

Mémoire de fin d'études : " Anciens murs en moellons : étude architectonique en vue de leur amélioration énergétique. Cas d'étude d'une ferme château dans le village de Polleur, en Wallonie"

Auteur : Gusbin, Antoine

Promoteur(s) : Trachte, Sophie; Tourneur, Francis

Faculté : Faculté d'Architecture

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

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/21271>

Avertissement à l'attention des usagers :

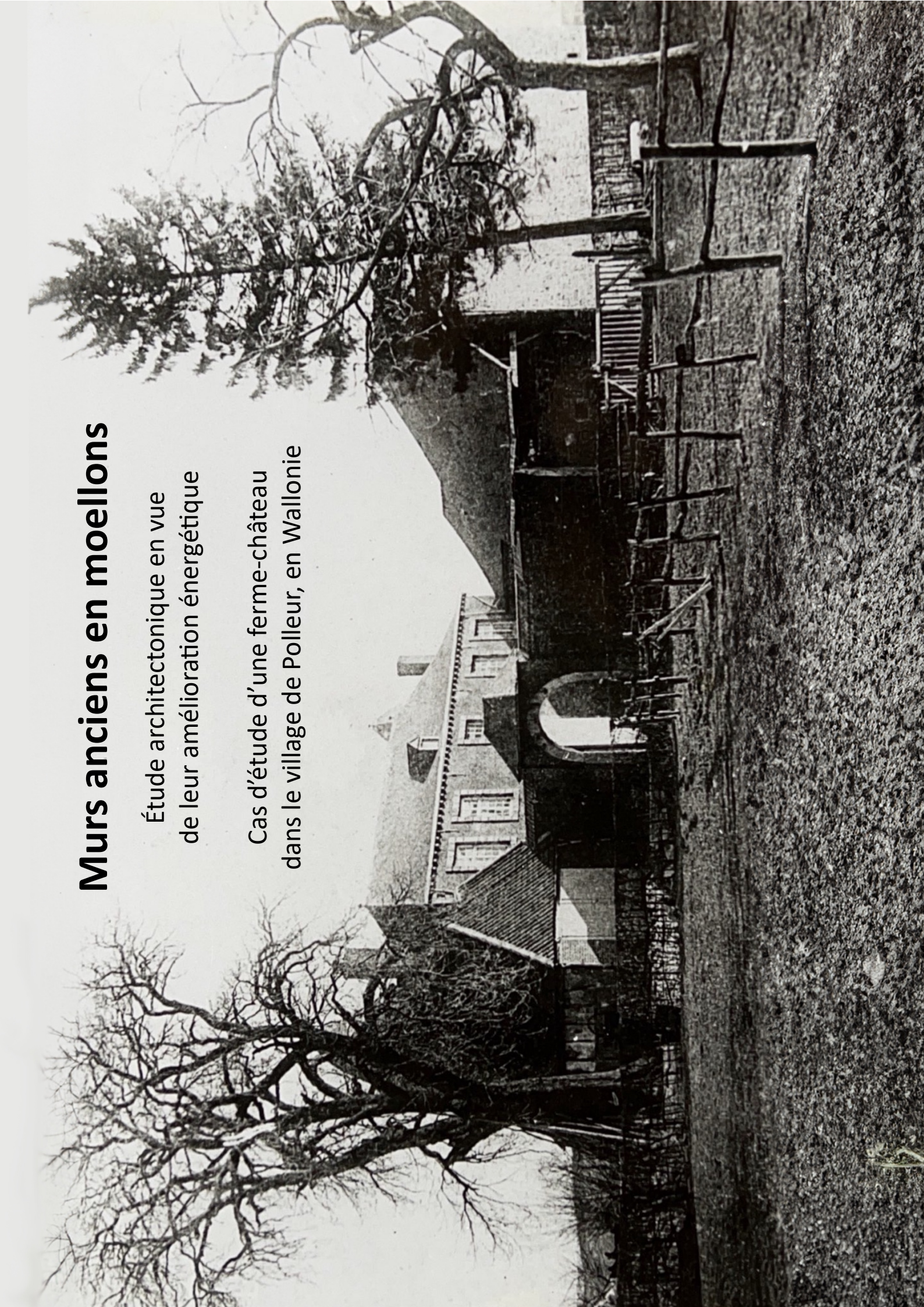
Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers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

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

Murs anciens en moellons

Étude architectonique en vue
de leur amélioration énergétique

Cas d'étude d'une ferme-château
dans le village de Polleur, en Wallonie





Université de Liège – Faculté d'Architecture

**Anciens murs en moellons de pierre : étude architectonique en vue de leur
amélioration énergétique.**

Cas d'étude d'une ferme-château dans le village de Polleur, en Wallonie.

Travail de fin d'étude présentée par Antoine GUSBIN en vue
de l'obtention du grade de MASTER en architecture.

Sous la direction de : Madame Sophie TRACHTE
Et Monsieur Francis TOURNEUR

Année académique : 2023 – 2024

Table des matières

REMERCIEMENTS	6
INTRODUCTION	8
I. Problématique	9
II. État de l'art	15
- Approche historique sur la construction d'avant-guerre en milieu rural	15
- Comportement des maçonneries en moellons sans isolation	17
- Solutions d'isolation et leurs impacts	20
- Analyse de l'état de l'art	25
III. Méthodologie	26
CHAPITRE 1 HABITAT RURAL EN WALLONIE	30
1.1 Évolution de la Wallonie	31
1.2 Bati rural d'avant-guerre	33
1.3 Types de ferme	37
1.3.1 La ferme pluricellulaire	39
1.3.2 La ferme à cour	42
1.3.3 La ferme-château	50
1.4 Ardenne Herbagère et ses fermes à cour	51
1.5 Conclusion	55
CHAPITRE 2 CONSTRUCTION ET COMPORTEMENT DE LA MAÇONNERIE EN MOELLONS	56
2.1 Construction de la maçonnerie de moellons de pierre	57
2.1.1 Généralités propres à la Wallonie	57
2.1.2 La carrière	58
2.1.3 Le transport	60
2.1.4 Le mur en pierre	60
2.2 Comportement de la maçonnerie de moellons de pierre	68
2.2.1 Comportement thermique	68
2.2.2 Comportement face à l'eau et la vapeur d'eau	70
2.3 Conclusion	75
CHAPITRE 3 DESCRIPTION DU CAS D'ETUDE	78
3.1 Situation	79
3.2 Description	82
3.2.1 Généralités	82
3.2.2 L'aile Sud-Est	87
3.2.3 L'aile Sud-Ouest	91
3.2.4 L'aile Nord-Ouest	97
3.2.5 Aile Nord-Est	101
3.3 Description architectonique des façades	104
3.3.1 Façade Nord-Ouest	105
3.3.2 Façade Nord-Est	106
3.3.3 Façade Sud-Est	107
3.3.4 Façade Nord-Est	108

3.3.5	Façade Sud-Ouest	109
3.3.6	Façade Sud-Est	110
3.3.7	Façade Nord-Est	111
3.3.8	Façade Nord-Ouest	112
3.4	Matérialité des murs du cas d'étude	113
3.4.1	Composition du mur	113
3.4.2	Illustrations en coupe	115
3.5	Propriétés du mur	120
3.5.1	Grès et ses propriétés	120
3.5.2	Mortier de chaux et ses propriétés	122
3.5.3	Performance du mur	124
3.6	Tests d'humidité	127
3.6.1	Méthodologie	127
3.6.2	Constatations	130
3.7	Murs en moellons de grès de bâtiments voisins	135
3.7.1	Boulangerie du Transvaal	136
3.7.2	Bâtiment agricole à Fays	139
3.7.3	Ferme à cour à Sasserotte	140
3.8	Conclusion	141
CHAPITRE 4	ITERATIONS DE SOLUTIONS D'ISOLATION PAR L'INTERIEUR	142
4.1	Contexte	143
4.2	Intervention thermique par l'extérieur (I.T.E.)	146
4.3	Intervention thermique par l'intérieur (I.T.I.)	147
4.4	Considérations	152
4.5	Itérations	156
4.5.1	L'enduit ou bloc chaux-chanvre	163
4.5.2	La cellulose recyclée en vrac	165
4.5.3	La fibre de bois en vrac	167
4.5.4	Le matelas de fibre de bois	169
4.5.5	Le panneau ou bloc silicate de calcaire	171
4.5.6	Le panneau rigide en polyuréthane	173
4.6	Discussion sur les itérations	175
CONCLUSION		176
BIBLIOGRAPHIE PRINCIPALE		179
BIBLIOGRAPHIE SECONDAIRE		182
ANNEXES		183

Remerciements

Je tiens premièrement à remercier l'équipe d'enseignants qui m'a permis de mener à bien ce travail de fin d'étude :

Madame TRACHTE qui, grâce à son expérience, son implication, ses précieux conseils et nombreuses sources, m'a permis de suivre la bonne voie,

Monsieur TOURNEUR qui, grâce à sa disponibilité, m'a livré de précieuses explications lors des visites in situ et m'a permis de comprendre la ferme et ses pierres en profondeur,

Monsieur BERTRAND qui, grâce à son approche historique et ses retours enthousiastes, m'a permis d'approfondir la compréhension des anciennes fermes agricoles,

Monsieur BRIBOSIA qui a répondu de manière enthousiaste à son rôle de lecteur et qui m'a apporté de précieux conseils archéologiques et techniques sur ma réflexion.

Je remercie ensuite ma famille et mes amis qui, de près ou de loin, ont toujours cru en moi, qui m'ont soutenu à travers ce parcours universitaire et qui ont tout mis en place afin que je puisse réaliser les études qui m'animent depuis ma tendre enfance.

Je tiens également à remercier ma belle-famille qui m'a permis de mener à bien ce travail de fin d'étude. Ils m'ont accordé leur soutien, mais surtout leur entière confiance et autorisé l'accès à leur lieu de vie, afin de pouvoir réaliser une étude approfondie de la ferme. Ils m'ont donné la possibilité de prélever des échantillons afin d'avoir une base de données solide. Enfin, me donner accès à ce bâtiment m'a permis d'éveiller un nouveau centre d'intérêt que je souhaite poursuivre lors de ma carrière d'architecte.

Introduction

I. Problématique

Afin de lutter contre le changement climatique, l'Accord de Paris¹, signé en 2015 par 195 pays, dont les pays membres de l'Union Européenne, vise à accélérer la réduction des émissions mondiales des gaz à effet de serre (GES). Son objectif est de : « [...] opérer des réductions rapidement [...] de façon à parvenir rapidement à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle [...] »². Pour cause, l'accélération du changement climatique, démontrée par la communauté scientifique dans le dernier rapport³ du GIEC, impacte de manière significative tant sur la santé de la population, la biodiversité que le bon fonctionnement des écosystèmes et notre système économique. Suite à cet accord, la Commission Européenne a dévoilé en 2019 le Pacte Vert ou *Green Deal* avec l'objectif de rendre l'Europe climatiquement neutre d'ici 2050 par rapport à 1990⁴.

Pour y parvenir, une série de directives européennes ont été adoptées, obligeant chaque état membre à réduire leurs émissions, réduire leur dépendance énergétique extérieure, améliorer le bien-être et la santé et enfin, à créer de l'emploi et développer le domaine de l'innovation. L'Union Européenne a ainsi mis en place une série de directives relatives à la performance énergétique des bâtiments, tant en construction neuve qu'en rénovation du parc bâti existant. Ce secteur est considéré comme un secteur clé pour l'atteinte des objectifs « carbone » puisqu'en 2020, le secteur européen de la construction est responsable de 36% des émissions de gaz à effet de serre⁵. En conséquence, la Directive (UE) 2018/844⁶ oblige d'établir des plans nationaux de rénovation afin que les membres de l'Union Européenne disposent d'un parc immobilier décarboné et plus efficace énergétiquement parlant d'ici 2050. En réponse, chaque membre a établi une stratégie de rénovation ainsi qu'une réglementation énergétique⁷.

En Wallonie, trois secteurs sont énergivores et émetteurs de gaz à effet de serre : l'industrie (33,8%), le transport (28,9%) et le logement qui représente 25,9% de la consommation énergétique⁸. Pour pallier à cette situation et atteindre les objectifs fixés, le gouvernement wallon a notamment adopté le PACE2030 (Plan Aire Climat Energie 2030)⁹ le 21 avril 2016, ayant pour objectif une transition énergétique permettant de réduire considérablement ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. La Wallonie s'est également engagée dans une stratégie de rénovation énergétique à long terme du parc bâti, suite à la mise en œuvre de la Directive (UE) 2018/844 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018¹⁰. Cette stratégie vise à constituer un parc immobilier énergétiquement performant et décarboné d'ici 2050¹¹ en tendant vers le label PEB A (soit une consommation annuelle située entre 45 et 85 kWh/m²) en moyenne pour l'ensemble du parc bâti. La priorité est mise sur les édifices les moins

¹ FCCC. (2015). Adoption de l'Accord de Paris.

² Ibidem.

³ République française & Vie publique (2022). Rapport 2022 du GIEC : une nouvelle alerte face au réchauffement climatique.

⁴ Commission Européenne. (2019). Le Pacte Vert pour l'Europe. Page 2.

⁵ UNO. (s.-d.). Rapport sur l'état mondial des bâtiments et de la consommation en 2022 : vers un secteur des bâtiments et de la construction à zéro émission, efficace et résilient. Page 4.

⁶Parlement Européen. (2023). Efficacité énergétique. Page 3.

⁷Commission Européenne. (2020). Une vague de rénovation pour l'Europe : verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la qualité de vie. Page 5.

⁸ICEDD (Institut de Conseil et d'Études en Développement Durable), (2022). Bilan énergétique de la Wallonie 2019 : Bilan global.

⁹Plan national énergie-climat (s. d.). Aperçu du plan national énergie-climat définitif.

¹⁰SPW. (2020). Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment. Page 3.

¹¹ Ibidem.

performants de niveau E, F et G en termes de consommation énergétique¹². Une statistique de la stratégie wallonne chiffre la consommation moyenne des logements wallons à 434 kWh/m² (ce qui correspond à une valeur PEB F). Cette moyenne peut s'expliquer par deux facteurs : un parc bâti ancien, dont 25% date d'avant 1919 et est peu performant, et un taux annuel de rénovation bas, se situant au-dessous de 1%¹³.

En Wallonie, 25% du parc bâti est considéré comme ancien et datant d'avant 1919¹⁴. En effet, jusqu'à la fin du XIXe siècle, la vie en Wallonie est principalement rurale et en lien étroit avec le climat et les ressources de la terre¹⁵. L'architecture rurale wallonne, dont le bâti ardennais, tire l'essentiel de ces matériaux de son environnement immédiat comme la pierre ou le bois¹⁶. C'est notamment le cas de l'Ardenne du Nord-Est, où la roche affleure et où on retrouve principalement du calcaire, du grès et des schistes¹⁷. De même, dans le Pays de Herve, les moellons de grès et de calcaire s'emploient le plus communément dans le gros œuvre¹⁸.

Ces constructions anciennes sont le reflet historique de nos régions et s'offrent à nous comme un précieux héritage, un atout économique, touristique et culturel. Elles doivent aujourd'hui faire l'objet d'une amélioration énergétique afin d'offrir un confort plus important à leurs occupants tout en répondant, entièrement ou en partie, aux exigences de la stratégie wallonne de rénovation à long terme. Cette amélioration énergétique passe essentiellement par l'isolation de l'enveloppe de ces anciennes constructions. Cette intervention a pour objectif d'éliminer la sensation de paroi froide pour l'occupant et d'atteindre un certain niveau de performance qui sera évalué au travers du coefficient de transmission thermique U et de résistance thermique minimale¹⁹. Cependant, l'amélioration énergétique du bâti ancien et par conséquent, des murs de façades construits en moellons, pose question. Afin de conserver l'identité culturelle, patrimoniale et l'aspect esthétique et matériel de ces façades visibles de l'extérieur, il faut écarter la solution d'isoler par l'extérieur. Sur base de ce constat, l'isolation par l'intérieur semble être la seule solution²⁰. Celle-ci nécessite une connaissance fine du mur, tant au niveau de sa matérialité et de sa composition architectonique que de son comportement physique, thermique et hygroscopique. Les murs en moellons ont des propriétés spécifiques puisqu'ils tirent parti de leur contexte proche et trouvent un équilibre avec celui-ci. Ces murs ont la capacité de respirer et ils interagissent avec plusieurs éléments du milieu dont l'eau, l'air et la chaleur²¹. Or, une intervention par l'intérieur modifie l'équilibre de ces parois ce qui pourrait mener à des problèmes d'humidité et/ou de stabilité. L'étude ATHEBA²² et les rapports RIBuild²³ mettent en avant l'intérêt de connaître les matériaux qui composent les murs,

¹² SPW. (2020). Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment. Page 3.

¹³ Ibidem.

¹⁴ STIERNON, D., TRACHTE, S., & all. (2017). Heritage value combined with energy and sustainable retrofit – representative types of old wallon dwellings built before 1914.

¹⁵ CASTIAU, E., & al. (2014). L'Ardenne Centrale La Thiérache. CFDT Atlas des Paysages de Wallonie.

¹⁶ MARDAGA, P. (1987). Ardenne Centrale. pg 106. ((Liège ; Bruxelles, 247 pages, ISBN : 2802100742.))

¹⁷ CASTIAU, E., & al. (2014). L'Ardenne Centrale La Thiérache. CFDT Atlas des Paysages de Wallonie.

¹⁸ MARDAGA, P. (1987). Pays de Herve.

¹⁹ EVRARD, A., BRANDERS, A., De HERDE, A. (2011). Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques plaines : guides d'aide à la conception. SPW – DG04 : Jambes, 98 pages.

²⁰ Ibidem.

²¹ MOYA, J.-P. (2018). Isolation thermique durable des bâtiments existants : choix multicritères. Manuel pratique. 296 pages. ISBN : 9782281142945

²² ATHEBA. (s.-d.). Connaissance du bâti ancien. Maisons paysannes de France.

²³ BLUMBERGA, A., BLUMBERGA, D., FREUDENBERG, P. et al. (s.-d.). Robust internal thermal insulation of historic building. RIBuild.

leurs propriétés et leur comportement afin de ne pas les détériorer.

Pour ce faire, il est primordial de récolter des données propres au cas d'étude par le biais de diagnostics et d'analyses précises. D'une part, ces données sont générales et comprennent la localisation géographique, le contexte proche et son climat. D'autre part, elles sont précises et décrivent l'épaisseur d'un mur, la nature des matériaux qui le composent, le liant, leur porosité, la densité et la quantité d'humidité présente dans le mur. Malgré les projets interrégionaux comme ERFIN²⁴ et BAPE²⁵ et les rapports tels RIBuild et P-RENEWAL²⁶, il manque des données et des connaissances sur le bâti ancien et notamment celui construit en pierre. Sans ces connaissances préalables, il est actuellement délicat de proposer des solutions d'isolation (matériaux et techniques) sans risquer d'entraîner des dégradations majeures pour ces murs.

Sur base de ces différents constats et enjeux, ma question de recherche est la suivante :

Comment sont construits les murs en moellons et quelles sont leurs principales propriétés physiques ?

Par « comment sont construits », j'entends la composition matérielle et architectonique et par « principales propriétés physiques », j'entends le comportement physique, thermique et hygroscopique.

La question de recherche vise à répondre aux objectifs suivants :

- Développement de connaissances sur la matérialité et l'architectonique des murs en moellons,
- Développement de connaissances qui permettent d'appréhender leur comportement hygrothermique de ces murs,
- Établissement d'itérations²⁷ pour les solutions d'isolation adaptées à ces derniers.

²⁴ R.E.D. (2013). Patrimoine et Energie - Projet Interrégional ERFIN.

²⁵ R.E.D. (2011). Energie et Patrimoine : 25 cas pratiques. Le bâti ancien, entre enjeux patrimoniaux et énergétiques.

²⁶ STIERNON, D. & TRACHTE, S. (2018). P-RENEWAL (rénovation énergétique du bâti wallon d'avant-guerre (1914) à valeur patrimoniale).

²⁷ Méthode de résolution approximative.

L'objet de ce travail de fin d'étude portera, à travers une approche ascendante, des fondations à la toiture, sur l'étude du bâti ancien rural d'avant 1919, et plus particulièrement sur les fermes à cour, présentes en Ardenne Herbagère. Il s'agira de mieux comprendre les murs de façade de ce bâti afin d'améliorer son efficacité énergétique de manière adéquate. Mais également de transmettre ce patrimoine historique et de permettre aux générations futures d'occuper celui-ci de manière confortable²⁸, ce qui est, de manière générale, un des enjeux majeurs de la sauvegarde de notre patrimoine bâti.

La ferme à cour est un type de bâtiment intéressant car il présente un énorme potentiel de rénovation et/ou de réaffectation. Ces bâtiments sont généralement peu transformés, et sont de ce fait toujours importants dans la structure de nos paysages. Leur potentiel va de pair avec des enjeux sociétaux culturels, économiques et historiques. Moins nombreux que les fermes pluricellulaires, il s'agit d'une opportunité de se pencher sur ce type de ferme.

De plus, le cas d'étude sélectionné, la ferme Lemaire, appartient à un membre proche de la famille. Cela a permis de pouvoir réaliser une analyse plus poussée, en ayant la possibilité de récolter de précieux témoignages, de me rendre sur place régulièrement et d'appréhender en profondeur les lieux, de prélever des données hebdomadaires durant presque une année entière et de prélever des échantillons de divers matériaux.

Enfin, je porte un grand intérêt envers le monde agricole depuis mon plus jeune âge mais également un intérêt pour le monde de la construction en général, et plus particulièrement envers les bâtiments anciens, d'ampleur et de caractère.

Le thème de mon master s'orientant vers la question de la rénovation/reconversion du patrimoine bâti, allier ce qui me passionne et m'anime en architecture me paraît être évident dans le cadre de mon travail de fin d'étude qui, je l'espère, me permettra d'entamer une carrière professionnelle relative à ma question de recherche.

La ferme Lemaire, illustrée à la page suivante²⁹, est une ferme-château datant en partie du 17^e siècle. Elle permettra d'apporter des connaissances sur ce type de mur (constructives, matérielles, propriétés physiques et hygrothermiques) dans le but de proposer des itérations d'isolation permettant l'amélioration de la performance énergétique et garantir la préservation de ces parois. Cette ferme à cour se situe dans le village de Polleur, dans l'Allochtone ardennais³⁰, en Ardenne Herbagère. L'étude de ce bâtiment sera vérifiée sur d'autres anciens bâtiments de la région afin de s'assurer de la pertinence de celle-ci.

²⁸ DELVIESMAISON, S., HOTTOIS, M., COOLS, Q. (2021). Les fermes à cour : recommandations pour leur avenir. Fondation rurale de Wallonie.

²⁹ Ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

³⁰ Allochtone ardennais : région située dans le prolongement du synclinorium de Dinant. Dans cette région se situe le « Thier de Polleur », un relief sur les hauteurs du village de Polleur, se trouvant sur un sol famennien.





II. État de l'art

Comme l'a expliqué la partie introductive, la préoccupation environnementale touche aujourd'hui énormément de domaines, y compris celui de la construction. L'intérêt pour parvenir à limiter ses émissions de gaz à effet de serre (GES) se porte notamment vers l'amélioration énergétique du patrimoine bâti wallon d'avant-guerre.

Cependant, comme vont le démontrer les paragraphes suivants, des données précises manquent afin de proposer et mettre en œuvre des interventions adaptées à ce patrimoine.

Cet état de l'art se développera à travers trois parties :

- Une approche historique sur la construction d'avant-guerre en milieu rural,
- Le comportement des murs en moellons dans leur environnement,
- Les différentes solutions d'isolation et leurs impacts.

Il a pour objectif d'identifier, à travers la littérature et les différentes études menées, les informations existantes et manquantes, qui permettraient d'intervenir de manière pertinente sur le parc bâti d'avant-guerre construit en maçonnerie de moellons.

- Approche historique sur la construction d'avant-guerre en milieu rural

Concilier la valorisation du patrimoine bâti wallon et son amélioration énergétique semble toujours être un défi complexe, principalement à cause de l'actuel manque d'informations sur les matériaux qui composent les murs ainsi que les caractéristiques physiques, mécaniques et hygrothermiques de ces bâtiments.

Néanmoins, plusieurs ouvrages de références permettent d'appréhender le patrimoine bâti d'avant-guerre présent en Wallonie.

Les divers ouvrages de L.-F. GENICOT, dont « Le patrimoine rural de Wallonie »³¹, ainsi que les Atlas du Paysage de la Wallonie permettent d'appréhender le bâti wallon avec une vision générale.

De manière globale, ils nous permettent de réaliser l'importance du patrimoine bâti d'avant-guerre et les raisons pour lesquelles ce dernier constitue des points de repère dans nos paysages.

Ces ouvrages décrivent de manière précise le train de vie des paysans dicté, jusqu'au 20^e siècle, par les économies liées au sol (la culture et l'élevage) ainsi que les régions dans lesquelles les terres étaient propices à l'une ou l'autre économie. Ils expliquent en long et en large les facteurs par lesquels la typologie et la matérialité des bâtiments agricoles varient selon les régions, à savoir la nature du sous-sol et du paysage. Ils abordent également le principe d'implantation des fermes dans les villages situés dans les creux des vallées, ainsi que le développement de l'organisation spatiale des fermes pluricellulaires et des fermes à cour présentes sur le territoire wallon.

Le fonctionnement de la ferme qui s'organise tel un système complet est développé. Ils abordent les principales fonctions que regroupe la ferme dans ses murs (logis, étable et grange), et en dehors comme le verger, les appentis et espaces de stockage, forgerie, four à pain...

³¹ GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., LOZET, B., WEBER, P. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.

Ces ouvrages parlent également d'éléments architecturaux plus spécifiques. Ils décrivent notamment les différentes baies présentes sur les façades des fermes, leurs différentes typologies en fonction de différents facteurs, ainsi leur emplacement stratégique sur les différentes façades.

Ces ouvrages donnent un aperçu relativement complet. Cependant, ils ne livrent pas vraiment d'informations précises sur la manière de construire les murs en maçonnerie de moellons, leur composition matérielle ou encore leurs différentes caractéristiques physiques.

Plusieurs projets nationaux (COZEB³², P-RENEWAL³³) et internationaux (TABULA³⁴) proposent, sur base d'analyse typologique, des typologies de bâti existant wallon dans une perspective de rénovation énergétique.

P-RENEWAL développe un outil méthodologique durable adapté au parc bâti wallon d'avant-guerre en vue d'une rénovation énergétique. L'étude propose une classification et une quantification des différentes typologies de logements présents en Wallonie. Elle explique également les enjeux d'une telle intervention sur ce parc bâti, mettant en avant leur préservation, leur transmission mais également l'aspect environnemental d'une intervention destinée à améliorer le confort dans ces bâtiments. Elle propose de manière précise une répartition de ce patrimoine bâti sur le territoire wallon.

Cependant, l'étude mène une campagne de mesure sur plusieurs types de logement d'avant-guerre, dont certains s'écartent de la typologie, traités par ce présent travail, mais sans pour autant nous livrer d'informations quant à la composition ou le comportement des murs en moellons.

L'étude COZEB identifie les types de logements estimés comme étant prioritaires pour être soumis à une rénovation énergétique. Elle montre également la faible qualité énergétique du parc wallon bâti d'après-guerre sur base de l'isolation des parois de l'enveloppe. L'étude fournit également des données quant aux compositions de parois, mais ces dernières ne reprennent pas les murs en moellons. Ces données sont intéressantes, mais ne concernent ni les bâtiments d'avant-guerre, ni la typologie de logement étudiée. Des suppositions peuvent être faites sur base de ces données, mais comme mentionné précédemment, la rénovation énergétique doit se baser sur des informations concrètes et vérifiables.

Ces études s'attardent sur le bâti de manière générale, leur volumétrie, leur gabarit, leur organisation spatiale sans entrer réellement dans l'étude de la composition matérielle des différentes parois composant ces types bâtis.

L'étude et la connaissance des murs anciens en moellons de pierre naturelle présentent ainsi des lacunes. Ce présent travail a pour but d'alimenter les savoirs et avoir une meilleure connaissance de la composition et des comportements des murs en moellons.

Enfin, les ouvrages de la Fondation Rurale de Wallonie (F.R.W.), concernant l'avenir des fermes pluricellulaires et des fermes à cour, nous permettent de comprendre le fonctionnement et les

³² Département de l'Energie et du Bâtiment Durable SPW – DG04. (2013). Etude CO-ZEB : Rapport final de projet.

³³ STIERNON, D., TRACHTE, S., & all. (2017). Heritage value combined with energy and sustainable retrofit – representative types of old wallon dwellings built before 1914.

³⁴ IEE. (2009). TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment).

différentes fonctions que loge la ferme, ainsi que l'importance de la manière d'intervenir sur ce type de bâtiments afin de garantir leur avenir.

Ces ouvrages permettront de guider ce travail concernant les interventions à mettre en place dans le cadre d'une amélioration énergétique.

Dans ce même esprit, le guide de la rénovation énergétique du Service Public de Wallonie³⁵ est relativement complet. Il donne des pistes de réflexion quant à des mesures générales à mettre en œuvre dans des projets de rénovation telles que la récolte des eaux pluviales pour limiter la consommation en eau potable, mais également limiter la quantité d'eau de pluie à traiter dans les stations d'épuration. Il parle également de la perméabilité des aménagements extérieurs, ou encore du recours à la toiture afin de compenser l'imperméabilisation des sols.

Il touche également des sujets généraux comme la consommation des ressources ou encore l'urbanisation et leurs impacts (impact paysager, impact sur les catastrophes naturelles, sur la santé, la biodiversité...) ; les typologies des logements en Belgique, et leur qualité thermique générale. Aborde la complexité relative à l'amélioration de la qualité thermique des murs de façade en mentionnant les mêmes raisons que les études ISOLIN³⁶ et HUMIBATex³⁷. Il mentionne les avantages et inconvénients d'une isolation par l'intérieur ou par l'extérieur sur des murs massifs. Cependant, cela n'est pas spécifiquement dédié aux murs en pierre.

- Comportement des maçonneries en moellons sans isolation

Le comportement hygrothermique a pu être appréhendé dans les quelques sources susmentionnées (A.P.W., COZEB, L.-F. GENICOT). Ces dernières nous mentionnent le fait que le parc bâti wallon d'avant-guerre tire profit et fonctionne avec son environnement proche.

Des études à travers l'Europe ont été réalisées quant au comportement hygrothermique des murs des logements d'avant-guerre. Les études ATHEBA, HYGROBA, HUMIBATex ou encore le guide ISOLIN confirment que les murs massifs anciens ont un comportement dépendant de leur milieu proche et qui leur est propre.

Jean-Pierre MOYA explique dans son ouvrage³⁸ le fonctionnement d'un mur ancien. Un bâtiment fonctionne comme un système interagissant avec l'environnement extérieur. Son enveloppe, semblable à notre peau corporelle, est une interface respirante, un lieu d'échange entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur.

Cette capacité respirante est due aux matériaux utilisés. Ils sont ouverts à la diffusion de vapeur d'eau et capillaire.

L'étude ATHEBA³⁹ est une étude française qui s'attarde spécifiquement sur le comportement des murs massifs en pierre. Elle explique les différences de conception et de comportement entre le bâti ancien et le moderne. Le bâti ancien fut construit afin de permettre les échanges

³⁵Wallonie énergie SPW (2014). Guide de la rénovation énergétique et durable des logements en Wallonie. En ligne : <https://energie.wallonie.be/fr/guide-de-la-renovation-energetique-et-durable-des-logements-en-wallonie.html?IDC=8661&IDD=114342>

³⁶EVARD, A., BRANDERS, A., De HERDE, A. (2011). Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques plaines : guides d'aide à la conception. SPW – DG04 : Jambes, 98 pages.

³⁷CSTB. (2017). Guide de recommandations techniques HUMIBATex : Prise en compte des risques hygrothermiques en réhabilitation du bâti existant.

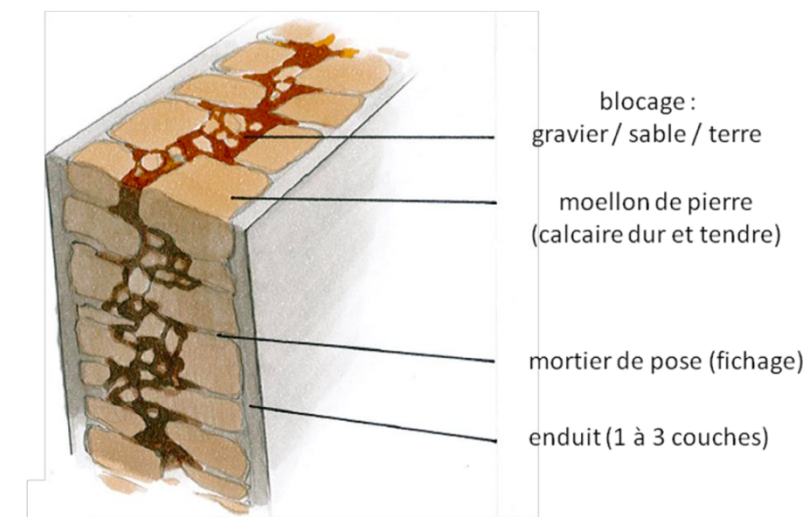
³⁸ MOYA, J.-P. (2018). Isolation thermique durable des bâtiments existants : choix multicritères. Manuel pratique. 296 pages. ISBN : 9782281142945

³⁹ATHEBA. (s.-d.). Connaissance du bâti ancien. Maisons paysannes de France.

d'air, de chaleur et de vapeur d'eau, alors que le bâti moderne se veut être le plus étanche possible. Les murs anciens possèdent des caractéristiques qui leur sont propres (inertie, microporosité des matériaux...) et qui leur permettent d'éviter naturellement les problèmes liés à l'eau. L'étude développe le comportement thermique hivernal et estival de ce bâti ancien et la manière dont l'environnement proche contribue à ces confort de saison (propriétés architecturales, bioclimatiques et d'inertie).

Cependant, même si cette étude française met en avant les propriétés propres au bâti ancien construit en pierre, elle stipule que ces dernières sont encore mal connues. De plus, l'étude est réalisée en France, ce qui la rend légèrement hors contexte.

L'étude HYGROBA⁴⁰ s'attarde en partie sur les principales caractéristiques thermiques et hygriques de plusieurs typologies de parois anciennes, dont une paroi en pierre calcaire dure hourdée au mortier de chaux. Elle détaille la composition d'un mur traditionnel en moellon à double appareillage qui comprend entre les deux appareils, beaucoup de mortier, du blocage (sable, gravier, terre) et des pores remplis d'air (figure 1).



Mur traditionnel en moellons à double appareil - Source : Maisons Paysannes de France

Figure 1 : illustration du principe de construction d'un mur en moellon à double appareillage – Source © HYGROBA

Elle mentionne que c'est à travers le mortier et les pores que les transferts d'air et de vapeur d'eau s'effectuent.

L'étude met également en évidence les inertie ($580 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) et la conductivité thermique élevées de la pierre calcaire dure ($2,2 \text{ W/m.K}$) et de ce fait, sa faible capacité isolante. A cela s'ajoute la faible hygroscopicité de la pierre calcaire dure (3 kg/m^3) et donc sa faible capillarité et sa haute résistance à la diffusion de vapeur d'eau. Enfin, l'hygroscopicité moyenne du mortier de chaux, environ 8 kg/m^3 , engendre sa grande capillarité et sa résistance moyenne à la diffusion de vapeur d'eau.

Elle donne également la valeur de la masse volumique de la pierre calcaire dure (2440 kg/m^3) et sa chaleur spécifique (850 J/kg.K).

Bien que ces données soient très pertinentes, il s'agit de données issues du patrimoine bâti français, et de murs en pierre calcaire dure, alors que ce présent travail s'attarde sur la construction en moellons de grès en Wallonie.

⁴⁰CETE de l'Est. (2013). HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes, maisons paysannes de France. Rapport.

L'étude HUMIBATex se penche elle aussi sur les logements français, mais ni la typologie, ni la date de construction ne sont précisées. Elle mentionne tout de même certaines caractéristiques hygroscopiques des murs massifs, à savoir qu'ils sont en constante interaction avec leur milieu interne et externe ; et qu'ils contiennent effectivement une quantité importante d'humidité dans leurs murs. Cette étude s'attarde principalement sur les différentes solutions d'isolation et leurs différents impacts sur le bâti.

Dans cette continuité, le projet BATAN⁴¹ fournit des informations et principes généraux de ces anciens murs. En plus du phénomène d'inertie, elle souligne leur sensibilité à l'humidité et l'importance du phénomène de respiration pour ces bâtiments, qui permet à l'humidité qui s'est infiltrée dans le mur, de pouvoir s'évacuer vers l'extérieur sous forme liquide ou de vapeur d'eau. De nouveau, les résultats portent sur des bâtiments français, et ne fournissent pas de données précises concernant les murs en moellons de grès.

Le projet a également contribué à l'amélioration de la modélisation des parois anciennes et de leur comportement en proposant un nouveau modèle de calcul permettant d'évaluer les besoins de chauffage et situation de confort. Les données utilisées demeurent insuffisantes et sont relatives aux typologies françaises étudiées. Elles peuvent être une base de données qu'il faudra adapter au contexte wallon.

Enfin, le guide wallon ISOLIN reprend lui aussi les caractéristiques hygrothermiques principales des murs massifs anciens. Il mentionne les transferts (vapeur d'eau, air, chaleur), l'inertie ou encore le stockage d'humidité récoltée par absorption, par remontée capillaire, par constitution ou de manière libre.

Cependant, il ne livre pas de données précises quant aux murs en moellons de grès et privilégie les caractéristiques des solutions d'isolation plutôt que celles du mur qui n'est pas isolé.

De manière générale, le comportement thermique des murs en moellons de grès et les outils qui tentent de l'appréhender ne semblent toujours pas en capacité de pouvoir le faire. Ce travail de fin d'étude aura pour but de fournir des informations nécessaires à la simulation des comportements des murs en moellons de grès.

⁴¹ENTPE ; CETE de l'Est et de l'Ouest ; MPF ; INSA de Strasbourg. (2011). Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948 : Rapport de synthèse. BATAN.

- Solutions d'isolation et leurs impacts

Si les données récoltées demeurent insuffisantes pour répondre à l'amélioration thermique du parc bâti d'avant-guerre avec des solutions concrètes et adaptées, quelques pistes d'intervention ont tout de même pu être étudiées. Deux solutions ressortent : une solution d'isolation par l'extérieur et une solution par l'intérieur.

Certaines études comme HYGROBA, ISOLIN, RIBuild ou HUMIBATex expliquent qu'une isolation par l'extérieur reste la plus favorable et performante. Elle permet une continuité de l'isolation, réduit le risque de ponts thermiques, améliore l'étanchéité de la façade, protège le mur du gel et des fissurations, conserve l'inertie...

Cependant, cette solution n'est pas privilégiée pour des raisons de conservation des façades. En effet, elle touche à l'esthétique de la façade et donc, du paysage. Or, dans certains cas de figure, le matériau de façade est parfois imposé, certaines façades sont protégées, ou alors il peut être interdit d'empiéter sur l'espace public.

Suite à cela, une isolation par l'intérieur représente généralement la seule solution possible en rénovation.

Les études citées dans le paragraphe précédent, ainsi que d'autres études et articles scientifiques développent la question de l'isolation par l'intérieur et ses impacts.

Plusieurs études abordent la question et son risque principal lié à l'humidité.

ISOLIN souligne qu'en Wallonie, 65% des murs extérieurs de logement ne sont pas isolés en 2007. L'isolation de la toiture et le remplacement des fenêtres sont des interventions plus courantes, mais les murs demeurent très peu isolés alors qu'il s'agit généralement de la plus grande surface de déperdition des logements.

Ce fait est dû à plusieurs raisons que l'étude souligne : le rôle structurel de la paroi qu'il ne faut pas modifier, son comportement hygrothermique complexe, le fait qu'ils soient percés de baies...

L'étude développe le principe de murs creux et de murs pleins, en s'attardant plutôt sur les murs en briques que ceux maçonnés en moellons. Elle chiffre tout de même à 48% les murs pleins parmi les logements wallons construits jusqu'en 2007.

L'étude s'attarde également sur le phénomène de paroi froide suite au phénomène d'isolation. Un mur en pierre non-isolé trouve naturellement son équilibre entre son milieu extérieur et intérieur. Une fois isolé par l'intérieur, cet équilibre est rompu et la maçonnerie extérieure perd la possibilité du phénomène d'inertie et devient donc froide.

Isoler, consiste également à modifier les transferts d'humidité entre intérieur et extérieur, ce qui peut provoquer de la condensation.

L'étude explique qu'en hiver, la vapeur contenue dans le milieu intérieur chauffé, migre vers l'extérieur et se refroidit progressivement créant, si le point de rosée est atteint, de la condensation et de la moisissure à l'intérieur du bâtiment.

Elle explique aussi que l'humidité présente dans la paroi tend à migrer vers les surfaces et qu'il est important, dans le cas d'une solution d'isolation par l'intérieur, de laisser un potentiel de séchage au mur grâce à des solutions qui ne sont pas complètement étanches. Le risque d'une étanchéité complète est d'affaiblir le potentiel de séchage et d'augmenter le risque que l'humidité s'accumule en rencontrant une membrane étanche.

L'étude HUMIBATex argumente elle aussi le choix privilégié d'une solution d'isolation par l'intérieur.

Elle parle également des phénomènes d'altération irréversible que peut provoquer le contact de l'eau avec les murs. Les murs sont soumis à l'eau de pluie directement poussée par les vents dominants et la partie basse du mur peut être en contact de l'eau par ruissèlement et projection. Il cite également le processus physique de capillarité qui s'exerce de manière naturelle. Le projet livre des informations pertinentes pour comprendre les conséquences de l'eau de pluie, mais ces données se basent sur des bâtiments situés en France, ce qui le rend légèrement hors contexte.

Bien que ces deux études ne s'attardent ni sur le patrimoine construit en moellons ni sur leur construction, elles soulignent le manque de connaissance sur le bâti existant, et l'importance d'une excellente connaissance physique, mécanique et hygrothermique des murs pour pouvoir proposer une solution d'isolation efficace et non destructrice. Cette réflexion peut être transposée sur le type de mur que vise ce travail de fin d'étude.

RIBuild confirme que l'application d'une solution d'isolation par l'intérieur affecte tout bâtiment au niveau structurel et dans la manière dont il se comporte et insiste sur l'importance de l'interaction entre les matériaux mis en œuvre et les propriétés du mur.

Elle met en évidence que les solutions d'intervention peuvent être distinguées de la manière suivante : les systèmes qui empêchent la condensation, ceux qui la limitent et ceux qui la tolèrent. Elle énumère les isolants naturels (cellulose, liège) et les isolants réalisés avec des matériaux artificiels (laine minérale, polyuréthane, polyisocyanurate, polystyrène expansé et extrudé, aérogel, panneau isolant sous vide, isolation thermique de plâtre et silicate de calcium). L'étude énumère une série de propriétés (conductivité thermique et résistance à la vapeur) mais ne s'attarde pas sur les impacts des solutions d'isolation sur le comportement hygrothermique et physique des murs (figures 2 et 3).

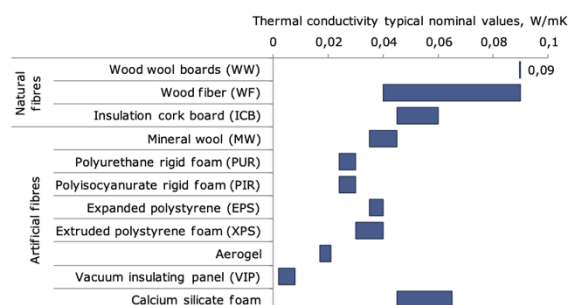


Figure 2.19. Comparison of insulation materials based on their thermal conductivity

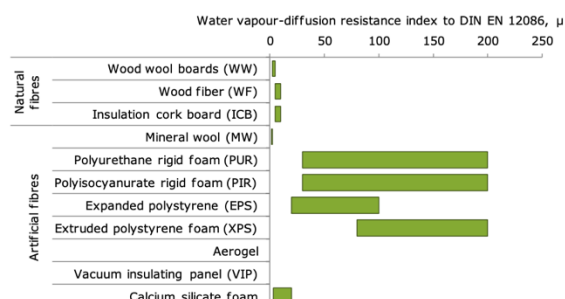


Figure 2.20. Comparison of insulation materials based on their vapour diffusion resistance

Figure 2 et 3 : tableaux illustrant la conductivité thermique et la diffusion de vapeur de matériaux isolants – Source © RIBuild

Enfin, l'étude met avant que l'amélioration énergétique d'un bâtiment ne peut s'aborder de manière globale, mais au travers d'une série d'actions spécifiques.

HYGROBA développe une partie de son étude sur les conséquences hygrothermiques de différentes solutions d'isolation sur un mur traditionnel en moellons à double appareil. Elle illustre des interventions extérieures et intérieures ainsi que leurs conséquences selon les cas de figures suivants : solution E-E (étanche (=E) en extérieur et étanche (=E) en intérieur), E-P (étanche en extérieur et perméable (P=) en intérieur), P-P et P-E. Elle synthétise ces informations sous la forme du tableau récapitulatif (figure 4) ci-dessous :

Murs en pierre calcaire dure		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie thermique	Résistance thermique
Isolation par l'extérieur	Base				● ● ●	
	E-E				● ● ●	
	E-P				● ● ●	
	P-E				● ● ●	
	P-P				● ● ●	
Isolation par l'intérieur	E-E				○ ○ ○	
	E-P				○ ○ ○	
	P-E				○ ○ ○	
	P-P				○ ○ ○	

Figure 4 : tableau illustrant les impacts de l'isolation sur un mur ancien – Source © HYGROBA

Bien que cette étude soit adaptée au type de mur sur lequel s'attarde ce présent travail, elle livre des données propres au parc bâti français, mais est une base fiable sur laquelle on pourrait se baser pour les logements d'avant-guerre de Wallonie.

Au Portugal, une étude⁴² s'est attardée sur le comportement après réhabilitation thermique du bâti ancien en pierre. Elle a analysé l'influence des solutions d'isolation par l'intérieur et le risque de condensation et souligne la nécessité de trouver des solutions d'isolation qui minimisent le risque de condensation.

Plusieurs études, dont ATHEBA, HUMIBATex et ISOLIN, insistent sur le terme de « correction thermique ».

Elles signifient par ce terme qu'il est primordial que la solution d'isolation ne rompe pas l'équilibre naturel du mur et conserve une paroi perméable à la vapeur d'eau et à la capillarité. Ce terme signifie également qu'il n'est parfois pas possible d'atteindre les performances thermiques recommandées ou exigées lors d'une amélioration énergétique. La correction pallie donc les principales insuffisances de l'enveloppe, elle augmente le confort de vie des occupants et permet d'économiser de l'énergie.

⁴²MORADIAS, P.-A., SILVA, P., CASTRO-GOMES, J.-P., SALAZAR, M.-V., PIRES, L. (2012). Experimental study on hygrothermal behaviour of retrofit solutions applied to old building walls, Construction and building materials.

Enfin, d'autres documents s'attardent sur les considérations environnementales qu'impliquent une amélioration énergétique.

Le projet LERH⁴³ identifie des rénovations énergétiques à l'international, y compris en Wallonie. Il lie la rénovation énergétique (confort, isolation, suppression de ponts thermiques, étanchéité...) à l'innovation technologique. Il désigne un ensemble de points d'attention, systèmes et techniques innovateurs à combiner avec l'amélioration énergétique.

Cette innovation reprend la conception bioclimatique ; l'apport et la protection solaire ; l'isolation, l'étanchéité et la ventilation ; les systèmes techniques ayant recourt aux énergies renouvelables ; production de chaleur grâce au soleil ou la biomasse ; une ventilation mécanique avec récupération de chaleur ; nouveaux matériaux isolants...

Cette innovation semble compliquée d'après le projet, à cause d'une série de facteurs : principalement parce que les corps de métier ne sont pas encore formés à cette innovation, car il y a une multitude de corps de métier et que leur coordination est compliquée, et car ces interventions chamboulent de manière prolongée le quotidien des occupants.

En ce sens, les ouvrages de la Fondation Rurale de Wallonie (F.R.W.), destinés à l'avenir des fermes à cour et pluricellulaires en Wallonie, porte notre attention sur une série de points dans le cadre d'une diversification de fonction ou d'une réhabilitation si l'activité agricole a complètement disparu.

Ils recommandent de prendre une série de considérations concernant les abords ; le respect de la cour, des volumes, de la toiture, des façades et des ouvertures ; l'impact des interventions contemporaines et la nécessité d'une cohérence d'ensemble pour mener à bien un projet sur ce parc bâti d'avant-guerre. Cependant, ces ouvrages ne développent pas du tout les interventions possibles pour améliorer le bâtiment d'un point de vue énergétique.

Les projets ERFIN ou PEPB, développés par la Ruralité-Environnement-Développement (R.E.D.) mettent en avant la durabilité de l'intervention et plusieurs stratégies innovantes d'intervention sur un patrimoine bâti d'avant-guerre. Parmi celles-ci figurent l'isolation ponctuelle, la cybernétique, le remplacement des châssis, le chauffage assuré par un réseau de chaleur urbain alimenté par biomasse, l'intégration de volumes performants dans l'enveloppe en pierre (boite dans la boite) ou encore l'émission de chaleur par un sol à l'eau.

Pour compléter cette considération environnementale et cette réduction de consommation d'énergie, le guide de la rénovation, fruit de la S.P.W., aborde la question du bilan environnemental des matériaux.

Pour répondre aux objectifs mis en place pour l'horizon 2050, le choix des matériaux mis en œuvre devrait également être réfléchi en fonction de son bilan environnemental. Les émissions de polluant et l'utilisation de l'énergie pour la fabrication des matériaux mis en œuvre sont généralement mal connues mais estimées comme un passage inévitable dans ces interventions d'amélioration énergétique.

