be/fr/environnement/politique-environnementale/dans-notre-pays-qui-sont-les-acteurs-de-la-politique-de>. Consulté le 02/05/2019.
- . 2016c. « Pollution de l’air intérieur ». SPF Santé Publique. 2016. <https://www.health.belgium.be/fr/environnement/produits-dans-la-maison/pollution-de-lair-interieur-nous-y-sommes-tous-exposes>. Consulté le 26/04/2019.
- . 2017. « B-EPD : principes généraux ». Service public fédéral.
- SPW: DGO4. 2016. « La réglementation PEB évolue vers de meilleures performances ». SPW éditions.
- . 2018. « Schéma de Développement du Territoire ». SPW.
- . 2019. « Code du Développement territorial ». SPW.
- SPW énergie. 2016. « Guide PEB 2015 ». Wallonie énergie SPW. 2016. <https://energie.wallonie.be/fr/guide-peb-2015.html?IDC=9491>. Consulté le 04/05/2019.
- STATBEL. 2018. « Chiffres clés de l’agriculture ». <https://statbel.fgov.be/fr/nouvelles/chiffres-cles-de-lagriculture-2018>. Consulté le 18/02/2019.
- Statbel. 2019. « Construction et logement: Permis de bâtir ». 2019. <http://statbel.fgov.be/fr/themes/construction-logement/permis-de-batir>. Consulté le 05/04/2019.
- Suttie, J.M. 2004. « Conservation du foin et de la paille pour les petits paysans et les pasteurs. » FAO.
- Theis, Bob. 2003. « Straw Bale Fire Safety ». Ecological Building Network.
- Thomas & Piron. s.d. « Fondations ». s.d. <https://www.thomas-piron.eu/fr/nos-activites/maison/construction/cahier-des-charges/120-fondations>. Consulté le 24/05/2019.
- . 2019a. « Cahier des charges - Énergie ». 2019. <https://www.thomas-piron.eu/fr/nos-activites/maison/construction/cahier-des-charges/124-energie-1>. Consulté le 22/04/2019.
- . 2019b. « Groupe Thomas & Piron ». 2019. <https://www.thomas-piron.eu/fr/groupe-thomas-piron>. Consulté le 07/05/2019.
- Thomson, Andrew, et Pete Walker. 2014. « Durability Characteristics of Straw Bales in Building Envelopes ». *Construction and Building Materials* 68 (octobre): 135-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.041>.
- Totem. 2018. « A propos de Totem ». 2018. <https://www.totem-building.be/pages/about.xhtml>. Consulté le 09/04/2019.
- Union belge pour l’agrément technique dans la construction (UBAtc). 2005. « Frais d’agrément ».
- Union belge pour l’Agrément technique de la construction. s.d. « Agrément Technique ATG ». s.d. http://www.ubatc.be/index.cfm?n01=technical_approval&n02=atg_whatis. Consulté le 02/05/2019.
- Université catholique de Louvain. 2017a. « Bachelier en architecture: Bruxelles ». *Catalogue des formations 2017-2018*, 14.
- . 2017b. « Master en architecture: Bruxelles ». *Catalogue des formations 2017-2018*, 17.

- Université de Liège. 2018. « Bachelier en architecture, structure du programme ». 2018. https://www.programmes.uliege.be/cocoon/20182019/programmes/T1ARCH01_C.html. Consulté le 21/04/2019.
- UPSTRAW. 2019a. « Soutenir l'utilisation de la paille dans la construction de bâtiments urbains et publics ». Interreg North-West Europe: UPSTRAW. http://www.cncp-feuillette.fr/wp-content/uploads/2019/02/Folder%20FR_fev2019.pdf. Consulté le 22/04/2019.
- . 2019b. « Urban and Public Buildings in Straw ». 2019. <http://www.nweurope.eu/projects/project-search/up-straw-urban-and-public-buildings-in-straw/>. Consulté le 22/04/2019.
- Wallonia Clusters: Cluster Eco-construction. 2019. « Nos membres ». Cluster Eco-construction. 2019. <http://clusters.wallonie.be/ecoconstruction-fr/nos-membres.html?IDC=3424&mode=list&term=&criteria=A++Architecte&order=name#contenu>. Consulté le 03/05/2019.
- Wallonie agriculture SPW. 2018. « L'agriculture wallonne en chiffre ». <https://agriculture.wallonie.be/documents/20182/21858/FR-2015.pdf/591e9fba-0df8-43a3-ac3a-042aeb83714c>. Consulté le 19.02/2019.
- Weidema, Bo. 2000. « Avoiding Co-Product Allocation in Life-Cycle Assessment ». *Journal of Industrial Ecology* 4 (3): 11-33. <https://doi.org/10.1162/108819800300106366>.
- Wishart, David J. 2004. *Encyclopedia of the Great Plains*. U of Nebraska Press.
- Zaccai, Edwin. 2011. *25 ans de développement durable et après? Développement durable et innovation institutionnelle*. Presses Universitaires de France.