Pour pallier à cette ignorance, le guide met en avant une série d'outils de type label, check-list, déclarations environnementales, etc.

⁴³ MLECNIK, E. et al. (2010). Low Energy Housing Retrofit (LEHR), Final Report, Belgian Science Policy. Bruxelles. 106 pages.

L'ouvrage de MOYA met également à disposition une série de pistes à investir dans le cadre d'une amélioration thermique. Il met en évidence l'importance de prendre en considération les facteurs externes au bâtiment (environnement et climat), mais également les matériaux qui composent le mur. Il insiste également sur l'importance d'apporter une solution propre à chaque élément de l'enveloppe et de travailler mur par mur, paroi par paroi car toutes n'ont pas besoin d'une même et unique intervention.

Il met en avant, tout comme les sources précédentes, des manières d'intervenir sur l'existant : lame d'air, espace tampon, attribution de fonctions à des endroits précis dans le bâtiment... Ces idées mettent en avant le fait que dans ce type de parc bâti, l'instauration d'éléments ponctuels performants participant à l'amélioration énergétique est dans certain cas préférable à l'instauration de performances dignes d'un bâtiment moderne passif.

Cependant, l'ouvrage recommande des démarches qu'il est important de remettre en question dans le cadre d'une intervention thermique par l'intérieur (ITI), comme le fait d'imperméabiliser la façade⁴⁴ ou d'utiliser des matériaux isolants imperméables⁴⁵.

⁴⁴ MOYA, J.-P. (2018). Isolation thermique durable des bâtiments existants : choix multicritères. Manuel pratique. 296 pages. ISBN : 9782281142945

⁴⁵ Ibidem.

- Analyse de l'état de l'art

Un nombre important et croissant d'études, tant à l'échelle internationale que régionale, s'attardent sur la problématique de la rénovation énergétique du patrimoine bâti.

L'état de l'art nous démontre une prise de conscience quant à la conservation de ce patrimoine en cette période de transition énergétique.

Cependant, un manque de données est constaté concernant les murs massifs en moellons de pierre naturelle présents en Wallonie. Leur composition matérielle et architectonique ainsi que leur comportement hygrothermique sont des données qu'il est nécessaire d'approfondir pour pallier les problèmes de simulation et de modélisation susmentionnés, afin de trouver des solutions saines de rénovation énergétique adaptées aux anciens bâtiments wallons.

Ce manque de données démontre l'importance d'alimenter les connaissances des murs en moellons de pierre naturelle de nos régions pour développer des modèles fidèles capables de cerner la complexité de ces parois. Ces modèles sont indispensables afin de réaliser des diagnostics fiables dans le but de satisfaire les exigences énergétiques wallonnes et envisager des solutions adéquates de rénovation énergétique afin de préserver ce patrimoine.

C'est pourquoi, tout en s'inscrivant dans la continuité des études citées dans les paragraphes précédents, ce présent travail visera à fournir des données qui aborderont un cas d'étude dans son ensemble : depuis la situation géographique jusqu'à la composition de la paroi, en passant par les fonctions que la ferme a logé ou encore des données relatives à l'humidité présente dans les murs de cette ferme durant plusieurs mois.

La littérature regroupe également un ensemble de conseils et de principes dans le cas d'une intervention pour une amélioration énergétique. Plusieurs outils méthodologiques sont en cours de construction et ont pour objectif de pouvoir mettre en évidence une série de critères (spécificités architecturales, matérielles, physiques, typologiques) et de mesures destinées à l'amélioration énergétique. Mais des données propres à la composition et au comportement du mur demeurent insuffisantes que pour pouvoir mettre au point l'un ou l'autre outil, qui puisse être appliqué dans différents endroits, pour différentes situations.

D'autres études s'attardent sur les isolants à utiliser dans le cadre d'une telle intervention, mais aucun inventaire n'est réellement établi quant aux matériaux qui pourraient être utilisés en Wallonie pour une intervention thermique par l'intérieur.

Ce présent travail de fin d'étude a pour objectif, dans sa capacité limitée, de pallier à ce manque général d'informations, et de proposer une liste de matériaux isolant qui présentent les caractéristiques techniques nécessaires (hygroscopicité, inertie thermique, faible résistance à la diffusion de vapeur) et des critères complémentaires (provenance, état du stock, nature de la ressource) pour réaliser une intervention thermique par l'intérieur qui soit respectueuse envers le mur et l'environnement.

Quelques solutions seront testées afin d'obtenir des données quant à la performance du mur et de sa solution d'isolation, grâce à l'outil TOTEM.

III. Méthodologie

Afin de répondre à la question de recherche qui est posée, l'approche méthodologique de ce présent travail de fin d'étude s'établira en quatre étapes.

La première étape se penchera sur l'habitat rural wallon d'avant-guerre, et plus particulièrement les fermes à cour. Elle visera à mieux cerner les spécificités de ce bâti, ses atouts et faiblesses et les enjeux auxquels il fait face en termes d'amélioration énergétique.

L'objectif est d'identifier les principales caractéristiques des fermes à cour telles que leur importance dans nos paysages, les fonctions qu'elles accueilleraient à l'époque et aujourd'hui, leur relation avec le contexte et le sol, la manière de vivre dans ces fermes et leurs intérêts divers et variés. Plusieurs références pourront être valorisées à cet effet, notamment les ouvrages de la Fondation Rurale de Wallonie, des Atlas de Paysage de Wallonie et de L.-F. GENICOT, dont les éditions de Mardaga.

Les informations recueillies concerneront essentiellement la région dans laquelle se situe la ferme Lemaire, à savoir l'Ardenne Herbagère. Ensuite, une description de cette ferme sera d'abord réalisée sur base d'observations, d'analyses in situ et de témoignages et ensuite confrontée aux informations issues de la littérature.

Cette première étape permettra de mettre en évidence une série d'enjeux liés à la rénovation énergétique d'une ferme à cour, et permettra d'alimenter principalement la dernière étape de ce travail de fin d'étude.

La deuxième étape visera à étudier les aspects constructifs des murs de façade en moellons de pierre. Elle sera composée de deux parties qui traiteront de la composition matérielle, et des propriétés physiques des composants principaux de ces murs.

La première partie aura pour objectif d'identifier la composition matérielle de ces murs et de comprendre leur technique de construction, à savoir les raccords « mur-toiture », « mur-baie de fenêtre », « mur-plancher », « mur-fondation » ; et les éléments architectoniques tels que les linteaux, les seuils, les appuis, les jambages, les pierres d'angle et les ancras. Pour ce faire, les A.P.W.⁴⁶, l'I.P.I.C.⁴⁷ ainsi que différents manuels de terrain sur les pierres à bâtir permettront de mieux comprendre la construction des murs en pierre. Après l'analyse de cette littérature, une analyse et une description de la ferme seront effectuées et transposées sur d'autres anciennes fermes de la sous-région construites en moellons afin de s'assurer de la pertinence des informations issues du cas d'étude. Cette seconde étape aura pour objectif de comprendre le système constructif de ces fermes, un système qui sera confronté à la quatrième étape dédiée à l'analyse de la ferme Lemaire.

La deuxième partie aura pour objectif de mieux cerner les propriétés physiques des composants principaux de ces murs en moellons, à savoir la masse volumique des matériaux en présence, leur conductivité thermique, leur chaleur massique. Si cela s'avère possible, la composition du mortier de chaux sera également analysée. Au travers des ouvrages de MESNAGER A.⁴⁸ et

⁴⁶ Atlas Paysager de Wallonie

⁴⁷ Inventaire du Patrimoine Immobilier Culturel

⁴⁸ MESNAGER, A. (1923). Matériaux de construction. Vol. 1, Pierres. J.-B. Baillière.

GENICOT L.-F. et les études HYGROBA⁴⁹ et HUMIBATex⁵⁰, l'objectif est d'identifier les principales caractéristiques des murs en pierre construits jusqu'au 19^e siècle. Ces notions théoriques seront vérifiées sur la ferme Lemaire ainsi que sur d'autres bâtiments de la sous-région, notamment pour vérifier la pertinence des apports théoriques. Des échantillons issus des différents bâtiments étudiés pourront être analysés afin d'obtenir des données concrètes.

Une troisième étape sera consacrée à la description du cas d'étude. Elle se penchera sur la ferme dans son ensemble (situation géographique, volumétries, organisation spatiale) ainsi que ses aspects constructifs et les propriétés physiques de ses matériaux principaux. Cette description se basera sur la deuxième étape. Cette troisième étape décrira les compositions architectonique et matérielle des murs de la ferme retranscrites à travers des documents graphiques. L'objectif est de parvenir à réaliser une estimation du coefficient de déperdition thermique, et d'obtenir des informations quant au comportement des murs étudiés face à la vapeur d'eau ou l'humidité extérieure afin d'estimer leur potentiel. Cela permettra d'alimenter le résultat de la recherche.

Une quatrième étape proposera des itérations de solutions d'isolation par l'intérieur et une discussion concernant ces dernières. Elles devraient permettre de réduire le coefficient de déperdition thermique tout en étant adéquates aux spécificités architectoniques et aux propriétés physiques des murs de la ferme Lemaire. Sur base des rapports ISOLIN, RIBuild et de l'ouvrage de D. STIERNON et S. TRACHTE consacré aux isolants en rénovation⁵¹, un inventaire des solutions existantes d'isolation par l'intérieur sera réalisé, ainsi qu'un inventaire des matériaux isolants.

Sur base de ces inventaires, il sera possible de sélectionner les matériaux et les systèmes compatibles avec les murs de la ferme.

Le résultat de cette dernière étape, grâce aux informations récoltées, sera de pouvoir émettre des itérations de solutions d'isolation par l'intérieur en veillant à ce qu'elles entrent en adéquation avec les caractéristiques des murs étudiés.

Pour résumer, ces étapes auront pour objectif de décrire la composition matérielle et les propriétés physiques des principaux matériaux présents dans ces murs. Cette recherche permettra de proposer des itérations de solutions d'isolation par l'intérieur afin de savoir dans quelle mesure les murs étudiés peuvent devenir plus performants d'un point de vue énergétique, tout en veillant à ce qu'ils conservent leurs spécificités.

Ces solutions pourront être à l'avenir vérifiées à travers des outils de numérisation ou des prototypes, dans le but de savoir si elles peuvent être réellement appliquées.

Cette méthodologie est illustrée dans le schéma ci-contre (figure 5).

⁴⁹CETE de l'Est. (2013). HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes, maisons paysannes de France. Rapport.

⁵⁰CSTB. (2017). Guide de recommandations techniques HUMIBATex : Prise en compte des risques hygrothermiques en réhabilitation du bâti existant.

⁵¹STIERNON, D., TRACHTE, S. (2023). Isolants thermiques en rénovation. ISBN : 9782889155347.

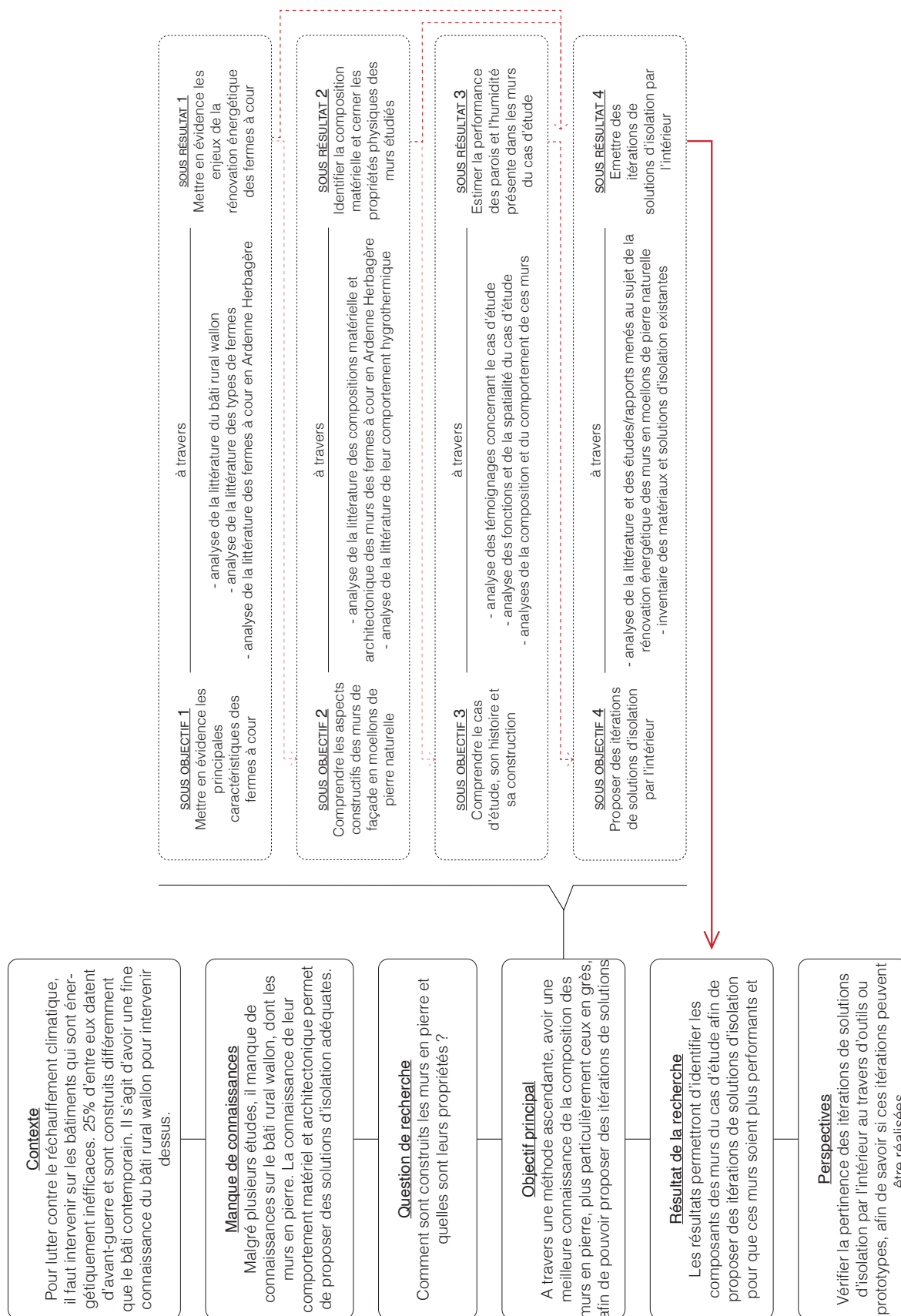


Figure 5 : Schéma de la méthodologie – Illustration © Antoine GUSBIN

CHAPITRE 1

Habitat rural en Wallonie

1.1 Évolution de la Wallonie

Autrefois, la Wallonie était un immense territoire boisé. A partir du 10^e siècle, la population locale connut une forte augmentation. Cette croissance démographique engendre une série de changements dans le paysage. L'homme, chasseur et cueilleur à l'époque, ouvre des clairières parmi les vastes étendues forestières wallonnes, afin de mettre ces terres en culture et créer des zones d'habitation groupées jusqu'au 14^e siècle. L'agriculture dictait le mode de vie des paysans qui habitaient les campagnes. En effet, la terre était la principale source de la richesse et constituait le capital par excellence jusqu'au début du 20^e siècle, voire au-delà.

La Wallonie est divisée en trois sous-régions aux conditions physiques et à l'occupation du sol spécifiques (figure 6) :

- La région limoneuse, la partie nord de la Wallonie, est composée de bas plateaux et de vastes étendues au sol fertile, ce qui favorise la culture du sol.
- La région condrusienne, la partie centrale de la Wallonie, comprend des climats et des sols intermédiaires, à savoir des prairies et des parties boisées.
- Et la région ardennaise, la partie Sud-Est de la Wallonie, est caractérisée par ses sols médiocres et un relief boisé prononcé, est plus adaptée à l'élevage.

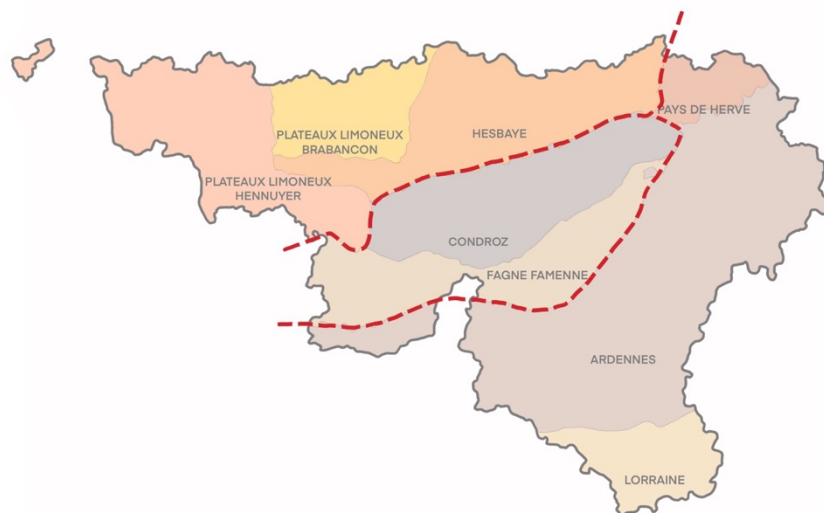


Figure 6 : carte illustrant la division du territoire wallon en trois régions – Illustration © Antoine GUSBIN

Comme il le sera expliqué plus tard dans la partie dédiée aux types de fermes, il résulte de cette division du territoire, une appropriation des autorités qui dictera la physionomie du bâti rural.

La culture et l'élevage dépendent ainsi des sous-sols présents en Wallonie. Le territoire wallon est composé de plusieurs types de sous-sol, ce qui le divise en huit sous-régions agro-géographiques (figure 7) :

- Le plateau limoneux hennuyer,
- Le plateau limoneux brabançon,
- La Hesbaye,
- Le Condroz,
- La Fagne-Famenne,
- La Lorraine,
- Les Ardennes,
- Et le Pays de Herve.

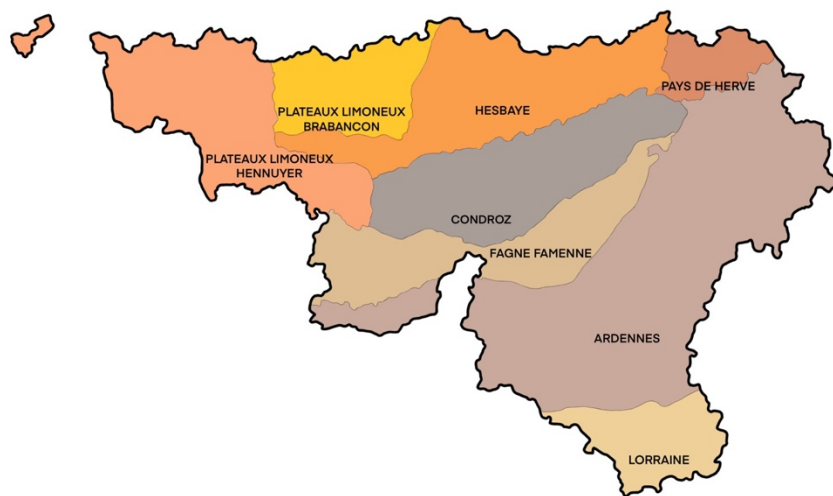


Figure 7 : carte illustrant les huit régions agro-géographiques – Illustration © Antoine GUSBIN

En l'espace de 200 ans, la population active dans le secteur agricole wallon a fortement chuté. Elle représentait près de 59 % à l'époque, alors qu'il n'y a plus que 22.000 travailleurs réguliers en agriculture au sein de la Wallonie en 2020⁵². Sans oublier que le pourcentage de population nourrit par l'agriculture ne cesse d'augmenter, créant un déséquilibre dans le système.

Ces changements surviennent suite aux progrès dans de nombreux domaines à l'aube de la Révolution Industrielle et de l'après-guerre, ce qui transforma le monde rural. Parmi ceux-ci, le changement du moteur économique de la Wallonie, l'accélération de la mobilité, l'évolution de la technique, la mécanisation dans le milieu agricole et la diminution du besoin en main d'œuvre, l'accroissement des rendements et des surfaces cultivées par une même personne, les remembrements agricoles, l'utilisation d'engrais, ou encore l'exode rural suite à l'implantation des industries dans les grandes villes.

Actuellement, d'autres raisons peuvent expliquer la diminution de la main-d'œuvre et le problème de transmission des exploitations agricoles. Parmi ces raisons, les contraintes horaires de la profession, les importants frais de travaux des entrepreneurs agricoles ou frais suite à une reprise, l'isolement social, les accidents liés au bouleversement climatique...

⁵²Etat de l'Agriculture Wallonne (2022). Population active.

1.2 Bati rural d'avant-guerre

Avant la transformation du monde rural, le parc bâti d'avant-guerre wallon est composé de différents types de logements. Parmi ceux-ci figurent des typologies de logements ruraux : la cellule ouvrière, la ferme en long et la ferme en bloc, la ferme en bâtiments parallèles, et la ferme en carré ou en U⁵³.

Les typologies de logements ruraux de type ferme est la catégorie sur laquelle se penche ce travail de fin d'étude.

Autrefois, la population vivait majoritairement grâce aux revenus en lien avec l'économie du sol. Pour l'une ou l'autre économie, le choix d'implantation dans le paysage demeure un point commun. Les fermes se regroupent et s'implantent de préférence en creux de vallée, afin de se protéger des vents et être à proximité d'une rivière.

Comme pour la culture, la terre est une source chère que le paysan a exploité pour construire sa ferme. Elles étaient construites avec des matériaux issus de l'environnement proche, faciles à mettre en œuvre et économiques car le revenu des paysans était maigre⁵⁴. La ferme est généralement construite en colombage, une ossature en bois remplie de panneaux de torchis, qui repose sur un soubassement en pierre et couverte d'un mélange de paille, la toiture en chaume⁵⁵.

Ce n'est pas avant le 18^e siècle, alors que les moyens financiers de la population augmentent, que les fermes sont progressivement améliorées, agrandies et transformées en ayant recourt aux matériaux « durs », à savoir la pierre, la brique et la tuile afin d'éviter les problèmes liés aux incendies⁵⁶ (cf. figure 9).

⁵³ Etat de l'Agriculture Wallonne (2022). Population active.

⁵⁴ CASTIAU, E., & al. (s.-d.) A.P.W. : l'Ardenne Centrale La Thiérache.

⁵⁵ GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1.

⁵⁶Etat de l'Agriculture Wallonne (2022). Population active.

Le sous-sol de la Wallonie étant composé de plusieurs types de roche, chaque sous-région agro-géographique construit ses logements avec des matières rocheuses et des typologies différentes, ce qui offre à chacune leur propre identité architecturale (figure 8) (annexe 1).



Figure 8 : carte illustrant la diversité des matériaux selon les régions agro-géographiques – Illustration © Antoine GUSBIN

Le **Plateau limoneux hennuyer** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en maçonnerie de briques brunes, et sont parfois toujours⁵⁷ badigeonnées de chaux. Les toitures recourent aux tuiles en « S » rouges ou grises, ou des tuiles plates.

Le **Plateau limoneux brabançon** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en maçonnerie de briques brunes, et sont parfois toujours badigeonnées de chaux. Les toitures recourent aux tuiles en « S » rouges ou grises.

La **Hesbaye** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en maçonnerie de briques brunes, et sont parfois toujours badigeonnées de chaux. Les toitures recourent aux tuiles en « S » rouges ou grises.

Le **Condroz** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en pierre calcaire ou en grès. Les toitures recourent aux tuiles en « S » rouges ou grises, ou des ardoises.

La **Fagne-Famenne** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en pierre calcaire ou en grès. Les toitures recourent aux tuiles en « S » rouges ou grises, ou des ardoises.

La **Lorraine** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en pierre calcaire ou en grès, badigeonnées ou non de chaux. Les toitures recourent aux tuiles à canal rouges ou des ardoises.

Les **Ardennes** sont une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en pierre calcaire, en schistes ou en grès, badigeonnées ou non de chaux. Les toitures recourent aux ardoises ou aux cherbains.

Le **Pays de Herve** est une région dans laquelle les façades des fermes sont réalisées en pierre calcaire ou en grès. Les toitures recourent aux tuiles en « S » rouges ou grises.

⁵⁷ Avant le 19^e siècle, les façades sont systématiquement recouvertes de chaux.

Le bâti rural d'avant-guerre fait partie intégrante du patrimoine immobilier wallon. Ils composent nos campagnes et paysages, et témoignent d'un langage architectural, d'un savoir-faire, d'un ancien mode de vie et constituent un héritage à prendre en compte et à transmettre aux générations futures. Ils sont également un atout économique dans le cadre de leur rénovation ou réaffectation.

Or, le visage ancestral de nos campagnes est actuellement en train de s'estomper. Les bâtiments d'avant-guerre n'étant plus adaptés aux pratiques agricoles actuelles, ils font face à des réhabilitations, des démolitions ou des abandons à cause de leur coût d'entretien conséquent ou de l'absence de repreneurs.

De plus, les campagnes ont connu un regain d'intérêt et voient se développer une importante quantité de constructions d'habitations neuves faisant preuve de confort et d'efficacité énergétique. Ces constructions uniformisent toute la Wallonie, tant par leurs matériaux utilisés que par leur volumétrie, alors que les anciens logements apportaient une diversité d'une région à l'autre (figure 10). Les techniques de construction se généralisant, il résulte d'une perte de savoir-faire concernant le bâti ancien, ce qui pose actuellement problème car il s'agit d'intervenir sur ce patrimoine bâti d'avant-guerre pour répondre à des exigences contemporaines (figure 9).

Actuellement, le stock bâti datant d'avant-guerre représente 25% du parc bâti wallon (figure 10), et 37% de ce parc sont des logements de type ferme⁵⁸. Il est considéré comme peu efficace d'un point de vue énergétique, et est une des priorités de la stratégie wallonne de rénovation à long terme. Malgré cette priorité, le taux de rénovation énergétique de ce parc reste faible en Europe, comme en Wallonie, avec un taux annuel inférieur à un pourcent. Pour bien faire, il s'agirait de tripler ce taux d'après le précédent ministre du Climat, Energie, Mobilité et Infrastructures, Philippe Henry⁵⁹.

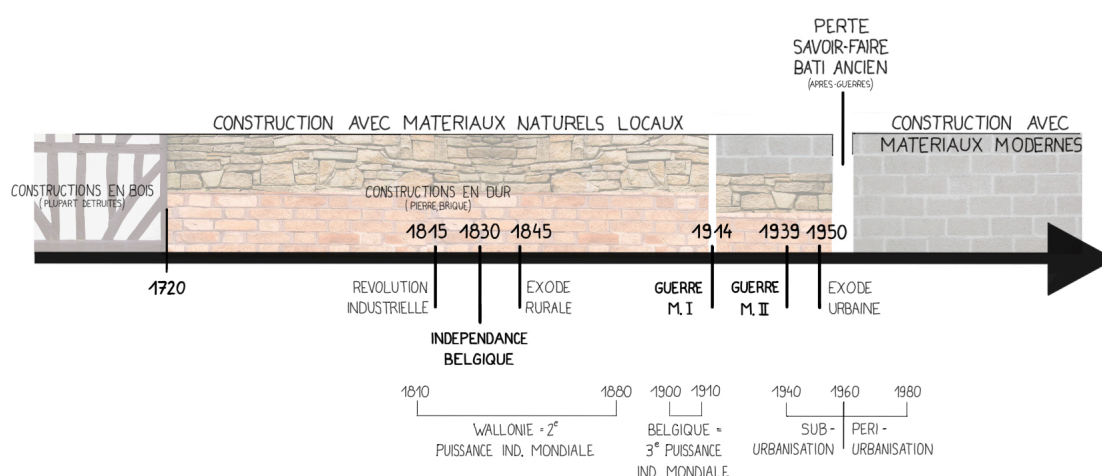
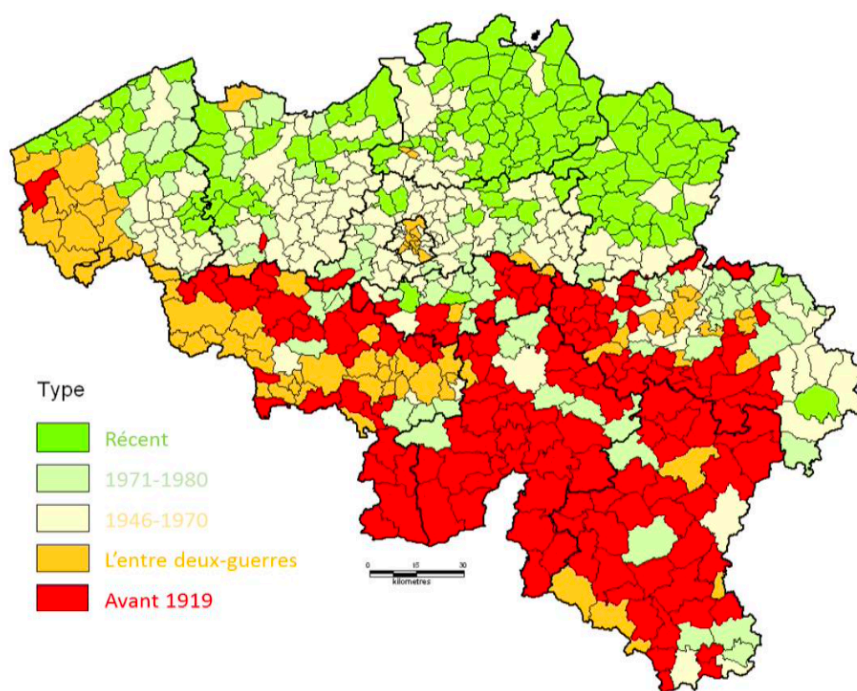


Figure 9 : ligne du temps illustrant l'évolution des matériaux utilisés pour le bâti rural – Illustration © Antoine GUSBIN

⁵⁸ STIERNON, D. & TRACHTE, S. (2018). P-RENEWAL (rénovation énergétique du bâti wallon d'avant-guerre (1914) à valeur patrimoniale).

⁵⁹ HENRY, P. (2023). Soutien et massification de la rénovation énergétique des logements. Wallonie.



Distribution des logements suivant leurs périodes de construction en Belgique (KULeuven-UCL 2001)

Figure 10 : carte illustrant la date de construction des logements à travers la Belgique – Source © P-RENEWAL

La réaffectation de ces fermes est une solution qui permet de participer à l'évolution de ces bâtiments. Leur reconversion en logements multiples est une option fréquente, mais elle peut entraîner une surexploitation des volumes et de ce fait une perte du caractère patrimonial, et dans certains cas une modification dans le paysage.

Aujourd'hui, il existe plusieurs projets tels que les projets de la R.E.D.⁶⁰ qui essayent de mettre en avant des pistes quant aux méthodes d'intervenir sur le patrimoine bâti afin de soutenir un meilleur dialogue entre l'amélioration de la performance énergétique et la conservation du patrimoine bâti dont nous sommes les ultimes dépositaires. Il s'agit de méthodes pertinentes qui émettent des pistes pour soutenir un meilleur dialogue entre l'amélioration de la performance énergétique et la conservation du patrimoine.

⁶⁰ R.E.D. - ERFIN et R.E.D. - Performance Énergétique et Patrimoine Bati.

1.3 Types de ferme

En Wallonie, l'économie liée à la culture et celle liée à l'élevage ont eu une influence sur la construction des différents bâtiments agricoles. A l'époque, la ferme désigne le lieu de résidence du fermier, car cette appellation englobe également les espaces nécessaires au bon fonctionnement d'une ferme⁶¹. Cette relation intimement liée entre l'Homme et le bétail, qui est un outil primordial de travail ou de production, représente le noyau originel de la ferme. Une véritable ferme est composée d'au moins trois cellules : le logis, l'étable et la grange (ou tout autre espace de stockage).

Elles furent construites pour répondre aux besoins qu'impliquent chaque économie. Sur le territoire wallon se distinguent ainsi deux types de ferme. D'une part, les fermes pluricellulaires qui s'intègrent sous une seule toiture. Elles sont petites, discrètes et réservées aux paysans les moins aisés. D'une autre part, les fermes à cour et ferme-châteaux qui s'étendent sur plusieurs bâtiments⁶².

Sous l'ancien régime, la division du territoire en trois régions mena à une appropriation sélective du territoire. L'Église bénéficia de la majorité de la région limoneuse car il s'agit de la région la plus intéressante pour s'enrichir. Elle fut en partie partagée avec la noblesse, les seigneurs et les propriétaires fonciers, qui se partagèrent également une majeure partie des terres du Condroz. Les Ardennes, terres moins fertiles, furent réservées aux paysans les plus pauvres⁶³. Ces appropriations se font toujours ressentir dans les témoins conservés du bâti rural (figure 11) :

- De grandes censes carrées se dressent sur les terres limoneuses ;
- D'innombrables ferme-châteaux ponctuent le Condroz ;
- Et les fermes pluricellulaires forment l'ensemble du bâti rural en Ardennes.



Figure 11 : carte illustrant les témoins de l'appropriation de la Wallonie sous l'ancien régime – Illustration © Antoine GUSBIN

⁶¹ BERTRAND, M. (2020). Les fermes brabançonnaises au 18^e siècle. Issuu.

⁶² STIERNON, D. & TRACHTE, S. (2018). P-RENEWAL (rénovation énergétique du bâti wallon d'avant-guerre (1914) à valeur patrimoniale).

⁶³ BERTRAND, M. (2020). Les fermes brabançonnaises au 18^e siècle. Issuu.

A cette époque, les autorités s'enrichissent et les paysans vivent de leurs récoltes et de leur élevage, et leur ferme fonctionne quasiment comme un système autonome. La ferme comprend un logis, à proximité d'une étable et d'un espace de stockage pour le foin destiné au bétail. Autour de cette ferme figure une éventuelle annexe pour y loger des fonctions de stockage ou en lien avec le feu telles qu'une forgerie ou un four à pain. Il y a également une série d'espaces extérieurs indispensables à la vie quotidienne comme le potager, le verger, un enclos à poules ce qui permet à la famille de se nourrir et de payer les taxes (figure 12).

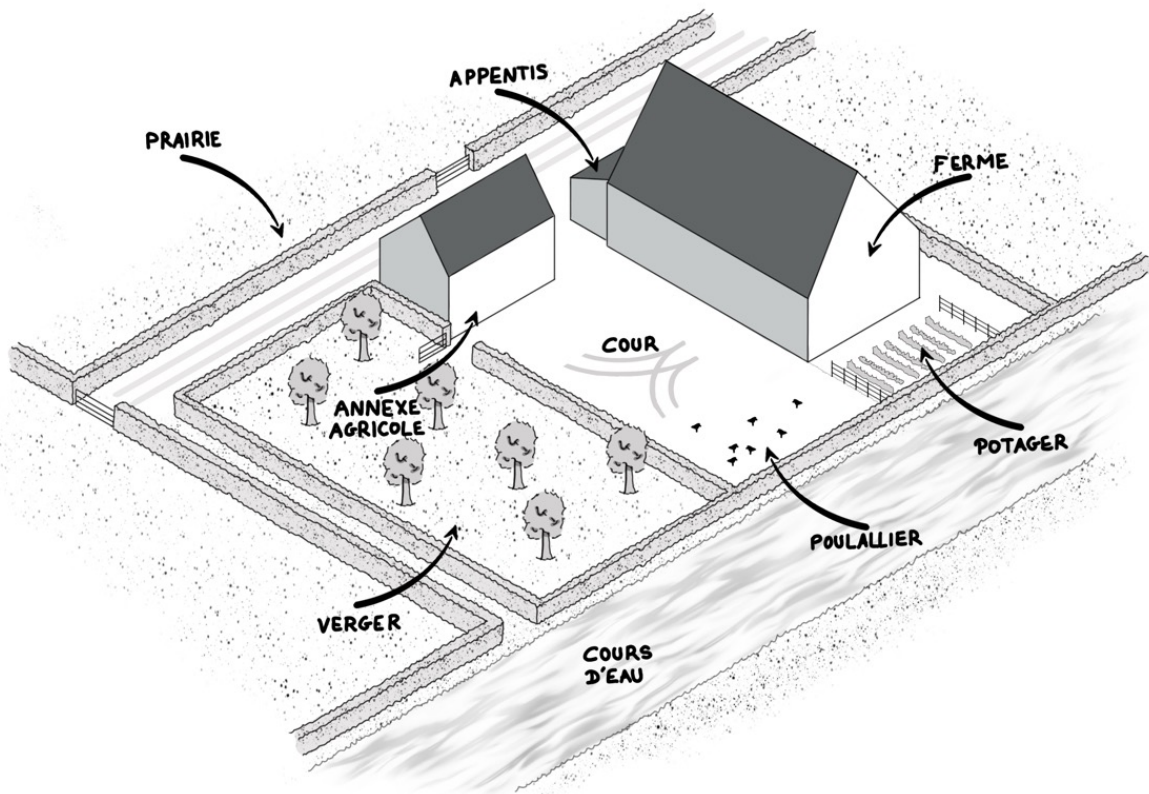


Figure 12 : schéma illustrant le fonctionnement d'une ferme – Illustration © Antoine GUSBIN

1.3.1 La ferme pluricellulaire

Bien qu'il ne s'agisse pas du sujet de ce présent travail, il est intéressant de contextualiser la ferme pluricellulaire. Il s'agit d'un type de ferme présent sur tout le territoire wallon, bien qu'elle soit le type traditionnel de la moitié sud de la Wallonie⁶⁴. Elle est destinée aux exploitations de petite voire de moyenne ampleur. Ce type de ferme compose majoritairement les villages qui se situent dans les creux de vallée, à proximité d'un cours d'eau. Leur implantation et orientation ne sont pas anodines, elle permet notamment de se protéger des vents froids et des fortes pluies et de profiter d'une source d'eau continue. Elles se rangent généralement les unes après les autres ou de manière plus ou moins dispersée le long de voie de communication, et sont généralement orientées Sud-Est – Nord-Ouest.

Selon la région agro-géographique, la ferme pluricellulaire a sa propre typologie et est réalisée avec les matériaux qui sont disponibles dans son environnement proche. Les ouvrages de la F.R.W. et de GENICOT permettent d'établir la carte suivante (figure 13) :



Figure 13 : carte illustrant la synthèse typologique des fermes pluricellulaires en Wallonie – Illustration © Antoine GUSBIN

Comme son nom l'indique, la ferme pluricellulaire se compose de plusieurs cellules logées sous un seul et même toit. Elles peuvent être au nombre de deux pour la ferme bicellulaire, elle est la ferme type du Pays de Herve ; trois pour la ferme tricellulaire, elle est la ferme traditionnelle ardennaise. A partir du 18^e siècle, on retrouve la ferme quadricellulaire qui est généralement le fruit de l'adjonction d'une cellule sur le même axe que les précédentes (figure 14).

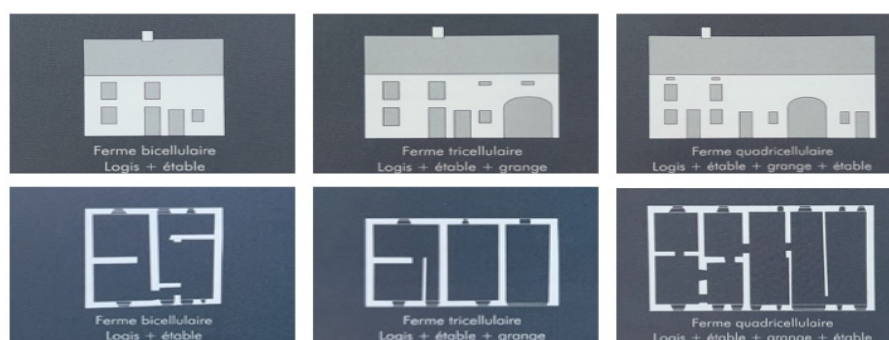


Figure 14 : élévations et plans de ferme bicellulaire, tricellulaire et quadricellulaire – Source © F.R.W. (2018)

⁶⁴ DELVIESMAISON, S., HOTTOIS, M., ANTOINE, D. (2018). Les fermes-blocs : recommandations pour leur avenir. Fondation Rurale de Wallonie, Namur, 127 pages.

La **ferme unicellulaire** existe. Il s'agit simplement d'une habitation, le logis. Il est composé de quelques pièces uniquement. On retrouve la cuisine, la pièce principale du logement qui s'articule autour de la cheminée. Elle permet de chauffer et d'éclairer en partie le logement, et permet la cuisson des repas. Dans le logement, plusieurs portes permettent d'accéder aux autres pièces de la ferme : la belle-pièce, les locaux agricoles, les chambres, la cave.

La **ferme bicellulaire** accueille une deuxième cellule, l'étable. Elle est dédiée au bétail (bovins, ovins, chevaux...) et est généralement surmontée d'un fenil (étable sous fenil). Jusqu'au 19^e siècle, cette cellule est attenante au logis et accessible depuis celui-ci. Cela permet de profiter de la chaleur animale pour réchauffer le logis. Après cela, l'étable fut déplacée pour des raisons sanitaires. L'organisation spatiale de cette cellule est optimisée afin d'y loger un maximum de bêtes. En fonction de la profondeur et de la largeur de l'étable, le bétail se range en largeur (parallèle à la façade) ou en profondeur (perpendiculaire à la façade).

La **ferme tricellulaire** comprend une troisième cellule, la grange. Elle n'est pas systématique, mais peut apparaître contre l'étable lorsque la taille de l'exploitation la justifie. La grange permet de stocker les récoltes et le fourrage. Il existe des servitudes entre l'étable et la grange pour faciliter la manipulation du fourrage pour nourrir le bétail.

La **ferme quadricellulaire** peut être le fruit de l'agrandissement d'une ferme tricellulaire, une quatrième cellule venue se greffer à la grange. Cette cellule peut être dédiée à une seconde étable ou une seconde grange selon l'exploitation. La tricellulaire devient alors quadricellulaire.

A ce volume principal, peut venir se greffer un appentis ou une bâtière, accolé à la ferme ou en retour d'angle, pour y loger des fonctions secondaires comme une forgerie, un four à pain ou le stockage d'outils (figure 15).

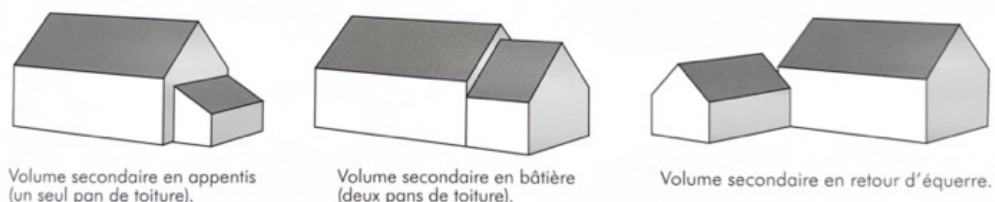


Figure 15 : illustrations d'annexes agricoles – Source © F.R.W. (2018)

La ferme pluricellulaire peut se développer de deux manières selon la région et l'activité développée : on distingue les fermes en long des fermes blocs (figure 16).

Dans les deux cas, la répartition des cellules suit un ordre similaire : logis – étable – grange.

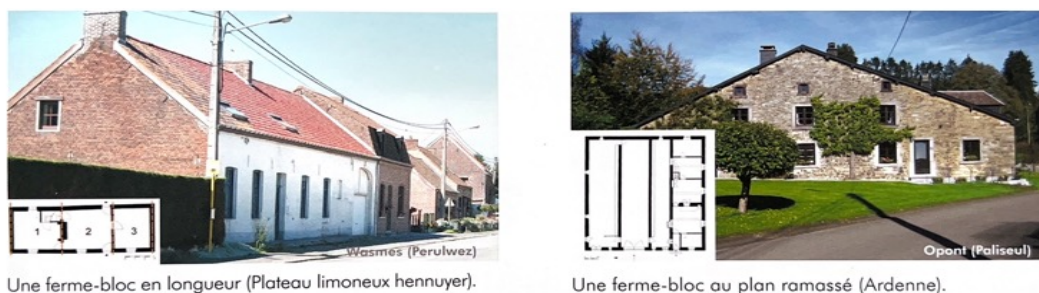


Figure 16 : illustrations d'une ferme en longueur à gauche et en profondeur à droite – Source © GENICOT, L.-F. & al. (1996)

La ferme bloc et son organisation compacte a plusieurs avantages. Elle permet une économie de l'emprise au sol, trop précieux pour le gâcher en espace bâti ; de tirer profit de la chaleur dégagée par le bétail, ce qui permet de chauffer la pièce de vie ; et de limiter les déplacements entre les cellules.

Elle est également dite « de surface » parce que, dans les régions où le sol est moins précieux, en Ardennes par exemple, la ferme bloc prend plus d'emprise sur le sol que la ferme en carré ou en long qui témoigne d'une exploitation plus importante.

En milieu rural, la ferme pluricellulaire est à l'origine construite avec des matériaux locaux, exploités à proximité de la ferme. On trouve un soubassement en maçonnerie de pierre naturelle sur lequel vient se poser les murs, généralement en colombage. Le tout est couvert par une toiture de chaume (figure 17). Ces matériaux à base essentiellement de bois et de végétaux furent remplacés durant le 18^e siècle par des matériaux plus durs, comme la pierre naturelle dans les Ardennes ou la brique sur les plateaux limoneux.



Figure 17 : illustrations d'une ferme avec un soubassement en pierre et pan de bois, à Astenet (PH) – Source © GENICOT, L.-F. & al. (1996)

La ferme est généralement peu ouverte afin de lutter contre les vents dominants, les fortes pluies ou les températures en fonction des saisons. La façade à rue est dotée de quelques ouvertures : une porte d'entrée et quelques fenêtres pour le logis ; une porte, une baie d'aération et une gerbière pour l'étable sous fenil ; et un passage charretier pour la grange.

1.3.2 La ferme à cour

Il s'agit d'un type de ferme qui est également présent partout en Wallonie, mais en moins grande quantité que le ferme pluricellulaire. Elles se situent principalement dans le nord, là où les terres limoneuses sont plus fertiles et offrent davantage de ressources financières aux agriculteurs⁶⁵.

Ce type de ferme s'implante de manière isolée tantôt au milieu des terres, tantôt dans les villages, en creux de vallée, afin de se protéger des vents froids, ou à mi-pente. L'orientation des différents bâtiments est également pensée en fonction des contraintes du climat, avec des ouvertures au Sud-Est et des murs aveugles au Nord-Ouest.

Ces édifices pouvaient être présidés par deux types de personnes : les familles d'origines seigneuriales ou une institution religieuse.

Les fermes d'origine seigneuriale s'implantent souvent au cœur des villages dont elles ont provoqué le développement. C'est au centre du domaine que les propriétaires fixent leur résidence qui comprenait la fonction d'habitat (gros logis, manoir, donjon) et d'unité agricole, exploitée par eux-mêmes ou par un paysan qui agissait à leur compte.

Les fermes issues d'une institution religieuse s'érigent généralement isolée dans les campagnes et vivent en autarcie.

La ferme à cour est donc synonyme d'une riche exploitation. L'importance et le statut de l'exploitation pouvant être appréhendée à travers sa taille et son nombre de bâtiments. Elle représente des points de repère dans nos paysages, tant par sa silhouette imposante, lui attribuant une certaine identité, que par ses caractéristiques architecturales, historiques et patrimoniales (figure 18).



Figure 18 : illustrations d'une ferme à cour s'imposant dans le paysage, à l'Ecluse (AH) – Source © GENICOT, L.-F. & al. (1996)

⁶⁵ DELVIESMAISON, S., HOTTOIS, M., COOLS, Q. (2021). Les fermes à cour : recommandations pour leur avenir. Fondation rurale de Wallonie, 98 pages.

Au sein de la Wallonie, les ouvrages de référence⁶⁶ sur le sujet estiment que les plus anciennes fermes à cour datent de la fin du 16^e siècle. En effet, uniquement les édifices les plus robustes (églises et châteaux) ont survécu jusqu'à aujourd'hui, notamment à cause des conditions de vie conflictuelles et hygiéniques du 16^e et 17^e siècles. Cependant, la construction des fermes à cour au courant du 17^e et 18^e siècles est monnaie courante.

Comme expliqué précédemment, la typologie des fermes à cour varie d'une région à l'autre selon plusieurs facteurs comme la nature du sous-sol et du sol ou encore le type d'économie qui se développe dans la région.

La Fondation Rurale de Wallonie (F.R.W.) a identifié huit sous-régions agro-géographiques en région wallonne, qui regroupent chacune une typologie de ferme (figure 19).



Figure 19 : carte illustrant la synthèse typologique des fermes à cour en Wallonie – Illustration © Antoine GUSBIN

Ces édifices furent construits, entièrement ou en partie, avec des matériaux locaux et propres à chaque région agro-géographique. Ces matériaux sont accessibles ou extraits à proximité de la ferme, voire sur la parcelle de la ferme. Avant le 18^e siècle, un soubassement en maçonnerie de pierre naturelle soutenait généralement des murs en colombage et des toitures en chaume. Durant le 18^e siècle, un changement de matérialité apparaît, les murs en colombage sont remplacés par des murs massifs en maçonnerie de pierre naturelle ou de brique selon les régions (annexe 1).

⁶⁶ Les ouvrages de GENICOT, L.-F.

La ferme à cour, ou cense⁶⁷ wallonne, est adaptée à la grande culture. Elle est synonyme d'importantes récoltes à engranger ainsi qu'une quantité non-négligeable d'écuries/étables pour les animaux qui sont à l'époque, un outil de travail. Il s'agit d'un ensemble architectural composé de plusieurs bâtiments articulés autour d'une aire de dégagement, la cour. Elle permet d'aboutir au système agricole le plus efficace de son époque. Son rôle est d'optimiser l'articulation entre les volumes implantés de manière raisonnée ; de limiter les distances à parcourir entre les cellules ; de permettre une direction optimale de toutes les activités et d'économiser l'emprise au sol car celui-ci est trop précieux pour le gâcher en espace bâti.

Cette cour centrale peut avoir une forme qui varie et de ce fait, donne naissance à plusieurs types de ferme à cour (figure 20) : la ferme qui s'organise autour d'une cour ouverte avec des bâtiments parallèles non-jointifs, en forme de L ou de U ; la ferme qui s'organise autour d'une cour fermée formant un quadrilatère, avec des bâtiments jointifs (ordre serré) ou non (ordre dispensé).

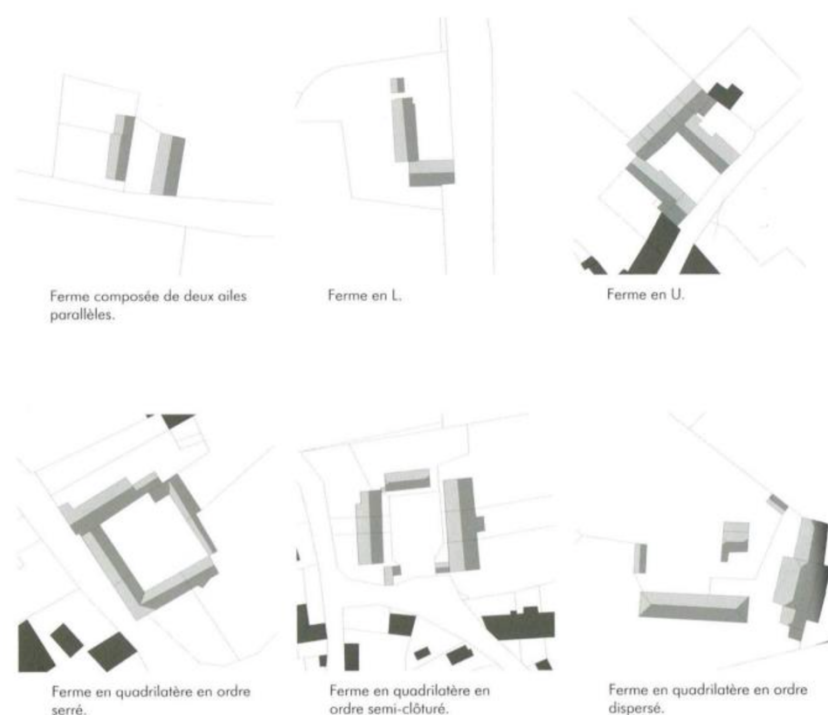


Figure 20 : illustration des typologies de fermes à cour en Wallonie – Source © F.R.W. (2021)

⁶⁷Le terme « cinse » en wallon désigne la ferme en référence à la cense qui était une redevance fixe que le possesseur d'une terre payait au seigneur du territoire.

Chaque bâtiment qui constitue une aile de la ferme loge une ou plusieurs fonctions dont le logis, l'étable, la grange et le porche d'entrée.

Le porche d'entrée est un composant majeur d'une ferme. Il est d'abord une porte, un lieu de passage obligé pour les visiteurs. Mais il est également un repère visuel dans le paysage et joue un rôle de signal (figure 21). Il peut être intégré dans le bâtiment d'une aile, ou dans un mur clôturant le périmètre bâti.

Le porche bénéficie généralement de toute l'attention de son propriétaire qui affiche fièrement son statut social à travers l'ornementation ou un millésime. Cet élément de passage était, jadis, synonyme d'exploitation relevant d'un seigneur et deviendra ensuite un élément essentiel de tout complexe agricole, tout en continuant de désigner un statut, sinon une fierté.



Figure 21 : illustration d'un porche d'entrée d'une ferme à cour à Bossut-Gottechain (HB)– Source © GENICOT, L.-F. & al. (1996)

Le corps de logis occupe généralement une aile complète. Comme pour la ferme bloc, le logis abrite la famille d'agriculteurs et les éventuels saisonniers. Il est au minimum constitué de deux pièces : la cuisine et sa cheminée ainsi qu'une pièce de vie qui ne sert qu'à la réception. Pour les édifices de plus grosse ampleur, le logis peut occuper une aile entière, être composé d'un couloir central favorable à une organisation symétrique sur base du mode double-corps (figure 22). Il peut s'étendre sur deux niveaux, l'étage sert d'ordinaire à des chambres.

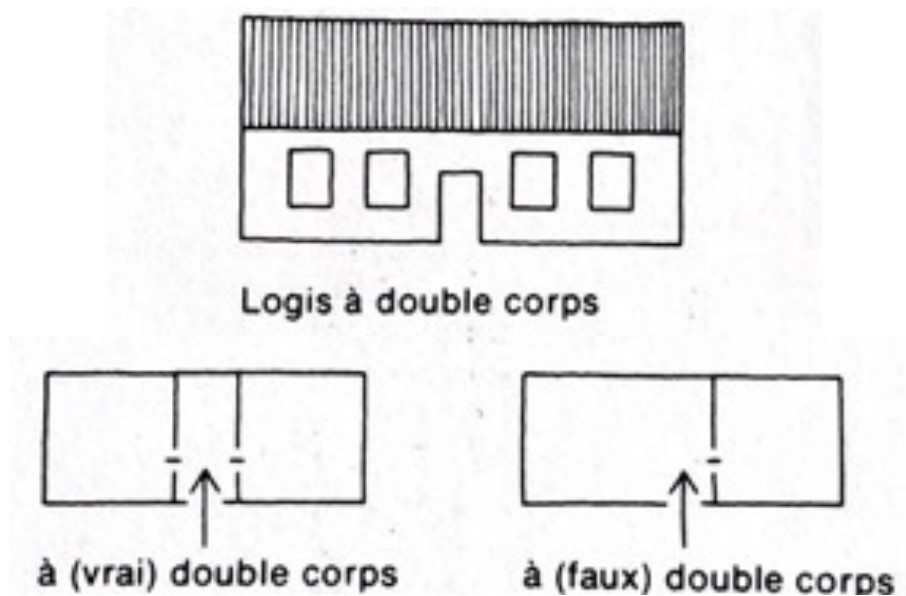


Figure 22 : élévation et plans d'un logis à double corps – Source © GENICOT, L.-F. (1992) Ardenne Herbagère

Il s'agit du bâtiment qui, selon le statut social et le niveau de richesse de l'agriculteur, peut bénéficier d'un traitement architectural plus important que les autres, notamment au travers du nombre de niveaux des encadrements de baies réalisées avec une matérialité différente que la façade (figure 23). Il est également celui qui comporte le plus d'ouvertures, tant du côté intérieur de la cour pour la surveiller, que du côté extérieur.



Figure 23 : illustration de la matérialité différente des baies d'une ferme à Rognée (HC)– Source © GENICOT L.-F. & al. (1996)

L'étable occupe une ou plusieurs ailes dans le cas d'une économie d'élevage, comme dans le Pays de Herve notamment.

En fonction de la région et l'économie en vigueur, la ferme peut accueillir des étables pour bovins et ovins, ou des écuries pour les animaux destinés au travail, voire les deux. Elles sont également attenantes au corps de logis afin de profiter de la chaleur dégagée par les animaux pour chauffer l'habitation (figure 24).



Figure 24 : illustration d'une aile d'étable d'une ferme à Vellereille-les-Brayeux (HC)– Source © GENICOT L.-F. & al. (1996)

Afin de loger le plus d'animaux, l'optimisation de l'espace est importante. L'espace intérieur est subdivisé en rangs, soit parallèles (étable en longueur), soit perpendiculaires au faîte (étable en largeur)⁶⁸ (figure 25).

En fonction de la configuration, des avantages de communication se créent avec la cour dans le cas d'une étable en longueur ; et/ou avec les autres ailes, dans le cas d'une étable en largeur. L'étable comprend souvent une aire de stockage au-dessus des animaux, le fenil.

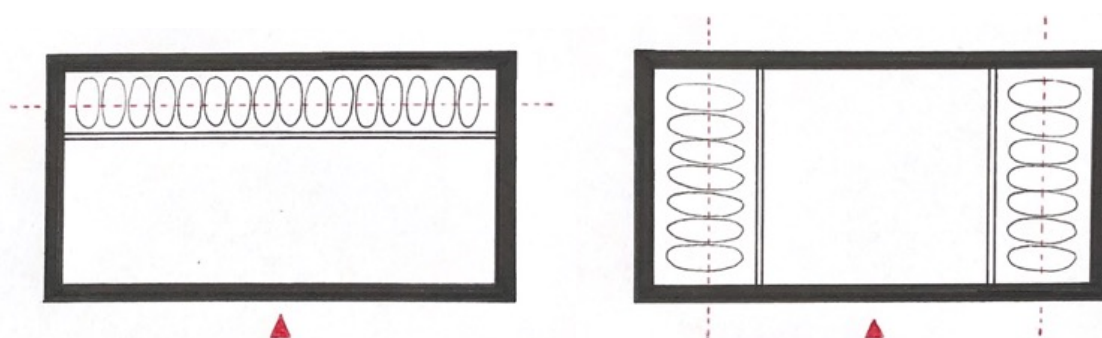


Figure 25 : plan d'une étable en longueur à gauche et en largeur à droite – Illustration © Antoine GUSBIN

⁶⁸ GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.

La grange occupe généralement la dernière aile dans le cas d'une économie de culture. Elle est l'endroit de stockage des récoltes, voire du matériel agricole en hiver. Selon l'ampleur de l'exploitation, elle peut se limiter à l'espace situé au-dessus des étables, ou peut être le bâtiment le plus haut et large de la ferme (figure 26). Son ampleur varie selon les régions et la vocation agraire de l'exploitation. Les régions axées sur l'économie céréalière sont caractérisées par des granges de plus grande ampleur.



Figure 26 : illustration de la grange d'une ferme à Jauchelette – Source © GENICOT L.-F. & al. (1996)

Comme l'étable, elle peut s'étendre en longueur avec un axe de circulation parallèle au faîte, ou en largeur, perpendiculaire au faîte⁶⁹ (figure 27).

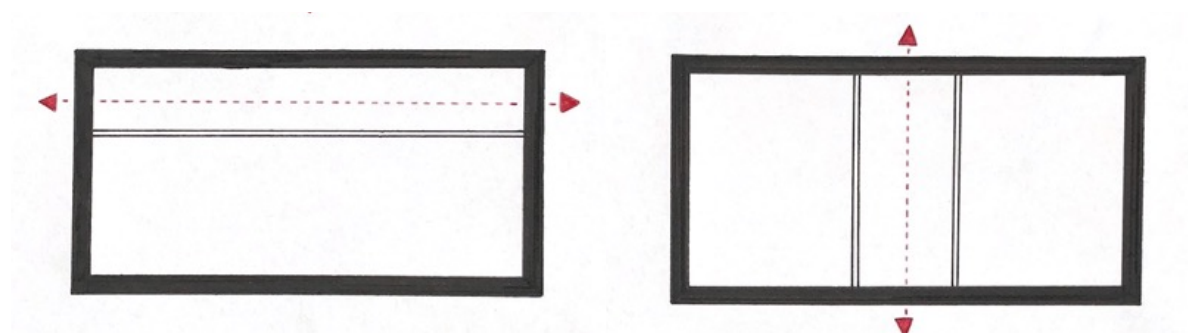


Figure 27 : plan d'une grange en longueur à gauche et en largeur à droite – Illustration © Antoine GUSBIN

⁶⁹ GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.

La ferme à cour peut également être dotée d'appentis ou de bâtières réalisés au fur et à mesure du temps selon les besoins de l'exploitant.

C'est-à-dire que la ferme à cour peut être le fruit de plusieurs agrandissements successifs autour d'un espace central à travers le temps. Par conséquent, les différents bâtiments d'une même ferme peuvent appartenir à un style architectural, être réalisés avec des matériaux et des techniques de construction légèrement différents selon les époques de construction (figures 28 et 29).



Figures 28 et 29 : illustrations d'une annexe en retour d'équerre et d'une aire d'abatage – Source © GENICOT L-F. & al. (1996)

De manière générale, la ferme à cour est dotée d'ouvertures proportionnées selon l'orientation et la fonction logée derrière la façade (figure 30). On retrouve des façades qui sont plus fermées afin de lutter contre les vents et pluies dominants provenant du Nord-Ouest. Il y a plusieurs types d'ouverture traduisant l'agencement intérieur des différents bâtiments. Le logis comprend de généreuses ouvertures dirigées vers l'intérieur de la cour, alors que les ouvertures vers l'extérieur de l'ensemble bâti sont moins importantes. Cela est dû au fait que toutes les distributions se faisaient à l'intérieur, vers la cour. Excepté pour le logis, les quelques ouvertures qui percent les façades extérieures du quadrilatère sont de petites prises d'air et de lumière. Les ouvertures extérieures du logis sont généralement des percements plus anciens, moins remis au goût du jour. Les étables/écuries comprennent des portes différentes en fonction des animaux, des baies d'aération vers l'intérieur de la cour ainsi que des baies gerbières pour l'étable sous fenil. Le piédroit des portes est généralement réalisé en maçonnerie de brique afin de ne pas blesser les animaux. La grange est caractérisée par un passage charretier, avec ou sans issue.



Figure 30 : illustration de façades extérieures peu ouvertes d'une ferme à cour à Couthin – Source © F.R.W. (2021)

1.3.3 La ferme-château

Il s'agit d'un dérivé de la ferme à cour qui est présent dans la Wallonie, et plus spécifiquement au centre du territoire (figure 31). La ferme-château est un ensemble de bâtiments imposants qui était généralement une exploitation abbatiale ou seigneuriale plus ou moins fortifiée⁷⁰. Pour appuyer sa forteresse et/ou son manoir, elle s'implantait sur des points culminants du relief, tantôt à la périphérie des villages, tantôt isolés au milieu de la campagne⁷¹.

Lors d'une interview pour la RTBF⁷², Mathieu BERTRAND, historien de l'architecture, explique qu'en Wallonie, la ferme-château se développe à partir du 12^e siècle sur une grande bande centrale de la région. Au Moyen-Âge, les temps sont incertains et il faut songer à se défendre. Pour solutionner cela, les classes sociales les plus aisées fortifient. Ils fortifient les châteaux, les ponts, les bâtiments religieux mais également les fermes. L'âge d'or des fermes-châteaux et des manoirs se situe dans le courant du 17^e siècle, qui était une période conflictuelle. A partir du 18^e siècle, la hache de guerre est enterrée et la population met davantage l'accent sur le développement de la ferme que celui du château.



Figure 31 : carte illustrant la synthèse typologique des fermes à cour en Wallonie – Illustration © Antoine GUSBIN

Mathieu BERTRAND explique que le mélange entre ferme et château naît du contexte de l'époque. Autrefois, la culture du sol était le principal moyen de s'enrichir. L'aristocratie rurale s'installe en Wallonie et doit vivre de ses terres, ce qui nécessite de bénéficier de bâtiments agricoles. La ferme-château est ainsi dotée des parties agricoles d'une ferme, à savoir la grange et des endroits dédiés aux animaux comme des écuries ou des étables et finalement un logis. Étant donné qu'il s'agit d'une partie de la population qui est plus aisée, et qu'elle veut manifester son pouvoir, elle va le faire à travers son logis : un manoir qui se développe en hauteur. La Wallonie étant une terre courue par beaucoup de gens, on attribue une fonction défensive au manoir, en plaçant des tours d'angle, des douves ou encore un porche d'entrée.

La ferme-château est donc le modèle qui émane de la synthèse entre la haute et la basse-cour⁷³. Au fil des années, elle a connu divers destins. Aujourd'hui, ces lieux importants sont tous en train d'être réinventés dans l'objectif de survivre, car ce sont des bâtiments qui peuvent rapidement être en mauvais état s'ils ne sont pas entretenus.

⁷⁰ STIERNON, D. & TRACHTE, S. (2018). P-RENEWAL (rénovation énergétique du bâti wallon d'avant-guerre (1914) à valeur patrimoniale).

⁷¹ CREMASCO, V. & al. (2007). L'Entre-Vesdre-et-Meuse. CFDT Atlas des Paysages de Wallonie.

⁷² BERTRAND, M. (2024). Laneffe : ferme et châteaux à Walcourt. RTBF.

⁷³ BERTRAND, M. (2020). Les fermes brabançonnaises au 18^e siècle. Issuu.

1.4 Ardenne Herbagère et ses fermes à cour

L'Ardenne Herbagère est une région particulière car elle tient nombre de similarités de ses régions limitrophes, l'Ardenne Centrale et le Pays de Herve.

Son relief est assez mouvementé avec des terroirs situés à 694 mètres d'altitude pour le signal de Botrange, ainsi qu'à 225 mètres d'altitude pour le village de Polleur (annexe 3). Le sous-sol de cette région est également complexe et diversifié (figure 32). Il est notamment composé de quartzite, de phyllade, de calcaire, de grès, de schiste, d'arkose et de psammite.

L.-F. GENICOT⁷⁴ explique que le climat est assez rude en Ardenne Herbagère : il y a en moyenne entre 180 à 200 jours de pluie par an ; entre 90 jours de gel au nord à 120 au sud-est de la région et entre 25 à 35 jours de neige.

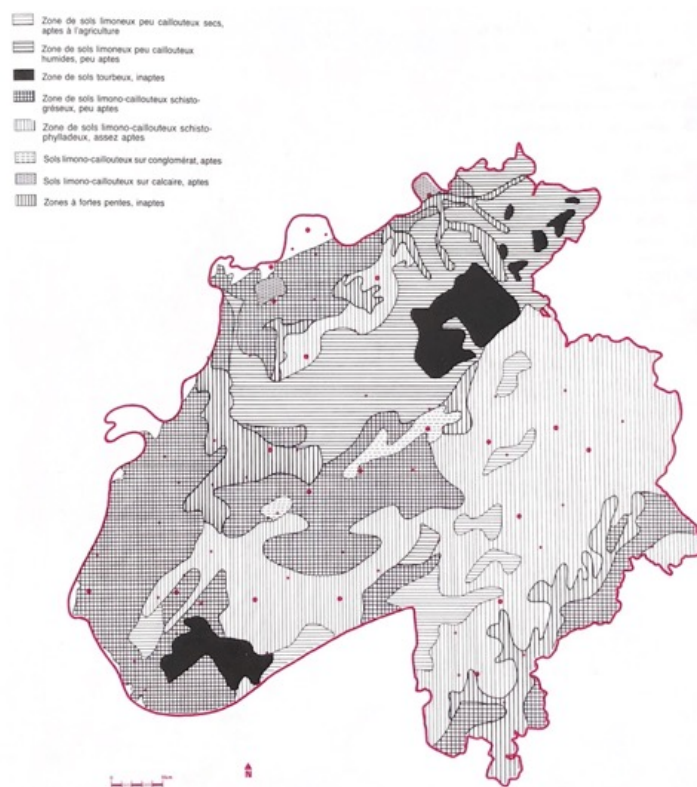


Figure 32 : carte illustrant les types de sols en Ardenne Herbagère – Source © GENICOT, L.-F. (1992) Ardenne Herbagère

Les pratiques agricoles et les typologies du bâti de l'Ardenne Centrale s'y retrouvent, mais l'influence du Pays de Herve également. Cette région connaît une activité agricole peu soutenue, notamment à cause de son sol pauvre et qui fut progressivement remplacée par l'herbage et l'élevage de bovins pour le lait, un héritage du Pays de Herve.

⁷⁴ GENICOT, L.-F. (coord.) (1992). Ardenne Herbagère. Liège ; Bruxelles, 299 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2870094906.

Comme chaque sous-région agro-géographique, l'Ardenne Herbagère est caractérisée par un bâti qui lui est propre. Ce dernier est marqué par le milieu local et est l'expression fonctionnelle de la vie paysanne, anciennement dictée par une activité agricole. L'habitat est construit selon le relief mouvementé de la région, il est le résultat de villages de bâti groupé et de petite densité situé en creux de vallée, dans l'objectif d'être alimentés facilement en eau et de s'abriter des vents dominants. Le parc bâti de cette région date principalement du 18^e et du 19^e siècles, plusieurs bâtiments sont plus anciens, mais s'identifient-ils à la typologie locale ?

La majorité de cet habitat groupé est constituée de fermes pluricellulaires de typologies variant selon les communes (figure 33).

Il y a également d'autres fermes, pluricellulaires ou à cour, situées au milieu des terres. Il s'agit d'exploitations plus importantes qui sont isolées notamment grâce à un approvisionnement facile en eau.

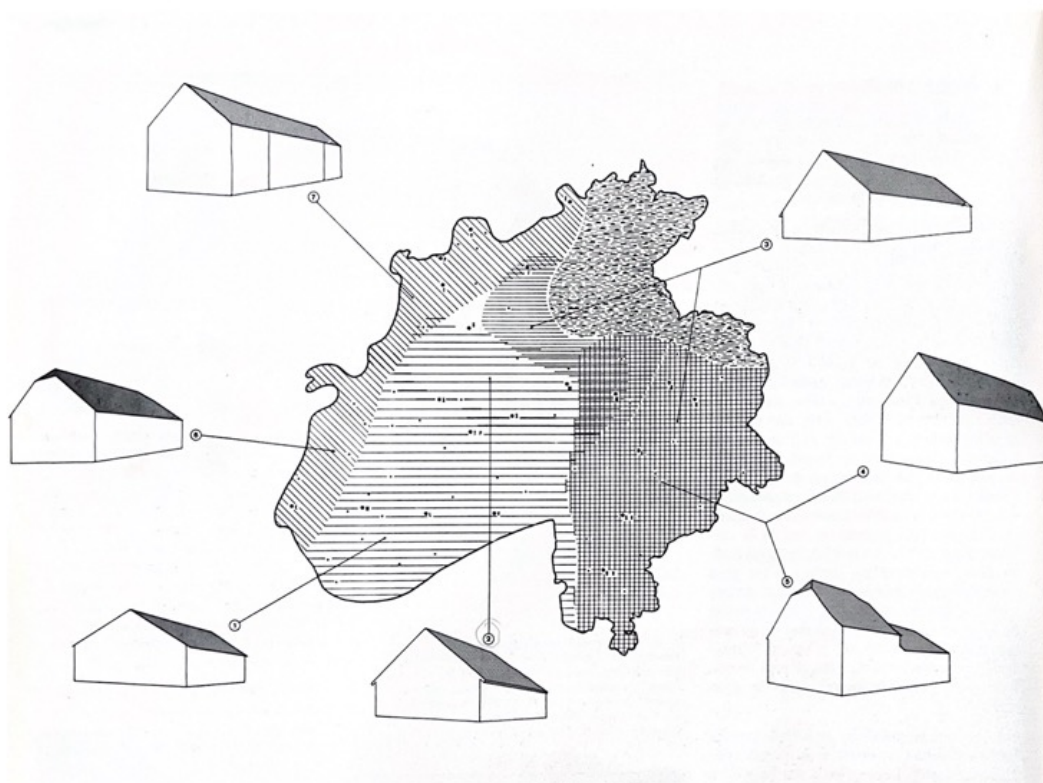


Figure 33 : carte illustrant les types de fermes bloc en Ardenne Herbagère – Source © GENICOT, L.-F. (1992) Ardenne Herbagère

En Ardenne Herbagère, la ferme bloc est le bâtiment le plus adapté à l'économie en vigueur à l'époque de l'Ancien Régime. La plupart d'entre elles sont composées de trois cellules : un logis accoté d'une étable et suivi d'une grange. Malgré l'intensification de l'élevage dans la région, la grange reste présente et fait preuve d'une attention particulière, les céréales stockées étant remplacées par une quantité de foin pour le bétail.

Chaque cellule a son type d'ouverture : le logis comprend généralement une porte en façade et des fenêtres le long du pignon ; la grange est dotée d'une porte et de fenêtres d'aération ; et la grange d'un passage charretier. Ces ouvertures se situent souvent au Sud et Sud-Est, les murs au Nord et Nord-Ouest sont aveugles afin de se protéger de la pluie et du vent.

A l'époque, les murs de ces maisons sont majoritairement construits en colombage, une structure bois remplie de terre, sur un soubassement en maçonnerie de pierre naturelle permettant d'éviter toute remontée capillaire. Parmi ces pierres naturelles, on retrouve le grès, le schiste gréseux ou le calcaire qui sont des roches présentes dans le sous-sol de la région. La pétrification de ces maisons se fait par endroit, selon les moyens financiers des paysans et la proximité des carrières. Il existe des murs en pierre, du sol au faîte, qui ont la particularité d'être très épais (60 à 90 cm) afin de combler la capacité peu liante du liant utilisé à l'époque, un mélange de chaux et de sable, ainsi que divers agrégats et matériaux organiques locaux⁷⁵.



Figure 34 : illustration d'une ferme à cour à Olne – Source © F.R.W. (2021)

On retrouve également des fermes à cour (figure 34), y compris les fermes-châteaux, mais en moins grande quantité.

Elles ont pour caractéristique d'être constituées de plusieurs ailes qui s'organisent autour d'une cour. Généralement, chaque aile loge une fonction, bien qu'il ne soit pas rare de retrouver sous le même toit logis et étables pour les ensembles de moindre ampleur.

Ces fermes se composent de bâtiments qui sont moins profonds que les fermes blocs, qui sont également disposés et ouverts de manière à tirer profit du climat et de l'environnement local. Ils sont réalisés avec un soubassement, voire des murs entiers en maçonnerie de pierres naturelles. Ils atteignent entre 50 et 75 centimètres d'épaisseur et se composent d'un double parement de grès et/ou calcaire⁷⁶.

La lecture de l'espace intérieur se lit, ici aussi, en façade : passage charretier, baies gerbières, portes accompagnées de baies d'aération, porte d'entrée et fenêtres du corps de logis.

⁷⁵ CALLEBAUT, K. (2000). Characterisation of historical lime mortars in Belgium : implication for restoration mortar, unpublished PhD-thesis, K.U.Leuven.

⁷⁶ GENICOT, L.-F. (coord.) (1992). Ardenne Herbagère. Liège ; Bruxelles, 299 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2870094906.

On observe également le double corps de logis dans les bâtiments de plus grande ampleur. Il apparaît aux environs du Pays de Herve, et est composé de deux étages. Au rez-de-chaussée, la vie s'articule autour de la cuisine et sa cheminée. Il y a également un hall, une arrière pièce et une belle pièce qui sert uniquement pour les réceptions. A l'étage, on retrouve généralement les chambres. Chaque façade du double corps de logis est plus ou moins dotée de fenêtres, les ouvertures restant plus généreuses du côté de la cour.

L'optimisation des espaces intérieurs est primordiale, notamment pour les étables qui s'organise en rangs, simples et parallèles au faîte ou doubles et perpendiculaires au faîte de toiture.

La grange occupe, en général, le bâtiment le plus haut de la ferme à cour en Ardenne Herbagère. Dès le 16^e siècle dans le Pays de Herve, il existe des granges combinées aux étables, des étables sous grange, un principe appliqué tant à la ferme à cour qu'à la ferme pluricellulaire.

Le traitement des ouvertures fait preuve d'une attention architecturale, plus particulièrement pour le logis qui recourt à la pierre de taille.

Dans le courant du 19^e siècle, les remises viennent compléter ces fermes, pour abriter des fonctions ne nécessitant pas une aile. Parmi ces fonctions, il y a le four à pain, la forge et le stockage d'outils.

Vous trouverez en annexe 2, une multitude de clichés illustrant le style bâti des fermes à cour en Ardenne Herbagère décrit dans les paragraphes précédents. Vous pourrez également constater les matériaux utilisés pour ériger ces différents édifices.

1.5 Conclusion

La Wallonie dispose d'un parc bâti ancien qui raconte l'histoire de nos terres. Nos ancêtres, vivant grâce à leurs récoltes et leur élevage, ont construit des bâtiments afin de répondre aux exigences de l'économie en vigueur (culture ou élevage). Selon les ressources, la richesse du territoire et l'économie, trois types de ferme se distinguent : la ferme pluricellulaire, la ferme à cour et la ferme-château.

A l'époque, la ferme fonctionnait comme un système autonome et au minimum composée d'un logis, accolé d'une étable pour profiter de la chaleur des animaux, ainsi qu'un espace de stockage. Ces fonctions sont disposées soit les unes après les autres dans le cas d'une ferme pluricellulaire, soit dans des ailes différentes dans le cas d'une ferme à cour. Autour de cette ferme figure une éventuelle annexe pour y loger des fonctions de stockage ou en lien avec le feu telles qu'une forgerie ou un four à pain. Il y a également une série d'espaces extérieurs indispensables à la vie quotidienne comme le potager, le verger, un enclos à poules ce qui permet à la famille de se nourrir et de payer les taxes.

Ces bâtiments sont construits avec des matériaux issus de l'environnement proche, ce qui permet à chaque région de bénéficier d'une typologie de bâti qui lui est propre. Leurs murs présentent, de manière naturelle, une capacité à contenir de l'humidité et interagir avec leurs milieux intérieurs et extérieurs.

Cependant, nous ne savons toujours pas comment sont construits ces murs anciens, d'où viennent les matériaux qui les composent, quels sont leurs composants principaux, quelles sont leurs propriétés physiques et comment fonctionne leur équilibre naturel en présence d'humidité.

Le chapitre qui suit a pour objectif de répondre à ces quelques questions.

CHAPITRE 2

Construction et comportement de la maçonnerie en moellons

2.1 Construction de la maçonnerie de moellons de pierre

Ce sous-chapitre se base sur les ouvrages de référence qui traitent de la construction d'avant-guerre en Wallonie et des pierres en Wallonie. Parmi eux figurent les éditions MARDAGA, les volumes de GENICOT, « Pierres et Marbres de Wallonie », le manuel de terrain de la S.P.W., ou encore un ouvrage français dédié aux pierres de construction.

2.1.1 Généralités propres à la Wallonie

De tout temps, l'Homme a utilisé la pierre pour se protéger, en se réfugiant dans la caverne, avant de l'exploiter pour construire sa maison avec les matériaux issus du contexte immédiat.

Le sous-sol de la Wallonie étant truffé de roches de natures différentes, la construction en matériaux durs se généralise durant le 18^e siècle. Les matériaux durs comprennent la brique, la pierre naturelle et la tuile. Pendant longtemps, la construction en pierre est demeurée l'apanage des classes les plus aisées (noblesse, haut clergé, bourgeoisie, riches laboureurs, mais aussi l'Église, le manoir, le château, le moulin seigneurial...). On remarque que davantage de bâtisses d'ampleur, privées ou publiques, s'ajoutent à la ville : remparts, hôtel de ville, couvent, pont... Au Moyen-Âge, après l'interdiction de construire des toitures en paille, apparaissent des ordonnances interdisant cette fois, de continuer à construire en bois favorisant l'usage de la brique et de la pierre. Cette pétrification a pour but une architecture plus pérenne, capable de résister aux problèmes liés aux incendies⁷⁷.

Ce phénomène de construction en « dur » pénètre les campagnes avec un certain décalage, variable selon les ressources locales et le contexte. Le pays de Herve et le Condroz connurent ce phénomène dès le 17^e siècle, alors que la Famenne, ou le Pays de Collines ne le ressentirent qu'au 19^e siècle⁷⁸.

Dans le cadre de ce présent travail, c'est la construction en pierre naturelle, plus précisément le grès, qui nous intéresse.

Les pierres se classent parmi les trois catégories suivantes :

- Les roches magmatiques,
- Les roches métamorphiques,
- Les roches sédimentaires.

Le sous-sol de la Wallonie est principalement composé de roches sédimentaires⁷⁹. Elles sont le résultat d'un dépôt de sédiments, particules de nature végétale ou animale, qui deviennent des roches, composées de lits successifs plus ou moins épais, selon le processus de la diagenèse⁸⁰. Ces lits irréguliers forment un matériau qui est rarement isotrope, de qualité égale quelle que soit l'orientation de la pierre.

⁷⁷ JONGHE, S. de, GEHOT, H., GENICOT, L.-F. (1996). Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie : manuel de terrain.

⁷⁸ Ibidem.

⁷⁹ Ibidem.

⁸⁰ Il s'agit d'un phénomène naturel physique de tassement sous le poids des sédiments successivement superposés, et de cimentation.

Parmi ces roches sédimentaires, nous retrouvons principalement des sols schisto-gréseux datant du Dévonien Inférieur. On retrouve dans ces sols le schiste, le grès et le grès-schisteux qui sont le fruit de la sédimentation irrégulière du Dévonien. Il s'agit de pierres à la texture grenue, à la structure fissile et à la forme plus nettement accusée de moellon. En bordure de territoire, les grès et schistes sont concurrencés par d'autres roches, dont les calcaires du Givétien qui borde la frange nord de l'Ardenne, en s'immiscuant concrètement dans l'architecture locale dès le début du 19^e siècle. Ils sont utilisés pour affermir et soigner les angles des murs et pour les encadrements de fenêtre.

En fonction de la région agro-géographique, les différentes pierres naturelles utilisées sont les suivantes (figure 35) (annexe 1) :

- La **Pierre calcaire** est utilisée dans le Condroz, la Fagne, la Lorraine, les Ardennes et le Pays de Herve,
- Le **grès** est utilisé dans les mêmes cinq régions, visible ou recouvert de chaux en Lorraine et en Ardennes,
- Le **schiste** est utilisé principalement en Ardennes.

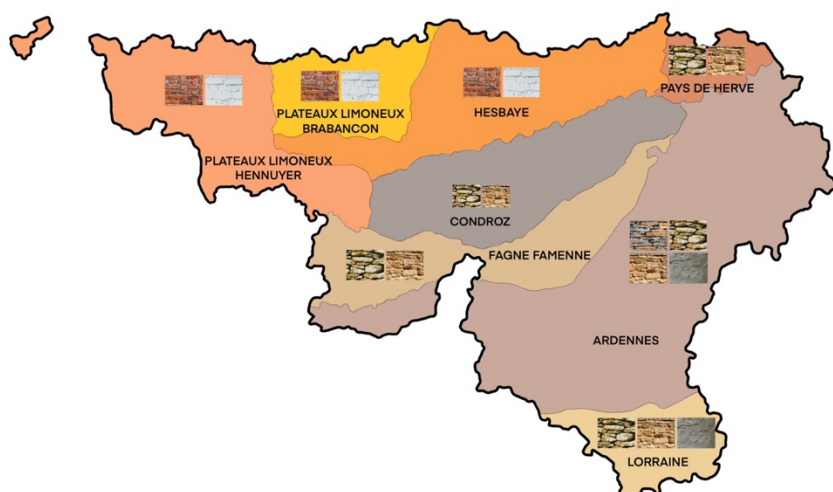


Figure 35 : carte illustrant les différentes pierres selon les régions agro-géographiques – Illustration © Antoine GUSBIN

2.1.2 La carrière

Pour construire sa maison, l'Homme va instinctivement au plus proche cherchant à économiser la distance parcourue et l'effort à fournir pour trouver la pierre.

Les pierres à construire se présentent généralement sous deux formes :

- Celles qui découlent d'un affleurement visible de manière naturelle,
- Celles qui sont présentes en sous-sol, et qui doivent être extraites de manière volontaire.

La première catégorie couvre les « pierres volantes ». Il s'agit de pierres qui sont manipulables à bras d'homme, et découlent généralement d'affleurement visible de roche. A l'époque, ces pierres volantes étaient issues soit du lit des cours d'eau, soit de la surface des champs. Cachées

par les terres arables, les paysans les extrayaient en labourant leur champ et en faisaient des tas qu'ils vendaient « à la voiture »⁸¹.

Ces pierres volantes représentent un volume de matériaux des plus considérables, ayant participé à la construction des bâtiments d'avant-guerre. Elles présentent des morphologies et des états de surface engendrés par l'altération naturelle.

La seconde catégorie couvre les pierres « de carrière » qui sont présentes en sous-sol. Il s'agit de pierres qui nécessitent une méthode d'extraction et qui sont généralement plus ou moins volumineuses, constituées de bancs successifs, sensiblement parallèles et de dimensions variables.

On distingue deux types de carrières : les carrières éphémères et les carrières de grosse ampleur⁸².

Les multiples trous de carrière au destin éphémère ne sont pas rares. Au voisinage du bâti et à ciel ouvert, il s'agit de petite carrière que les paysans ouvrent sous l'accord de leur seigneur. Dans ces carrières, quasiment tout convient qui tombe sous le pic : bons et moins bons bancs, roche cohérente ou friable, calcaires de moellon ou pour la chaux... l'Homme fit ainsi moellon de toute roche⁸³. Aujourd'hui, ces anciens lieux d'extraction forment de petites dépressions dans les cultures ou dans les bois, ou ils furent comblés de déblais et s'accompagnent dans ce cas d'un toponyme qui reste le seul témoin après la disparition de toute trace d'extraction dans le paysage⁸⁴ (figures 36 et 37).



Figure 36 et 37 : illustration d'une carrière éphémère et de petites dépressions témoignant d'une ancienne trace d'extraction – Source © BLARY, F. & al. (2020) *Pierres de construction*

A l'inverse, il existe des carrières de grosse ampleur qui étaient une source de revenus domaniale pour les communautés ecclésiastiques qui s'en portaient acquéreur au Moyen-Âge⁸⁵. Parmi ces carrières : Val-Dieu, Orval, Floreffe, Villers, Aulne, Saint Barthélémy à Liège, etc. Les roches de ces carrières doivent d'abord être extraites et sont ensuite généralement débitées de manière grossière pour éviter l'encombrement du chargement et de ce fait, réduire son coût.

⁸¹ BLARY, F., GELY, J.-P., BERNARDI, P. (2020). *Pierre de construction : de la carrière au bâtiment*. Éditions du comité des travaux historiques et scientifiques.

⁸² Ibidem.

⁸³ JONGHE, S. de, GEHOT, H., GENICOT, L.-F. (1996). *Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie : manuel de terrain*.

⁸⁴ BLARY, F., GELY, J.-P., BERNARDI, P. (2020). *Pierre de construction : de la carrière au bâtiment*. Éditions du comité des travaux historiques et scientifiques.

⁸⁵ JONGHE, S. de, GEHOT, H., GENICOT, L.-F. (1996). *Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie : manuel de terrain*.

2.1.3 Le transport

Pour construire sa maison, l'Homme va instinctivement au plus proche cherchant à économiser la distance parcourue et l'effort à fournir pour trouver la pierre.

En milieu rural, les moellons sont généralement transportés sur des distances de quelques kilomètres tout au plus, reflétant fidèlement les ressources lithiques du terroir dans la construction traditionnelle.

Quant aux pierres de carrière, elles sont transportées soit par voie terrestre, soit par voie fluviale. Dans les deux cas, le transport est lent car le convoi normal par chariot ou tombereau parcourt environ 3 kilomètres par heure. La voie fluviale permet de transporter la pierre sur une distance de 40 km, voire davantage, car cette méthode était beaucoup moins onéreuse. La pierre transportée par traction chevaline est généralement acheminée dans un rayon d'une quinzaine de kilomètres autour de la carrière, soit le temps d'une journée de transport dans des conditions moyennes cumulées de relief, de voirie et de climat⁸⁶.

2.1.4 Le mur en pierre

Parmi les réalisations en pierre, nous pouvons distinguer deux niveaux de qualité : la couche privilégiée des monuments qui fait usage de pierres de taille issues d'un approvisionnement plus varié et plus lointain ; et la couche de l'architecture traditionnelle qui se limite aux pierres issues de carrière éphémères ou aux pierres brutes qui affleurent le sol⁸⁷.

Dans le cadre de ce présent travail, il s'agit de l'architecture traditionnelle qui sera développée.

Le **mur de soutènement** est une composante des constructions traditionnelles que l'on retrouve en Ardenne Herbagère et dans le Pays de Herve jusqu'au 18^e siècle (figure 38).

Il s'agit d'un mur dont la hauteur peut varier, construit en pierre/moellon de calcaire, ou de grès, ce qui permet « d'isoler » du sol humide la partie haute du mur. Situé dans le sol, le mur de soutènement témoigne d'une mise en œuvre grossière.

Après cela, le soubassement s'efface au profit d'un parement en moellons. Les pierres les plus fortes sont cependant réservées aux fondations de l'ouvrage afin de contrecarrer les poussées, servir à la stabilité du bâtiment et résister aux conditions atmosphériques pluvieuses de nos régions⁸⁸.

⁸⁶ JONGHE, S. de, GEHOT, H., GENICOT, L.-F. (1996). Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie : manuel de terrain.

⁸⁷ Ibidem.

⁸⁸ Ibidem.



Figure 38 : illustration d'un mur de soutènement en pierre d'une ferme en long à Aubel (PH) – Source © JONGHE, S. & al (1996)
Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie

Les **fondations** sont généralement plus larges que les murs qui la surmonteront. Ils peuvent atteindre une profondeur variable selon les régions, le but étant toujours de se poser sur un sol solide. La première couche d'une fondation peut être un lit de chaux pure, dont l'objectif est d'empêcher les remontées capillaires. Les pierres qui composent ces fondations peuvent être des pierres volantes, ou des pierres réutilisées, provenant d'une démolition.

Les **murs de parement** de l'architecture traditionnelle sont généralement construits de moellons irréguliers, issus des carrières éphémères ou récoltés à la surface des champs. Ils sont globalement élevés en deux parements parallèles, dont l'interstice est comblé par un mélange hétérogène de mortier, de terre, de graviers ou de fibres organiques. De manière ponctuelle, des pierres plus longues sont placées dans le sens de l'épaisseur du mur pour lier les deux parements.

Les moellons sont plus ou moins noyés dans la maçonnerie par un abondant mortier traditionnel de chaux, dont la charge peut être de nature différente (fer, végétale...) (figure 39). Cette couche importante de mortier permet d'atténuer les irrégularités du moellon⁸⁹.

Ces murs doivent leur épaisseur importante, pouvant atteindre les 90 centimètres, au faible pouvoir liant du mortier, ainsi qu'à l'utilisation de moellons de moins bonne qualité qui engendre un double parement.

⁸⁹ BLARY, F., GELY, J.-P., BERNARDI, P. (2020). Pierre de construction : de la carrière au bâtiment. Éditions du comité des travaux historiques et scientifiques.

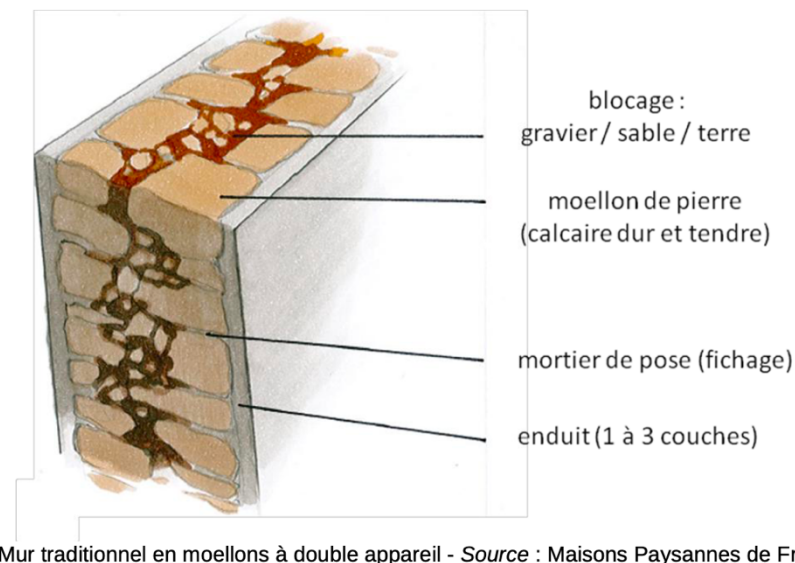


Figure 39 : illustration du principe de construction d'un mur en moellon à double appareillage – Source © HYGROBA

Il existe trois variantes majeures d'appareillage d'un mur : le moellonnage, l'appareil assisé et l'appareil réglé (figure 40). Ils dépendent de plusieurs facteurs comme : la disponibilité d'une ou l'autre pierre, la facilité à tailler la pierre, l'habilité du maçon, la qualité du mortier ou encore les finances et les goûts du client⁹⁰.



32. Les trois variantes majeures de l'appareil du mur: moellonnage, appareil assisé, appareil réglé.

Figure 40 : illustration des variantes d'appareillage d'un mur – Source © JONGHE, S. & al (1996) Pierres à bâtir

Dans ces appareillages, nous pouvons distinguer des niveaux d'arase, ou ligne de jour. Il s'agit d'un alignement horizontal de la maçonnerie que l'on retrouve à une certaine fréquence (tous les 20 ou 30 centimètres par exemple). Cet alignement correspond à une fin de travail journalier.

De manière générale, les moellons sont maçonnés en lit (1), c'est-à-dire dans le sens de leur stratification naturelle afin qu'ils profitent pleinement de leurs caractéristiques physiques (dont la résistance à la compression). Il existe cependant dans la maçonnerie, des éléments qui sont posés en délit, parallèles (2) ou perpendiculaires (3) au plan de la façade, dans une position contraire à la stratification naturelle (figure 41). Ces éléments peuvent être déforcés à long terme et ainsi mal résister aux charges, aux intempéries et avoir comme conséquence des fissurations, des décollements, voire la chute de l'élément.

⁹⁰ JONGHE, S. de, GEHOT, H., GENICOT, L.-F. (1996). Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie : manuel de terrain.



Figure 41 : illustration de pierres en lit (1), en délit parallèle (2) et délit perpendiculaire à la façade (3) sur une façade du cas d'étude – Illustration © Antoine GUSBIN

Le **mortier** le plus communément utilisé jusqu'au 20^e siècle était à base de chaux. Le parc bâti wallon d'avant-guerre fut notamment construit, mais également rejointoyé et badigeonné avec le mortier de chaux.

Une thèse de doctorat concernant les mortiers de bâtiments historiques en Belgique⁹¹ démontre qu'à l'époque, ce mortier est composé de chaux grossière et de sable humide, et généralement accompagné de divers agrégats ou matériaux organiques locaux. La nature de la chaux dépend, à l'époque, des roches extraites et varie d'une région à l'autre.

Contrairement aux mortiers actuels en ciment, le mortier de chaux fait preuve d'une certaine souplesse et d'une capacité hygroscopique permettant d'atténuer les problèmes d'humidité et de condensation dans le bâti d'avant-guerre. En effet, il joue un rôle fondamental dans les performances hygrothermiques du bâti ancien. Grâce à ses caractéristiques décrites dans les paragraphes suivants, c'est lui qui permet les transferts d'humidité d'un mur construit avec des pierres dures. Dans le cas d'un mur construit de pierres tendres, il joue un rôle moins important dans ces transferts d'humidité (figure 42).

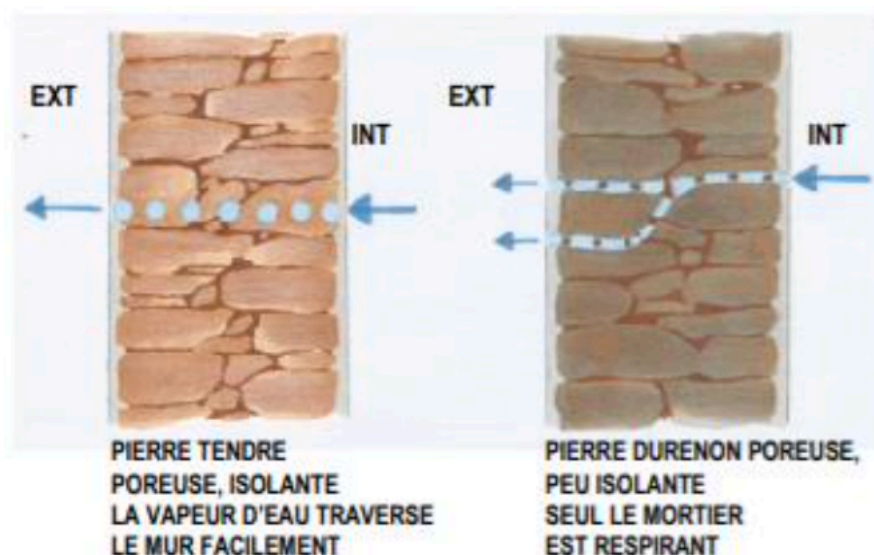


Figure 42 : illustration du rôle du mortier dans le comportement hygrothermique des parois anciennes – Illustration © ATHEBA

⁹¹ CALLEBAUT, K. (2000). Characterisation of historical lime mortars in Belgium : implication for restoration mortar, unpublished PhD-thesis, K.U.Leuven.

Dans la construction en moellons, les **encadrements** de baies sont généralement de nature différente que le moellon utilisé en façade. Ces ouvertures peuvent être en brique, ou en pierre de taille, notamment le calcaire en Ardenne Herbagère (figure 43).

La brique permet de travailler avec des angles arrondis, elle permet de réaliser des petits oculi pour desservir la grange, ou encore de réaliser des arcs de décharge. Elle apporte une certaine souplesse dans les réalisations, mais également une richesse chromatique en façade.

La pierre calcaire est abondamment présente dans cette région, et est utilisée pour les encadrements de baies notamment en raison de ses qualités de plasticité, de résistance et de tenue. On les retrouve également pour des chaînages d'angle, des seuils, ...



Figure 43 : illustration d'encadrements de baies, réalisés avec un matériau différent, d'une ferme en surface à Rahier (AH) – Source © GENICOT L.-F. & al. (1996)

Du côté intérieur du mur, les **planchers et plafonds** procèdent partout et pour tout de la même manière : une poutre maîtresse s'encastre dans les éléments porteurs. Elle est soit emmortaisée dans le pan-de-bois ou alors scellée dans la maçonnerie. Sur ces poutres reposent des solives qui complètent la structure du plancher (8x8 ou 9x9 centimètres avec un entre-axe de 30 centimètres). Cette technique fait presque l'unanimité auprès des constructeurs traditionnels⁹². Ce principe est également applicable pour la charpente qui loge une pièce maîtresse dans la maçonnerie (figure 44).

Une autre technique demeure tout de même, et consiste à loger dans les murs porteurs une série de gîtes d'une section moindre (15x15 centimètres avec un entre-axe de 70 centimètres)⁹³.

Ces pièces principales en bois sont généralement associées à un tirant métallique qui permet de lier la poutraison à la maçonnerie, réglant de ce fait les problèmes de cohésion entre ossature et enveloppe.

Sur ces deux premières couches s'appuie un gitage qui sera recouvert de terre et ensuite de parquet.

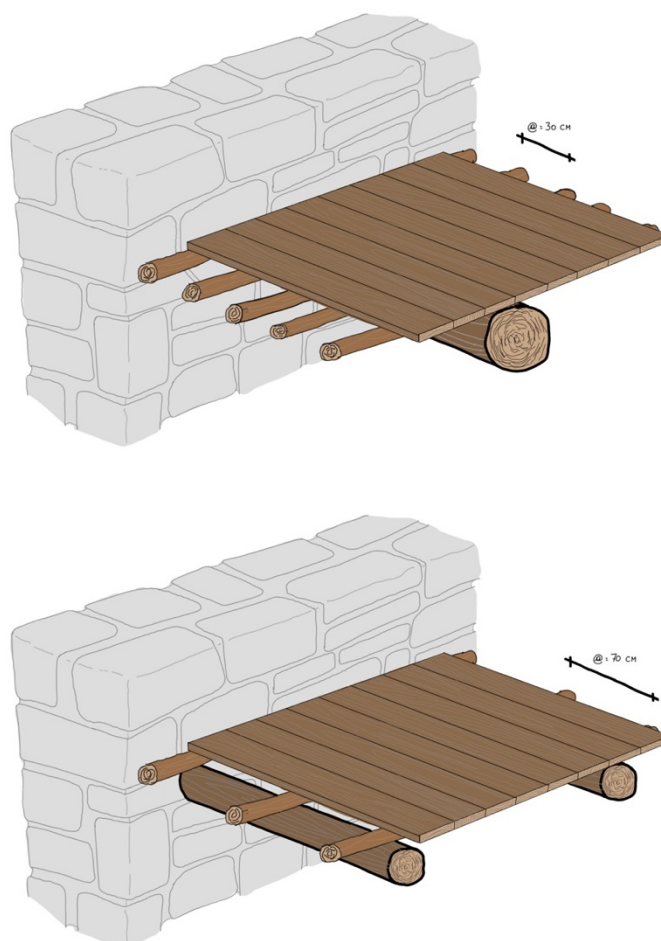


Figure 44 : schémas des structures de planchers/plafonds – Illustration © Antoine GUSBIN

⁹² GENICOT, L-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.

⁹³ Ibidem.

La coupe suivante (figure 45) permet d'illustrer les principes constructifs décrits dans les paragraphes précédents.

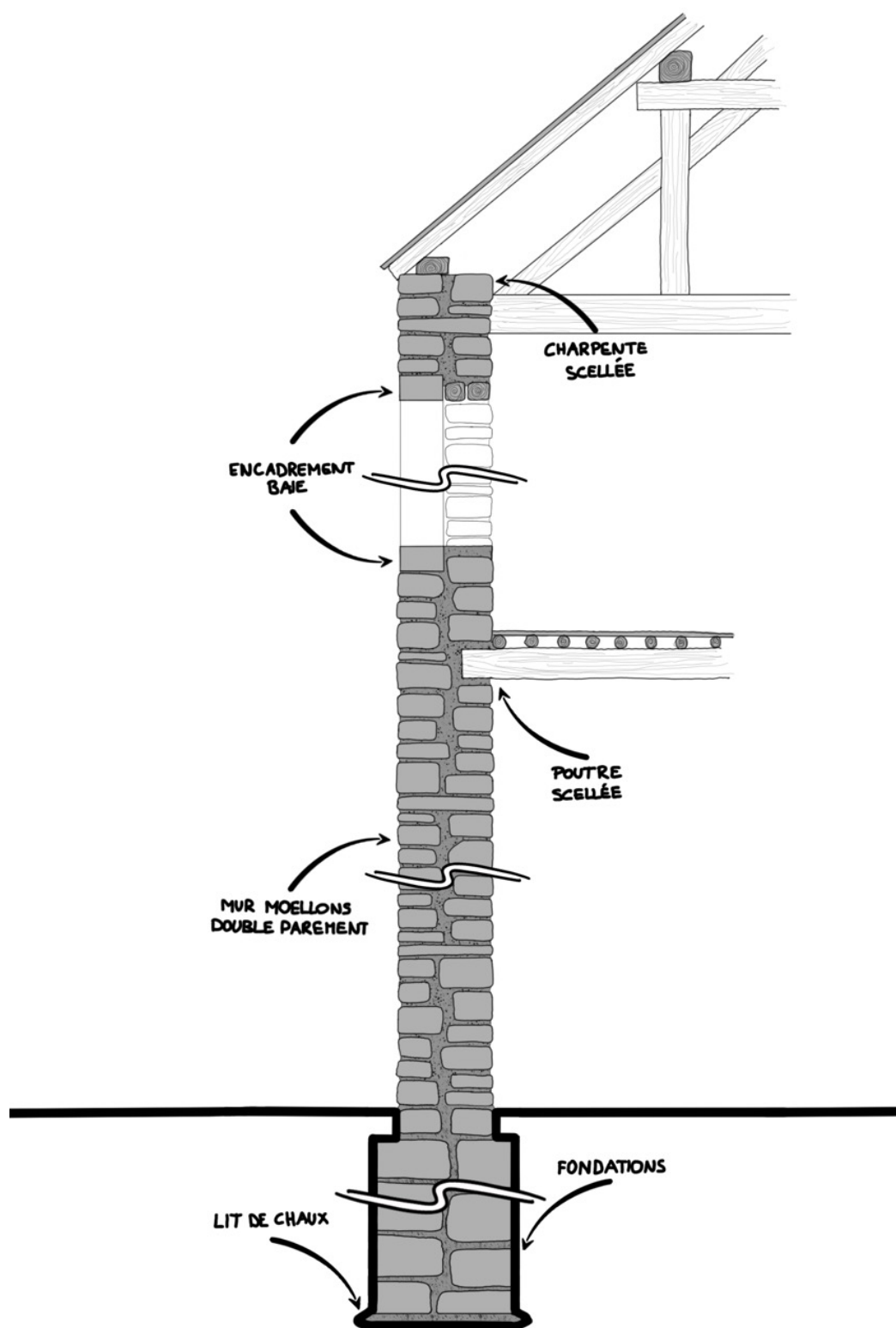


Figure 45 : coupe schématique d'un mur ancien en pierre – Illustration © Antoine GUSBIN

2.2 Comportement de la maçonnerie de moellons de pierre

Ce sous-chapitre se base sur les différentes études qui se sont attardées sur le comportement hygrothermique des murs massifs. Parmi elles figurent l'étude ATHEBA, l'étude HYGROBA, le projet BATAN ou encore l'ouvrage de Jean-Pierre MOYA.

MOYA explique dans son ouvrage que les murs qui composent l'enveloppe d'un bâtiment agissent comme un ensemble, un système qui interagit en permanence avec son environnement extérieur. L'enveloppe du bâti ancien est en réalité une interface respirante, un lieu d'échange entre l'ambiance intérieure et l'environnement extérieur.

Cette capacité respirante découle des matériaux utilisés qui sont considérés comme vivants, ouverts à la diffusion de vapeur d'eau et capillaire, et du fait que ces bâtiments ne sont pas étanches à l'air.

Comme expliqué précédemment, ces murs sont généralement réalisés à l'aide de matériaux naturels locaux, peu transformés, ce qui leur offre la particularité de parvenir à interagir et tirer profit de leur environnement proche. Sans le savoir, les paysans de l'époque faisaient de l'architecture bioclimatique. Les constructions tenaient généralement compte de l'environnement proche ce qui permettait aux paysans de se protéger des vents dominants ou du soleil en été grâce au relief ou la présence d'une végétation persistante. Pour les façades les mieux exposées, cette conception permet également de récupérer les apports solaires en hiver grâce à la présence de végétation caduque.

De manière naturelle, les paysans tenaient compte des propriétés et des caractéristiques intrinsèques des matériaux mis en œuvre, car leur confort en dépendait. Ces murs en maçonnerie de moellons de pierre trouvent un équilibre entre ses milieux intérieur et extérieur et ont grâce à cela capacité de réaliser différents transferts de vapeur d'eau, d'air et de chaleur. Enfin, ces murs ont des caractéristiques thermiques et hygriques qui leur sont propres comme leur importante inertie, la microporosité des matériaux mis en œuvre, l'hygroscopie ou encore la résistance à la diffusion de vapeur.

2.2.1 Comportement thermique

Le comportement thermique des murs en maçonnerie de moellons de pierre présente un avantage majeur, l'inertie.

L'inertie est la capacité à stocker de la chaleur et de la restituer, selon un déphasage plus ou moins important. Les murs en maçonnerie de moellons de pierre possèdent une très haute inertie, de par l'épaisseur importante des murs, mais surtout sa capacité thermique massique⁹⁴. Cette capacité d'inertie représente un point fort du bâti ancien car il permet d'apporter un certain confort intérieur. En été, elle permet de stocker et ensuite restituer la fraîcheur nocturne avec un déphasage plus ou moins important selon l'épaisseur et les matériaux qui composent le mur.

⁹⁴ Il s'agit de la capacité d'un matériau à accumuler de l'énergie sous forme thermique, selon une masse donnée – Source © HYGROBA

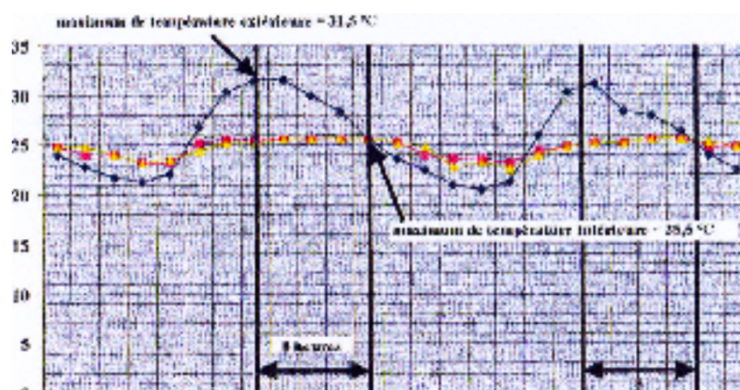
L'étude AHEBA nous livre que pour un mur en moellons de grès, d'une épaisseur de 50 centimètres, le déphasage est d'environ huit heures (figure 46).

Elle montre également l'avantage d'une inertie d'un tel déphasage en période de canicule. Pour une température extérieure de 31° C, la température intérieure n'excède pas les 26° C, soit une différence de 5° C sans aucune climatisation artificielle (figure 47).

Matériaux constituant les murs (épaisseur)	Déphasage: valeur moyenne
granit (50 cm)	7 h
pan de bois et torchis (20 cm)	7 h
grès (50 cm)	8 h
brique (35 cm)	11 h
calcaire (40 cm)	13 h

*Ordre de grandeur
des valeurs de déphasage*

Figures 46 et 47 : tableau résumant l'inertie de matériaux et graphique illustrant l'impact de l'inertie sur la température intérieure – Source © ATHEBA

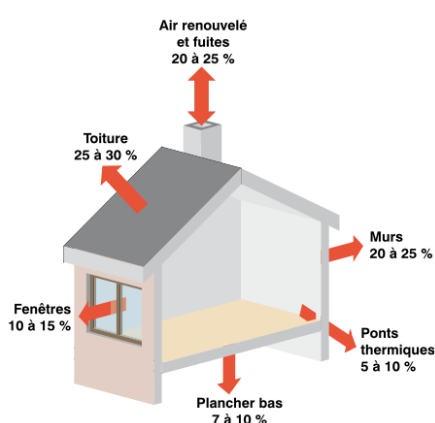


Des campagnes de mesures ont montré les performances globales du bâti ancien en période estivale. Sur cet exemple, avec un décalage de 8 heures, les températures extérieures dépassent les 31°C sous abri, la température intérieure n'excède pas les 26°C, soit une différence de 5°C environ, sans climatisation artificielle.

Le confort thermique estival est également garanti par d'autres facteurs.

Comme mentionné précédemment, les protections solaires extérieurs, tels que la végétation, les volets ou un front bâti voisin, peuvent empêcher le rayonnement solaire de pénétrer à l'intérieur du logement ; et l'évaporation, qui est un phénomène physique, permet de créer du froid dans la paroi lorsque l'humidité contenue dans celle-ci s'évapore sous les rayons du soleil.

En hiver, les apports solaires garantissent un apport de chaleur en journée et de nuit grâce à la restitution de la chaleur emmagasinée par les murs. Cela permet une stratégie de réduction de chauffage. Cependant, les apports solaires étant moins importants en hiver, les murs peuvent « rayonner » du froid et provoquer un inconfort. Cet inconfort peut être corrigé sans travaux importants, un enduit intérieur adaptée notamment, ce qui entrainera un gain sur le confort d'hiver et sur la consommation énergétique par la même occasion.



Bien que le ratio apport/déperdition des murs ouverts en maçonnerie de moellons soit positif, les autres parois de l'enveloppe du parc bâti d'avant-guerre sont les principales sources de déperdition (figure 48).

En effet, si les murs sont relativement étanches à l'air, c'est à travers le toit (25%), les infiltrations d'air provenant des baies (15%) et du plancher bas (10%) que la majorité des déperditions ont lieu. Les châssis vitrage simple représentent également une source de déperdition non-négligeable par infiltration, mais cette déperdition est également une source de ventilation du bâtiment.

Figure 48 : schémas des déperditions à travers l'enveloppe d'un bâtiment ancien – Source © ISOLIN

2.2.2 Comportement face à l'eau et la vapeur d'eau

Les caractéristiques hygriques principales des murs massifs du bâti d'avant-guerre sont au nombre de trois : l'hygroscopicité, la capillarité et la résistance à la diffusion de vapeur d'eau.

Pour contexte, contrairement au bâti moderne qui s'isole de l'eau, le bâti d'avant-guerre contient de l'humidité qu'il régule pour maintenir son équilibre, qu'il est important de conserver. Bien qu'il contienne de l'humidité, un bâtiment d'avant-guerre en bonne santé n'a pas de problèmes à ce sujet car il est construit pour résister naturellement aux problèmes liés à l'humidité, notamment grâce à la chaux qui permet les transferts de vapeur d'eau.

Il y a des cas de figure où ces logements d'avant-guerre sont endommagés par ces problèmes et les raisons peuvent être multiples : manque d'entretien, changement radical de l'environnement ou de l'utilisation du bâtiment ou dans le pire des cas, suite à une intervention énergétique désastreuse.

L'humidité présente dans ces murs peut provenir de différentes sources. Elle vient soit par capillarité, soit par absorption, soit par constitution ou soit de manière libre⁹⁵. Ces transferts se réalisent principalement à travers les matériaux poreux de la paroi, comme les mortiers de pose et de finition⁹⁶ étant donné que leur hygroscopicité est élevée, alors que celle des pierres dures, dont le grès, présente une faible hygroscopicité.

L'**hygroscopicité** d'un matériau est sa capacité à pouvoir stocker de la vapeur d'eau en son sein lorsque ce dernier est en contact avec de l'air humide. Cette capacité est la résultante du phénomène physique de la condensation capillaire, faisant que la vapeur contenue dans l'air peut se condenser dans les micropores des matériaux. Ce phénomène dépend de l'importance de la microporosité d'un matériau et de l'humidité relative présente dans l'air.

En d'autres termes, plus le matériau est doté de pores fins, plus il est considéré comme hygroscopique car sa microporosité présente une grande capacité à provoquer la condensation. En revanche, plus la porosité d'un matériau est grossière, moins elle est sujette à provoquer la condensation de la vapeur d'eau. Ce matériau est dans ce cas peu hygroscopique.

L'hygroscopicité est caractérisée par la teneur en eau de référence W_{80} , exprimée en kg/m^3 . Il s'agit de la teneur en eau d'équilibre d'un matériau lorsque celui-ci est maintenu dans un milieu ayant une humidité relative de 80%⁹⁷.

A titre indicatif, l'étude HYGROBA nous livre les valeurs suivantes concernant l'hygroscopicité des matériaux anciens suivants : brique de terre cuite, mortier de chaux, torchis, bois, pierre calcaire dure et pisé (figure 49).

⁹⁵EVARD, A., BRANDERS, A., De HERDE, A. (2011). Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques plaines : guides d'aide à la conception. SPW – DG04 : Jambes, 98 pages.

⁹⁶ATHEBA. (s.-d.). Connaissance du bâti ancien. Maisons paysannes de France.

⁹⁷CETE de l'Est. (2013). HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes, maisons paysannes de France. Rapport.

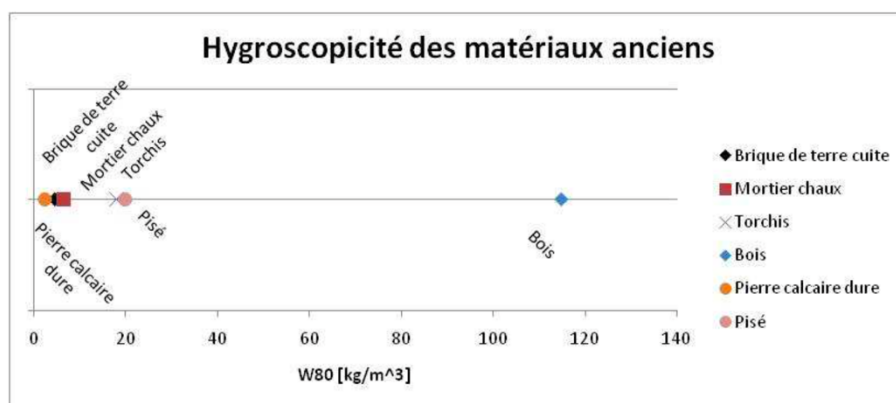


Figure 49 : tableau illustrant l'hygroscopicité de différents matériaux – Source © HYGROBA

Ce graphique permet de classer les matériaux étudiés en trois catégories, représentées à travers le schéma suivant (figure 50).

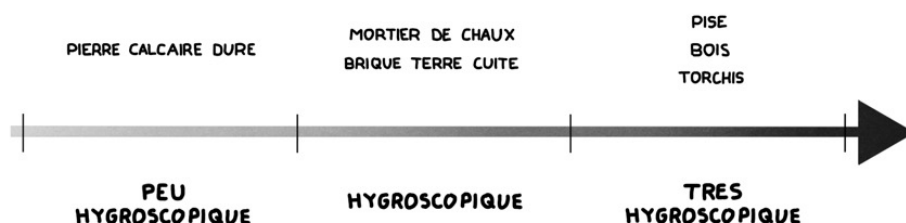


Figure 50 : schéma de l'hygroscopicité de différents anciens matériaux – Illustration © Antoine GUSBIN

Concernant la construction en maçonnerie de moellons de grès, nous pouvons constater sur base des figures ci-dessus et des données récoltées dans les paragraphes précédents que l'hygroscopicité du grès est faible, alors que celle du mortier est moyenne, voire normale, avec une valeur approximative de 7,5 kg/m³. « Pierres et Marbres en Wallonie » et la Note d'Information Technique (N.I.T.) 205⁹⁸ du CSTC renseignent une porosité inférieure à 1% du volume des grès.

La **capillarité**, ou plutôt le coefficient d'absorption de liquide A d'un matériau, est sa capacité à absorber de l'eau liquide par capillarité, c'est-à-dire lorsque ce dernier est mis en contact avec un plan d'eau. En d'autres termes, cela caractérise les flux entrant et sortant et donc, le volume d'eau mobilisé lorsqu'elle est en contact d'un matériau.

Plus ce coefficient, exprimé en $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$, est élevé plus le matériau est capillaire.

Une remontée capillaire est un transfert d'eau par absorption, sous forme liquide, du sol vers le mur en contact avec celui-ci. Cette remontée peut survenir via un mur de fondation, ou un soubassement, composés de matériaux poreux. Selon les saisons, la hauteur de cette partie humide du mur varie et dépend de facteurs dont l'humidité de l'air, l'ensoleillement, l'orientation du mur, le climat, etc.

La remontée capillaire peut également varier en fonction du fait que le mur soit entouré de sols perméables ou imperméables comme le montre le schéma suivant (figure 51). En effet, si le mur est entouré de sols perméables, une certaine quantité d'eau transite par les sols et le mur et s'évapore depuis ces derniers. S'ils sont imperméables, cette même quantité transite par le

⁹⁸CSTC. (1997). NIT 205 : pierres naturelles.

mur uniquement, ce qui le rend beaucoup plus humide tout au long de l'année. Cela permet de se rendre compte que, intervenir simplement sur les deux côtés d'un mur pour le rendre étanche, n'est pas une solution adéquate pour maintenir le mur en état.

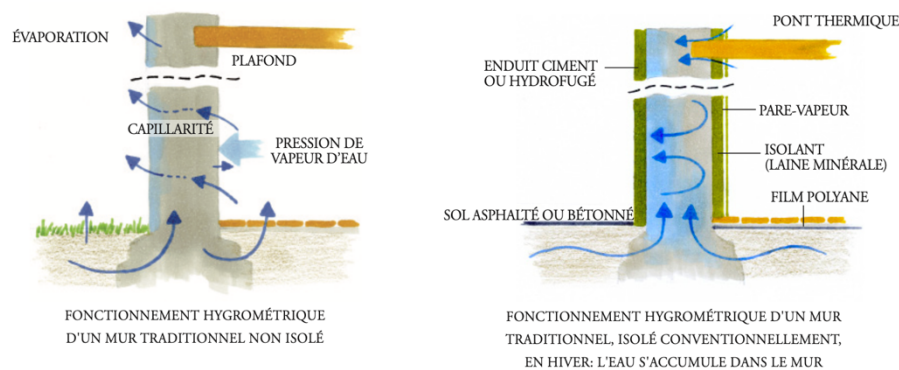


Figure 51 : schéma illustrant la rupture de l'équilibre naturel d'un mur ancien – Source © ATHEBA

A titre indicatif, l'étude HYGROBA nous livre les valeurs suivantes concernant la capillarité des matériaux anciens suivants : brique de terre cuite, mortier de chaux, torchis, bois, pierre calcaire dure et pisé (figure 52).

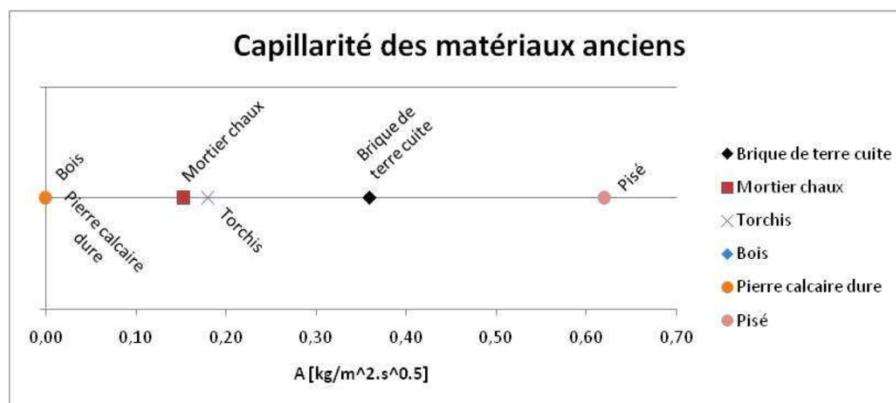


Figure 52 : tableau illustrant la capillarité de différents matériaux – Source © HYGROBA

Ce graphique permet de classer les matériaux étudiés en trois catégories, représentées à travers le schéma suivant (figure 53).

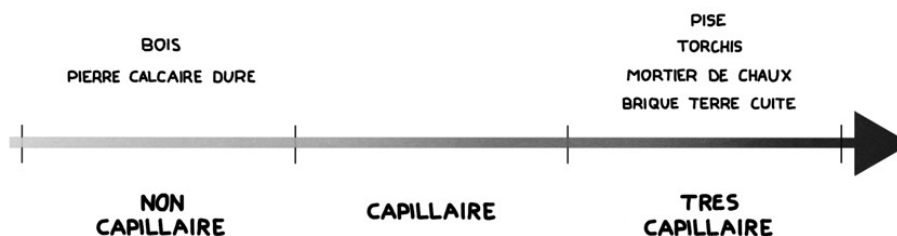


Figure 53 : schéma de la capillarité de différents anciens matériaux – Illustration © Antoine GUSBIN

Concernant la construction en maçonnerie de moellons de grès, nous pouvons constater sur base des figures ci-dessus que la capillarité du grès est nulle avec un coefficient A de 0, alors que celle du mortier est très élevée, avec un coefficient A de 0,15 kg/m²s^{1/2}.

Le **coefficient de résistance à la diffusion de vapeur** μ d'un matériau est sa capacité à empêcher son franchissement par la vapeur d'eau. Plus un matériau est étanche à la vapeur d'eau, plus son μ est élevé.

Par convention, on considère que l'air immobile possède un coefficient de résistance à la vapeur d'eau $\mu = 1$.

Le facteur de lame d'air équivalente (Sd en m) entre en jeu, remplaçant le coefficient de résistance à la diffusion de vapeur. Ces deux grandeurs sont liées par la formule suivante :

$$Sd = \mu \cdot d$$

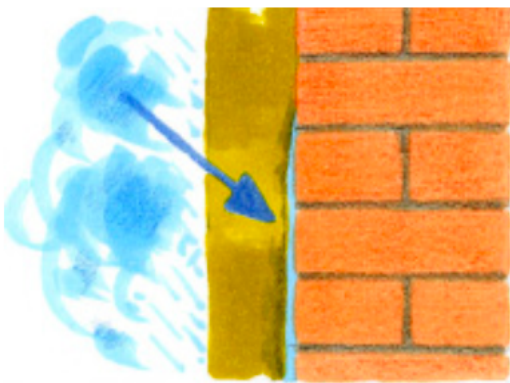
où d est l'épaisseur du matériau en question exprimée en mètre.

Cette formule signifie donc qu'un matériau de 10 cm avec un coefficient $\mu = 1$ s'oppose au passage de la vapeur d'eau comme 10 cm d'air immobile.

La diffusion de vapeur d'eau est un transfert qui va d'un milieu à forte concentration de vapeur vers un milieu à faible concentration. Si le logement est occupé normalement, ce transfert se dirige généralement de l'intérieur vers l'extérieur selon la fonction des pièces et une pression légèrement supérieure. Si le logement n'est ni occupé, ni chauffé en hiver, l'équilibre thermique s'installe, la quantité de vapeur à l'extérieure peut devenir plus importante qu'à l'intérieur et dans ce cas, le flux se dirige vers l'intérieur.

Cette concentration présente dans l'air peut être capturée et retenue sous sa forme gazeuse, il s'agit de l'adsorption, ou sous sa forme liquide comme pour l'hygroscopicité, il s'agit de l'absorption. Le phénomène physique qui différencie l'adsorption et l'absorption est la condensation, qui dépend de l'humidité relative (HR) présente dans l'air.

L'HR exprime un rapport (en %) entre la quantité d'humidité présente dans l'air et la quantité d'humidité que l'air peut contenir. Lorsque ce rapport est atteint, que l'humidité relative dépasse les 100%, la vapeur contenue dans l'air se transforme en état liquide, ce phénomène s'appelle la condensation. Elle a lieu lorsque la température d'un milieu non saturé baisse, ce qui augmente l'humidité relative, ou lorsqu'il y a un apport d'humidité dans un milieu non saturé (ex. : lorsqu'on prend une douche dans une pièce fermée).



La condensation peut avoir lieu en surface, mais également à l'intérieur d'une paroi notamment suite à une rénovation énergétique sur un bâtiment d'avant-guerre. Ce cas de figure a lieu lorsque l'air intérieur chargé de vapeur d'eau rencontre une paroi froide et imperméable (figure 54). Par exemple derrière une laine minérale située contre un mur massif rendu imperméable. Ce phénomène survient lorsque l'équilibre du mur massif est interrompu, lorsque sa capacité respirante est rompue.

Figure 54 : schéma illustrant la formation de condensation au contact du mur – Source © ATHEBA

Généralement, les matériaux naturels utilisés pour la construction d'avant-guerre ont un coefficient de résistance à la diffusion de vapeur peu élevé mentionne l'étude ATHEBA. Le plâtre possède un coefficient $Sd = 10$; pour la terre cuite, $Sd = 16$; pour la pierre calcaire, Sd varie entre 18 et 90 ; alors que le coefficient des matériaux modernes comme le béton plein est bien plus élevé, $Sd = 130$.

A titre indicatif, l'étude HYGROBA nous livre les valeurs suivantes concernant l'épaisseur équivalente d'air des matériaux anciens suivants : brique de terre cuite, mortier de chaux, torchis, bois, pierre calcaire dure et pisé (figure 55).

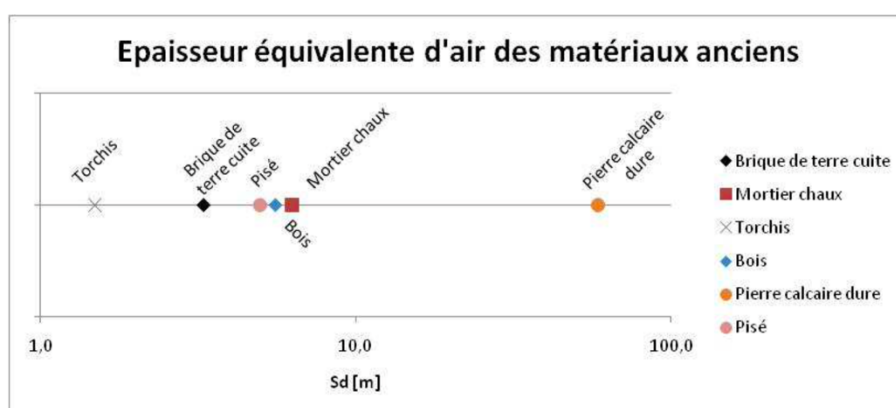


Figure 55 : tableau illustrant la capillarité de différents matériaux – Source © HYGROBA

Ce graphique permet de classer les matériaux étudiés en trois catégories, représentées à travers le schéma suivant (figure 56).



Figure 56 : schéma de l'épaisseur équivalente d'air de différents anciens matériaux – Illustration © Antoine GUSBIN

Concernant la construction en maçonnerie de moellons de grès, nous pouvons constater sur base des figures ci-dessus que l'épaisseur équivalente d'air du grès est très importante avec un coefficient Sd d'environ 70 mètres, alors que celle du mortier est très élevée, avec un coefficient Sd d'environ 8 mètres.

2.3 Conclusion

Bien que les précédentes études permettent d'appréhender le comportement hygrothermique des murs en maçonnerie de moellons, les données précises relatives à ce comportement sont toujours insuffisantes en Wallonie, ce qui empêche la vérification de la pertinence d'une ou l'autre amélioration énergétique.

Cependant, elles mettent en avant quelques principes, dont le fait qu'il soit important de maintenir l'équilibre naturel du mur pour éviter toute dégradation.

Sur base des données fournies, nous pouvons émettre les hypothèses suivantes.

Premièrement, la paroi composée d'un double appareil de moellons de grès et mortier de chaux est une paroi moyennement, voire peu hygroscopique. Le mortier de chaux étant considéré comme hygroscopique avec une valeur estimée à $7,5 \text{ kg/m}^3$ et celle du moellon de grès (pierre dure qui se rapproche de la pierre calcaire dure) estimée à $2,5 \text{ kg/m}^3$. Cela signifie et prouve que le grès n'est pas à même de pouvoir stocker une grande quantité de vapeur d'eau, et que c'est à travers le mortier que cette vapeur transite.

Deuxièmement, cette même paroi est sujette à la capillarité. Le moellon de grès (pierre dure qui se rapproche de la pierre calcaire dure) ayant une capillarité nulle, c'est de nouveau à travers le mortier de chaux, dont le coefficient A est de $0,15 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$, que l'eau remonte par capillarité.

Troisièmement, cette même paroi est sujette à la diffusion de vapeur d'eau. Le moellon de grès (pierre dure qui se rapproche de la pierre calcaire dure) ayant un coefficient Sd d'environ 70 mètres, c'est de nouveau à travers le mortier de chaux, dont le coefficient Sd d'environ 8 mètres, que la diffusion de vapeur d'eau s'opère.

Quatrièmement, les murs ne sont pas la source principale de l'enveloppe des déperditions de chaleur. Celles-ci provenant principalement du plancher bas, des châssis non-étanches et simples vitrages, et de la toiture ; le fait d'isoler ces parois et de remplacer les châssis serait une source d'amélioration thermique intéressante.

Enfin, pour parvenir à une solution d'isolation qui respecte l'équilibre hygrique du mur, il faudrait un matériau isolant avec une capacité hygroscopique moyenne ou élevée, et avec une épaisseur équivalente d'air faible. A titre d'exemple, les schémas suivants (figures 57, 58 et 59) réalisés sur base des données de l'étude HYGROBA indiquent quelques matériaux présentant ces caractéristiques : l'ouate de cellulose, la fibre de bois, ou l'enduit de chaux. Nous verrons dans le chapitre dédié aux itérations d'isolation qu'il existe d'autres isolants correspondants.



Figure 57 : schéma de l'hygroscopicité de différents matériaux isolants – Illustration © Antoine GUSBIN

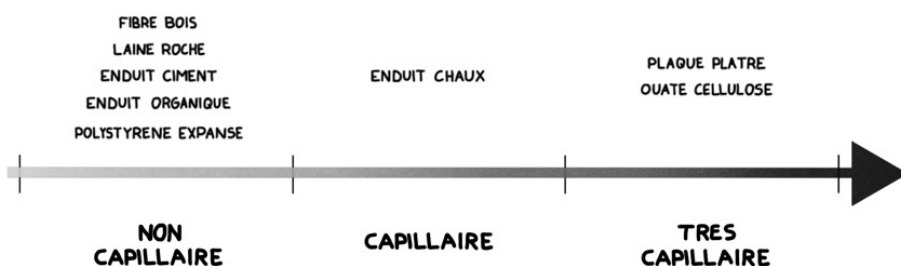


Figure 58 : schéma de la capillarité de différents matériaux isolants – Illustration © Antoine GUSBIN

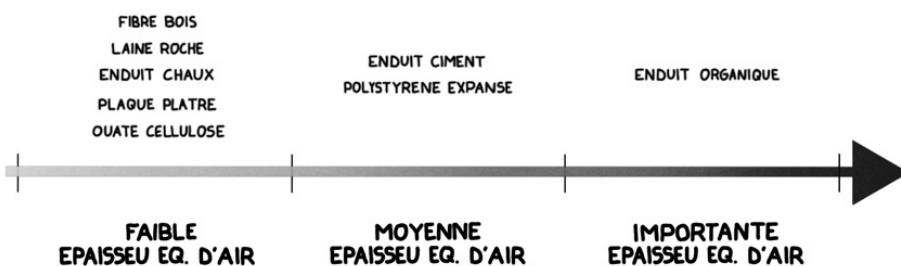


Figure 59 : schéma de l'épaisseur équivalente d'air de différents matériaux isolants – Illustration © Antoine GUSBIN

En perspective et afin de valider ces hypothèses, il serait intéressant de pouvoir modéliser le comportement de la paroi via un logiciel comme WUFI ou via une chambre de test en laboratoire.

Le prochain chapitre a pour objectif d'identifier la composition des murs du cas d'étude quant à leur comportement face à l'humidité, ainsi que d'en extraire des données. Suite à cela, il sera possible d'estimer une performance de ces murs afin d'établir des itérations de solutions d'isolation par l'intérieur.

CHAPITRE 3

Description du cas d'étude

Ce chapitre a pour objectif de décrire la ferme Lemaire dans son ensemble, et de mettre en relation les apports théoriques relevés au travers de la littérature avec les éléments relevés sur cette ferme. Il se compose de deux parties : une première partie remet la ferme dans sa situation géographique et la décrit en abordant son histoire, sa volumétrie, son organisation spatiale, son évolution fonctionnelle et les travaux auxquels elle a fait face ; et la deuxième partie est dédiée à la description architectonique des façades ainsi que sa composition matérielle et quelques données concernant son comportement hygrothermique.

3.1 Situation

La ferme Lemaire, est située sur les hauteurs de Polleur, un village implanté en creux de vallée. Il se situe en Ardenne Herbagère, à proximité du Pays de Herve. Il s'agit d'une région vallonnée touchée par l'activité herbagère dans le courant du 19^e siècle, voire plus tôt. Cette économie mène à la création de nouveaux hameaux et quelques fermes isolées au milieu des terres. Dans le centre du village, l'habitat est réparti le long d'un réseau viaire et d'un cours d'eau, la Hoegne (annexe 3). Les maisons y sont implantées à l'époque de manière groupée et non jointive (figure 60).

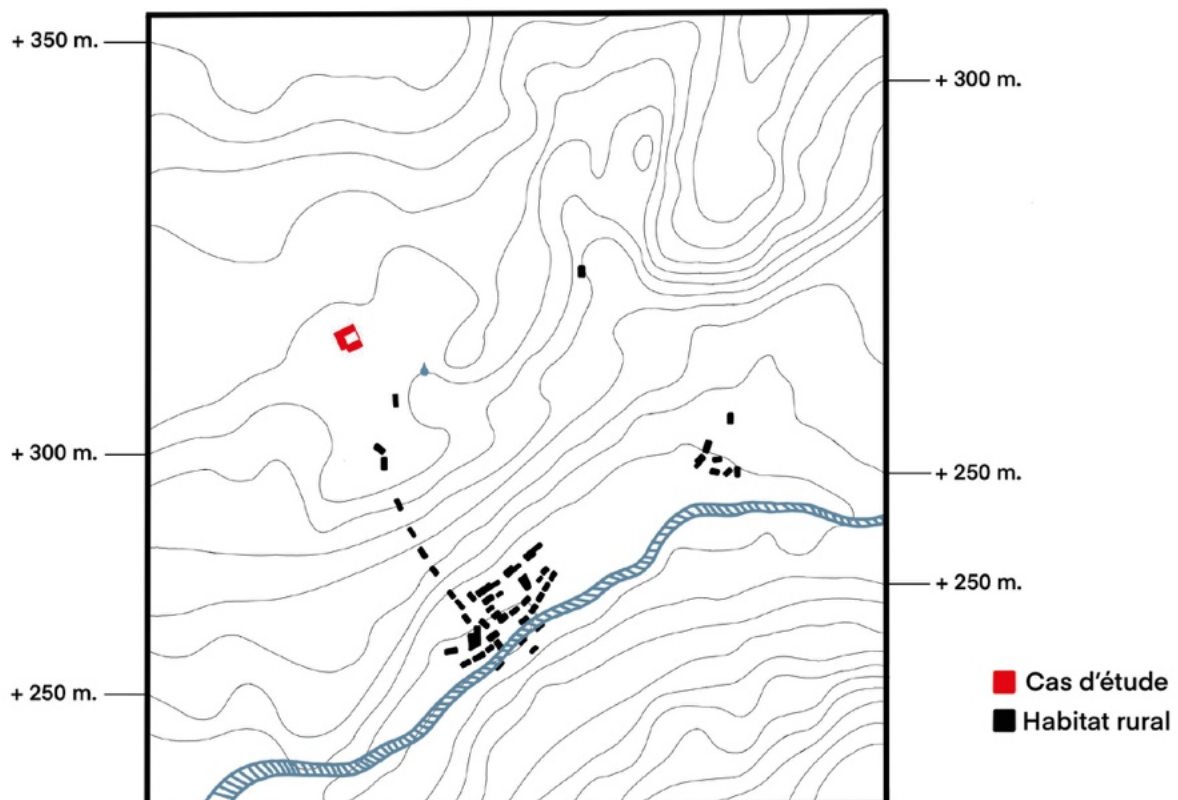


Figure 60 : carte de l'habitat et du relief de Polleur en 1777 – Illustration © Antoine GUSBIN sur base de Ferraris 1777

D'un point de vue géologique, le sous-sol de cette région est complexe. Il est à cheval sur plusieurs sous-sols, composés de schistes et de psammites du Dévonien supérieur ; de grès, schistes et calcaires du Dévonien moyen ; et entouré de grès, schistes, phyllades, quartzophyllades et arkose du Dévonien inférieur (figure 61).

Parmi ces roches, affleurent principalement du grès, dont de l'arkose, et du calcaire, généralement utilisé pour les ouvertures des bâtiments de haute gamme.



Figure 61 : carte des principaux types de sols dans la région de Polleur – Source © Géoportail de la Wallonie

L'architecture présente dans le village de Polleur s'apparente à l'architecture du bâti rural de la région. A l'époque, les rues du village sont bordées de quelques fermes blocs ou qui se développent en longueur, dont la plupart sont construites en moellons de grès (figure 62). Au fur et à mesure de son évolution, le village se densifie sans pour autant connaître une explosion démographique. Les rues se remplirent de maisons modestes prenant place entre les fermes construites non-jointives. Il en résulte un village caractérisé par une gamme chromatique plutôt uniforme, composée de fermes construites en moellons de grès et de constructions plus récentes majoritairement construites en briques rouges. Certains bâtiments mêlent l'usage de la brique pour les gouttereaux à rue et du moellon de grès pour les pignons (annexe 3).

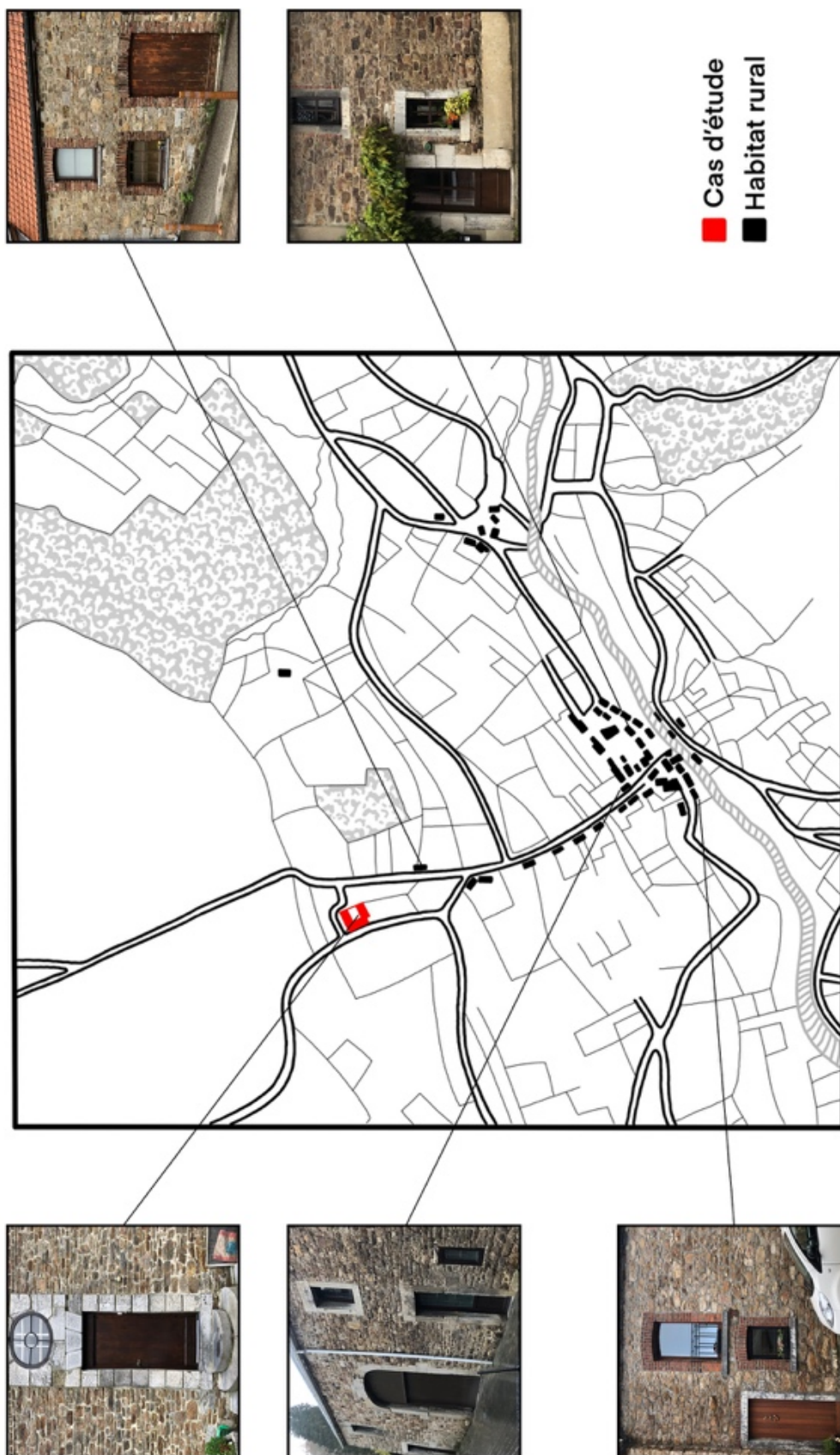


Figure 62 : carte de Polleur en 1777 combinée à des photos d'anciennes fermes à Polleur – Illustration © Antoine GUSBIN sur base de Ferraris 1777

3.2 Description

3.2.1 Généralités



Figure 63 : photocopie d'une photo (s.-d.) de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

La ferme Lemaire est une ferme-château (figure 63), datant du 17^e siècle, qui a manifestement résisté aux conditions conflictuelles de la région lors des 16^e et 17^e siècles, ainsi qu'aux deux Guerres Mondiales.

La ferme-château se situe à mi-pente, totalement isolée sur un relief relativement plat, à proximité d'un ancien puit communal (cf. figure 60). Jadis, elle fut entourée d'un ensemble de prairies et d'étendues forestières, avant que la campagne ne connaisse une série de constructions d'habitations neuves durant les 20^e et 21^e siècles. Actuellement, elle est toujours principalement entourée de prairies.

La ferme-château sur laquelle se base ce travail de fin d'étude est un ensemble bâti composé de trois ailes, disposées en ordre serré autour d'une cour centrale, clôturée par un périmètre bâti doté d'un porche. Comme beaucoup de fermes seigneuriales ou abbatiales à l'époque, elle est dotée d'un système symbolique de défense : deux tours d'angle accolées à l'aile dédiée au logis (figure 64).

Grâce aux relevés réalisés sur place, vous trouverez un plan de chaque niveau en annexe 4.

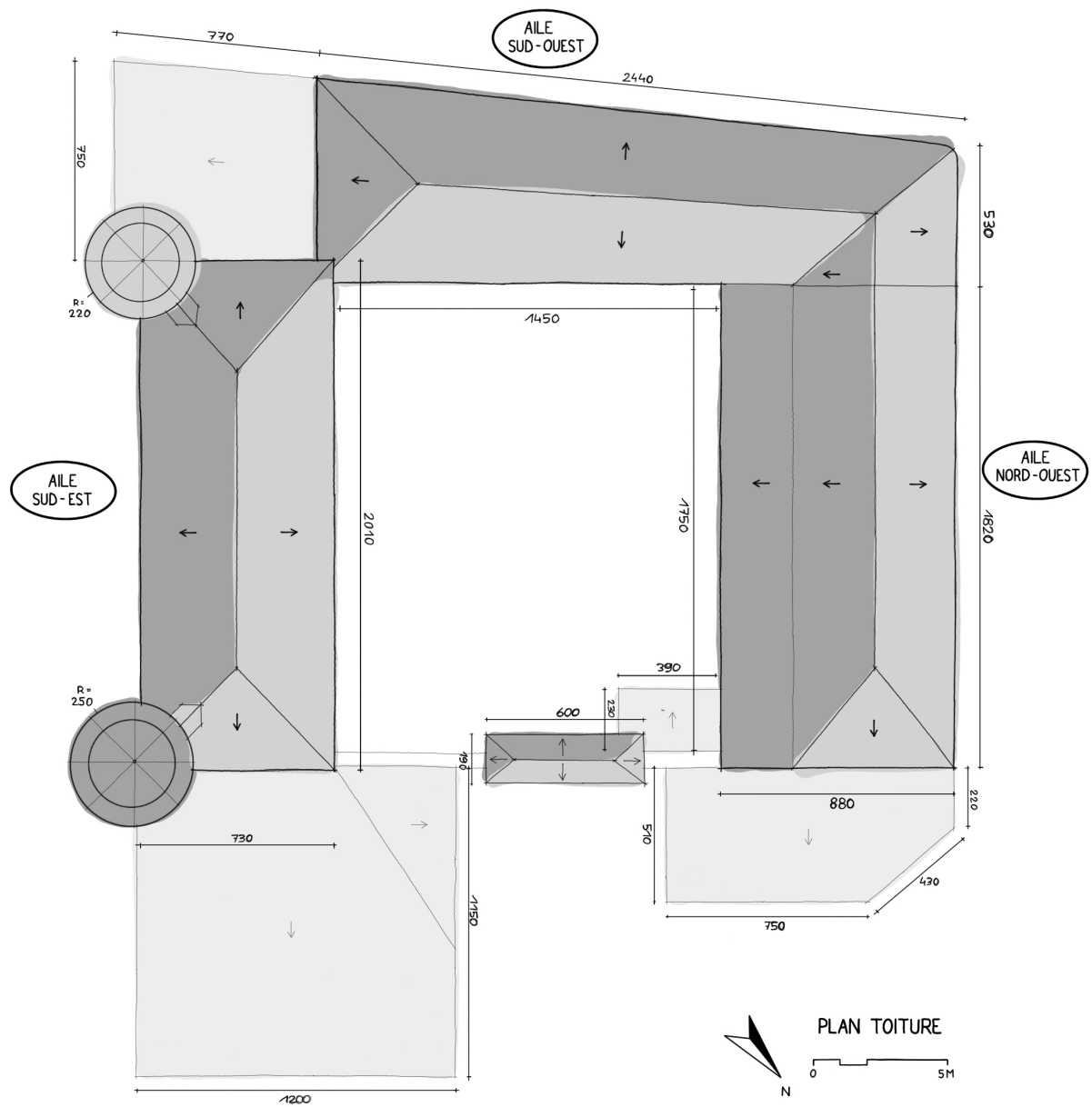


Figure 64 : plan de toiture de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

L'édifice est repris à l'Inventaire du Patrimoine Immobilier Culturel (IPIC) de Wallonie comme monument, et l'Agence du Patrimoine wallon (AWAP) propose la notice suivante :

« ...Ferme Fagal ou Lemaire. Propriété des familles de Thier au XVII^es. et Deru aux siècles suivants, exploitée en 1842 par un certain Fagal ou Fogal (?), de 1865 à 1972 par Lambert Lemaire et aujourd'hui par la famille Leporcq-Lemaire. Quadrilatère en moellons de grès, calcaire et briques disposant ses bâtiments autour d'une cour autrefois pavée de galets provenant des bords de la Høgne. Accès à l'E. par un portail en plein cintre, déchargé par un rouleau de briques, aux piédroits moulurés et terminés en congé avec deux chasse-roues, sous bâtière d'ardoises, à croupettes. Au S., logis de la 2^e moitié du XVII^es. sans doute partiellement reconstruit après l'incendie de 1676 qui ravagea Polleur et nombreuses de ses fermes, probablement en 1687, date figurant sur le mur-pignon N-E. Côté cour, façade probablement jadis entièrement en moellons de grès, en double corps de deux niveaux de cinq travées. Porte à plante-bande aux claveaux centraux pendants, sur piédroits à refends et le tout sous baie d'imposte ovale inscrite dans un encadrement rect. à refends et crossettes. Perron à degrés convexes et soupiraux à pourtour de calcaire.

A dr., entrée de cave à degré droit rentrant sous un édicule en moellons de grès, à linteau bombé sur montants, avec battée et traces de gonds. Baies à même encadrement que la porte, agrandies à g. au XIX^e ou XX^es. Ancres à double volute. Bâtière de tuiles à croupes interrompue par une lucarne à fronton triangulaire. Blochets. Façade postérieure flanquée à l'E. et à l'O. de tours circulaires en moellons de grès au rejointoiement ferrugineux, avec fruit, ajourées de baies à traverse ; certaines aux jours murés. Dernier niveau rehaussé de briques sous toiture hexagonale d'ardoises, à coyaux et couronnée d'un épi de faîtage. Façade de deux niveaux de quatre travées de baies à traverse, avec gonds de contrevent et aux nombreux jours murés. Percement récent d'une baie à linteau droit et d'une porte. Deux lucarnes à fronton triangulaire. Ancres à double volute.

Au N., étables et fenil en moellons de grès non assisés aux ouvertures à encadrement de briques sous bâtière d'ardoises. Façade postérieure avec boulins et ancras en S étiré. A l'O., grange et étables en moellons de grès éclairés d'oculi au dernier niveau. A l'arrière, façade avec boulins, traces de besaces d'angle en calcaire et baie récente. A l'angle S-O., appentis récent.

M.-A.11[2377]

F. PASQUASY, op. cit., p. 31-32, 105-107. »

Il semble que cette ferme ait occupé une fonction importante dans la région.

A la base, elle était la propriété d'une riche famille, la famille De Thier, qui semblait être en lien avec les pouvoirs de la province liégeoise⁹⁹. Le bâtiment servit ensuite de ferme stricto sensu pendant plusieurs siècles. Selon les témoignages récoltés, la ferme a évolué à travers le temps, accueillant plusieurs familles et plusieurs types d'animaux (des chevaux, des chevaux de trait, des moutons, des porcs et des vaches). Durant la Deuxième Guerre Mondiale, il servit également de refuge. En effet, les caves de la ferme servirent à loger les habitants de la région, venus se protéger contre les attaques ennemies.

Depuis 1997, l'activité est remise et plus aucune occupation agricole n'est d'actualité. Si l'ensemble reste très bien conservé, cette ferme à cour a vécu et a évolué en fonction du temps et des besoins rencontrés, ce qui a nécessité plusieurs phases de travaux, de transformations et d'interventions comme décrits dans les pages suivantes.

Les dates de construction respectives des différents bâtiments n'ont pas pu être identifiées de manière précise. La plupart des archives de la commune de Theux ayant été emportées avec les inondations de juillet 2021, aucune information autre que celles présentes dans les ouvrages de référence mentionnés précédemment, n'a pu être retenue.

Cependant, un millésime (figure 65) présent sur un pignon du logis nous indique une date de construction : 1686. Cette date semble être la date de construction de l'aile dédiée au logis, voire de l'ensemble de la ferme. Sur base des données du géoportail de la Wallonie, nous pouvons constater que l'ensemble du quadrilatère fut construit entre 1686 et 1777, comme l'illustre la carte de Ferraris de 1777 (cf. figure 60).



Figure 65 : illustration du millésime présente sur la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

⁹⁹ PASQUASY, F. (1970). Si Polleur m'était conté. Exemple n°106.

Les pages suivantes proposent une description de chaque aile, abordant les thématiques suivantes : la fonction, le volume, la spatialité intérieure, la matérialité et l'évolution de chaque aile.

Sur base de cette ancienne photo aérienne (figure 66), les ailes de la ferme seront mises les unes après les autres en évidence.



Figure 66 : illustration (s.-d.) de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

3.2.2 L'aile Sud-Est



Figure 67 : mise en évidence du logis de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Il s'agit de l'aile la plus imposante et importante de la ferme, elle est dédiée au logis.

Elle loge un vrai logis double corps qui s'étend sur deux étages en façade (figure 67). Il est doté d'un système symbolique de défense, deux tours d'angle, qui est synonyme de richesse et caractéristique des fermes-châteaux jusqu'au 17^e siècle. Dans ces édifices, y compris la ferme Lemaire, le logis est le bâtiment le plus imposant car c'est à travers ce dernier que la richesse est manifestée.

Le bâtiment est un volume imposant, il mesure 7,3 mètres par 20,1 mètres de longueur et s'étend sur quatre niveaux : les caves, le rez-de-chaussée, l'étage et les combles (figure 68).

La toiture de cette aile est une toiture à croupes, composée de quatre pans en tuiles de terre cuite rouge. Cette toiture fut restaurée durant la deuxième moitié du 20^e siècle, suite à des dégradations causées durant la Deuxième Guerre Mondiale.



Figure 68 : illustration de la façade Nord-Ouest du logis de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 69 : illustration de la différence de matérialité des tours de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Les façades de ce bâtiment sont réalisées à l'aide de trois matériaux : le moellon de grès, la brique et la pierre calcaire pour les encadrements de baies.

Sur la façade Nord-Ouest de l'aile Est, le premier étage est en maçonnerie de briques alors que le rez-de-chaussée est en moellons de grès (cf. figure 68). Les parties supérieures des deux tours d'angle sont elles aussi en maçonnerie de briques, alors que les étages inférieurs sont en maçonnerie de moellons de grès (figure 69).

Selon Monsieur TOURNEUR, cette différence de matériaux témoigne d'un remaniement de la façade au cours du 18^e siècle. Les tours de la façade Sud-Est de l'aile Est semblent avoir été réhaussées, et la façade Nord-Ouest de cette même aile fut quant à elle, complètement retravaillée. Monsieur BRIBOSIA affirme que les baies que présente cette façade sont typiques du 18^e siècle.

De fait, nous pouvons observer une typologie de baie différente sur les deux façades. Nous avons d'une part des baies à traverse (façade Sud-Est) et d'autre part des baies anciennement à croisée, jadis composées d'une traverse et de deux meneaux (façade Nord-Ouest).

A priori, il y a deux hypothèses concernant l'utilisation de la brique : soit elle fut utilisée pour reconstruire un étage car le bâtiment fut soumis aux conditions conflictuelles de la région pollinoise durant le 17^e siècle, soit parce que l'utilisation de la brique est synonyme de richesse à l'époque.

L'organisation spatiale intérieure du bâtiment est celle d'un vrai double corps, divisé en trois travées qui se répètent à chaque étage (figure 70). Au rez-de-chaussée, la porte d'entrée mène au hall d'entrée qui, à l'époque, devait distribuer la cuisine, une arrière pièce et une pièce de réception.

Dès le départ, le logis occupa probablement toute la longueur de l'aile, les anciennes cheminées intérieures sur les pignons témoignent de cette occupation de l'espace (cf. figure 67).

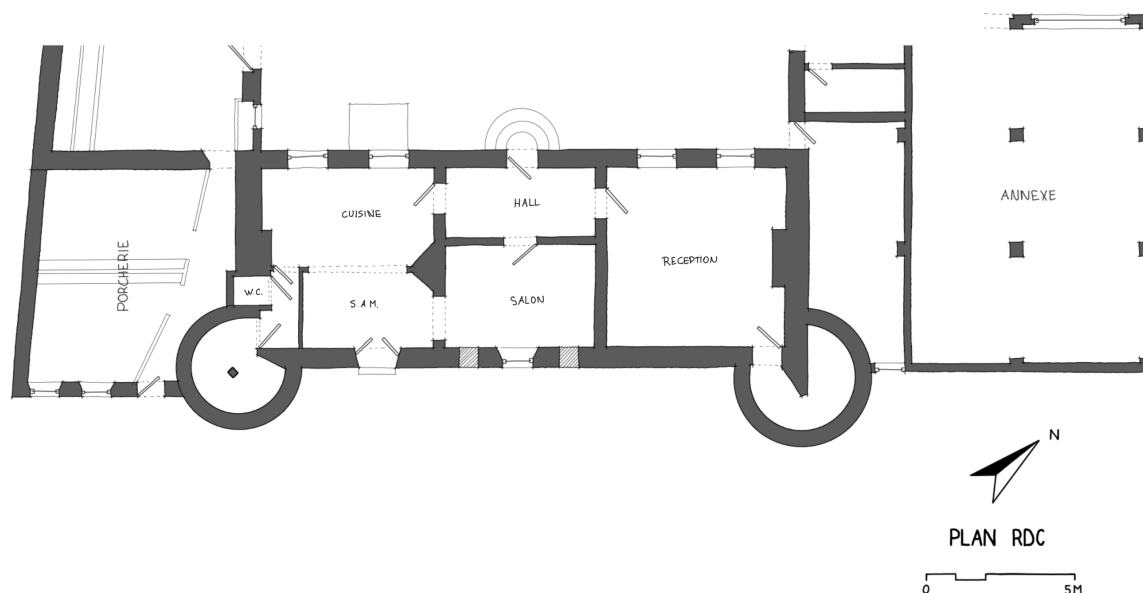


Figure 70 : plan de l'aile Sud-Est de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

En fonction de l'époque, l'aile fut aménagée différemment et utilisée à d'autres égards. Le foyer occupa probablement toujours la même travée, à proximité du bétail. Ce fut notamment le cas durant les 60 dernières années, d'après le témoignage de la propriétaire des lieux, bien qu'une laiterie se logea dans cette même travée il y a 50 ans (figure 71).

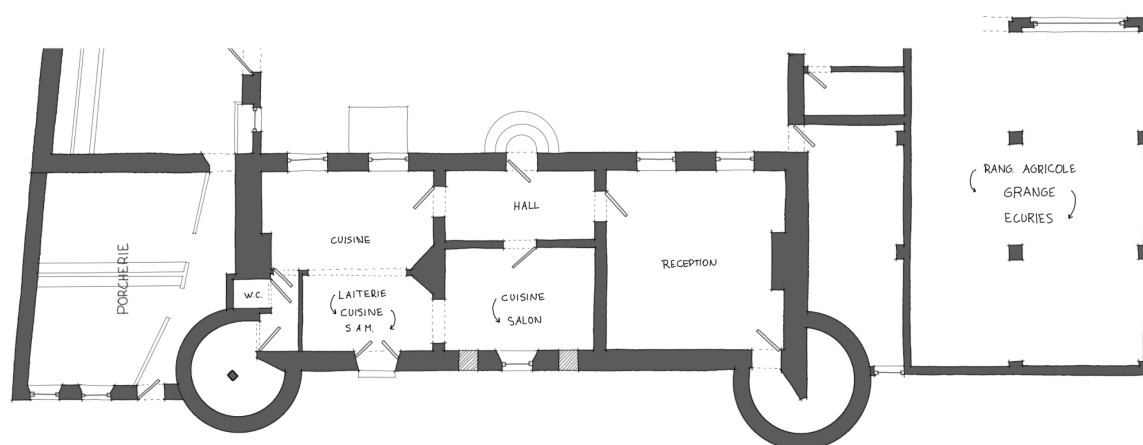


Figure 71 : plan de l'évolution de l'aile Sud-Est de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Le logis a également été sujet à plusieurs interventions extérieures. La toiture fut refaite suite aux dommages causés lors de la Seconde Guerre Mondiale ; plusieurs baies furent rebouchées sur la façade côté jardin pour des raisons qui restent inconnues et d'autres baies furent percées (figure 72). Les têtes de cheminées ont été démontées il y a quelques années car elles risquaient de s'effondrer. Actuellement, une cheminée plus récente se situe au milieu de la toiture (cf. figure 67).



Figure 72 : illustration de baies murées sur la façade Sud-Est de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Une description architectonique des façades de cette aile est présente dans la partie suivante.

3.2.3 L'aile Sud-Ouest



Figure 73 : mise en évidence de la grange de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Il s'agit de l'aile dédiée à la grange et aux étables (figure 73).

Elle mesure 7,5 mètres par 32,1 de longueur et s'étend sur deux étages : les étables, la grange et un appentis au rez-de-chaussée, et des espaces d'engrangement situés au-dessus des étables au premier étage.

La toiture de cette aile est une toiture à croupe unique, elle est composée de trois pans en ardoise en fibrociment (figure 74). La toiture de l'appentis est quant à elle recouverte de tôles ondulées en fibre de ciment (figure 75).



Figures 74 et 75 : illustrations de la façade Nord-Est de la grange de la ferme Lemaire et de son appentis accolé – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 76 : illustration de la matérialité de la façade Nord-Est de la grange de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Les façades de ce bâtiment sont réalisées à l'aide de trois matériaux : majoritairement le moellon de grès, et la brique ainsi que la pierre calcaire pour les encadrements de baies (figure 76). La brique est utilisée pour la majorité des encadrements car ses arrêtes non tranchantes permettaient de réduire le coût de la construction et de ne pas blesser le bétail lorsque celui-ci rentrait aux étables¹⁰⁰. La partie inférieure des jambages du passage charretier est quant à elle réalisée en pierre calcaire afin de résister aux chocs des roues de chariots (figure 77).



Figure 77 : Illustration des piédroits en pierre calcaire du passage charretier de la grange de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

¹⁰⁰ GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.

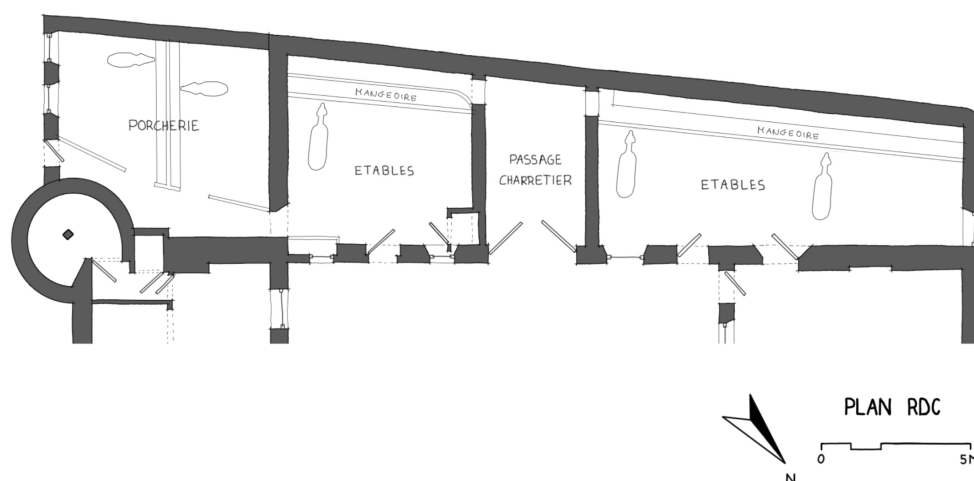


Figure 78 : plan de l'aile Sud-Ouest de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

L'organisation spatiale intérieure de cette aile est divisée en quatre travées. Au rez-de-chaussée, le plan s'organise comme suit : un appentis accolé au bâtiment original ; une première étable sous grange ; un passage charretier sans issue sur double hauteur suivi d'un espace qui sert d'étable sous grange lors de la dernière exploitation (figure 78). L'étage est destiné au fourrage et composé de trois travées : deux planchers de part et d'autre de la double hauteur réservée au passage charretier (figure 79).



Figure 79 : illustration des trois travées de la grange de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Les étables sont dites « en longueur » et sont accessibles depuis la cour grâce à des portes jumelées de baies d'aération (cf. figure 78). Elles communiquent également avec le passage charretier grâce à deux portes situées au fond de celui-ci et qui donnent accès aux anciennes mangeoires (figure 80).



Figure 80 : illustration du passage charretier communiquant avec les étables sous grange - de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Nous observons que les murs du passage charretier sont un mélange de brique et de moellon de grès (figures 81 et 82). Est-ce que ces murs intérieurs témoignent d'une moins grande importance et furent construits avec ces deux matériaux ? Ou s'agissait-il, à l'époque, d'une grange en largeur qui a été réaménagée ?



Figures 81 et 82 : illustrations des murs du passage charretier composés de briques et de moellons – Illustration © Antoine GUSBIN

Cette aile connut quelques modifications. A travers celles-ci, nous observons la création ou l'extension d'une baie existante (figure 83). Malgré la présence de plusieurs types de mortiers sur cette façade, cette baie fut rejointoyée avec un mortier différent (figure 84).

Nous constatons également que les oculi, qui permettaient d'aérer la grange sur étable, furent eux aussi réalisés après construction, selon les témoignages des propriétaires (cf. figure 74)



Figure 83 et 84 : illustrations d'une baie récente, rejointoyée avec un mortier différent de la façade – Illustration © Antoine GUSBIN

Les murs intérieurs des étables furent recouverts d'un enduit de chaux blanc, afin de répondre aux mesures d'hygiène du 19^e siècle. Concernant les planchers en béton sur sommiers métalliques, ils ne sont a priori pas d'origine. Ils furent probablement remplacés dans le courant du 19^e ou du 20^e siècle, alors que les planchers en bois laissent place à des planchers en béton sur sommiers métalliques¹⁰¹ (figures 85 et 86).



Figure 85 et 86 : illustration des murs enduits de chaux et du plancher à sommiers métalliques – Illustration © Antoine GUSBIN

¹⁰¹ GENICOT, L.-F. (coord.) (1987). Pays de Herve. Liège, 227 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2802100750.

En 1947, un appentis est venu se greffer au volume principal de cette aile, et prit la place d'un petit four à pain (figure 87). Cet espace servit ensuite de porcherie et de poulailler.

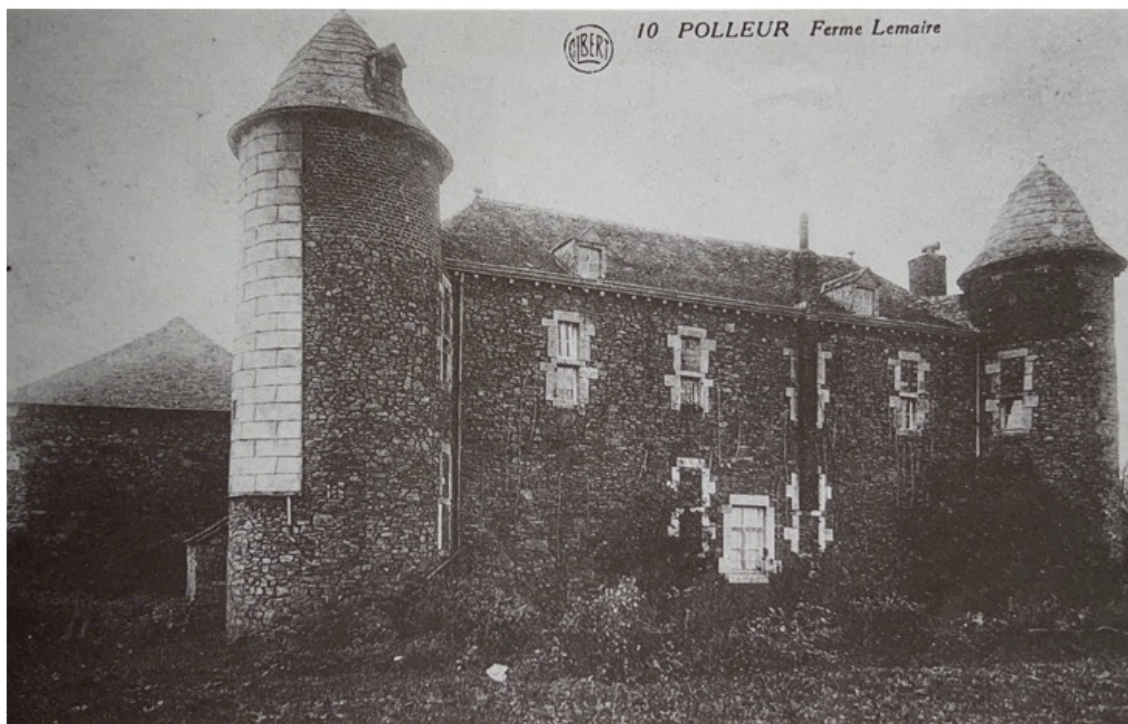


Figure 87 : illustrations de la construction de l'appentis remplaçant le four à pain – Illustration © Antoine GUSBIN

Une description architectonique des façades de cette aile est présente dans la partie suivante.

3.2.4 L'aile Nord-Ouest



Figure 88 : mise en évidence des étables de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Il s'agit de l'aile qui loge l'étable sous fenil (figure 88).

Elle mesure 8,8 mètres par 18 mètres de longueur et s'étend sur deux étages : les étables au rez-de-chaussée et le fenil au premier étage.

La toiture de ce bâtiment est particulière : il s'agit d'une toiture couverte d'ardoises en fibrociment, à croupe unique, à trois pans, à laquelle vient se greffer une toiture à pan unique. Sa forme est le résultat d'un agrandissement du volume durant la seconde moitié du 20^e siècle (figure 92).

Les façades de cette aile sont réalisées avec deux matériaux : le moellon de grès pour les murs et la brique pour les encadrements de baies et la pierre calcaire pour les seuils (figure 89).



Figure 89 : illustration de la façade Sud-Est de la grange de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

L'organisation spatiale intérieure de cette aile est actuellement un plan libre, tant au rez-de-chaussée qu'à l'étage.

A l'époque de la famille de Thier, la physionomie du bâtiment laisse à penser qu'il s'agissait probablement des écuries explique Mathieu BERTRAND.

Lors de la dernière exploitation, l'étable était divisée de manière à accueillir cinq rangées de bovins (figure 90). Les équipements prévus à cet effet sont toujours présents et témoignent de cette organisation (cf. figure 90). Ces rangs sont en largeur, donc perpendiculaires au faîte et ils sont traduits en façade par cinq portes et quatre baies d'aération, elles aussi encadrées de briques.

A travers les siècles, plusieurs animaux ont occupé les lieux : chevaux, ensuite moutons et vaches en lien avec l'herbage et l'économie en vigueur dans la région.

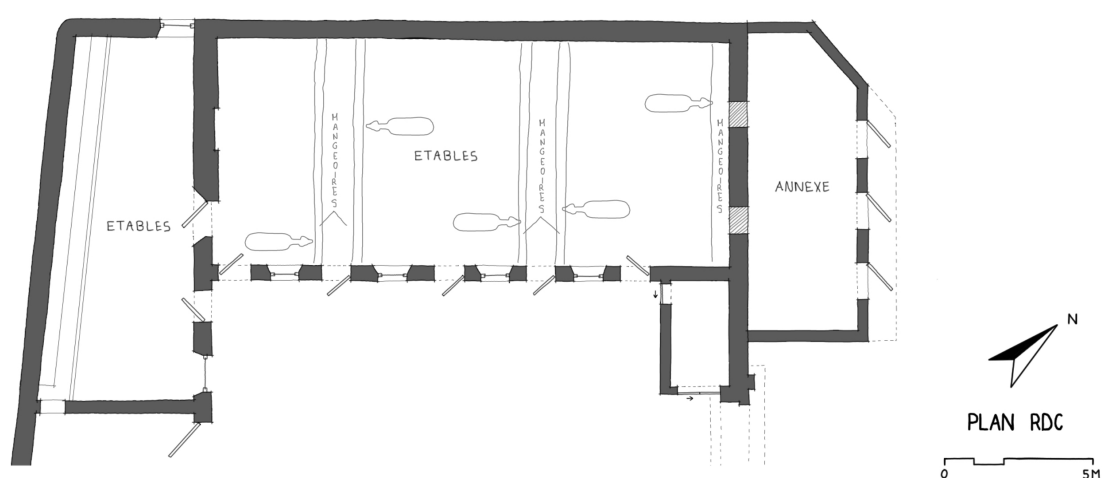


Figure 90 : plan d'étable de l'aile Nord-Ouest de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 91 : illustration de l'agrandissement de l'aile Nord-Ouest de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Ce bâtiment a connu plusieurs transformations.

A l'époque, cette aile était moins profonde. La façade côté cour fut démolie et ensuite reconstruite vers l'an 1935 selon F. Tourneur et les témoignages des propriétaires. La volumétrie intérieure du fenil montre l'ampleur de l'extension et la complexité de la toiture actuelle (figure 91). Avant cette intervention, y avait-il une autre organisation intérieure ?

Le fenil communique avec la cour grâce à trois baies gerbières, dont l'encadrement est en maçonnerie de briques.

Suite à cette extension, la composition du mur diffère des autres : le parement extérieur est en moellon de grès et l'intérieur en brique recouverte d'un enduit de chaux. L'épaisseur de ce mur est de 55 centimètres, alors que les murs en double moellonage varient entre 60 et 65 centimètres. Une coupe illustrant cette différence sera développée dans le chapitre suivant.

Accolé à l'extension, un appentis est venu se greffer à cette aile Nord-Ouest. Il servit entre autres de porcherie, puis de laiterie lors de la dernière exploitation.

Enfin, l'intérieur des étables fut également badigeonné d'un enduit de chaux blanc, pour les mêmes raisons susmentionnées. Les planchers furent eux aussi refaits, probablement au cours du 19^e ou du 20^e siècle (figures 92 et 93).



Figure 92 : illustration du plancher à sommiers métalliques dans l'étable de l'aile Nord-Ouest – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 93 : illustration des murs enduits de chaux dans l'étable de l'aile Nord-Ouest – Illustration © Antoine GUSBIN

Une description architectonique des façades de cette aile est présente dans la partie suivante.

3.2.5 Aile Nord-Est



Figure 94 : illustration du porche clôturant le périmètre bâti de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Le périmètre bâti de cette ferme est clos par un porche, réalisé en maçonnerie de moellons de grès et de briques, comprenant une arche réalisée de pierres naturelles de calcaire (figure 94 et 95).



Figure 95 : illustration de la porte du porche, encadrée d'une arche en pierres de calcaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Deux annexes agricoles sont construites en dehors de l'enceinte : un hangar construit en 1959 qui servit à stocker le matériel agricole et à souffler les tourteaux ; ainsi qu'une seconde annexe qui servit de cuve avant d'être réaffectée en étables (figure 96 et 97). Elles furent toutes deux construites en maçonnerie de briques.



Figure 96 : illustration (s.-d.) d'un hangar construit en 1959 – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 97 : illustration (2019) des anciennes étables sous bâtière – Illustration © Antoine GUSBIN

Il faut également mentionner les deux autres apprentis : la porcherie et la laiterie dans la cour, elle aussi en maçonnerie de brique.

Le four est lui aussi à l'extérieur du périmètre bâti et est construit avec un mur mixte composé de brique à l'intérieur et de moellons à l'extérieur (cf. figure 71).

3.3 Description architectonique des façades

Vous trouverez sur les pages suivantes, une description architectonique de chaque façade de la ferme Lemaire.

3.3.1 Façade Nord-Ouest



Fonction :

Corps de logis (aile Sud-Est)

Composition :

Façade de deux niveaux sous bâtière à croupes, organisée en un double corps ordonnancé en cinq travées de baies de typologie appartenant au 18^e siècle. La travée principale, au centre, est percée par une porte d'entrée légèrement surélevée et précédée de trois marches en demi-cercle. La porte est inscrite dans un encadrement rectangulaire à refends et est enrichie d'une baie d'imposte ovale surmontée par une fenêtre rectangulaire à refends, dotée à l'origine d'une croisée. De part et d'autre de la travée axiale, deux paires de baies analogues, anciennement à croisée, viennent éclairer les deux registres de la façade. Leur partie inférieure présente une feuillure et la partie supérieure des traces d'anciens barreaux.

Une entrée de cave se greffe au bas de la première travée droite.

Le premier niveau suit ce même ordonnancement en cinq travées de baies, mais semble remanié et la toiture est épinglée en son centre par une lucarne à fronton triangulaire en bois.

Matérialité :

Le premier niveau et l'entrée de cave sont en maçonnerie de moellons de grès, mis en œuvre de manière homogène et assisée avec des niveaux d'arase apparents. Ils sont maçonnés avec un mortier de chaux et rejointoyés par du ciment. Le second niveau est en maçonnerie de briques rouges à appareillage vertical, rejointoyée de ciment. La toiture est couverte de tuiles en « S » rouges. Un cheneau, récent, en ardoises sépare le mur de façade et la toiture.

L'ensemble des baies sont encadrées par des piédroits, des appuis non-saillants et des linteaux en pierre calcaire givétien, provenant probablement de la Vesdre. Certains éléments d'encadrement furent remplacés par du petit granit. Les baies présentent des châssis récents en PVC, double vitrage, dans lequel se trouvent des croisillons. Les marches précédant la porte sont en pierre calcaire de Vesdre, comme les piédroits de l'entrée de cave. Le linteau en forme d'arc est en petit granit. La porte d'entrée et le châssis de la baie d'imposte qui la surmonte, sont en bois de ton foncé. Entre chaque travée, des ancrs à double volute sont présentes.

3.3.2 Façade Nord-Est



Fonction :

Corps de logis (aile Sud-Est)

Composition :

Façade de deux niveaux sous bâtière à croupes. Elle est éclairée par deux baies à traverse de typologie appartenant au 17^e siècle, dont les jours sont murés. Le rez-de-chaussée (non illustré) ne comprend aucune baie.

Une tour circulaire vient ponctuer l'angle de la façade et est creusée par des meurtrières et une baie carrée. La tour d'angle est dotée d'une toiture en poivrière.

Matérialité :

Le premier niveau de la façade et les deux niveaux de la tour sont en maçonnerie de moellons de grès. Le premier niveau de la façade est recouvert d'un enduit blanc de chaux et les deux niveaux de la tour sont maçonnés avec un mortier de chaux et rejointoyés par un mortier de même nature. Le second niveau est en maçonnerie de briques rouges à appareillage vertical, rejointoyée de ciment. La façade est affermie par des chaînages d'angle en calcaire givétien. La bâtière à croupes est couverte de tuiles en « S » rouges, alors que la toiture de la tour est couverte d'ardoises galbées.

L'ensemble des baies sont encadrées par des piédroits, des appuis non-saillants et des linteaux en pierre calcaire givétien, provenant probablement de la Vesdre.

Les jours ont été murés de moellons de grès.

La façade est agrémentée d'ancres d'origine, à double volute.

3.3.3 Façade Sud-Est



Fonction :

Corps de logis (aile Sud-Est)

Composition :

La façade arrière reproduit le double corps à deux niveaux de la façade principale. Elle est éclairée par des baies à traverse de typologie appartenant au 17^e siècle, dont certains jours sont murés. Le rez-de-chaussée est percé dans l'axe et dans sa travée gauche par des baies plus récentes.

Deux tours circulaires viennent ponctuer les angles de la façade et sont creusés par des jours analogues et partiellement murés. Elles sont dotées de toitures en poivrière.

En toiture, deux lucarnes à fronton triangulaire éclairent les combles.

Matérialité :

La façade et le premier niveau des tours sont en maçonnerie de moellons de grès mise en œuvre de manière homogène et assisée, avec niveaux d'arase apparents, et maçonnée avec un mortier de chaux, récemment rejointoyés par du ciment. Le second niveau des tours est en maçonnerie de briques rouges rejointoyées au ciment qui présente un développement de lichen partiel.

Les toitures de ces tours sont recouvertes d'ardoises galbées, alors que la toiture du double corps est recouverte de tuiles en « S » rouges. Un cheneau, récent, en ardoises sépare le mur de la façade et la toiture.

L'ensemble des baies à traverse sont encadrées par des jambages, des appuis non-saillants et des linteaux en pierre calcaire, provenant probablement de la Vesdre. Ils présentent des châssis en PVC de ton foncé, double vitrage.

La porte de la travée gauche est encadrée de piédroits en briques, d'un linteau en béton et d'un seuil en pierre calcaire de Meuse. Elle comprend un châssis en bois de ton foncé, double vitrage.

Dans l'axe, la récente fenêtre est encadrée de piédroit, d'un linteau et d'un appui en pierre calcaire. Elle comprend un châssis en PVC, double vitrage, protégé par un volet en plastique. Certains jours ont été murés de moellons de grès ou de briques rouges.

La façade est agrémentée d'ancres d'origine, à double volute.

3.3.4 Façade Nord-Est



Fonction :

Grange et étables sous grange (aile Sud-Ouest)

Composition :

Grange et étables présentant une façade de deux niveaux, ordonnancée en six travées asymétriques sous une bâtière à croupes piquée de chatières de ventilation. La travée principale est agrémentée d'un passage charretier à l'arc en anse de panier. La travée gauche est creusée par une porte d'étable à arc légèrement surbaissé entre deux baies d'aération de même composition. A droite, les deux dernières travées présentent une baie d'aération plus large et plus récente ainsi qu'une porte d'étable. Le registre supérieur est rythmé par neuf oculi à intervalle plus ou moins régulier.

Matérialité :

Les deux niveaux sont en maçonnerie de moellons de grès mis en œuvre de manière assez hétérogène et est rejointoyée par plusieurs types de mortier : ciment, ferrugineux, à la chaux, chaux et brique (et au charbon ?). La toiture est couverte d'ardoises en fibrociment.

L'ensemble des baies sont pourvues d'encadrements en briques. Elles présentent d'anciens châssis métalliques à croisillons, simple vitrage.

Les portes d'étable sont en bois peintes en blanc. La porte du passage charretier est en bois peinte en blanc et est encadrée de piédroits dont la base est en pierre calcaire de Vesdre jusqu'à mi-hauteur.

3.3.5 Façade Sud-Ouest



Fonction :

Grange et étables sous grange

Composition :

Façade arrière de la grange et de ses étables, couverte par une bâtière à croupe unique soulignée par une corniche et des trous de boulin. Elle est sobrement percée dans son deuxième niveau par une unique gerbière dont le linteau est un arc fortement surbaissé. Une annexe aveugle et sous appentis perpendiculaire vient s'adosser au volume principal.

Matérialité :

Les deux niveaux sont en maçonnerie de moellons de grès assisée, mélangée à quelques pierres calcaires réemployées, et maçonnée par un mortier de chaux. La façade est affermie par des chaînages d'angle en calcaire recyclé. La toiture de la grange et des étables est couverte d'ardoises en fibrociment et la toiture de l'appentis est couverte de tôles en fibrociment amiantées.

La gerbière est dotée d'un encadrement de briques. Elle est fermée par une porte en bois de ton foncé.

3.3.6 Façade Sud-Est



Fonction :

Étables sous fenil (aile Nord-Ouest)

Composition :

Façade présentant des étables sous fenil en bâtière à croupe unique piquée de chatières de ventilation et prolongée par une toiture à faible pente. Le rez-de-chaussée est ouvert par cinq portes et est éclairés par quatre fenêtres d'aération. L'étage est creusé de gerbières analogues sous trous de boulin et corniche débordante.

Matérialité :

Les deux niveaux sont en maçonnerie de moellons de grès mis en œuvre de manière plus ou moins assisée et est rejointoyée par plusieurs types de mortier : ciment et chaux.

La toiture est couverte d'ardoises en fibrociment et bordée d'un cheneau récent en ardoises naturelles.

L'ensemble des baies sont encadrées par des jambages et des arcs surbaissés en briques alors que les appuis sont en petit granit.

Les trois portes du milieu sont composées de deux ouvrants en acier repeints en blanc, celles aux extrémités d'une simple porte en bois repeint en blanc.

Tous les jambages des portes d'étable sont recouverts en partie basse d'un enduit de ciment.

Les baies d'aération présentent d'anciens châssis métalliques à croisillons, simple vitrage.

La façade est agrémentée d'ancres à double volute au premier étage et d'ancres rondes au rez-de-chaussée.

3.3.7 Façade Nord-Est



Fonction :

Corps de logis (aile Nord-Ouest)

Composition :

Façade de deux niveaux sous bâtière à croupe unique prolongée par une toiture plus récente à faible pente. Elle présente au premier niveau une porte d'étable et une baie toutes deux murées. Au second niveau, une baie gerbière est également murée.

Le registre supérieur est rythmé par trois oculi à intervalle plus ou moins régulier.

Matérialité :

Les deux niveaux sont en maçonnerie de moellons de grès mis en œuvre de manière plus ou moins assisée et est rejointoyée par plusieurs types de mortier : ciment et chaux.

La toiture est couverte d'ardoises en fibrociment et bordée d'un cheneau récent en ardoises naturelles.

La bâtière à croupe est couverte d'ardoises en fibrociment, alors que la toiture plus récente est recouverte d'ardoises naturelles.

L'ensemble des baies sont encadrées par des piédroits, des appuis et des linteaux en arc en briques. Les jours ont été murés de moellons de grès.

La façade est affermie par des chaînages d'angle en briques.

3.3.8 Façade Nord-Ouest



Fonction :

Étables sous fenil (aile Nord-Ouest)

Composition :

Façade arrière des étables sous fenil couverte par une bâtière à croupe unique soulignée par une corniche et des trous de boulin. Elle est sobrement percée dans son premier niveau par une unique baie d'aération à l'arc surbaissé.

Au rez-de-chaussée, la façade présente six trous d'aération.

Matérialité :

Les deux niveaux sont en maçonnerie de moellons de grès et est rejointoyée par un mortier de chaux.

La toiture du fenil est couverte d'ardoises en fibrociment.

La baie est encadrée par des jambages et un linteau à arc surbaissé en briques ainsi que d'un appui en petit granit.

La façade est agrémentée d'ancres à double volute sous corniche et d'ancres rondes au rez-de-chaussée.

3.4 Matérialité des murs du cas d'étude

Sur base des données relevées in situ, notamment en la compagnie de Monsieur TOURNEUR, une hypothèse quant à la composition des murs de la ferme a pu être émise.

Bien qu'il y ait eu une série d'intervention au fil du temps, les murs de la ferme sont globalement construits de manière homogène. Ils sont construits en un double parement de moellons, rempli de blocage, et maçonnés avec un mortier de pose de chaux et ensuite rejointoyés avec un mortier de chaux plus riche. Leur épaisseur varie entre 55 et 65 centimètres selon l'endroit. Cette composition est vérifiable sur plusieurs ailes car la plupart des murs sont nus sur leurs deux faces. Quelques récentes ouvertures permettent d'entrevoir la composition du blocage situé entre les deux parements.

3.4.1 Composition du mur

La majorité du parement extérieur des façades étudiées est un appareillage de moellons posés en lit, de manière assisée, avec des hauteurs d'arrase d'environ 20 centimètres. Selon les observations réalisées sur place, il semblerait que les moellons furent extraits d'une source commune, bien qu'il y ait une gamme chromatique variée. Cette différence de couleur peut être due aux différents lits d'une même source : ils peuvent varier d'épaisseur et donner des moellons de dimensions et de couleur différentes. Cette source commune se situait probablement dans les quelques kilomètres autour de la ferme Lemaire.

De manière ponctuelle, il y a des éléments de différentes natures qui sont insérées dans la maçonnerie (pierre calcaire réutilisée, petit granit, bois). Nous remarquons également quelques éléments posés en délit, soit parallèles soit perpendiculaires au plan de la façade.

Enfin, certaines traces de badigeon de chaux sont présentes par endroit, notamment sur la façade sud-est des étables sous fenil (aile Nord-Ouest).

Les encadrements de ces murs de façades sont réalisés en pierre calcaire de Vesdre de la région (probablement des anciennes carrières présentes à Verviers, Pepinster ou la Reid), parfois accompagné de petit granit, ou de brique.

Tous ces éléments, qui composent les façades, sont reliés grâce à un mortier, principalement à base de chaux. En effet, grâce aux observations réalisées à la loupe, en présence de Monsieur TOURNEUR, nous avons pu constater que le mortier principalement utilisé lors de la construction de cet édifice est le mortier à base de chaux, chargé de sable de rivière.

L'ambition d'envoyer une série d'échantillons de mortier en laboratoire n'ayant pu être réalisée, la composition de plusieurs autres mortiers fut analysée à la loupe, in situ, à plusieurs reprises lors des visites de Monsieur TOURNEUR.

Les autres mortiers batards, utilisés de manière plus ou moins ponctuelle, sont :

- Un mortier récent de ciment présentant un développement partiel végétal (lichen),
- Un mortier de couleur violette, probablement à base de chaux et de charge ferrugineuse,
- Un mortier à base de chaux, mélangé grossièrement à de la brique de terre cuite pilée,
- Un mortier à base de chaux, chargé de grains grenus et sombres (probablement un mélange de quartz et de sable).

3.4.2 Illustrations en coupe

Les deux coupes suivantes représentent la composition d'un mur d'origine du mur Nord-Est de l'aile Sud-Ouest (60 cm) (coupe A-A) et la composition de la façade Sud-Est des étables sous fenil de l'aile Nord-Ouest (55 cm) (coupe B-B), construit plus récemment.

Ci-dessous, un plan permettant de situer les coupes (figure 98).

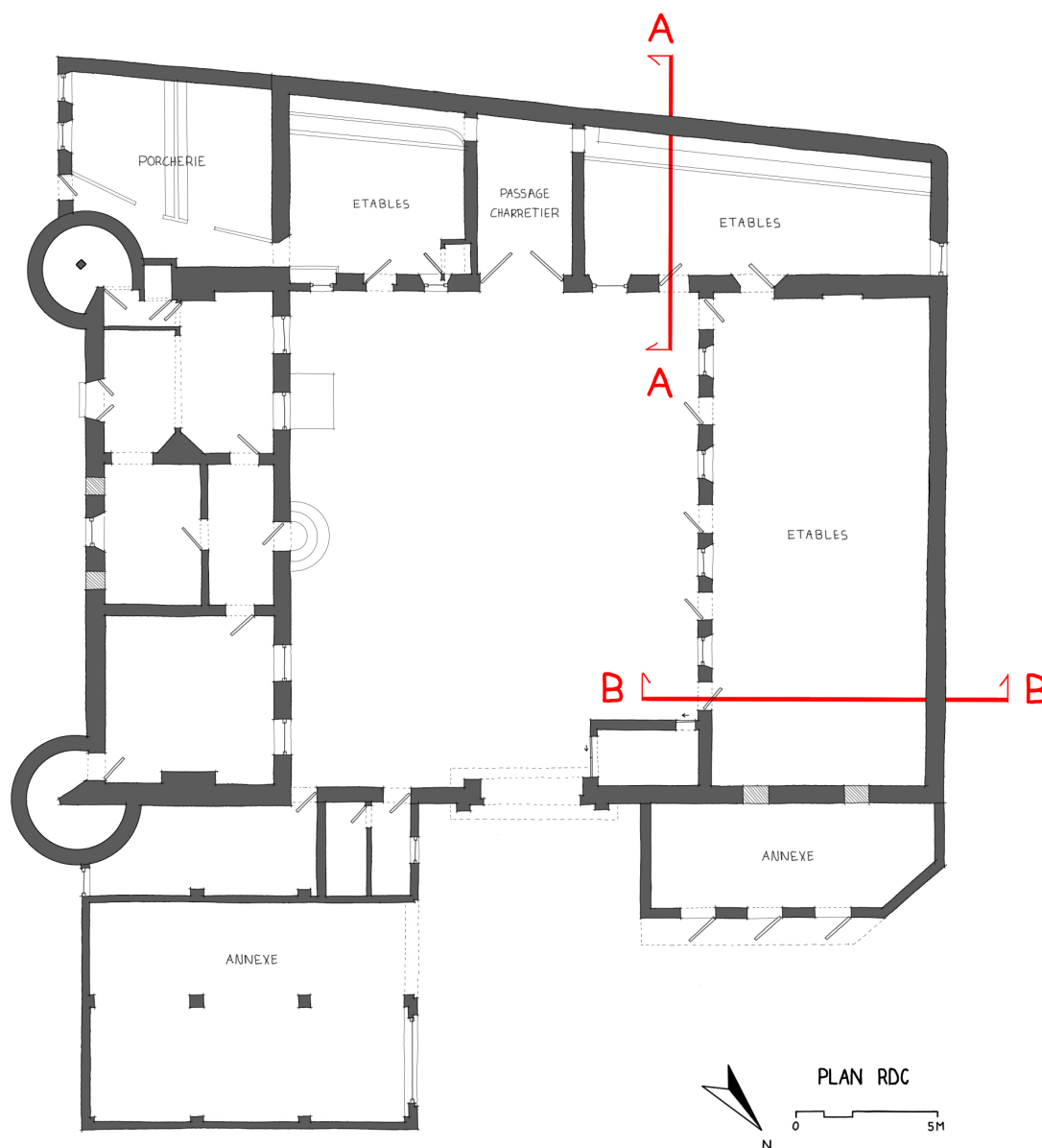


Figure 98 : plan situant les coupes A-A et B-B – Illustration © Antoine GUSBIN

La coupe A-A (figure 99) représente une paroi d'origine. Il s'agit d'un mur constitué d'un double parement de moellons de grès, d'une épaisseur de 62 centimètres maçonné à l'aide d'un mortier à base de chaux.

Le revêtement de sol du rez-de-chaussée est composé d'une dalle de brique posées sur face.

Les ouvertures comprennent une porte en bois, encadrée par un seuil en pierre calcaire, des piédroits en briques et un arc cintré en brique légèrement surbaissé, et un oculus dont l'encadrement est en briques. Les pièces soutenant la maçonnerie sont deux linteaux en bois à chaque ouverture.

Le plancher comprend une série de sommiers métalliques (16x8), d'un entre-axe de 80 cm, comblés de voussettes en briques, qui se logent dans la maçonnerie de moellons. Il est complété par une chape en béton.

La toiture repose sur des fermes de charpente qui se logent également dans la maçonnerie. Ces fermes reprennent des poutres sur lesquelles reposent des gites, sur lesquels reposent des planches qui supportent la couverture de toiture et des ardoises en fibrociment.

La coupe B-B (figure 100) représente une paroi plus récente. Il s'agit d'un mur constitué d'un double parement de moellon de grès, d'une épaisseur de 52 centimètres maçonné à l'aide d'un mortier à base de chaux.

Le revêtement de sol du rez-de-chaussée est composé de plusieurs allées en briques posées sur face.

Les ouvertures comprennent une porte en bois, encadrée par un seuil en béton présentant une pente, des piédroits en briques enduit de ciment et un arc cintré en brique légèrement surbaissé, et une baie gerbière encadrée par un appui en pierre calcaire, des piédroits et un arc surbaissé en briques. Les pièces soutenant la maçonnerie sont deux profilés « H » en acier (12x12) pour la porte et deux linteaux en bois pour la baie gerbière.

Le plancher comprend une série de sommiers métalliques (16x8), d'un entre-axe de 80 cm, comblés de voutes en briques, qui se logent dans la maçonnerie de moellons. Il est complété par une chape en béton.

La toiture récente repose sur des fermes de charpente moisées qui se logent également dans la maçonnerie. Ces fermes reprennent des poutres sur lesquelles reposent des gites, sur lesquels reposent des planches qui supportent la couverture de toiture, des ardoises naturelles et en fibrociment.

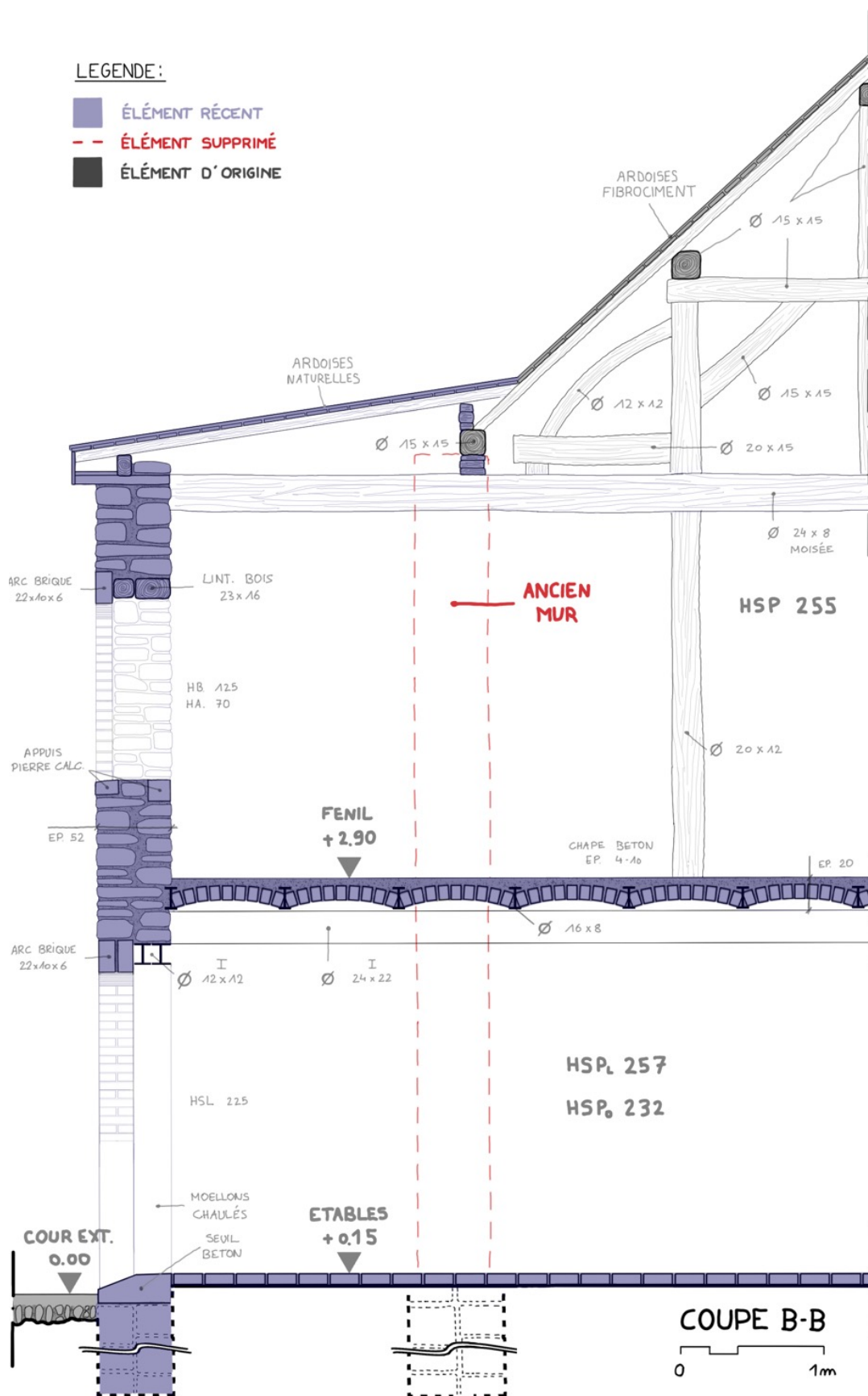


Figure 100 : coupe d'un mur récent de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Nous observons une différence au niveau de la forme des deux coupes. Elle est le fruit d'un agrandissement de l'aile durant la seconde moitié du 20^e siècle.

Hormis cette différence formelle, nous pouvons observer que la charpente présente une charpente à ferme assemblée similaire.

Comme l'illustre la coupe schématique suivante (figure 101), la charpente d'origine est composée de pannes faitières, intermédiaires et sablières ; d'un poteau soutenant un faux-entrait soutenant lui-même un poinçon, renforcés par des jambes de force et un blochet. Dans le cas d'une ferme de croupe, une poutre principale prend la place des blochets et libère le plan de tout poteau, et soutient deux poinçons, deux jambes de force et un faux entrait.

La charpente remaniée présente la même composition que celle d'origine, et présente une poutre moisée, un poinçon et un aisselier supplémentaires.

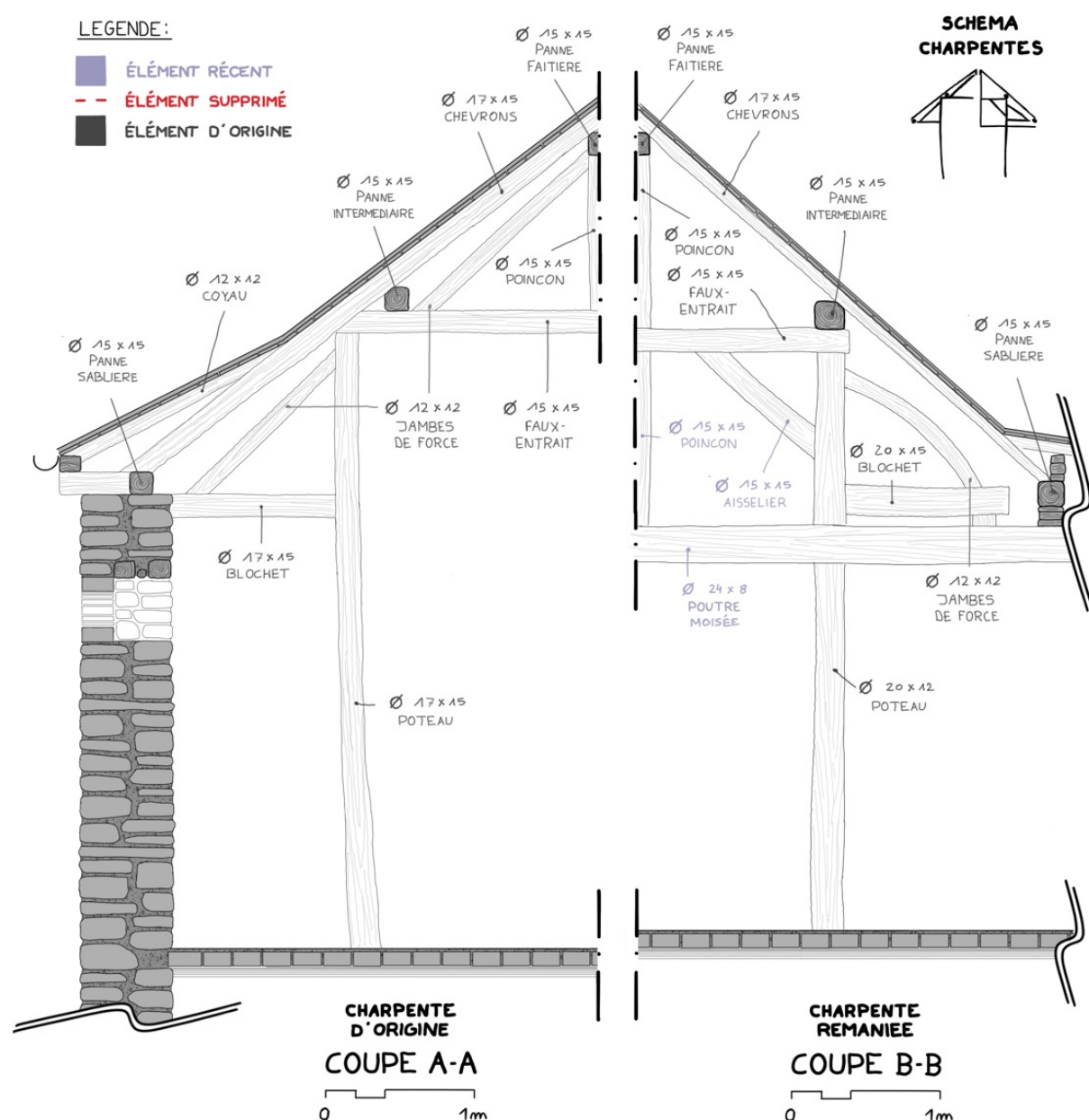


Figure 101 : coupe illustrant les charpentes de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

3.5 Propriétés du mur

Sur base de toutes ces informations et observations, nous pouvons désormais appréhender la composition principale des murs de la ferme :

- Un double parement en moellons de grès,
- Et un blocage à base de mortier de chaux.

3.5.1 Grès et ses propriétés

Les grès sont des roches sédimentaires détritiques, constituées principalement de quartz, une forme de silice très dure, qui donne aux grès leur dureté et leur résistance (compression, intempéries, pollution). Ils s'identifient généralement par la nature du ciment qui relie ses grains : grès siliceux (ciment à base de silice), grès argileux (à base d'argile), grès calcaire (à base de calcaire) et grès ferrugineux (à base d'oxyde ou d'hydroxyde de fer).

On retrouve les grès dans la majeure partie de l'Ardenne, mais plus massivement en bordure nord de la région et au nord du Synclinorium de Dinant. En Wallonie, les grès les plus exploités sont ceux du Famennien. En Ardennes, le grès schisteux.

Autrefois ; cette roche assura la base des constructions. Au fil du temps, elle fut utilisée pour l'entièreté des ouvrages, généralement sous forme de moellons grossiers ou de pavés, mais jamais en tant que pierre de taille à cause de sa forte abrasivité.

Les grès sont associés à une roche dure, de grande densité et qui présente une gamme colorimétrique variée allant du gris-vert à l'ocre, en passant par le gris-bleu, le jaune, le beige, le brun. Avec une masse volumique estimée entre 2000 et 2750 kg/m³, ils sont réputés pour leur haute inertie, leur résistance à la compression¹⁰², mais également pour leur excellent comportement face à l'usure et aux altérations atmosphériques (pollution, intempéries, gélivité nulle...). Enfin, il présente une faible porosité estimée à quelques pourcents de son volume.

A la page suivante, les priorités des grès sont résumées dans un tableau (figure 102), réalisé par A. Gusbin, sur base des sources suivantes :

- Site internet de la carrière de la Hazotte¹⁰³,
- Site internet de la carrière GBA¹⁰⁴,
- Note d'Information Technique NIT n° 205 du CSTC¹⁰⁵,
- Et l'ouvrage de CNUDE, C., HAROTIN, J.J., MAJOT, J.-P. (1990). Pierres et Marbres de Wallonie¹⁰⁶.

Le grès schisteux étant majoritairement utilisé en Ardenne Herbagère, nous prendrons en considération ses caractéristiques. Bien qu'elles soient incomplètes, nous pouvons grâce aux

¹⁰² CSTC. (1997). NIT 205 : pierres naturelles. En ligne : <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/NIT%20205.pdf>

¹⁰³ Carrière de la Hazotte. En ligne : <https://www.hazotte.be/pdf/fiches/fr/moellons-gres-neuf.pdf>

¹⁰⁴ Carrière GBA. En ligne : <https://carrieregba.be/le-gres/>

¹⁰⁵ CSTC. (1997). NIT 205 : pierres naturelles. En ligne : <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/NIT%20205.pdf>

¹⁰⁶ CNUDE, C., HAROTIN, J.-J., MAJOT, J.-P. (1990). Pierres et Marbres de Wallonie. Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles. 184 pages. ISBN 2871430683

données relatives au grès Famennien, avoir une idée de sa porosité et sa conductivité thermique.

DENOMINATION					
	Grès Famennien	Grès Famennien	Grès	Grès Famennien	Grès Schisteux
Masse volumique (kg/m ³)	2580	2540	2000 - 2500	2680	2600 - 2750
Porosité (volume %)	<0,5	0,9	0 - 25	0,79	NR
Résistance compression (N/mm ²)	240	180	19 - 290	300	250
Résistance flexion (N/mm ²)	39,7	33,7	NR	NR	NR
Résistance au gel	non - gélif	NR	NR	non - gélif	non - gélif
Conductivité thermique (W/mK)	NR	2,3	NR	NR	NR
Sources	Carrière de la HAZOTTE https://www.hazotte.be/pdf/fiches/fr/moellons-gres-neuf.pdf	GBA Carrière https://carrieregb.a.be/le-gres/	CSTC NIT 205 : Pierres naturelles http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualites/doc/NIT%20205.pdf	Cnudde, C., Harotin, J.J., Majot, J.P. (1990) « Pierres et Marbres de Wallonie » Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles. 184 pages. ISBN 2871430683	

Figure 102 : tableau récapitulatif des propriétés des grès – Illustration © Antoine GUSBIN

3.5.2 Mortier de chaux et ses propriétés

Le mortier le plus communément utilisé jusqu'au 20^e siècle était à base de chaux. Le parc bâti wallon d'avant-guerre fut notamment construit, mais également rejointoyé et badigeonné avec le mortier de chaux.

Une thèse de doctorat concernant les mortiers de bâtiments historiques en Belgique¹⁰⁷ démontre qu'à l'époque, ce mortier est composé de chaux grossière et de sable humide, et généralement accompagné de divers agrégats ou matériaux organiques locaux. La nature de la chaux dépend, à l'époque, des roches extraites et varie d'une région à l'autre.

Contrairement aux mortiers actuels en ciment, le mortier de chaux fait preuve d'une certaine souplesse et d'une capacité hygroscopique permettant d'atténuer les problèmes d'humidité et de condensation dans le bâti d'avant-guerre. En effet, il joue un rôle fondamental dans les performances hygrothermiques du bâti ancien.

A la page suivante, les priorités du mortier de chaux sont résumées dans un tableau (figure 103) de l'Annexe 7 : document de référence pour les pertes par transmission¹⁰⁸.

¹⁰⁷ CALLEBAUT, K. (2000). Characterisation of historical lime mortars in Belgium : implication for restoration mortar, unpublished PhD-thesis, K.U.Leuven.

¹⁰⁸ DEMOTTE, R., ANTOINE, A. (2008). Annexe 7 : Document de référence pour les pertes par transmission.

Tableau A.12 – Enduits <i>La chaleur massique c vaut 1000 J/(kg.K)</i>				
Enduits	Masse volumique ρ (kg/m³)	λ_{ui} W/(m.K)	λ_{ue} W/(m.K)	
Mortier de ciment	1 900	0.93	1.50	
Mortier de chaux	1 600	0.70	1.20	
Plâtre	1 300	0.52	(1)	
(1) L'exposition directe de ces matériaux aux conditions climatiques extérieures, avec entre autre un risque d'humidification par la pluie, n'est en règle générale pas recommandée.				

Figure 103 : tableau récapitulatif des propriétés de la chaux– Source © DEMOTTE, R. & al. (2008). Annexe 7

3.5.3 Performance du mur

Nous estimerons que la composition du mur est la suivante :

- Parement extérieur d'une épaisseur de 25 centimètres, composé à 90 % de moellons de grès et 10 % de mortier de chaux,
- Blocage entre parements d'une épaisseur de 10 centimètres, dont la composition pourrait être estimée de 70 % de mortier de chaux et de 30 % de gravats,
- Parement intérieur d'une épaisseur de 25 centimètres, composé à 90 % de moellons de grès et 10 % de mortier de chaux.

Sur base des données propres à chaque matériaux, regroupées dans le tableau de la page suivante (figure 104), réalisé par A. Gusbin, nous pouvons calculer les valeurs R de résistance thermique ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$) et U de coefficient de transmission thermique ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

Les formules sont les suivantes :

- $\text{Valeur } R = \frac{e}{\lambda}$ où e est l'épaisseur en m et λ est la conductivité en $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$.
- $\text{Valeur } U = \frac{1}{R}$ où R est la résistance thermique en $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$.

Rappelons que :

- $\lambda_{\text{grès}} = 2,3 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$
- $\lambda_{\text{chaux}} = 0,95 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$

La valeur R d'un mur du cas d'étude $R_{\text{parement ext.}} + R_{\text{blocage}} + R_{\text{parement int.}}$ où :

- $R_{\text{parement ext.}} = \frac{90\% \cdot 0,25 \text{ m}}{2,3 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{10\% \cdot 0,25 \text{ m}}{0,95 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,098 + 0,026 = 0,124 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
- $R_{\text{blocage}} = \frac{30\% \cdot 0,1 \text{ m}}{2,3 \text{ W}/\text{mK}} + \frac{70\% \cdot 0,1 \text{ m}}{0,95 \text{ W}/\text{mK}} = 0,013 + 0,074 = 0,087 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
- $R_{\text{parement int.}} = \frac{90\% \cdot 0,25 \text{ m}}{2,3 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{10\% \cdot 0,25 \text{ m}}{0,95 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 0,098 + 0,026 = 0,124 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

La valeur R d'un mur d'origine du cas d'étude $= R_{\text{parement ext.}} + R_{\text{blocage}} + R_{\text{parement int.}}$
 $= 0,335 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

La valeur U d'un mur d'origine du cas d'étude vaut alors $\frac{1}{R} = \frac{1}{0,335}$
 $= 2,99 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

MATERIAUX			
Mortier de chaux		Grès	
C A R A C T E R I S T I Q U E S	Masse volumique (kg/m ³)	1600	2600 - 2750
	Conductivité thermique (W/mK) ...		
	... intérieure	0,7	NR
	... extérieur	1,2	NR
	... moyenne	0,95	2,3
Sources		DEMOTTE, R., ANTOINE, A. (2008). Annexe 7 : Document de référence pour les pertes par transmission. En ligne : https://energie.wallonie.be/ser- vlet/Repository/annexe-7 --- fr.pdf?ID=12572	
		GBA Carrière https://carrieregba.be/e-gres/ Cnudde, C., Harotin, J.J., Majot, J.P. (1990) « Pierres et Marbres de Wallonie » Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles. 184 pages. ISBN 2871430683	

Figure 104 : tableau récapitulatif des propriétés des composants principaux des murs de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Comparons tout de même ces valeurs obtenues après calcul, avec la modélisation d'un mur de même composition sur l'outil TOTEM¹⁰⁹ (figure 105).

A défaut de ne pas pouvoir proposer de moellons de grès posés sur mortier de chaux, l'outil calculera la performance du mur avec des moellons de grès posés sur mortier de ciment.

Composant(s)				
EXT	C1		Mur intérieur - porteur Partie primaire	
			Moellons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment	
			Nouveau	∞ ≥ 60 ans
				↓ 0.25 m
				R 0.152 m²K/W
INT	C2		Finition de sol Structure portante	
			Chape Mortier de chaux-trass (100 mm)	
			Nouveau	∞ ≥ 60 ans
				↓ 0.1 m
				R 0.143 m²K/W
INT	C3		Mur intérieur - porteur Partie primaire	
			Moellons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment	
			Nouveau	∞ ≥ 60 ans
				↓ 0.25 m
				R 0.152 m²K/W
Total			0.6 m	
			U 1.62 W/m²K	

Figure 105 : modélisation d'un mur de la ferme Lemaire et de sa performance – Source © TOTEM

Avec cette modélisation, nous constatons une meilleure performance du mur étudié. Étant donné que l'outil calcule de manière plus approfondie, en se basant sur plus de données, le calcul de la performance du mur réalisé à la page 121 ne sera finalement pas pris en considération.

Nous considérerons que :

La valeur R d'un mur d'origine du cas d'étude = 0,447 m².K/W

La valeur U d'un mur d'origine du cas d'étude vaut alors = 1,62 W/m².K

¹⁰⁹ Outil en ligne permettant notamment de calculer la performance, le potentiel de réemploi et l'impact environnemental d'une solution architecturale. En ligne : <https://www.totem-building.be/welcome.xhtml>

3.6 Tests d'humidité

3.6.1 Méthodologie

Dans le cadre de ce travail, la récolte de données concernant l'humidité présente dans certains murs est nécessaire afin d'étudier le comportement des murs de la ferme face aux conditions climatiques auxquelles ils sont soumis durant une année ; et comprendre ainsi que vérifier la relation qui existe entre la météo et la quantité d'eau présente dans les murs.

Ces prises de mesure permettent de relever des données propres à un facteur hygrothermique qui influencera les itérations de solutions d'isolation proposées à la fin de ce présent travail.

Afin de déterminer les murs les plus intéressants à mesurer, plusieurs critères ont été pris en considération. Parmi ceux-ci figurent :

- L'orientation de la façade est-elle soumise au vent, à la pluie ?
- L'état de la façade est-elle d'origine ? a-t-elle été transformée, reconstruite, rejointoyée ?
- La fonction derrière la façade : le volume intérieur est-il chauffé ou non ?
- Le mur est-il en cave ou non ?

Afin de répondre de la manière la plus pertinente possible à la problématique de ce travail de fin d'étude, les mesures des murs déterminés intéressants ont été relevées.

Parmi ceux-ci, les deux murs de façade du logis (aile Sud-Est), ils sont relativement d'origine et sont soumises à une exposition Nord-Ouest (vents et pluies dominants) et Sud-Est, et délimitent une enveloppe occupée et chauffée. La source de chaleur est un poêle à bois qui rayonne sur le mur de la façade Nord-Ouest.

Il y a également la façade Nord-Ouest de l'étable (aile Nord-Ouest), un mur aveugle d'origine qui délimite un espace non chauffé et orienté nord-ouest (figure 106).

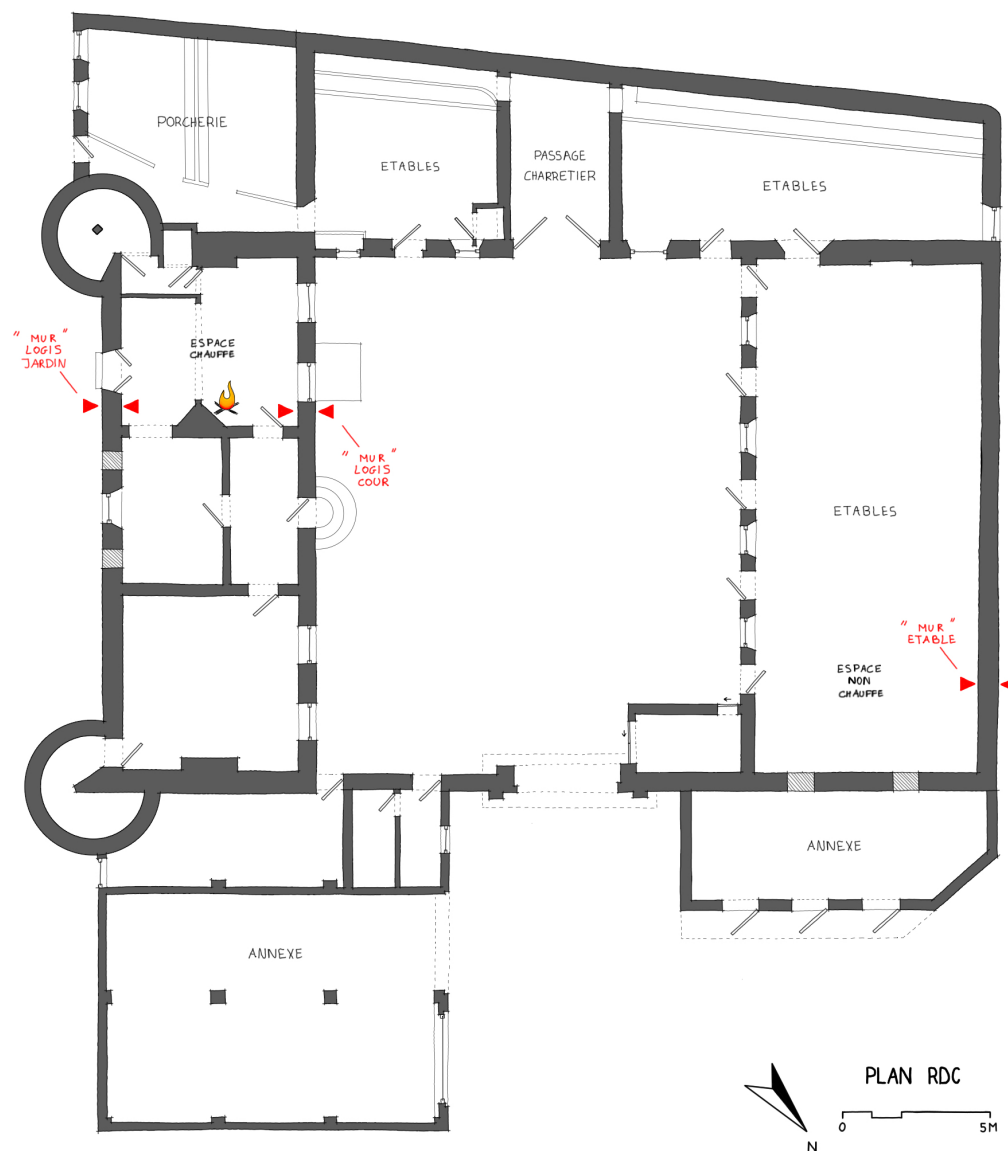


Figure 106 : plan illustrant les points de relevés d'humidité – Illustration © Antoine GUSBIN

Il existe plusieurs méthodes de mesure. Parmi celles-ci :

- Des mesures non destructrices, résistives ou capacitives, réalisées à l'aide d'un TROTEC T610. Cette méthode permet rapidement d'avoir une idée, non précise et à titre d'indication, si le mur est sec ou non. Elle est donc pratique, facile d'utilisation et demande un temps de réponse court mais présente rapidement des limites, elle est influencée par plusieurs facteurs qui dépassent la capacité de l'appareil (sels, éléments métalliques, compaction...).
- Des mesures destructives, réalisées à l'aide d'une bombe à carbure ou par gravimétrie. Cette méthode consiste à récolter des échantillons du mur pour connaître la quantité d'humidité. Cette solution est d'une bonne précision, facile d'utilisation et demande un temps de réponse court mais elle est destructrice et n'est pas adaptée aux mesures continues.

L'appareil qui a permis ces prises de mesure est prêté par l'Université de Liège. Une autre étudiante en eu également besoin pour prendre des mesures dans le cadre de son TFE. D'un commun accord, l'appareil a été utilisé par l'autre étudiante et moi-même, de manière juste en fonction des occasions propres à chacun pour prendre ces mesures.

Pour des raisons évidentes, une méthode de mesure non destructrice a été préconisée pour récolter les données quant à l'humidité présente dans les murs au cours de l'année. Pour ce faire, l'humidimètre TROTEC T610 a été utilisé. Il ne permet pas d'indiquer le taux d'humidité présent dans chaque mur, mais permet tout de même de récolter des données permettant de comprendre le comportement hygrométrique du mur au cours de l'année.

Afin d'obtenir les données les plus pertinentes, les mesures ont été réalisées avec un seul et même appareil ; à des endroits bien précis, au milieu d'un moellon et à une hauteur suffisante afin que le résultat ne soit pas influencé par une éventuelle remontée capillaire ; et à une fréquence la plus régulière possible à raison de deux fois ou trois fois par semaine en fonction de la disponibilité de l'appareil.

Lors de chaque prise de mesure, des valeurs minimales et maximales ont été prises en considération, afin de réaliser une moyenne après chaque mesure. De plus, un récapitulatif de la météo lors des prises de mesure a été réalisé de manière rigoureuse.

Le résultat de chaque semaine est la moyenne des différentes mesures prises au cours de celle-ci. Ce sont ces moyennes hebdomadaires qui sont prises en considération dans les graphiques (annexe 5).

3.6.2 Constatations

Dans la mesure où il n'a pas été possible d'obtenir de réponse favorable pour une analyse scientifique des données récoltées suite aux tests d'humidité, ce travail se contentera de quelques constatations des relevés réalisés durant 40 semaines, soit 94 relevés (annexe 5). Ces données devraient idéalement être vérifiées auprès d'un spécialiste.

De manière générale, nous pouvons affirmer sur base des données récoltées qu'il y a une corrélation entre l'orientation des façades et la quantité d'humidité présente dans les différents murs. Les murs qui reçoivent les vents et pluies dominants Nord-Ouest sont plus humides que les murs orientés Sud-Est.

Nous remarquons également que dans le logis, la température des murs qui est une conséquence de l'activité humaine (chauffage, cuisson, occupation du local) influence également la quantité d'humidité présente dans le mur.

En considérant un laps de temps de quelques semaines, j'ai pu observer un déphasage entre un temps pluvieux et l'augmentation du taux d'humidité dans le mur. Il serait intéressant, grâce à une analyse en laboratoire par exemple, de pouvoir chiffrer ce delta de temps.

En considérant un laps de temps de plusieurs mois, le delta d'humidité varie dans chaque mur d'environ 5 unités, bien que la période de test soit caractérisée par un temps principalement pluvieux. Il n'y a pas eu de période de canicule durant laquelle des données complémentaires auraient pu être prélevées.

Si ces constatations sont à vérifier de manière scientifique, ces relevés permettent tout de même de constater que, quel que soit le mur et le climat auquel il fait face, les murs sont en permanence humides et ce taux d'humidité ne descend pas en deçà d'un certain seuil, propre à chaque mur.

Vous trouverez sur les pages suivantes un tableau synthétisant les données récoltées au cours des 40 semaines, ainsi qu'un graphique illustrant la variation du taux d'humidité aux six endroits étudiés.

Valeur en DIGITS		M U R S					
		logis cour		logis jardin		étable	
		intérieur	extérieur	intérieur	extérieur	intérieur	extérieur
D A T E S	sem. 1	22,98333333	44,51666667	24,2	33,8	43,26666667	43,68333333
	sem. 2	24,96666667	45,28333333	24,8	37,11666667	51	46,78333333
	sem. 3	23,5	45,36666667	25,5	34,93333333	49,88333333	47,35
	sem. 4	21,46666667	44,98333333	24,36666667	34,88333333	47,33333333	46,36666667
	sem. 5	23,26666667	43,1	23,21666667	36,63333333	48,85	45,43333333
	sem. 6	22,73333333	45,66666667	25,63333333	36,95	51,1	47,75
	sem. 7	20,925	43,775	24,125	36,8	51,575	45,45
	sem. 8	20,58333333	44,8	23,63333333	39,76666667	50,88333333	47,56666667
	sem. 9	19,21666667	45,01666667	21,58333333	40,96666667	47,88333333	47,55
	sem. 10	19,75	45,45	23,45	35,125	45,4	43,025
	sem. 11	19,45	44,775	22,525	34,2	50,2	45
	sem. 12	19,08333333	44,66666667	23,58333333	34,4	53,65	47,68333333
	sem. 13	19,925	44,475	23,725	35,375	45,05	47,95
	sem. 14	20	44,475	24,225	37,175	49,975	47,875
	sem. 15	19,98333333	44,6	22,63333333	34,61666667	49,81666667	48,5
	sem. 16	18,85	45,05	22,75	38,2	48,675	47,9
	sem. 17	19,48333333	43,61666667	23,36666667	35,01666667	44,05	46,5
	sem. 18	21,95	44,35	19,5	34,3	43,65	46,6
	sem. 19	19,5	43,4	23,65	34,7	44,8	46,75
	sem. 20	21,25	46,825	21	38,1	46,55	48,65
	sem. 22	20,21666667	44,73333333	22,45	34,95	43,8	47,46666667
	sem. 23	19,65	47,425	23	35,625	46,025	47,8
	sem. 24	18,975	44,625	21,85	32,275	42,05	45,9
	sem. 25	19	45,36666667	21,6	32,61666667	44,58333333	47,96666667
	sem. 26	19,15	44,775	18,675	33,975	43,575	47,6
	sem. 27	17,61666667	43,28333333	18,2	31,88333333	42,83333333	45,75
	sem. 28	18,025	44,975	20,25	33,475	45,35	47,275
	sem. 29	17,18333333	45,33333333	20,35	32,95	45,31666667	47,43333333
	sem. 30	16,2	44,975	19,775	32,075	45,4	46,725
	sem. 31	16,625	44,25	18,6	32,15	44,25	45,475
	sem. 32	16,53333333	44,33333333	19,08333333	31,3	43	46,16666667
	sem. 33	17,45	43,8	20,675	32,525	46	45,75
	sem. 34	16,55	42,7	17,85	30,45	41,15	43,05
	sem. 35	17,25	44,4	19,53333333	32,93333333	43,68333333	44,55
	sem. 36	17,46666667	44,3	18,73333333	31,86666667	43,9	43,86666667
	sem. 37	17	43,15	18,15	33,65	42,65	43,45
	sem. 38	16,05	44,1	17,725	31,5	42,1	43,025
	sem. 39	15,6	42,65	17,45	29,575	40,325	43,85
	sem. 40	15,65	43,325	19	32,25	40,525	41,8

Figure 107 : tableau illustrant les moyennes hebdomadaires de relevés d'humidité sur différents murs de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Ci-dessous, les graphiques des relevés intérieurs et extérieurs de la façade Nord-Ouest du logis, côté cour.

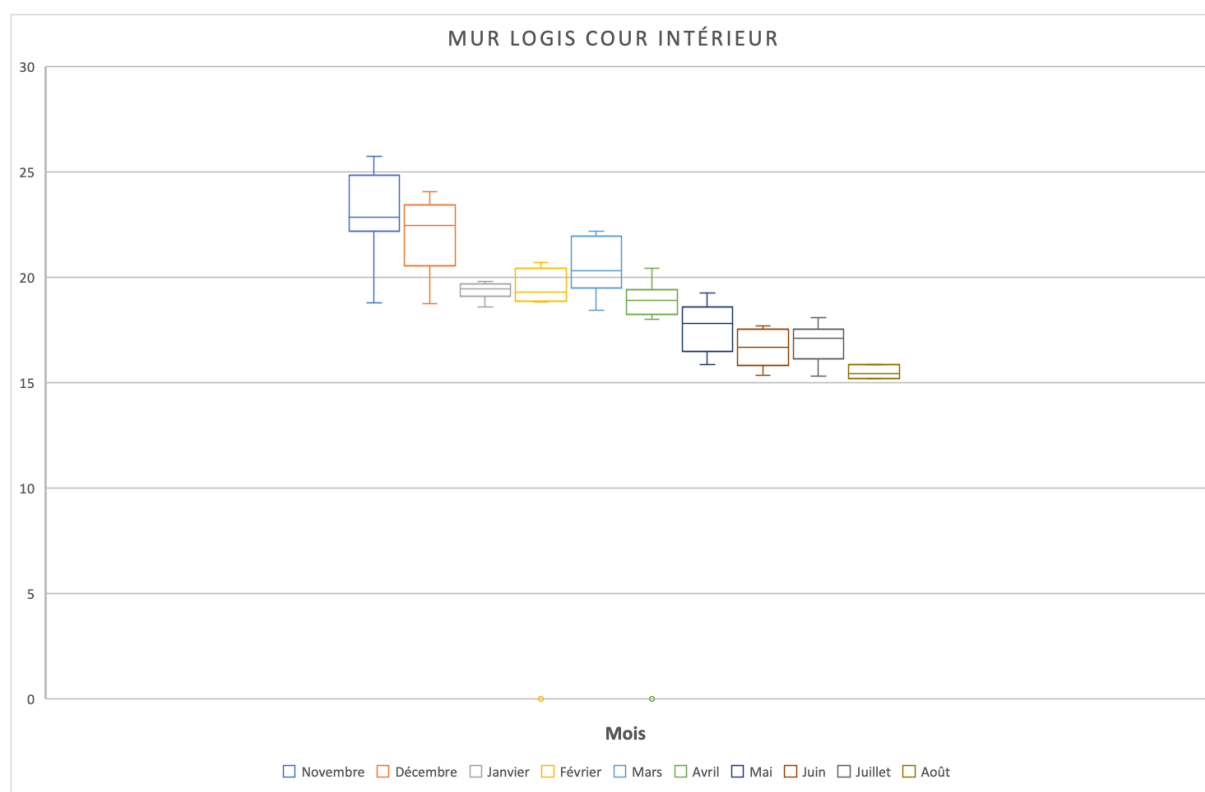


Figure 108 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie intérieure du mur N-O du logis, côté cour – Illustration © Nicolas HENNES

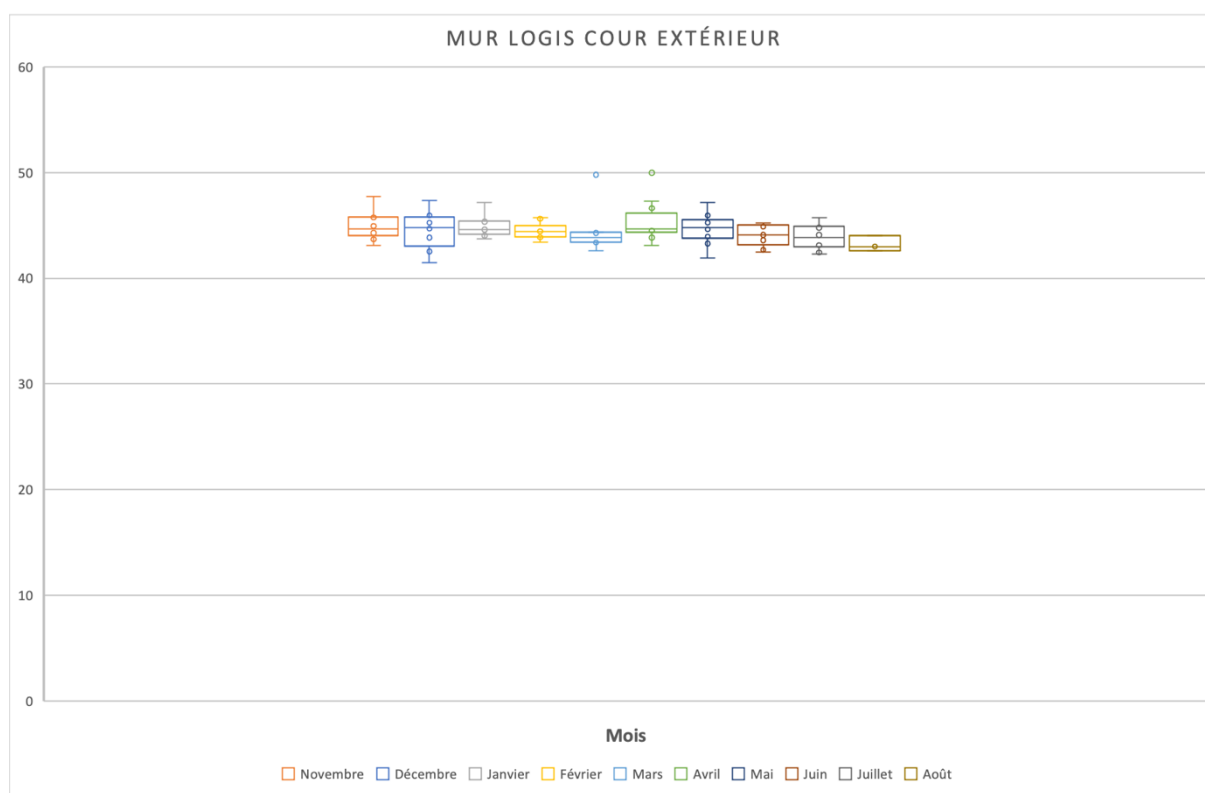


Figure 109 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie extérieure du mur N-O du logis, côté cour – Illustration © Nicolas HENNES

Ci-dessous, les graphiques des relevés intérieurs et extérieurs de la façade Sud-Est du logis, côté jardin.

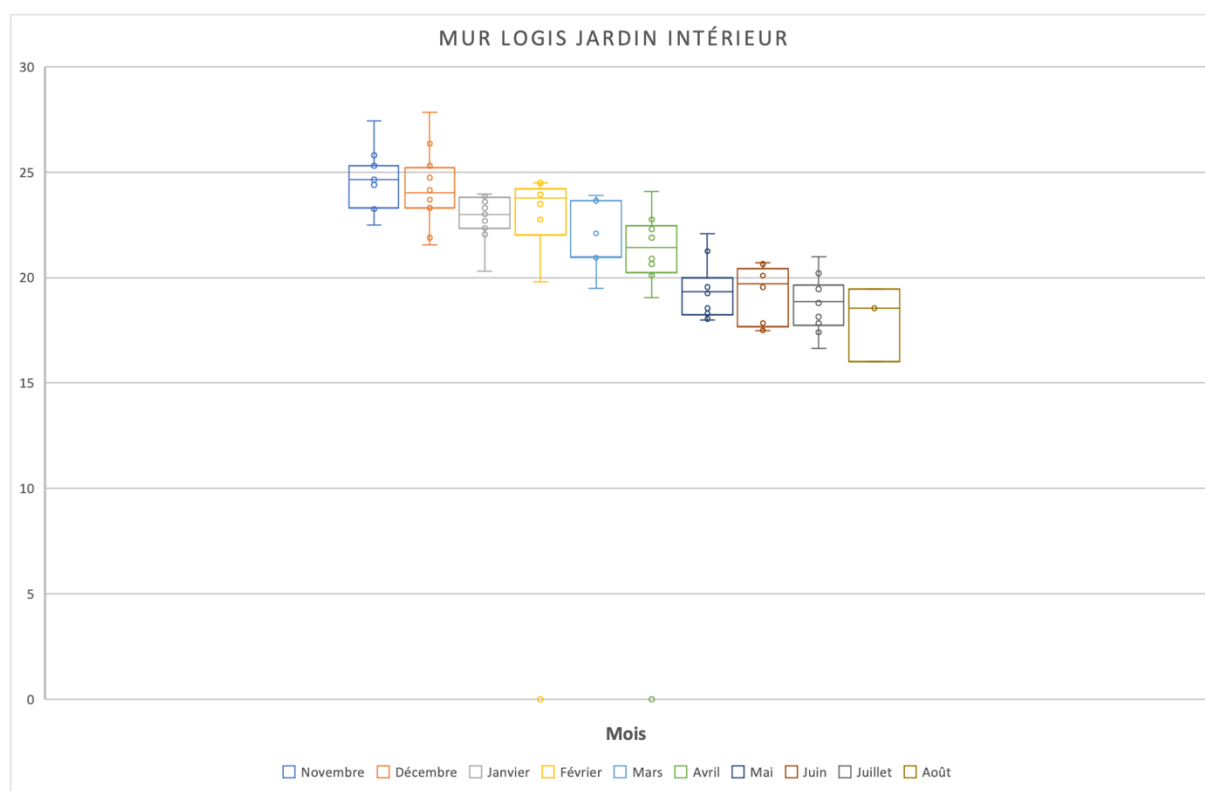


Figure 110 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie intérieure du mur S-E du logis, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

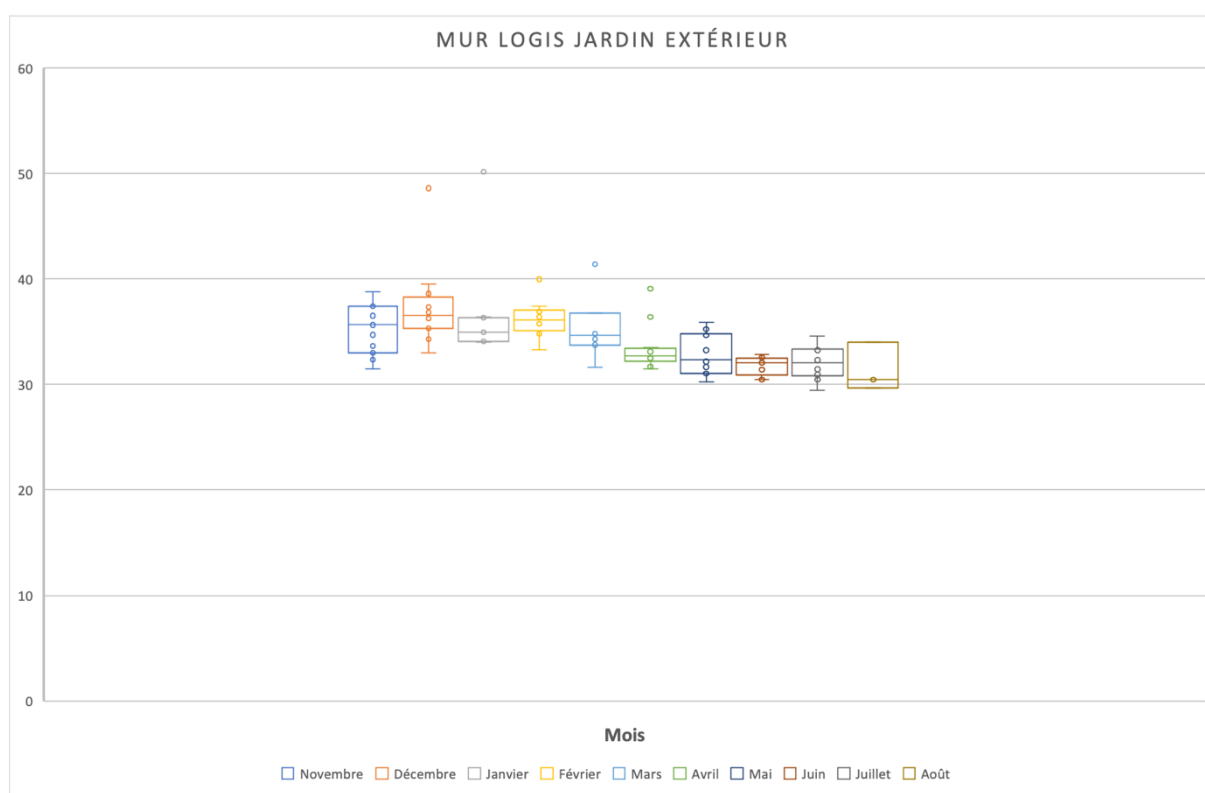


Figure 111 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie extérieure du mur S-E du logis, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

Ci-dessous, les graphiques des relevés intérieurs et extérieurs de la façade Nord-Ouest de l'étable, côté jardin.

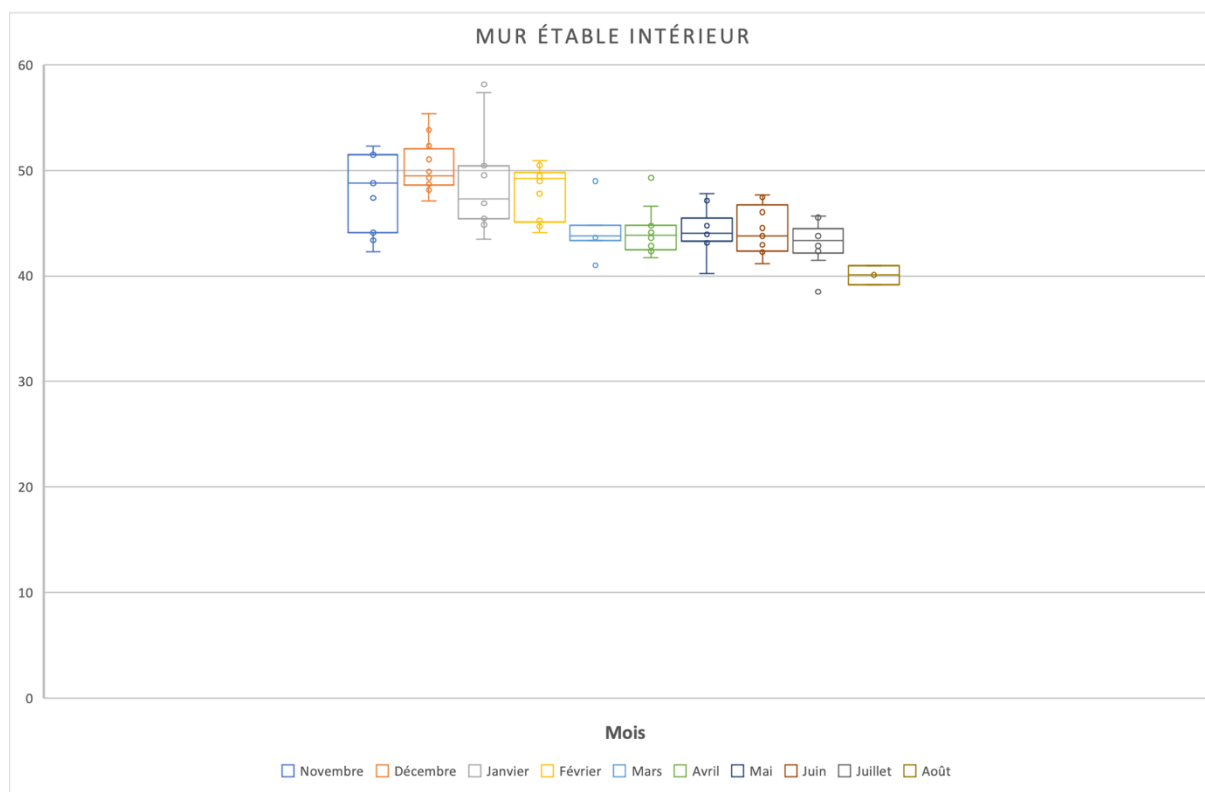


Figure 112 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie intérieur du mur N-O de l'étable, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

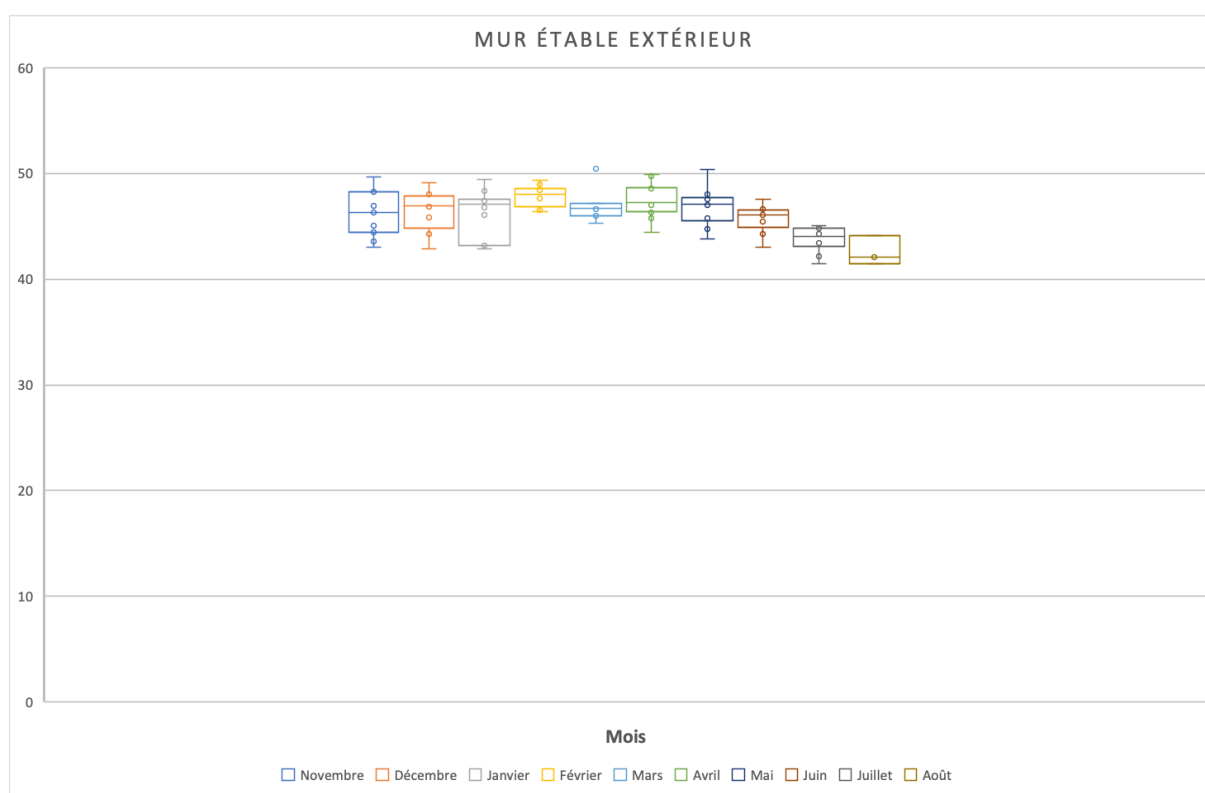


Figure 113 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie extérieur du mur N-O de l'étable, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

3.7 Murs en moellons de grès de bâtiments voisins

Afin de donner de la crédibilité à la pertinence du cas d'étude, une analyse sur quelques autres bâtiments des villages voisins a permis de vérifier et de comparer cette composition de paroi. Les bâtiments sélectionnés étaient soit dans un état déplorable, permettant de récolter des informations, soit en travaux. Dans ce cas, il a fallu contacter le bureau d'architecture NDS chargé de ce projet afin de récolter quelques données essentielles à la comparaison.

Tout d'abord, la commune dans laquelle se situe le cas d'étude, ainsi que les villages voisins présentent des bâtiments qui sont majoritairement construits en moellons de grès. Cette constatation a pu être réalisée en parcourant l'ouvrage de DE BIEVRE, G. & MOUREAUX, P. (1984). « Le patrimoine monumental de la Belgique »¹¹⁰.

Dans les communes de Polleur et de Theux, il semble que la pierre la plus utilisée soit le grès. Dans la commune de Polleur, les villages de Polleur, de Fays, de Jehanster et du Chinru ont été décortiqués et la matérialité de trente-quatre bâtiments, datant principalement du 18^e et 19^e siècles, et parfois du 17^e, a été relevée. Les matériaux dominants sont les moellons de grès et le calcaire, parfois accompagnés de la brique (annexe 2).

La commune de Theux est quant à elle un peu plus éloignée de la ferme Lemaire, mais la matérialité reste similaire. Les villages d'Oneux, La Reid et de Sassorette, qui sont les plus proches du cas d'étude, ont été analysés et la matérialité d'une dizaine de bâtiments, datant principalement des 17^e, 18^e et 19^e siècles, a été relevée. Les matériaux dominants dans ces villages sont également les moellons de grès et le calcaire, parfois accompagnés de briques (annexe 2).

Aux pages suivantes se trouve une brève description des deux bâtiments susmentionnés.

¹¹⁰ DE BRIEVE, G., MOUREAUX, P. (1984). Le patrimoine monumental de Belgique : Wallonie. Volume 12, tome 4, Province de Liège : arrondissement de Verviers. Pierre Mardaga. ISBN : 2802100696.

3.7.1 Boulangerie du Transvaal

Le premier bâtiment se situe au Transvaal, à Theux et était durant quelques mois en travaux. Implanté à un kilomètre à vol d'oiseau, il s'agit d'une ancienne ferme dont la date de construction est estimée entre 1865 selon walonmap et 1913 selon les données de NDS Architecture concernant leur projet. Après sa fonction agraire, le bâtiment servit de café, et puis de boulangerie à partir de 1913 pendant plus de 100 ans. Après quelques années d'inactivité, les travaux réalisés sur ce bâtiment visent à le transformer en un commerce et plusieurs logements.

Suite aux informations délivrées par le bureau d'architecture, la composition de ces murs semble être de trois natures. Premièrement, il y a des murs extérieurs composés de manière aléatoire de briques et de moellons de grès, confirmé par les observations de Monsieur TOURNEUR. Deuxièmement, il y a des murs extérieurs composés de deux parements en moellons de grès (figure 114). Enfin, il y a en partie supérieure des murs, des murs plus récents en colombage, remplis de torchis.



Figure 114 : illustration (s.-d.) de l'ancienne boulangerie du Transvaal – Source © NDS Architecture

Sur base de quelques photos récoltées (figures 115, 116, 117 et 118), les hypothèses suivantes ont été tirées.

Il est question d'un bâtiment composé de murs maçonnés selon le principe du double moellonage, comblé de blocage. L'épaisseur de ces murs varie entre 55 et 65 centimètres selon les relevés réalisés par le bureau NDS.

Après analyse des photos et plusieurs échanges avec Monsieur TOURNEUR, il semblerait que les murs soient maçonnés de moellons de grès variés, et peut-être des quartzites de manière ponctuelle.

Le type de mortier utilisé dans la maçonnerie étant difficilement identifiable depuis les photos, aucune autre information ne fut récoltée.

Sans aucune désobligeance, cela prouve qu'à l'heure actuelle, les interventions sur ce type de bâtiment ancien ne prennent pas forcément en compte la composition de la paroi existante pour proposer une intervention qui soit appropriée à chaque mur.



Figure 115 : illustration d'une façade en travaux du projet au Transvaal – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 116 et 117 : illustrations de la composition d'un mur en travaux du projet au Transvaal – Illustration © Antoine GUSBIN



Figure 118 : illustration d'un mur intérieur du projet au Transvaal – Illustration © Antoine GUSBIN

3.7.2 Bâtiment agricole à Fays

Le deuxième bâtiment repris dans « Le patrimoine monumentale de la Belgique¹¹¹ », se situe dans le village de Fays, implanté également à un kilomètre à vol d'oiseau de la ferme Lemaire. Cette ancienne maison agricole est dans un état de dégradation avancée et la composition d'un mur pignon est visible et accessible (figure 119).

Selon les observations in situ, il semblerait que blocage utilisé pour cette maçonnerie de moellons de grès soit à base de chaux, comme c'est le cas pour la ferme Lemaire. Le mortier de finition est également à base de chaux.



Figure 119 : illustration d'un mur dans un état de dégradation avancée d'un bâtiment agricole à Fays – Illustration © Antoine GUSBIN

¹¹¹ DE BRIEVE, G., MOUREAUX, P. (1984). Le patrimoine monumental de Belgique : Wallonie. Volume 12, tome 4, Province de Liège : arrondissement de Verviers. MARDAGA, P. édition. ISBN : 2802100696.

3.7.3 Ferme à cour à Sasserotte

Il s'agit ici d'une ferme à cour datant du 17^e siècle, composée de deux bâtiments parallèles : un logis et une aile composée de deux étables et d'une grange. L'ensemble est construit en moellons de grès, perturbé par endroits de grès jaunâtres.

Actuellement, les étables et la grange ne sont plus d'usage et le bâtiment se dégrade à vue d'œil. Nous observons que la partie centrale de la toiture est toujours présente, mais que les extrémités se sont écroulées (figure 120).

Selon les observations in situ, il semblerait que blocage utilisé pour cette maçonnerie de moellons de grès soit à base de chaux, comme c'est le cas pour la ferme Lemaire. Le mortier de finition est également à base de chaux.



Figure 120 : illustration d'un mur dans un état de dégradation avancée d'une ferme à cour à Sasserotte— Illustration © Antoine GUSBIN

3.8 Conclusion

Nous avons désormais une idée concernant la manière dont se comporte un mur ancien, maçonné de moellons de pierres naturelles. Ces derniers présentent une inertie thermique et trouvent un équilibre naturel avec leurs milieux intérieurs et extérieurs. Cet équilibre se traduit par la capacité à pouvoir réguler les échanges de vapeur d'eau, ce qui signifie que ces murs sont en permanence en présence d'humidité. Cette humidité transite généralement par le mortier qui a une capacité hygroscopique contrairement à la pierre dure.

Nous avons également une idée de la composition des murs de la ferme Lemaire, qui sont composé d'un double parement en moellons de grès, comblés par un blocage. Le mortier utilisé est majoritairement à base de chaux, comme il a pu être observé sur place.

Nous sommes parvenus à identifier les propriétés physiques de chaque composant (grès et mortier de chaux) afin d'estimer les valeurs R de résistance thermique ($\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) et U de coefficient de transmission thermique ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$) par calcul, et ensuite avec l'outil de modélisation TOTEM qui nous a permis d'obtenir :

- Une valeur $R = 0,447 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$,
- Une valeur $U = 1,62 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$.

Dès lors, nous pouvons nous demander vers quel isolant se tourner pour mener une amélioration énergétique respectueuse envers le patrimoine et l'environnement. Quels isolants produits en Belgique répondent aux caractéristiques des murs anciens (hygroscopicité et faible épaisseur équivalente d'air) ? Quelle est leur nature ? Sont-ils produits en grande quantité ou de manière limitée ?

Le chapitre suivant a pour objectif de répondre à ces questions et savoir vers quels isolants il serait intéressant de se diriger.

CHAPITRE 4

Itérations de solutions d'isolation par l'intérieur

4.1 Contexte

A l'heure actuelle, le parc bâti résidentiel wallon présente toujours une performance énergétique globale peu élevée. En 2019, cette performance globale atteignait en moyenne un label PEB de classe « F » (figure 121), synonyme d'une consommation annuelle très énergivore de 434 kWh/m².

Le patrimoine bâti d'avant-guerre est de ce fait, un parc bâti à prioriser afin d'améliorer la performance globale du parc bâti wallon.

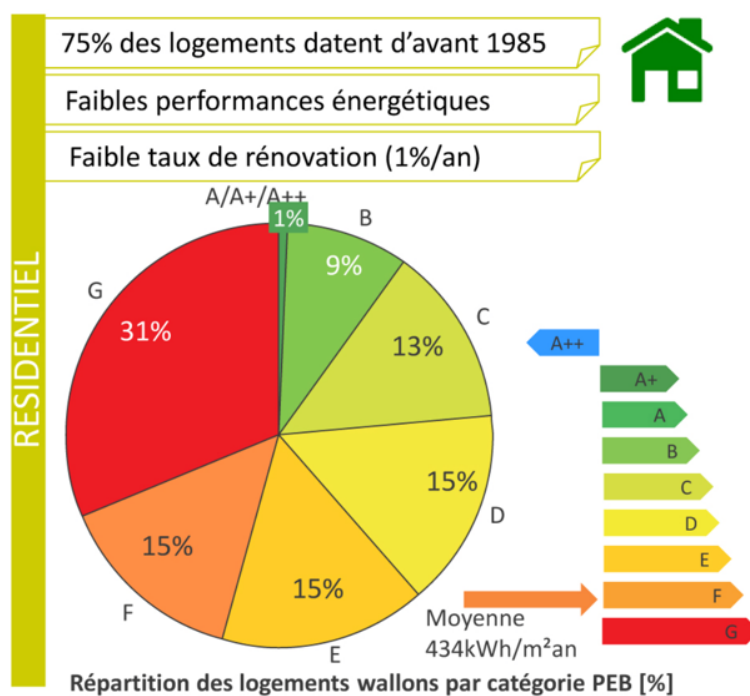


Figure 121 : graphique de la performance énergétique d'un mur dans un état de dégradation avancée d'un bâtiment agricole à Fays – Source © RENOUVELLE¹¹²

Rappelons l'importance de l'analyse du projet dans sa globalité ainsi que dans ses caractéristiques constructives.

Dans le cas de ce présent travail, les murs du cas d'étude sont :

- Des murs construits de manière traditionnelle, d'une épaisseur de 60 centimètres, composés d'un double parement de moellons de grès,
- Composés d'un parement extérieur de 25 centimètres de moellons de grès (90 % de grès et 10 % de mortier de chaux), d'un blocage de 10 centimètres (30% de pierre et 70 % de mortier de chaux) et d'un parement intérieur (90 % de grès et 10 % de mortier de chaux),
- Et ont une valeur U de 1,62 W/m².K selon l'outil TOTEM.

¹¹² HAVEAUX, C., PRAILLET, F. (2019). En Wallonie, des plateformes locales aident les ménages à rénover leur logement. Renouvellement.

La faible performance énergétique de ce parc bâti vient du fait que ce sont des bâtiments qui sont ouverts à leur milieu extérieur (les murs respirent), mais également parce qu'ils ne sont pas étanches à l'air, pas dotés de châssis performants et que l'enveloppe n'est pas isolée. Les sources de déperditions peuvent être chiffrées à :

- 25 % par la toiture,
- 20 % par l'infiltration d'air provenant de l'enveloppe,
- 15 % par le châssis simple vitrage,
- 10 % par le plancher bas,
- 10 % par les ponts thermiques
- **Et 20 % par les murs.**

Nous avons tendance à imaginer l'isolation des murs comme une solution miraculeuse qui permettrait l'amélioration énergétique d'un bâtiment ancien, alors que les déperditions par les murs ne représenteraient que 20 % des déperditions totales de l'enveloppe du bâtiment (figure 122).

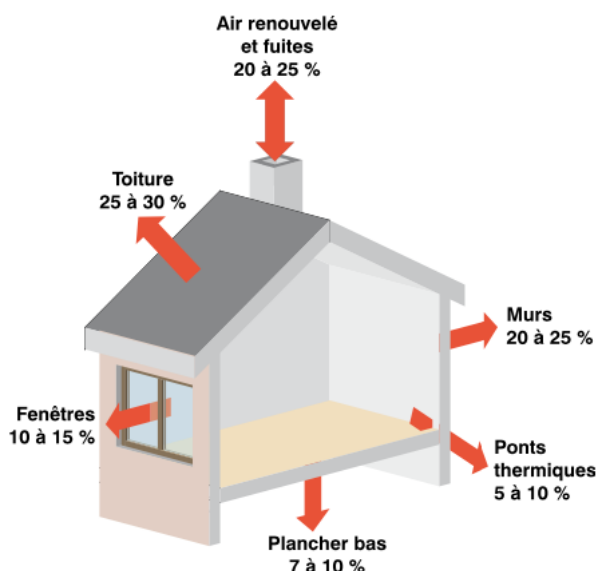


Figure 122 : schéma illustrant les déperditions dans une ancienne maison – Source © ISOLIN

Les premiers points d'attention peuvent également être :

- La toiture, qui présente généralement une grande surface qu'il s'agirait d'isoler pour limiter une partie des déperditions. La toiture étant une paroi qui a pour objectif de garantir l'étanchéité supérieure du bâtiment, proposer une solution d'isolation sur celle-ci est plus simple qu'une solution sur un mur qui est une paroi respirante.
- L'étanchéité à l'air, qui permettrait de limiter une partie des déperditions. Cette intervention intéressante se réalise notamment par le changement de châssis, qui concerne quant à lui une autre source de déperditions.
- Ou encore le plancher bas, qui par conduction, engendre des déperditions thermiques non-négligeables.

Face à ces constatations, l'isolation des murs de façades ne semble pas être une solution absolue. Le bâtiment étant un système complet, les autres sources de déperdition méritent également une intervention afin de diminuer le besoin en chauffage.

Cependant, elle n'est pas à négliger. Elle permettrait de réduire le besoin de chauffage et de participer au confort intérieur des occupants en supprimant le phénomène de paroi froide.

En rénovation, les interventions mises en œuvre afin de réduire la consommation énergétique ne parviennent pas systématiquement à atteindre un coefficient de transmission thermique de $0,24 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ recommandé ou exigé. Toutefois, recourir à une intervention permet de pallier les insuffisances de l'enveloppe, d'améliorer le confort des occupants et de réduire le besoin énergétique.

Cela amène à employer le terme de « correction thermique » plutôt que d'« isolation thermique ». Cette correction peut se traduire par une couche isolante de faible épaisseur ou par une isolation partielle de l'enveloppe.

Il existe différents procédés qui peuvent être combinés pour parvenir à une amélioration thermique d'un mur (figure 123). Il est possible d'intervenir :

- Dans la coulisse du mur (cette solution ne concerne pas le bâti ancien),
- Du côté extérieur du mur avec une isolation thermique extérieure (I.T.E.),
- **Du côté intérieur du mur avec une isolation thermique intérieure (I.T.I.).**

C'est cette dernière solution sur laquelle se penche ce présent travail.

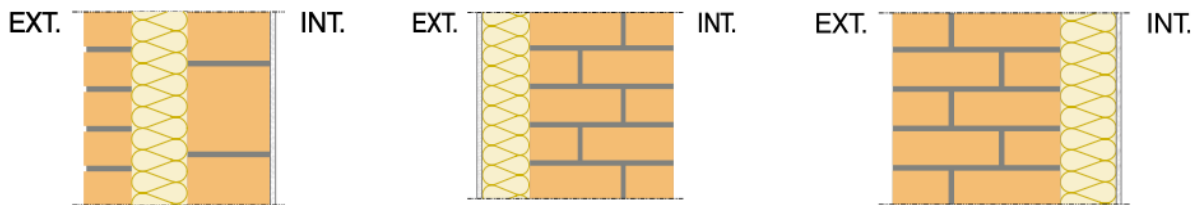


Figure 123 : schéma illustrant les possibilités d'isolation thermique – Source © ISOLIN

4.2 Intervention thermique par l'extérieur (I.T.E.)

L'ITE est une solution qui est plus favorable face au comportement du mur ancien et son potentiel de séchage.

Cette solution permet d'avoir une continuité de l'isolant et d'éviter les ponts thermiques ; d'améliorer l'étanchéité des façades ; de protéger le mur des conditions climatiques (pluie, gel) ; de préserver la masse thermique et l'inertie thermique des murs ; et de ne pas engendrer de perte de surface habitable.

L'ITE est très intéressante si le côté extérieur reste perméable, peu importe si l'intérieur est perméable ou étanche. Cela permet la capacité de séchage du mur, contrairement à une solution extérieure étanche à la diffusion de vapeur d'eau (figure 124).

Murs en pierre calcaire dure		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie thermique	Résistance thermique
Base						

Figure 124 : tableau illustrant les bénéfices d'une isolation thermique par l'extérieur – Source © HYGROBA

Cependant, il s'agit d'une solution qui est généralement exclue dans nos régions car elle touche à l'esthétique des façades d'un patrimoine bâti et car elle empiète sur l'espace public. En Lorraine, en Allemagne ou en France, cette solution n'est pas forcément exclue.

Elle présente d'autres inconvénients comme l'isolation obligatoire des retours de baies ou l'adaptation du système de descente des eaux (figure 125).

► Isolation par l'extérieur

Avantages	Inconvénients
– Continuité de l'isolant : supprime les risques de ponts thermiques locaux – Amélioration de l'étanchéité de la façade – Protège le mur du gel et de la fissuration. – Améliore l'aspect extérieur en cas de revêtement abîmé ou pas assez homogène – Masse thermique et finitions intérieures préservées – Pas de perte de surface habitable à l'intérieur	– Modification de l'aspect extérieur et , si maisons mitoyennes, modification de l'alignement des façades : nécessité d'introduire un permis d'urbanisme dans la plupart des cas – Retours de baies doivent être isolés, seuils remplacés, etc. (diminution de la surface vitrée) – Déplacement/remplacement/adaptation des descentes d'eau, gouttières, chéneaux, etc. – Nécessité de faire appel à une entreprise spécialisée (coût élevé)

Figure 125 : tableau illustrant les avantages et inconvénients d'une isolation thermique par l'extérieur – Source © ISOLIN

4.3 Intervention thermique par l'intérieur (I.T.I.)

En Belgique, la solution d'ITI est généralement la solution vers laquelle on se tourne afin de conserver l'identité culturelle, patrimoniale et l'aspect esthétique et matériel de ces façades visibles de l'extérieur. Elle semble être la seule solution possible.

Il s'agit d'une solution plus risquée concernant le comportement hygrothermique naturel du mur comme le montre un tableau de l'étude HYGROBA (figure 126). Elle est moins favorable face au risque d'accumulation d'humidité dans la paroi, face à la capacité de séchage et face à la possibilité de condensation et à l'inertie thermique. Ces résultats sont influencés par les matériaux utilisés, comme expliqué dans les prochains paragraphes.

Murs en pierre calcaire dure		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie thermique	Résistance thermique
Base	Base				● ● ●	
	E-E				○ ○ ○	
Isolation par l'intérieur	E-P				○ ○ ○	
	P-E				○ ○ ○	
	P-P				○ ○ ○	
	P-P				○ ○ ○	

Figure 126 : tableau illustrant les impacts d'une isolation thermique par l'intérieur – Source © HYGROBA

Le principal inconvénient d'une isolation par l'intérieur est sans doute la perte de **l'inertie thermique** du mur, qui est un facteur clé pour le confort dans un bâtiment.

Une solution d'isolation par l'intérieur rend la masse thermique du mur inaccessible aux échanges de chaleur avec l'ambiance intérieure. Diminuer l'inertie d'une pièce peut engendrer sa surchauffe (figure 127). Cette inertie peut être en partie conservée en choisissant un matériau isolant et un parachèvement qui présentent une certaine masse thermique.

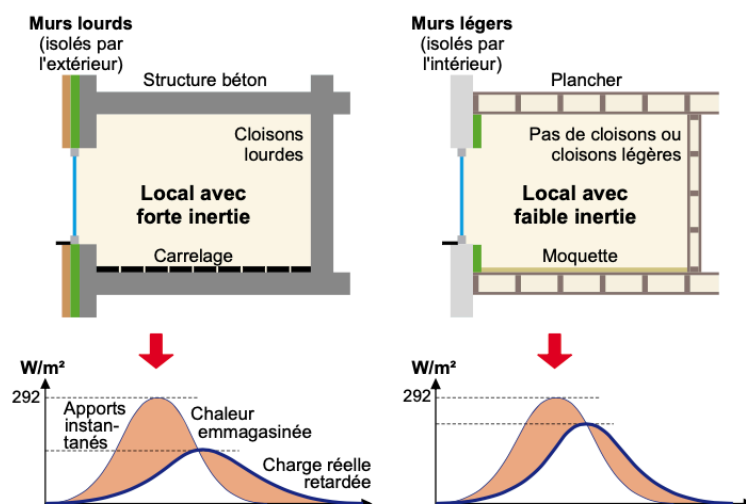


Figure 127 : schéma illustrant l'effet de l'inertie pour un mur lourd et un mur léger – Source © ISOLIN

Le mur n'étant plus soumis aux échanges thermiques intérieurs, il en résulte des variations de température et d'humidité qui sont plus importantes au sein du mur, puisque ce dernier subira davantage le climat extérieur et que son potentiel de séchage est réduit. Le mur étant globalement plus froid et plus humide, le front d'humidité pénètre plus profondément dans la paroi.

Le risque de cette coupure est l'apparition de déformations mécaniques (retraits/dilatations), des ruptures locales dans la façade entraînant des fissures pouvant porter préjudice à l'esthétique et à la stabilité de la façade.

Idéalement, il est préférable de choisir une solution qui offre de l'inertie pour éviter tout problème lié au potentiel de séchage du mur. Il existe des matériaux isolants et des revêtements qui présentent une certaine capacité d'inertie (figure 128).



Figure 128 : schéma illustrant l'inertie de différents matériaux isolants – Illustration © Antoine GUSBIN

Le potentiel de séchage peut également être influencé par la capacité de l'isolant et du revêtement d'être ouvert aux **transferts de vapeur**. Il existe des systèmes qui présentent trois résistances différentes à la diffusion de vapeur d'eau¹¹³.

Le premier système empêche complètement la formation de condensation dans l'isolant, en bloquant la migration de la vapeur intérieure vers le mur via une étanchéité à l'air (pare-vapeur) (figure 129). Cette étanchéité peut être une membrane du côté de la pièce intérieure, ou faire partie du système d'isolation.

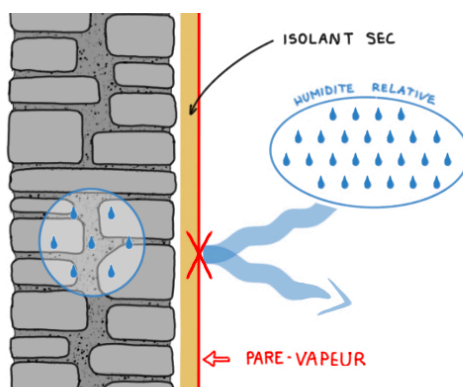


Figure 129 : schéma illustrant l'effet d'un pare-vapeur sur le transfert de vapeur du mur – Illustration © Antoine GUSBIN

¹¹³ BLUMBERGA, A., BLUMBERGA, D., FREUDENBERG, P. et al. (s.-d.). Robust internal thermal insulation of historic building. RIBuild.

Ce système ne permet aucun échange de vapeur, et est privilégié pour les ambiances intérieures à forte humidité (piscine intérieure).

Les matériaux isolants utilisés pour empêcher toute migration de vapeur sont le polyuréthane, le polystyrène extrudé ou le verre cellulaire.

Une solution étanche n'est pas forcément une bonne solution. Il faut privilégier un matériau qui permettent le transfert de vapeur et garantisse le séchage du mur car si le mur éprouve une difficulté de sécher du côté intérieur, cela peut engendrer de la condensation interne par diffusion en hiver.

Cette solution peut également provoquer de la condensation à un second moment de l'année, en été. En été, la température, l'humidité relative intérieure et la pression de vapeur sont parfois plus élevées à l'extérieur ce qui provoque un flux d'humidité vers l'intérieur.

Empêcher la vapeur de migrer vers un environnement intérieur provoque de la condensation au contact de la membrane étanche.

Le second système limite la diffusion de vapeur de l'intérieur vers le mur notamment grâce à un freine-vapeur et une capacité hygroscopique des matériaux mis en œuvre (figure 130). Le freine-vapeur présente une valeur S_d assez faible (2 à 10 mètres maximum¹¹⁴) ce qui autorise la diffusion de vapeur et facilite le potentiel de séchage du mur. Les matériaux limitant cette diffusion peuvent être de la laine minérale, les granulats de verre cellulaire, le polystyrène expansé.

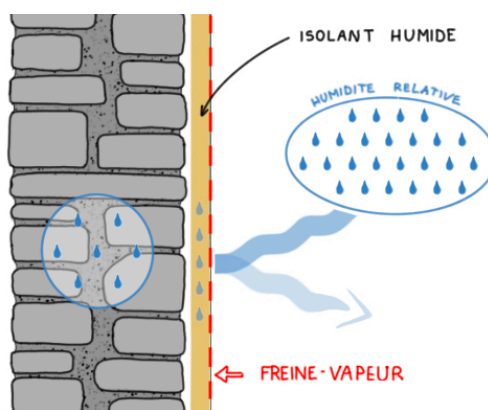


Figure 130 : schéma illustrant l'effet d'un freine-vapeur sur le transfert de vapeur du mur – Illustration © Antoine GUSBIN

Cette solution présente néanmoins un risque : la condensation d'hiver. Il s'agit de vapeur qui, lorsqu'elle migre vers l'extérieur, se refroidit au fur à mesure de sa migration et qui se condense dans l'isolant ou au contact du mur. Ce risque peut être effacé si le matériau que la vapeur traverse présente une certaine hygroscopicité, une capacité à pouvoir stocker de la vapeur d'eau en son sein.

¹¹⁴ EVRARD, A., BRANDERS, A., De HERDE, A. (2011). Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques plaines : guides d'aide à la conception. SPW – DG04 : Jambes. 98 pages.

Le troisième système tolère la diffusion de vapeur, et consiste en une solution d'isolation avec une capacité hygroscopique/de capillarité active (figure 131). La seule résistance à la vapeur est due au matériau d'isolation ou de parachèvement lui-même, il y a donc très peu de résistance au transfert de vapeur d'eau. L'avantage principal de cette solution est qu'elle n'est dépendante ni de la qualité de mise en œuvre, ni des conditions climatiques, ni des influences du comportements humain. Le matériau mis en œuvre est poreux et est capable d'absorber et de distribuer la vapeur d'eau présente dans ses pores. De ce fait, ni l'équilibre du mur, ni la capacité de séchage ne sont modifiés.

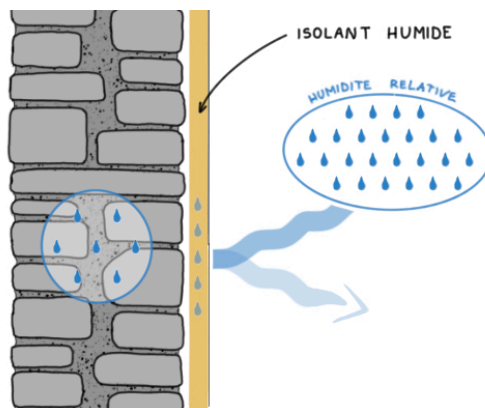


Figure 131 : schéma illustrant d'un système qui tolère le transfert de vapeur du mur – Illustration © Antoine GUSBIN

Les matériaux qui tolèrent cette diffusion de vapeur sont par exemple le mortier de chaux, la fibre de bois, le calcium silicate, l'ouate de cellulose, la plaque de plâtre ou encore le ciment aéré¹¹⁵.

Cependant, cette solution ne peut pas être employée dans des contextes extérieurs très humides ou bien dans une exploitation permanente car il faut que le potentiel de séchage soit assuré.

Pour éviter l'apparition de condensation, il faut également éviter les **ponts thermiques**. Il s'agit d'une « coupure » dans la couche isolante qui occasionne des déperditions thermiques. Ces déperditions ont généralement lieu aux nœuds constructifs (raccord entre deux parois).

Les éléments qui provoquent le pont thermique sont soumis à deux ambiances : d'une part une ambiance chaude (milieu isolé) et d'autre part une ambiance froide (élément non-isolé). Cette confrontation, au sein d'un élément, entre ces deux ambiances peut provoquer de la condensation superficielle entraînant la formation de moisissure.

Lors d'une amélioration énergétique, les poutres encastrées dans la maçonnerie sont à risque. Elles sont enfouies dans une paroi froide qui est couverte d'une ou l'autre solution d'isolation créant un milieu chaud. La poutre étant à cheval dans le milieu froid et chaud, le point de rencontre de ces milieux peut atteindre le point de rosée et provoquer de la condensation, ce qui entraînera la moisissure de l'élément (figure 132).

¹¹⁵ BLUMBERGA, A., BLUMBERGA, D., FREUDENBERG, P. et al. (s.-d.). Robust internal thermal insulation of historic building. RIBuild.

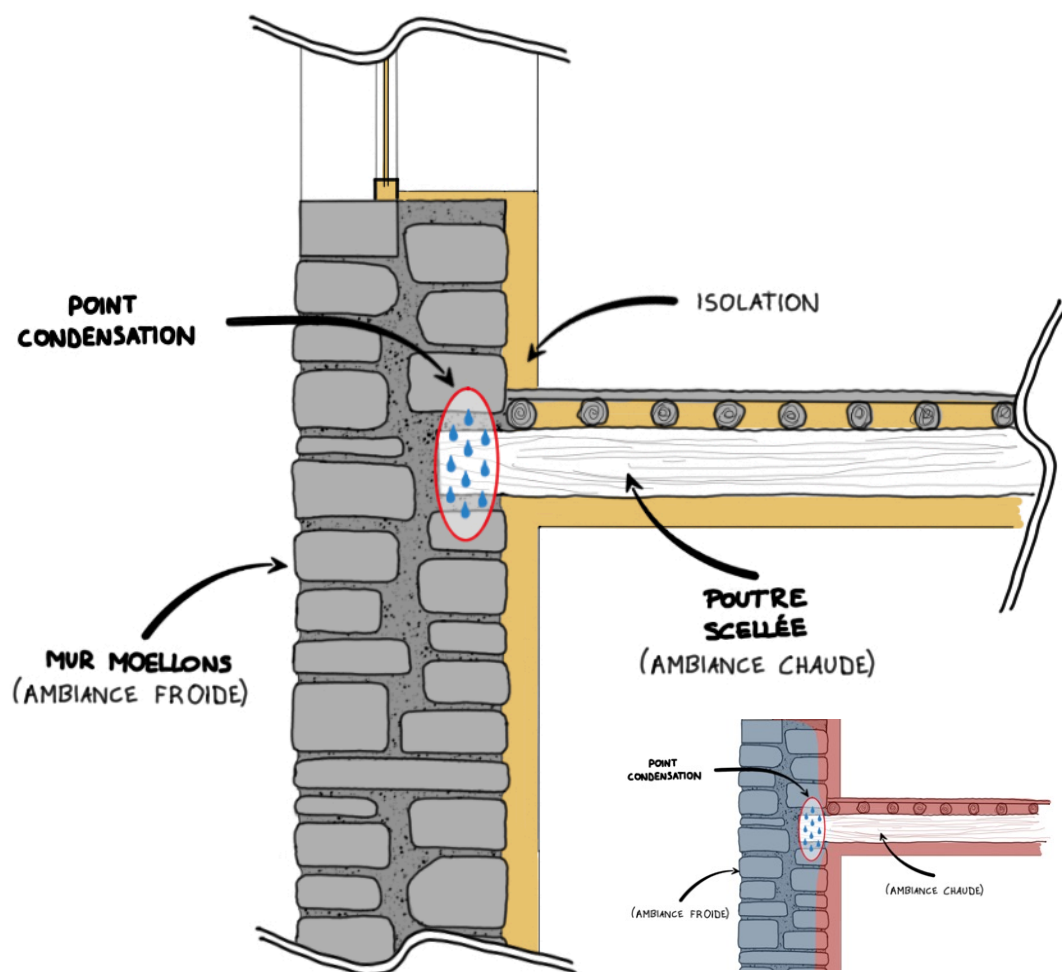


Figure 132 : schéma illustrant le phénomène de condensation dans le cas d'une poutre encastrée – Illustration © Antoine GUSBIN

4.4 Considérations

Généralement, pour parvenir à une haute performance énergétique, il faudrait utiliser un isolant présentant une haute résistance thermique, avec une **conductivité thermique** (valeur λ) la plus basse possible afin d'obtenir un coefficient de transmission thermique (valeur U) le plus bas possible.

L'isolation des murs anciens est en réalité plus complexe que cela. Elle dépend de plusieurs facteurs à prendre en considération afin de parvenir à une solution d'isolation qui convienne au comportement du mur qu'il s'agit de conserver.

Idéalement, il faut choisir un matériau isolant et/ou un matériau de revêtement qui :

- Présente une certaine **hygroscopicité** afin de réguler les transferts de vapeur avec l'ambiance intérieure et le mur pour garantir son séchage,
- Présente une faible **résistance à la diffusion** de vapeur d'eau, ce qui est égal à une faible épaisseur équivalente d'air S_d .
- Présente une certaine **inertie thermique** afin de garantir le confort intérieur et éviter le risque de surchauffe. Elle doit être calculée selon la fonction que loge le local et son taux d'occupation. Une forte inertie est le produit d'une haute densité ρ en kg/m^3 par une grande chaleur spécifique c en J/kgK . Elle dépend également d'une forte effusivité (capacité d'un matériau à stocker une quantité de chaleur en un certain temps) et d'une faible diffusivité (vitesse à laquelle un matériau monte en température).

Les matériaux mis en œuvre vont influencer les choix de la technique constructive illustrés à la page suivante :

- Un système par collage (1) pour les matériaux sous formes de panneaux rigides (figure 133),
- Un système à ossature (2) pour les matériaux sous forme de matelas (figure 134),
- Un système projeté (3) pour les matériaux en vrac (figure 135),
- Un système maçonné (4) pour les matériaux sous forme de blocs/briques (figure 136).

Parmi ces techniques constructives, les systèmes projetés et à ossature nécessitent la mise en place d'une membrane qui régule la transmission de vapeur dans le mur (pare-vapeur ou freine-vapeur).

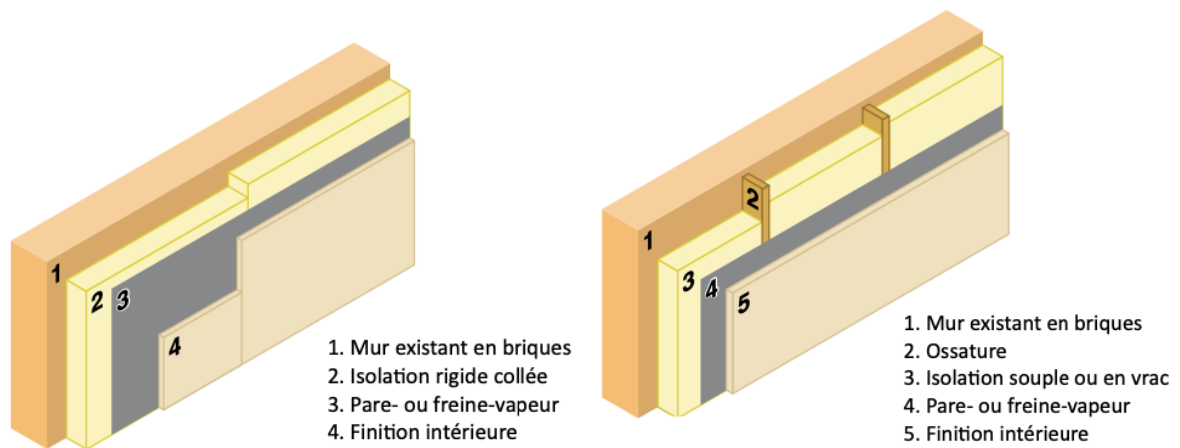


Figure 133 et 134 : schémas illustrant un système par collage à gauche et un système à ossature à droite – Source © ISOLIN

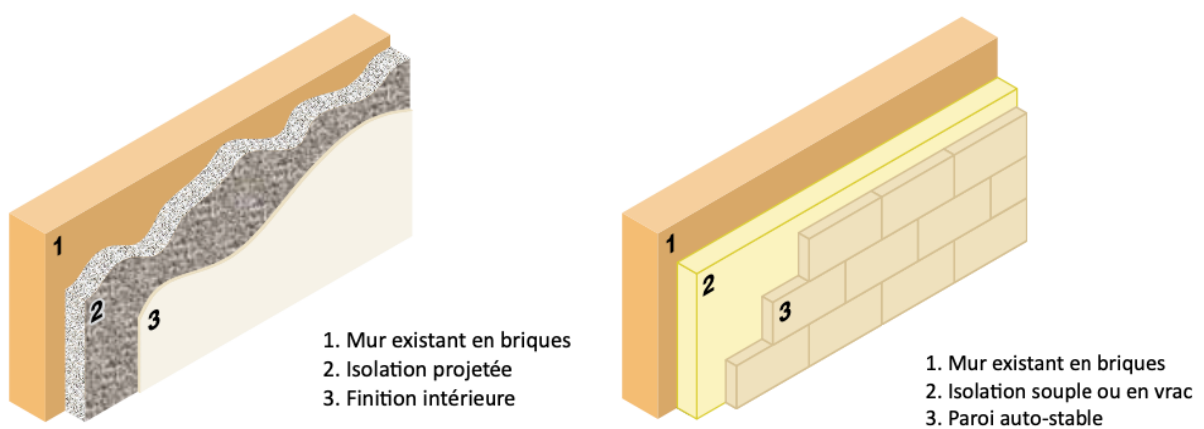


Figure 135 et 136 : schémas illustrant un système projeté à gauche et un système maçonné à droite – Source © ISOLIN

Après la prise en considération de ces facteurs essentiels pour le comportement du mur, d'autres éléments peuvent être pris en compte.

L'ambition de la Wallonie étant de tendre vers un parc bâti à faible émission pour réduire l'impact environnemental du monde de la construction, il serait pertinent face à cette ambition de prendre en considération l'impact environnemental de la solution d'isolation.

Plusieurs facteurs peuvent être pris en compte, comme :

- La provenance du matériau,
- La disponibilité de la ressource qui constitue le matériau utilisé,
- La nature du matériau,
- Le fait que le matériau dispose d'une déclaration environnementale,
- La pérennité de la solution,
- Le potentiel de réemploi/recyclage.

Des facteurs complémentaires peuvent également être pris en considération.

Parmi ceux-ci :

- L'impact de la solution d'isolation sur la santé des habitants,
- La facilité de mise en œuvre,
- L'entretien,
- Le prix.

Enfin, il est à mentionner que pour parvenir à une amélioration énergétique de qualité, la solution d'isolation est complémentaire à d'autres facteurs tels que :

- Une mise en œuvre minutieuse, car les finitions sont importantes sur la sensation de confort et la performance de la solution mise en place,
- Un système de chauffage qui permet en hiver de maintenir une chaleur confortable,
- Un système de ventilation qui permet de limiter le risque de surchauffe et garantit la qualité de l'air.

Lorsque l'une ou l'autre solution d'isolation par l'intérieur est déterminée, il est possible de calculer si son impact causera ou non de la condensation, en régime statique.

Ce calcul, exprimé dans l'ouvrage de MOYA¹¹⁶, est le suivant :

Admettons qu'en hiver, la température intérieure considérée soit de 18° C et celle extérieure soit de 0° C, soit une différence de 18° C, et que les valeurs de résistance superficielle (Rs) données par les règles de l'art sont :

- $R_{S_{intérieure}} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$,
- $R_{S_{extérieure}} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Nous pouvons calculer la résistance du mur du cas d'étude :

$$\begin{aligned} R_{\text{mur}} &= R_{\text{total}} - R_{S_i} - R_{S_e} \\ &= 0,45 - 0,13 - 0,04 \\ &= 0,28 \text{ m}^2\text{K/W}. \end{aligned}$$

Dès lors, nous pouvons calculer la température présente dans les différentes parties du mur grâce au calcul suivant :

$$T = T_{\text{int}} - ((R_{S_{\text{int}}} / R_{\text{total}}) \cdot (T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}))$$

Voici la résolution pour un mur du cas d'étude (figure 137) :

Couche		Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR			18° C
Rs int	0,13	Ts int. = $18 - ((0,13/0,45) \cdot (18 - 0))$ = $18 - (0,289 \cdot 18)$ = 12,80° C	
R mur	0,28	Ts ext. = $12,80 + ((0,28/0,45) \cdot (18 - 0))$ = $11,12 + (11,2)$ = 1,6° C	
Rs ext	0,04		
EXTERIEUR			0° C

Figure 137 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur – Illustration © Antoine GUSBIN

Ce même calcul sera appliqué pour chaque itération afin de savoir à quel moment la température atteint le point de rosée, soit 7,5° C, avec une température extérieure de 0° C.

¹¹⁶MOYA, J.-P. (2018). Isolation thermique durable des bâtiments existants : choix multicritères. Manuel pratique. 296 pages. ISBN : 9782281142945

4.5 Itérations

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, les matériaux isolants seront issus de l'ouvrage de Sophie TRACHTE et Dorothee STIERNON (2023), dédié aux isolants thermiques en rénovation. Pour choisir les matériaux les plus pertinents pour la réalisation des itérations de solutions d'isolation par l'intérieur, les critères suivants seront pris en compte :

- Nature de la ressource (biosourcés/recyclés – minérale/naturelle – pétrochimie),
- État du stock (grande quantité – quantité moyenne – quantité limitée),
- Provenance (idéalement la Belgique, sinon pays limitrophes – Europe – hors continent),
- Compatibilité avec une ITI de façade (oui – non),
- Conductivité thermique (faible de préférence),
- Chaleur spécifique (haute de préférence),
- Déphasage thermique,
- Résistance à la diffusion de vapeur (faible de préférence),
- Hygroscopicité (idéalement capacité hygroscopique).

Nous parvenons à une première sélection représentée aux pages 154 et 155 sous forme de tableau (figure 138), réalisé par A. Gusbin, sur base des sources suivantes :

- STIERNON, D., TRACHTE, S. (2023). Isolants thermiques en rénovation. ISBN : 9782889155347,
- Cluster Eco-construction. (2015). La mallette à isolation : les fiches techniques matériaux isolants thermiques. Ré-Emploi.

Afin de ne pas se limiter à ces quelques possibilités, la sélection s'élargit aux pays limitrophes et prend en compte les matériaux suivants aux pages 154 et 155, dans un tableau (figure 139), réalisé par A. Gusbin, sur base des mêmes sources susmentionnées.

			CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES			CARACTERISTIQUES PRATIQUES		
			nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	
	origine biosourcée/recyclée	fibres d'herbes matelas	produits biosourcés	quantité importante	Belgique	oui	entre structures	
		paille de céréales en vrac	produits biosourcés	renouvelable et quantité importante	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée	
		paille de céréales en ballot	produits biosourcés	renouvelable et quantité importante	Belgique	oui	entre structures	
		liège expansé en vrac	recyclage	renouvelable et quantité suffisante	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée	
		cellulose recyclée en vrac	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée	
		cellulose recyclée en matelas	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	entre structures	
M	origine naturels ou synthétiques							
A		argile expansé en vrac	minérale	quantité importante	Belgique	non	entre structure ou sous dalle	
T		laine de roche - matelas	recyclage et/ou naturelle non renouvelable	quantité importante	Belgique	oui	entre structures	
E		laine de roche panneau rigide	recyclage et/ou naturelle non renouvelable	quantité importante	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	
R		laine de verre - vrac	recyclage et/ou naturelle non renouvelable	quantité importante	Belgique	NR	entre caisson ou structure fermée	
I		laine de verre - matelas	recyclage et/ou naturelle	quantité importante	Belgique	oui	entre structures	
A		laine de verre - panneau	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	
U		verre cellulaire panneau rigide	recyclage + minérale	quantité importante	Belgique	oui	collé	
X	base synthétique	polystyrène expansé - vrac	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée	
		polystyrène expansé - panneau	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	entre structures ou mécanique	
		polystyrène expansé - panneau rigide	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	
		polystyrène extrudé - panneau rigide	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	
		polyuréthane - mousse	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	non	projetée	
		polyuréthane - panneau rigide	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	
		mousse phénolique - panneau riède	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	

Figure 138 : tableau illustrant les caractéristiques de la première sélection d'isolants – Illustration © Antoine GUSBIN

	origine biosourcée/recyclée	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	entre caisson ou structure fermée
M	origine biosourcée/recyclée	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	entre structures
		recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	fixation mécanique ou collé
A		produits biosourcés	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	entre caisson ou structure fermée
		produits biosourcés	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	entre structures
T		produits biosourcés et minéral	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	maçonné
E		produits biosourcés et minéral	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	maçonné
		produits biosourcés	quantité moyenne	Allemagne, France	oui	entre structures
R		recyclage et/ou biosourcé	quantité moyenne	France	oui	entre caisson ou structure fermée
I		produits biosourcés	quantité moyenne	U.S.A., Chine, Inde	oui	entre structures
A		produits biosourcés	quantité limitée	Allemagne, Angleterre, France	oui	entre structures
U	origine naturels ou synthétiques	minérales	quantité importante	Amérique du Nord, Europe	non	entre structure ou sous dalle
X		minérales	quantité importante	U.S.A., Chine, Afrique du Sud	NR	NR
		minérales	quantité importante	Europe	NR	NR

Figure 139 : tableau illustrant les caractéristiques de la deuxième sélection d'isolants – Illustration © Antoine GUSBIN

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES				
conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité
0,04	1600 - 2100	NR	1 à 2	NR
0,052	1550	NR	1,14	NR (mais paille en ballot oui)
0,052	1550	14h44 pour 35 cm	1,14	oui
0,042	NR (1670 pour liège vrac non-expensé)	10h27 pour 22 cm	2,9	très peu
0,04	1950	6h43 pour 19 cm	1	très peu
0,039	NR	8h49 pour 21 cm	NR	oui
0,1	1000	19h49 pour 45 cm	2	oui
0,04	1030	3h44 pour 17 cm	NR (1 pour laine de roche en vrac)	non
0,36	850	3h44 pour 17 cm	1	non
0,045	850	3h30 pour 18 cm	1	non
0,035	NR (850 pour laine de roche en vrac)	3h30 pour 18 cm	1	non
0,032	NR (850 pour laine de roche en vrac)	3h30 pour 18 cm	1	non
0,038	1000	8h52 pour 23 cm	infini	non
0,033	ND	2h29 pour 16 cm	NR	non
0,35	1470	4h17 pour 16 cm	20 à 140	non
0,35	1470	4h17 pour 16 cm	20 à 140	non
0,033	NR	3h32 pour 15 cm	50 à 150	non
NR	NR	3h32 pour 15 cm	NR	non
0,023	NR	3h16 pour 13 cm	45 à 200	non
0,022	NR	3h22 pour 11 cm	NR	non

0,04	2100	7h36 pour 19 cm	1 à 3	oui
0,038	2100	7h04 pour 18 cm	3	oui
0,043	2100	15h48 pour 22 cm	3	oui
0,045	1700	?	2	oui
0,042	1700	4h28 pour 22 cm	2	oui
0,065	1870	22h42 pour 35 cm	1	oui
0,065	1870		1	oui
0,044	1800	4h29 pour 18 cm	2	oui
0,052	1800	11h26 pour 25 cm	1	oui
0,045	1600	4h32 pour 20 cm	1 à 3	oui
0,036	1800	5h18 pour 18 cm	2	oui
0,053	900	7h42 pour 23 cm	2	oui
0,06	1000	7h42 pour 23 cm	3	oui
0,042	1000	8h16 pour 23 cm	3	oui

Nous pouvons constater que plusieurs matériaux isolants sont moins favorables que d'autres, de par leur nature, leur utilisation, ou leur hygroscopicité.

A la page suivante se trouve un tableau synthétique (figure 140) réalisé par A. Gusbin sur base des mêmes sources précédentes. Il énumère les matériaux isolants qui, après tri, présentent les caractéristiques qui conviennent le mieux à une solution d'isolation par l'intérieur sur le bâti ancien.

Ce présent travail ne pouvant calculer la performance de l'ensemble des matériaux présents dans ce tableau, les 5 matériaux suivants furent sélectionnés :

- L'enduit ou le bloc chaux-chanvre (système à projeter ou à coller).
- La cellulose recyclée en vrac (système entre caisson ou structure fermée).
- La fibre de bois en vrac (système entre caisson ou structure fermée).
- Le matelas de fibre de bois (système à structure fermée)
- Le panneau ou bloc silicate de calcaire (système à coller).

Afin de comparer ces solutions d'origine biosourcées avec une solution d'une autre nature, une sixième performance sera calculée :

- Le panneau rigide en polyuréthane (système à « coller¹¹⁷ »).

¹¹⁷ Fixer mécaniquement contre le mur.

CARACTERISTIQUES ENVIRONNEMENTALES				CARACTERISTIQUES PRATIQUES			
		nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	
M	origine	fibres d'herbes matelas	produits biosourcés	quantité importante	Belgique	oui	entre structures
A	biosourcée/recyclée		produits biosourcés	renouvelable et quantité importante	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée
T		paille de céréales en vrac	produits biosourcés	renouvelable et quantité importante	Belgique	oui	entre structures
E		paille de céréales en ballot	recyclage	renouvelable et quantité suffisante	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée
I		liège expansé en vrac	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	entre caisson ou structure fermée
A		cellulose recyclée en vrac	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	entre structures
U		cellulose recyclée en matelas	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	entre structures
X							

origine biosourcée/recyclée		fibres de bois vrac	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	entre caisson ou structure fermée
M		laine de bois matelas	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	entre structures
A		fibres de bois panneau	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	fixation mécanique ou collé
T		laine de chanvre vrac	produits biosourcés	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	entre caisson ou structure fermée
E		laine de chanvre matelas	produits biosourcés	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	entre structures
R		brique chaux et de chanvre vrac ou bloc	produits biosourcés et minéral	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	maçonnerie
I		enduit chaux - chanvre	produits biosourcés et minéral	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	maçonnerie
A		laine de lin matelas	produits biosourcés	quantité moyenne	Allemagne, France	oui	entre structures
U		fibres de coton - chanvre en vrac	recyclage et/ou biosourcé	quantité moyenne	France	oui	entre caisson ou structure fermée
X		fibres de coton recyclées matelas	produits biosourcés	quantité moyenne	U.S.A., Chine, Inde	oui	entre structures
		laine de mouton matelas	produits biosourcés	quantité limitée	Allemagne, Angleterre, France	oui	entre structures
	origine naturels ou synthétiques	vermiculite expansée vrac	minérales	quantité importante	U.S.A., Chine, Afrique du Sud	NR	NR
		béton cellulaire isolant panneau	minérales	quantité importante	Europe	NR	NR

Figure 140 : tableau illustrant les caractéristiques des d'isolants sélectionnés – Illustration © Antoine GUSBIN

CARACTERISTIQUES TECHNIQUES				
conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité
0,04	1600 - 2100	NR	1 à 2	NR
0,052	1550	NR	1,14	NR (mais
0,052	1550	14h44 pour 35 cm	1,14	paille en ballot oui)
0,042	NR (1670 pour liège vrac non-expensé)	10h27 pour 22 cm	2,9	oui
0,04	1950	6h43 pour 19 cm	1	très peu
0,039	1950	8h49 pour 21 cm	1	très peu
0,04	2100	7h36 pour 19 cm	1 à 3	oui
0,038	2100	7h04 pour 18 cm	3	oui
0,043	2100	15h48 pour 22 cm	3	oui
0,045	1700	?	2	oui
0,042	1700	4h28 pour 22 cm	2	oui
0,065	1870	22h42 pour 35 cm	1	oui
0,065	1870	4h29 pour 18 cm	1	oui
0,044	1800	11h26 pour 25 cm	2	oui
0,052	1800	4h32 pour 20 cm	1	oui
0,045	1600	5h18 pour 18 cm	1 à 3	oui
0,036	1800	7h42 pour 23 cm	2	oui
0,06	1000	8h16 pour 23 cm	3	oui
0,042	1000		3	oui

4.5.1 L'enduit ou bloc chaux-chanvre

CARACTERISTIQUES										
nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité	
Enduit/bloc chaux - chanvre	produits biosourcés et minéral	renouvelable et grande quantité	Allemagne, France	oui	maçonné	0,065	1870	22h42 pour 35 cm	1	oui

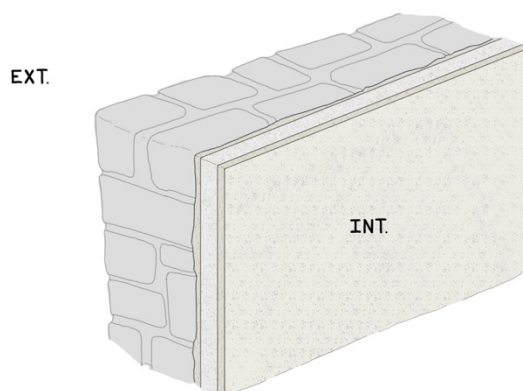


Figure 141 : tableau et schéma illustrant les caractéristiques d'un enduit/bloc chaux-chanvre – Illustration © Antoine GUSBIN

La première solution d'isolation (figure 141) pourrait être d'appliquer un bloc chaux-chanvre de 9 centimètres sur le mur en moellons de grès (système 3 ou 4 page 150). Cette intervention ne nécessite pas d'importants travaux et permettrait une correction thermique de la paroi froide ce qui est bénéfique pour le confort d'hiver et les besoins énergétiques. Cette solution permettrait de conserver les caractéristiques hygrothermiques et l'équilibre naturel du mur constitué de matériaux naturels, l'enduit chaux – chanvre garanti : inertie et transfert de vapeur d'eau. Si le taux d'humidité est trop élevé dans la paroi, la capacité hygroscopique de la solution lui permettra de stocker cette eau et de la restituer en temps voulu.

Dans ce cas de figure, le matériau mis en œuvre fait office d'isolant et de finition intérieure.

Comme le démontre la modélisation suivante (figure 142), cette première solution n'est pas la plus performante, mais elle permet de réduire sensiblement la sensation de paroi froide.

Composant(s)				
EXT	C1	Mur intérieur - porteur Partie primaire		
		Moellons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment		
		Nouveau ≥ 60 ans ± 0.25 m		R 0.152 m²K/W
	C2	Finition de sol Structure portante		
		Chape Mortier de chaux-trass (100 mm)		
		Nouveau ≥ 60 ans ± 0.1 m		R 0.143 m²K/W
INT	C3	Mur intérieur - porteur Partie primaire		
		Moellons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment		
		Nouveau ≥ 60 ans ± 0.25 m		R 0.152 m²K/W
	C4	Mur intérieur - non porteur Partie primaire		
		Blocs Béton de chanvre (600x90x300 mm) Collé		
		Nouveau ≥ 50 ans ± 0.09 m		R 1.216 m²K/W
Total			0.69 m	U 0.55 W/m²K

Figure 142 : modélisation illustrant la performance d'un enduit/bloc chaux-chanvre – Source © TOTEM

R solution = 0,45 + 1,22 = 1,67 m²K/W et U solution = 0,55 W/m²K.

Elle permet cependant une nette amélioration de la paroi en général. Cette solution est à coupler avec une isolation en toiture et sur dalle, le remplacement des châssis et l'étanchéité à l'air du bâtiment afin de parvenir à un bâtiment présentant une performance énergétique globale acceptable.

Cette solution présente-t-elle une possibilité de formation de condensation ?

Couche		Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR			18° C
Rs int	0,13	$Ts \text{ int.} = 18 - ((0,13/1,67) \cdot (18 - 0))$ $= 18 - (0,078 \cdot 18)$ $= 16,6^{\circ} \text{ C}$	
R isolant	1,09	$T \text{ iso-mur} = 16,6 - ((1,09/1,67) \cdot (18 - 0))$ $= 16,6 - (0,65 \cdot 18)$ $= 4,85^{\circ} \text{ C} \Rightarrow \text{CONDENSATION}$	
R mur	0,41	$T \text{ ext.} = 4,85 - ((0,41/1,67) \cdot (18 - 0))$ $= 4,85 - (0,25 \cdot 18)$ $= 0,43$	
Rs ext	0,04	$Ts \text{ ext.} = 0,43 - ((0,04/1,67) \cdot (18 - 0))$ $= 0,43 - (0,02 \cdot 18)$ $= 0^{\circ} \text{ C}$	
EXTERIEUR			0° C

Figure 143 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur avec un enduit/bloc chaux-chanvre – Illustration © Antoine GUSBIN

Il semblerait qu'en hiver, il y ait naturellement formation de condensation au sein du mur (figure 143). Dans ce cas de figure, la condensation n'entraînera pas de moisissure dans le mur ou l'enduit, mais il est tout de même possible qu'il soit mouillé à l'intérieur.

Il n'est malheureusement pas dans la capacité de ce présent travail de calculer l'hygroscopicité du matériau. Il sera donc impossible de savoir s'il sera capable d'absorber et restituer la condensation formée au passage du point de rosée, ou s'il est nécessaire de prévoir un système d'évacuation vers l'extérieur de l'eau condensée.

Si le matériau n'en est pas capable, un système de chauffage peut être placé à proximité de la paroi afin de chauffer le matériau pour que le point de rosée ne soit pas atteint. Il est important de jumeler ce dispositif à une bonne ventilation. Cela favoriserait le potentiel de séchage du mur.

Cette solution ne présentant pas de capacité porteuse, les éléments porteurs du bâtiment, dont les poutres de plancher, sont logiquement maçonnées dans le mur. Ils représentent donc des ponts thermiques et seraient soumis à un taux d'humidité similaire au taux d'humidité initial, ce qui peut les rendre vulnérables à la condensation et à la formation de moisissure.

4.5.2 La cellulose recyclée en vrac

CARACTERISTIQUES										
nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité	
Cellulose recyclée en vrac	recyclage	quantité importante	Belgique	oui	entre structures	0,039	1950	8h49 pour 21 cm	1	oui

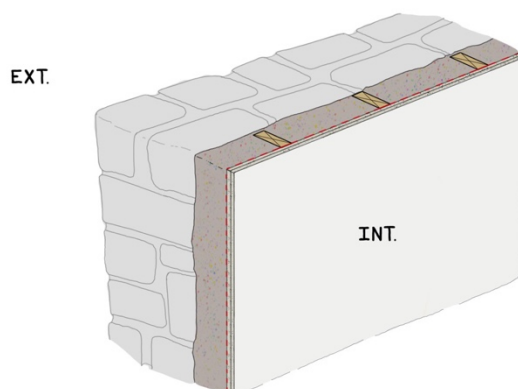


Figure 144 : tableau et schéma illustrant les caractéristiques de la cellulose recyclée en vrac – Illustration © Antoine GUSBIN

La deuxième solution d'isolation (figure 144) consiste en la mise en œuvre d'ouate de cellulose recyclée en vrac de 13 centimètres, disposée entre les montants d'une ossature indépendante du mur en moellons de grès (système 2 page 150). Cette intervention nécessite d'importants travaux et permettrait une correction thermique de la paroi qui atteindrait ainsi les objectifs de performance fixés à 0,24 W/m²K. Elle utilise des matériaux qui présentent une faible résistance à la diffusion de vapeur, une capacité hygroscopique et une inertie, ce qui permet de conserver les caractères hygroscopiques du mur. Afin d'obtenir une isolation pérenne, un freine-vapeur est placé entre l'isolant et le mur pour que celle-ci ne soit gorgée d'humidité, et la structure porteuse en bois est traitée afin de ne pas subir de déformation suite à la présence d'humidité. Si le taux d'humidité est trop élevé dans la paroi, la capacité hygroscopique de la solution lui permettra de stocker cette eau et de la restituer en temps voulu.

Comme le démontre la modélisation suivante (figure 145), cette première solution est performante et égale au seuil performanciel exigé de 0,24 W/m²K.

Composant(s)				
EXT.	C1	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moellons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.25 m
	C2	Finition de sol Structure portante Chape Mortier de chaux-trass (100 mm) Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.1 m
	C3	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moellons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.25 m
INT.	C4	Mur extérieur Isolation thermique ISOPROC Flocons Cellulose (133 mm) Pour remplissage entre ossature bois Insufflé sur site Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.133 m
Total			0.733 m	
			U 0.24 W/m²K	

Figure 145 : modélisation illustrant la performance de la cellulose recyclée en vrac – Source © TOTEM

$R_{\text{solution}} = 0,45 + 3,5 = 3,95 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $U_{\text{solution}} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Cette solution est à coupler avec une isolation en toiture et sur dalle, le remplacement des châssis et l'étanchéité à l'air du bâtiment afin de parvenir à un bâtiment présentant une haute performance énergétique globale.

Cette solution présente-t-elle une possibilité de formation de condensation ?

Couche	Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR		18° C
Rs int	0,13	$T_{s \text{ int.}} = 18 - ((0,13/3,95) \cdot (18 - 0))$ $= 18 - (0,033 \cdot 18)$ $= 17,41^\circ \text{C}$
R isolant	3,37	$T_{\text{iso-mur}} = 17,41 - ((3,37/3,95) \cdot (18 - 0))$ $= 17,41 - (0,85 \cdot 18)$ $= 2,05^\circ \text{C} \Rightarrow \text{CONDENSATION}$
R mur	0,41	$T_{\text{ext.}} = 2,05 - ((0,41/3,95) \cdot (18 - 0))$ $= 2,05 - (0,10 \cdot 18)$ $= 0,18$
Rs ext	0,04	$T_{s \text{ ext.}} = 0,18 - ((0,04/3,95) \cdot (18 - 0))$ $= 0,18 - (0,01 \cdot 18)$ $= 0^\circ \text{C}$
EXTERIEUR		0° C

Figure 146 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur avec de la cellulose recyclée en vrac – Illustration © Antoine GUSBIN

Il semblerait qu'en hiver, il y ait naturellement formation de condensation au sein du mur (figure 146). Dans ce cas de figure, la condensation n'entraînera pas de moisissure dans l'isolant ou le plâtre, au vu de leur hygroscopicité.

Il n'est malheureusement pas dans la capacité de ce présent travail de calculer l'hygroscopicité des matériaux. Il sera donc impossible de savoir s'ils seront capables d'absorber et restituer la condensation formée au passage du point de rosée, ou s'il est nécessaire de prévoir un système d'évacuation vers l'extérieur de l'eau condensée.

Si le matériau n'en est pas capable, un système de chauffage peut être placé à proximité de la paroi afin de chauffer le matériau pour que le point de rosée ne soit pas atteint. Il est important de jumeler ce dispositif à une bonne ventilation. Cela favoriserait le potentiel de séchage du mur.

Cette solution peut offrir un nouveau système porteur, c'est-à-dire que les éléments normalement liés à la maçonnerie, dont les poutres de plancher, peuvent être désolidarisés de la maçonnerie et ne représenteront plus ainsi de ponts thermiques. Ils seraient soumis à un taux d'humidité moindre que d'ordinaire, ce qui pérenniserait l'ensemble.

Il est à noter que les poutres de plancher sont généralement reliées à des éléments permettant d'assurer la stabilité de la façade (ancres). Dès lors, il faut s'assurer que, si les poutres sont désolidarisées des ancres et de la façade, la poutraison se raccroche d'une manière ou d'une autre à la façade afin d'assurer sa stabilité du bâtiment.

4.5.3 La fibre de bois en vrac

CARACTERISTIQUES										
nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité	
Fibre de bois en vrac	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	entre caisson ou structure fermée	0,04	2100	7h36 pour 19 cm	1 à 3	oui

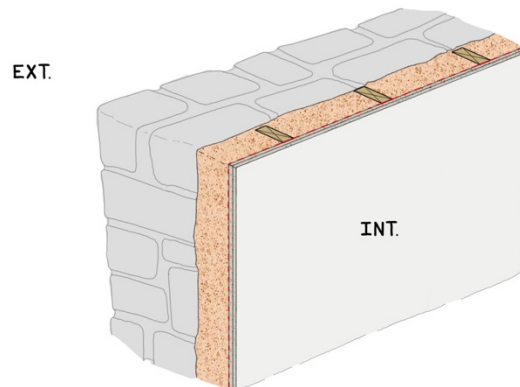


Figure 147 : tableau et schéma illustrant les caractéristiques de la fibre de bois en vrac – Illustration © Antoine GUSBIN

La troisième solution d'isolation (figure 147) consiste en la mise en œuvre de fibres de bois (liège) en vrac sur une épaisseur de 14 centimètres, disposées entre les montants d'une ossature indépendante du mur en moellons de grès et ce dernier (système 2 page 150). Cette intervention nécessite d'importants travaux et permettrait une correction thermique de la paroi se rapprochant des objectifs de performance fixés à $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$. Cette solution utilise des matériaux qui présentent une faible résistance à la diffusion de vapeur, une capacité hygroscopique et une inertie, ce qui permet de conserver les caractères hygroscopiques du mur. Afin d'obtenir une isolation pérenne, un freine-vapeur est placé entre l'isolant et le mur, et la structure porteuse en bois est traitée afin de ne pas subir de déformation suite à la présence d'humidité.

Si le taux d'humidité est trop élevé dans la paroi, la capacité hygroscopique de la solution lui permettra de stocker cette eau et de la restituer en temps voulu.

Comme le démontre le calcul suivant, cette première solution est performante mais reste supérieure au seuil exigé de $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ (figure 148).

Composant(s)				
EXT. INT.	C1	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau ≥ 60 ans ↑ 0.25 m	R 0.152 m²K/W	
	C2	Finition de sol Structure portante Chape Mortier de chaux-trass (100 mm) Nouveau ≥ 60 ans ↑ 0.1 m	R 0.143 m²K/W	
	C3	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau ≥ 60 ans ↑ 0.25 m	R 0.152 m²K/W	
	C4	Mur extérieur - porteur Isolation thermique Granulés Liège expansé (140 mm) Pour remplissage entre ossature bois Insufflé sur site Nouveau ≥ 60 ans ↑ 0.14 m λ 0.047 W/mK	R 2.979 m²K/W	
Total			0.74 m	U 0.28 W/m²K

Figure 148 : modélisation illustrant la performance de la fibre de bois en vrac – Source © TOTEM

$R_{\text{solution}} = 0,45 + 2,98 = 3,43 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $U_{\text{solution}} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Cette solution est à coupler avec une isolation en toiture et sur dalle, le remplacement des châssis et l'étanchéité à l'air du bâtiment afin de parvenir à un bâtiment présentant une haute performance énergétique globale.

Cette solution présente-t-elle une possibilité de formation de condensation ?

Couche		Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR			18° C
Rs int	0,13	$T_{s \text{ int.}} = 18 - ((0,13/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 18 - (0,038 \cdot 18)$ $= 17,32^\circ \text{ C}$	
R isolant	2,85	$T_{\text{iso-mur}} = 17,32 - ((2,85/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 17,32 - (0,83 \cdot 18)$ $= 2,36^\circ \text{ C} \Rightarrow \text{CONDENSATION}$	
R mur	0,41	$T_{\text{ext.}} = 2,36 - ((0,41/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 2,36 - (0,12 \cdot 18)$ $= 0,21$	
Rs ext	0,04	$T_{s \text{ ext.}} = 0,21 - ((0,04/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 0,21 - (0,011 \cdot 18)$ $= 0^\circ \text{ C}$	
EXTERIEUR			0° C

Figure 149 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur avec de la fibre de bois en vrac – illustration © Antoine GUSBIN

Il semblerait qu'en hiver, il y ait naturellement formation de condensation au sein du mur (figure 149). Dans ce cas de figure, la condensation n'entraînera pas de moisissure dans l'isolant ou le plâtre, au vu de leur hygroscopicité.

Il n'est malheureusement pas dans la capacité de ce présent travail de calculer l'hygroscopicité des matériaux. Il sera donc impossible de savoir s'ils seront capables d'absorber et restituer la condensation formée au passage du point de rosée, ou s'il est nécessaire de prévoir un système d'évacuation vers l'extérieur de l'eau condensée.

Si le matériau n'en est pas capable, un système de chauffage peut être placé à proximité de la paroi afin de chauffer le matériau pour que le point de rosée ne soit pas atteint. Il est important de jumeler ce dispositif à une bonne ventilation. Cela favoriserait le potentiel de séchage du mur.

Cette solution peut offrir un nouveau système porteur, c'est-à-dire que les éléments normalement liés à la maçonnerie, dont les poutres de plancher, peuvent être désolidarisés de la maçonnerie et ne représenteront plus ainsi de ponts thermiques. Ils seraient soumis à un taux d'humidité moindre que d'ordinaire, ce qui pérenniserait l'ensemble.

Il est à noter que les poutres de plancher sont généralement reliées à des éléments permettant d'assurer la stabilité de la façade (ancres). Dès lors, il faut s'assurer que, si les poutres sont désolidarisées des ancres et de la façade, la poutraison se raccroche d'une manière ou d'une autre à la façade afin d'assurer sa stabilité.

4.5.4 Le matelas de fibre de bois

CARACTERISTIQUES										
nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité	
Fibre de bois en matelas	recyclage et/ou biosourcé	renouvelable et quantité importante	Allemagne, Autriche, Suisse	oui	entre caisson ou structure fermée	0,043	2100	15h48 pour 22 cm	3	oui

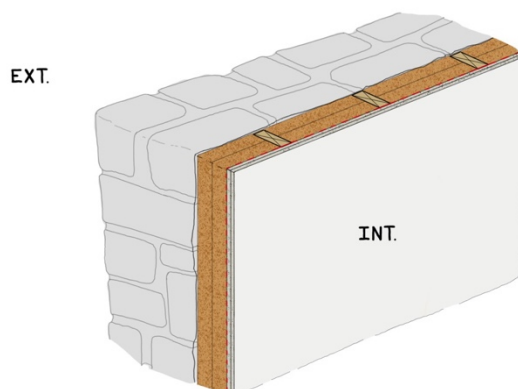


Figure 150 : tableau et schéma illustrant les caractéristiques d'un matelas en fibre de bois – Illustration © Antoine GUSBIN

La quatrième solution d'isolation (figure 150) consiste en la mise en œuvre de panneaux de fibre de bois sur une épaisseur de 14 centimètres, disposés entre les montants d'une ossature indépendante du mur en moellons de grès (système 2 page 150). Cette intervention nécessite d'importants travaux et permettrait une correction thermique de la paroi se rapprochant des objectifs de performance fixés à 0,24 W/m²K. Cette solution utilise des matériaux qui présentent une faible résistance à la diffusion de vapeur, une capacité hygroscopique et une inertie, ce qui permet de conserver les caractères hygroscopiques du mur. Afin d'obtenir une isolation pérenne, un freine-vapeur est placé entre l'isolant et la finition en plâtre pour que celle-ci ne soit gorgée d'humidité, et la structure porteuse en bois est traitée afin de ne pas subir de déformation suite à la présence d'humidité. Si le taux d'humidité est trop élevé dans la paroi, la capacité hygroscopique de la solution lui permettra de stocker cette eau et de la restituer en temps voulu.

Comme le démontre le calcul suivant, cette première solution est performante mais reste supérieure au seuil exigé de 0,24 W/m²K (figure 151).

Composant(s)					
EXT. INT.	C1	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	≥ 60 ans	± 0.25 m	R 0.152 m²K/W
	C2	Finition de sol Structure portante Chape Mortier de chaux-trass (100 mm) Nouveau	≥ 60 ans	± 0.1 m	R 0.143 m²K/W
	C3	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	≥ 60 ans	± 0.25 m	R 0.152 m²K/W
	C4	Mur - finition exérieure Isolation thermique Panneau Fibre de bois (140 mm) Pour mur creux Crochets et clips à ajouter Nouveau	≥ 60 ans	± 0.14 m	λ 0.047 W/mK R 2.979 m²K/W
Total			0.74 m		U 0.28 W/m²K

Figure 151 : modélisation illustrant la performance d'un matelas en fibre de bois – Source © TOTEM

$R_{\text{solution}} = 0,45 + 2,98 = 3,43 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $U_{\text{solution}} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Cette solution est à coupler avec une isolation en toiture et sur dalle, le remplacement des châssis et l'étanchéité à l'air du bâtiment afin de parvenir à un bâtiment présentant une haute performance énergétique globale.

Cette solution présente-t-elle une possibilité de formation de condensation ?

Couche		Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR			18° C
Rs int	0,13	$T_{s \text{ int.}} = 18 - ((0,13/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 18 - (0,038 \cdot 18)$ $= 17,32^\circ \text{ C}$	
R isolant	2,85	$T_{\text{iso-mur}} = 17,32 - ((2,85/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 17,32 - (0,83 \cdot 18)$ $= 2,36^\circ \text{ C} \Rightarrow \text{CONDENSATION}$	
R mur	0,41	$T_{\text{ext.}} = 2,36 - ((0,41/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 2,36 - (0,12 \cdot 18)$ $= 0,21$	
Rs ext	0,04	$T_{s \text{ ext.}} = 0,21 - ((0,04/3,43) \cdot (18 - 0))$ $= 0,21 - (0,011 \cdot 18)$ $= 0^\circ \text{ C}$	
EXTERIEUR			0° C

Figure 152 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur avec un matelas en fibre de bois – Illustration © Antoine GUSBIN

Il semblerait qu'en hiver, il y ait naturellement formation de condensation au sein du mur (figure 152). Dans ce cas de figure, la condensation n'entraînera pas de moisissure dans l'isolant ou le plâtre, au vu de leur hygroscopicité.

Il n'est malheureusement pas dans la capacité de ce présent travail de calculer l'hygroscopicité des matériaux. Il sera donc impossible de savoir s'ils seront capables d'absorber et restituer la condensation formée au passage du point de rosée, ou s'il est nécessaire de prévoir un système d'évacuation vers l'extérieur de l'eau condensée.

Si le matériau n'en est pas capable, un système de chauffage peut être placé à proximité de la paroi afin de chauffer le matériau pour que le point de rosée ne soit pas atteint. Il est important de jumeler ce dispositif à une bonne ventilation. Cela favoriserait le potentiel de séchage du mur.

Cette solution peut offrir un nouveau système porteur, c'est-à-dire que les éléments normalement liés à la maçonnerie, dont les poutres de plancher, peuvent être désolidarisés de la maçonnerie et ne représenteront plus ainsi de ponts thermiques. Ils seraient soumis à un taux d'humidité moindre que d'ordinaire, ce qui pérenniserait l'ensemble.

Il est à noter que les poutres de plancher sont généralement reliées à des éléments permettant d'assurer la stabilité de la façade (ancres). Dès lors, il faut s'assurer que, si les poutres sont désolidarisées des ancres et de la façade, la poutraison se raccroche d'une manière ou d'une autre à la façade afin d'assurer sa stabilité.

4.5.5 Le panneau ou bloc silicate de calcaire

nature de la ressource	état du stock	origine	CARACTERISTIQUES							
			ITI façade	mise en œuvre	conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité	
Silicate de calcaire en panneau	minérale	quantité importante	Europe	oui (supposition)	fixation mécanique ou collé (supposition)	0,042	1000	8h16 pour 23 cm	3	oui

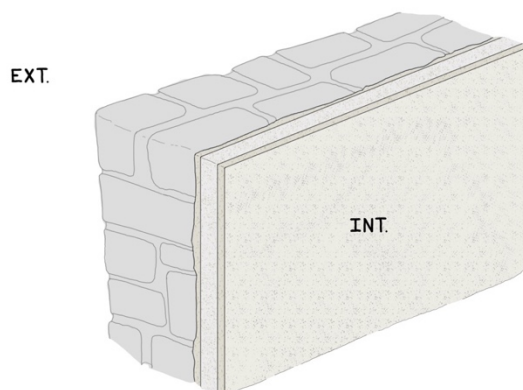


Figure 153 : tableau et schéma illustrant les caractéristiques d'un panneau/bloc silicate de calcaire – Illustration © Antoine GUSBIN

La cinquième solution d'isolation (figure 153) consiste en la mise en œuvre de panneaux de béton cellulaire sur une épaisseur de 14 centimètres. Ces panneaux seraient maçonnerés sur un mortier chaux – chanvre qui permette de lisser les irrégularités du mur en moellons, et seraient recouvert d'un enduit chaux – chanvre également (système 4 page 150). Cette intervention nécessite des travaux de moyenne ampleur et permettrait une correction thermique de la paroi qui atteigne les objectifs de performance fixés à 0,24 W/m²K. Cette solution utilise des matériaux qui présentent une faible résistance à la diffusion de vapeur, une capacité hygroscopique et une inertie, ce qui permet de conserver les caractères hygroscopiques du mur. Si le taux d'humidité est trop élevé dans la paroi, la capacité hygroscopique de la solution lui permettra de stocker cette eau et de la restituer en temps voulu.

Comme le démontre le calcul suivant, cette première solution est performante mais reste supérieure au seuil exigé de 0,24 W/m²K (figure 154).

Composant(s)					
EXT.	C1	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.25 m		R 0.152 m ² K/W
	C2	Finition de sol Structure portante Chape Mortier de chaux-trass (100 mm) Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.1 m		R 0.143 m ² K/W
	C3	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.25 m		R 0.152 m ² K/W
INT.	C4	Mur - finition intérieure Isolation thermique Panneau Béton cellulaire (140 mm) Collé Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.14 m λ 0.043 W/mK		R 3.256 m ² K/W
Total			0.74 m		U 0.26 W/m ² K

Figure 154 : modélisation illustrant la performance d'un panneau/bloc silicate de calcaire – Source © TOTEM

$R_{\text{solution}} = 0,45 + 3,26 = 3,71 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $U_{\text{solution}} = 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Cette solution est à coupler avec une isolation en toiture et sur dalle, le remplacement des châssis et l'étanchéité à l'air du bâtiment afin de parvenir à un bâtiment présentant une haute performance énergétique globale.

Cette solution présente-t-elle une possibilité de formation de condensation ?

Couche		Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR			18° C
Rs int	0,13	$T_{s \text{ int.}} = 18 - ((0,13/3,71) \cdot (18 - 0))$ $= 18 - (0,035 \cdot 18)$ $= 17,37^\circ \text{C}$	
R isolant	3,13	$T_{\text{iso-mur}} = 17,37 - ((3,13/3,71) \cdot (18 - 0))$ $= 17,37 - (0,84 \cdot 18)$ $= 2,18^\circ \text{C} \Rightarrow \text{CONDENSATION}$	
R mur	0,41	$T_{\text{ext.}} = 2,18 - ((0,41/3,71) \cdot (18 - 0))$ $= 2,18 - (0,11 \cdot 18)$ $= 0,19$	
Rs ext	0,04	$T_{s \text{ ext.}} = 0,19 - ((0,04/3,71) \cdot (18 - 0))$ $= 0,19 - (0,01 \cdot 18)$ $= 0^\circ \text{C}$	
EXTERIEUR			0° C

Figure 155 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur avec un panneau/bloc silicate de calcaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Il semblerait qu'en hiver, il y ait naturellement formation de condensation au sein du mur (figure 155). Dans ce cas de figure, la condensation n'entraînera pas de moisissure dans le mur ou l'enduit, mais il est tout de même possible qu'il soit mouillé à l'intérieur.

Il n'est malheureusement pas dans la capacité de ce présent travail de calculer l'hygroscopicité du matériau. Il sera donc impossible de savoir s'il sera capable d'absorber et restituer la condensation formée au passage du point de rosée, ou s'il est nécessaire de prévoir un système d'évacuation vers l'extérieur de l'eau condensée.

Si le matériau n'en est pas capable, un système de chauffage peut être placé à proximité de la paroi afin de chauffer le matériau pour que le point de rosée ne soit pas atteint. Il est important de jumeler ce dispositif à une bonne ventilation. Cela favoriserait le potentiel de séchage du mur.

Cette solution ne présentant pas de capacité porteuse, les éléments porteurs du bâtiment, dont les poutres de plancher, sont logiquement maçonnées dans le mur. Ils représentent donc des ponts thermiques et seraient soumis à un taux d'humidité similaire au taux d'humidité initial, ce qui peut les rendre vulnérables à la condensation et à la formation de moisissure.

Cette solution pourrait être adaptée et insérée dans une structure métallique, ce qui permettrait de fonctionner avec une nouvelle structure porteuse (en acier par exemple), et de supprimer les ponts thermiques.

4.5.6 Le panneau rigide en polyuréthane

CARACTERISTIQUES										
nature de la ressource	état du stock	origine	ITI façade	mise en œuvre	conductivité thermique W/m.K	chaleur spécifique J/kg.K	déphasage thermique	résistance diffusion de vapeur	hygroscopicité	
PUR en panneau rigide	pétrochimie	quantité limitée	Belgique	oui	fixation mécanique ou collé	0,023	ND	3h16 pour 13 cm	45 à 200	non

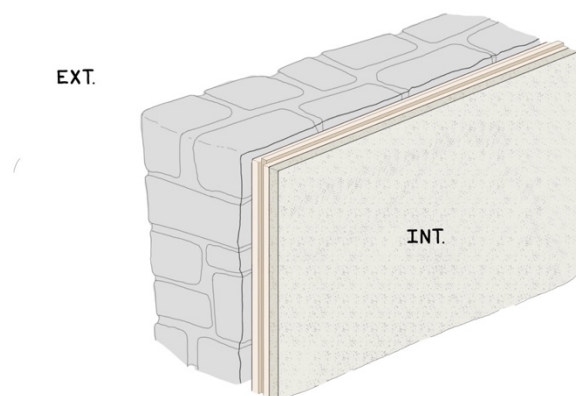


Figure 156 : tableau et schéma illustrant les caractéristiques d'un panneau rigide en polyuréthane – Illustration © Antoine GUSBIN

La dernière solution d'isolation (figure 156) consiste en la mise en œuvre de panneaux de polyuréthane sur une épaisseur de 8 centimètres. Ces panneaux seraient fixés mécaniquement au mur, et seraient recouvert d'un enduit chaux – chanvre (système 1 page 150). Cette intervention nécessite des travaux de moyenne ampleur et permettrait une correction thermique de la paroi qui atteigne les objectifs de performance fixés à 0,24 W/m²K. Cette solution présente un matériau isolant étanche à l'eau et qui n'est pas hygroscopique. Il serait recouvert d'un enduit de chaux-chanvre, ce qui permettrait d'apporter de l'inertie et de réguler les échanges de vapeur du milieu intérieur. Si le taux d'humidité est trop élevé dans la paroi, cette solution ne lui permettra pas de stocker cette eau et de la restituer en temps voulu.

Comme le démontre le calcul suivant, cette première solution est performante et égale au seuil exigé de 0,24 W/m²K (figure 157).

Composant(s)				
EXT.	C1	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.25 m	R 0.152 m²K/W
	C2	Finition de sol Structure portante Chape Mortier de chaux-trass (100 mm) Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.1 m	R 0.143 m²K/W
	C3	Mur intérieur - porteur Partie primaire Moëllons Grès (250 mm) Posé sur mortier de ciment Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.25 m	R 0.152 m²K/W
INT.	C4	Mur - finition intérieure Isolation thermique RECTICEL Panneau PUR - Revêtement d'aluminium (80 mm) Hors fixations Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.08 m	R 3.478 m²K/W
Total			0.68 m	U 0.24 W/m²K

Figure 157 : modélisation illustrant la performance d'un panneau rigide en polyuréthane – Source © TOTEM

$R_{\text{solution}} = 0,45 + 3,48 = 3,93 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $U_{\text{solution}} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Cette solution est à coupler avec une isolation en toiture et sur dalle, le remplacement des châssis et l'étanchéité à l'air du bâtiment afin de parvenir à un bâtiment présentant une haute performance énergétique globale.

Cette solution présente-t-elle une possibilité de formation de condensation ?

Couche		Résist. thermique	Température de surface
INTERIEUR			18° C
Rs int		0,13	$T_{s \text{ int.}} = 18 - ((0,13/3,93) \cdot (18 - 0))$ $= 18 - (0,033 \cdot 18)$ $= 17,41^\circ \text{ C}$
R isolant		3,35	$T_{\text{iso-mur}} = 17,41 - ((3,35/3,93) \cdot (18 - 0))$ $= 17,41 - (0,85 \cdot 18)$ $= 2,07^\circ \text{ C} \Rightarrow \text{CONDENSATION}$
R mur		0,41	$T_{\text{ext.}} = 2,07 - ((0,41/3,93) \cdot (18 - 0))$ $= 2,07 - (0,10 \cdot 18)$ $= 0,19$
Rs ext		0,04	$T_{s \text{ ext.}} = 0,19 - ((0,04/3,93) \cdot (18 - 0))$ $= 0,19 - (0,1 \cdot 18)$ $= 0^\circ \text{ C}$
EXTERIEUR			0° C

Figure 158 : tableau illustrant la température dans différentes parties du mur avec un panneau rigide en polyuréthane – Illustration © Antoine GUSBIN

Il semblerait qu'en hiver, il y ait formation de condensation au sein du mur (figure 158). Étant donné que l'isolant est hydrofuge, il ne risque pas d'être soumis à la condensation en son sein. Cependant, il y aurait de la condensation entre l'isolant et le mur.

L'enduit intérieur permettrait tout de même d'amener une inertie et une capacité à réguler les diffusions de vapeur d'eau.

Avec cette solution, il est nécessaire de prévoir, entre le mur et l'isolant, un système d'évacuation vers l'extérieur de l'eau condensée, par exemple en prévoyant un système de récolte de l'eau condensée, qui dirigerait cette dernière vers l'extérieur à travers une série de joints creux.

Cette solution ne présentant pas de capacité porteuse, les éléments porteurs du bâtiment, dont les poutres de plancher, sont logiquement maçonnées dans le mur. Ils représentent donc des ponts thermiques et seraient soumis à un taux d'humidité similaire au taux d'humidité initial, ce qui peut les rendre vulnérables à la condensation et la formation de moisissure.

4.6 Discussion sur les itérations

L'isolation des murs de façades ne semble pas être une solution absolue. Le bâtiment étant un système complet, les autres sources de déperditions méritent une intervention afin de diminuer drastiquement le besoin en chauffage. Cependant, elle n'est pas à négliger. Elle permettrait de réduire le besoin de chauffage et de participer au confort intérieur des occupants en supprimant le phénomène de paroi froide.

Avec ou sans isolation, le mur en moellons de grès et son système d'isolation passent le point de rosée à un moment donné ce qui forme de la condensation.

Lorsque le mur est nu, il est capable de gérer cette condensation de manière naturelle grâce aux matériaux naturels mis en œuvre.

Si celui-ci est recouvert d'un enduit de même composition que son mortier, le mur devrait être capable d'assumer et réguler cette condensation, même si ce travail n'étudie pas l'hygroscopicité de cette solution.

Ensuite, les quatre solutions d'isolation proposées permettent d'améliorer positivement la performance du mur, en veillant à utiliser des matériaux qui présentent des caractéristiques similaires à celles du mur (ouverture à la diffusion de vapeur, hygroscopicité et inertie).

Globalement, en utilisant une épaisseur de 14 centimètres d'isolation, le seuil exigé de $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ est rarement atteint. Cela signifie qu'avec une solution plus épaisse, et donc plus imposante sur l'espace de vie, la performance du mur pourrait encore être améliorée.

De manière inévitable, le point de rosée est atteint dans l'épaisseur du mur, ce qui amène l'humidité à migrer vers le milieu le plus chaud, c'est-à-dire vers l'intérieur, vers l'isolant.

C'est pour cette raison qu'il est primordial d'opérer avec un isolant présentant des caractéristiques similaires au comportement du mur.

Par manque de données, il n'est malheureusement pas possible d'étudier la capacité hygroscopique de ces solutions afin de s'assurer que ces dernières soient adaptées au bâti ancien, bien que nous ne doutions pas que ce soit le cas.

Enfin, nous avons vu que faire usage d'un matériau qui ne présente pas les mêmes caractéristiques que le mur cause de la condensation. Il est alors impératif de mettre en place un système d'évacuation de l'eau vers l'extérieur, afin de garantir le potentiel de séchage du mur et d'éviter tout problème qui pourrait toucher à la stabilité du bâtiment.

Conclusion

La Wallonie dispose d'un patrimoine bâti ancien qui est le reflet historique de nos régions. Ce patrimoine est le fruit de nos ancêtres qui vivaient de leur récolte et de leur élevage et qui ont construit des bâtiments afin de répondre aux exigences de l'économie en vigueur à cette époque. Les paysans construisirent ainsi leur ferme, pluricellulaire ou à cour, avec des ressources naturelles locales, dont la pierre.

Pour des raisons culturelles et économiques à l'heure actuelle, il est indispensable de conserver ce patrimoine bâti qui a construit les paysages de la Wallonie et de l'améliorer d'un point de vue énergétique afin de satisfaire les exigences fixées par la Directive (UE) 2018/844 du Parlement européen et du Conseil du 30 mai 2018. L'enveloppe de ce patrimoine bâti est généralement peu performante et les sources principales de déperdition sont la toiture, les fuites d'air à cause d'une mauvaise étanchéité, les châssis non-performants et les murs.

Les murs de ce parc bâti ancien construits en pierre sont généralement composés d'un double parement de pierre, lié par un blocage, à base de mortier de chaux. A l'époque, ils étaient généralement recouverts d'un enduit de chaux. Ce type de construction fut pensé de manière à pouvoir naturellement contenir une certaine quantité d'humidité (eau de pluie, humidité de l'air, remontée capillaire) régulée par une capacité de séchage, de manière à ce qu'il y ait des transferts de chaleur avec ses milieux intérieurs et extérieurs. Les échanges d'eau transitent à travers le mortier qui lie la maçonnerie. Ce dernier présente des capacités hygroscopique et capillaire qui lui permettent de contenir une certaine quantité d'humidité. Les transferts de chaleur, quant à eux, ont principalement lieu à travers la masse de la pierre utilisée.

Dès lors, comment intervenir sur un mur qui représente à lui seul, un système actif complexe ? Il s'agirait de mettre en place une solution d'isolation thermique qui permettrait au mur de conserver son équilibre naturel pour éviter toute dégradation, c'est-à-dire une solution qui permettrait les échanges d'eau et de chaleur pour éviter tout problème lié à la condensation et toute situation d'inconfort.

En Belgique, contrairement à la France ou à l'Allemagne, la solution d'une isolation par l'extérieur est exclue parce qu'elle entrave notamment la conservation des façades. La solution possible vers laquelle on se tourne est alors une intervention thermique par l'intérieur.

Cette solution permet d'améliorer la résistance thermique du mur mais présente plusieurs inconvénients dont la perte de l'inertie thermique du mur ce qui réduit le potentiel de séchage et peut provoquer de la condensation, et la possible présence de ponts thermiques (figure 159).

Murs en pierre calcaire dure		Quantité d'eau	Capacité de séchage	Condensation	Inertie thermique	Résistance thermique
Base	Base				● ● ●	
	E-E				○ ○ ○	
	E-P				○ ○ ○	
	P-E				○ ○ ○	
	P-P				○ ○ ○	

Figure 159 : tableau illustrant les impacts d'une isolation thermique par l'intérieur – Source © HYGROBA

A partir de ce constat, il est primordial de tenir en considération et maintenir les propriétés du mur afin de ne pas le détériorer. Pour parvenir à une solution d'isolation respectueuse, il faudrait idéalement choisir un matériau qui présente : une capacité hygroscopique afin de pouvoir réguler les transferts de vapeur avec l'ambiance intérieure et le mur pour garantir son séchage ; une inertie thermique afin de garantir le confort intérieur et éviter tout risque de surchauffe en été, ainsi qu'une faible résistance à la diffusion de vapeur.

En tenant compte de ces propriétés, et en les couplant avec des considérations environnementales, telles que la provenance du matériau, la disponibilité de la ressource, la nature du matériau utilisé, le fait que le matériau utilisé soit soumis à une déclaration environnementale, la pérennité de la solution d'isolation, le potentiel de réemploi... nous avons pu établir une liste de matériaux isolants disponibles et produits en Belgique, ou dans les pays limitrophes.

Issus de cette liste des matériaux isolants, nous en avons sélectionné six matériaux avec lesquels nous ferons une simulation de la performance de la nouvelle paroi. Parmi ceux-ci, nous retrouvons :

- L'enduit ou le bloc chaux-chanvre (système à projeter ou à coller),
- La cellulose recyclée en vrac (système entre caisson ou structure fermée),
- La fibre de bois en vrac (système entre caisson ou structure fermée),
- Le matelas de fibre de bois (système à structure fermée),
- Le panneau ou bloc de silicate de calcaire (système à coller).

Afin de comparer ces solutions d'origine biosourcées avec une solution d'une autre nature, une sixième performance sera étudiée : le panneau rigide en polyuréthane (système à coller).

Ces simulations permettent de réaliser que la performance du mur se rapproche fortement des exigences fixées ($0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$) et que le mur en moellons de grès, doté ou non d'un système isolant, passe le point de rosée en son sein, ce qui forme de la condensation.

Les cinq premières solutions présentent les mêmes propriétés que le mur, ce qui permet le transfert d'humidité vers le milieu le plus chaud, à travers l'isolant, et permet un potentiel de séchage du mur.

Faire usage d'un matériau ne présentant pas les propriétés du mur (isolant polyuréthane) cause également de la condensation, mais celle-ci ne peut être absorbée et restituée par l'isolant. Cette solution est à coupler avec un système d'évacuation des eaux vers l'extérieur, afin d'éviter tout problème qui pourrait toucher à la stabilité du bâtiment.

N'oublions pas que certains isolants par l'intérieur peuvent causer des ponts thermiques, au risque de dégrader les éléments de poutraison notamment et de porter atteinte à la stabilité du bâtiment.

Nous venons de parcourir comment mener une intervention thermique par l'intérieur afin que celle-ci soit respectueuse envers le mur et envers l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE PRINCIPALE

Ouvrages consultés

- BERTRAND, M. (2020). Les fermes brabançonnaises au 18^e siècle. Issuu. En ligne : https://issuu.com/lesfestivalsdewallonie/docs/intro_fermes_v2 (consulté le 28/04/24)
- BERTRAND, M. (2024). Laneffe : ferme et châteaux à Walcourt. RTBF. En ligne : https://www.youtube.com/watch?v=rsDQExe_4tc (consulté le 05/04/24)
- BLARY, F., GELY, J.-P., BERNARDI, P. (2020). Pierre de construction : de la carrière au bâtiment. Éditions du comité des travaux historiques et scientifiques. Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques. ISBN : 9782735509171.
- CASTIAU, E., & al. (2014). L'Ardenne Centrale La Thiérache. CFDT Atlas des Paysages de Wallonie. Belgique. ISBN : 9782805601583. En ligne : <https://cpdt.wallonie.be/publications/> (consulté le 15/10/23)
- Cluster Eco-construction. (2015). La mallette à isolation : les fiches techniques matériaux isolants thermiques. Ré-Emploi. En ligne : <https://clusters.wallonie.be/ecoconstruction/sites/ecoconstruction/files/2020-10/fiche%20technique%20mat%C3%A9riaux%20isolation%20technique.pdf> (consulté le 18/07/24)
- CNUDDE, C., HAROTIN, J.-J., MAJOT, J.-P. (1990). Pierres et Marbres de Wallonie. Archives d'Architecture Moderne, Bruxelles. 184 pages. ISBN 2871430683
- CREMASCO, V. & al. (2007). L'Entre-Vesdre-et-Meuse. CFDT Atlas des Paysages de Wallonie. Belgique. ISBN : 2874012238. En ligne : <https://cpdt.wallonie.be/publications/> (consulté le 23/10/23)
- DELVIESMAISON, S., HOTTOIS, M., COOLS, Q. (2021). Les fermes à cour : recommandations pour leur avenir. Fondation rurale de Wallonie, 98 pages.
- DE BRIEVE, G., MOUREAUX, P. (1984). Le patrimoine monumental de Belgique : Wallonie. Volume 12, tome 4, Province de Liège : arrondissement de Verviers. MARDAGA, P. édition. ISBN : 2802100696.
- GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 1. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.
- GENICOT, L.-F. (coord.) (1987). Ardenne Centrale. Liège, 247 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2802100742.
- GENICOT, L.-F. (coord.) (1992). Ardenne Herbagère. Liège ; Bruxelles, 299 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2870094906.
- GENICOT, L.-F. (coord.) (1987). Pays de Herve. Liège, 227 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2802100750.
- HAVEAUX, C., PRAILLET, F. (2019). En Wallonie, des plateformes locales aident les ménages à rénover leur logement. Renouvellement. En ligne : <https://www.renouvellement.be/fr/en-wallonie-des-plateformes-locales-aident-les-menages-a-renover-leur-logement/> (consulté le 14/08/24)
- MESNAGER, A. (1923). Matériaux de construction. Vol. 1, Pierres. J.-B. Baillière.
- MOYA, J.-P. (2018). Isolation thermique durable des bâtiments existants : choix multicritères. Manuel pratique. 296 pages. ISBN : 9782281142945
- STIERNON, D., TRACHTE, S. (2023). Isolants thermiques en rénovation. ISBN : 9782889155347.

Documents officiels

- Commission Européenne. (2019). Le Pacte Vert pour l'Europe. En ligne : https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_19_6691 (consulté le 06/04/23)

- Commission Européenne. (2020). Loi Européenne sur le Climat. En ligne : https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal/european-climate-law_fr (consulté le 06/04/23)
- Commission Européenne. (2020). Une vague de rénovation pour l'Europe : verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la qualité de vie. En ligne : https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en (consulté le 09/04/23)
- DEMOTTE, R., ANTOINE, A. (2008). Annexe 7 : Document de référence pour les pertes par transmission. En ligne : <https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/annexe-7---fr.pdf?ID=12572> (consulté le 24/07/24)
- Etat de l'Agriculture Wallonne (2022). Population active. En ligne : [https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-A II b 2.html#:~:text=La%20Wallonie%20compte%20moins%20de,temps%20plein%20\(47%20%25\).](https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-A II b 2.html#:~:text=La%20Wallonie%20compte%20moins%20de,temps%20plein%20(47%20%25).) (consulté le 02/03/24)
- FCCC. (2015). Adoption de l'Accord de Paris. En ligne : <https://climat.be/politique-climatique/internationale/accord-de-paris> (consulté le 06/04/23)
- HENRY, P. (2023). Soutien et massification de la rénovation énergétique des logements. Wallonie. En ligne : <https://henry.wallonie.be/home/communiqués-de-presse/presses/soutien-et-massification-de-la-renovation-energetique-des-logements.html#:~:text=Le%20taux%20annuel%20de%20rénovation,comme%20l%27ambition%20la%20Wallonie> (consulté le 12/05 24)
- SPW. (2020). Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment. En ligne : <https://energie.wallonie.be/fr/strategie-de-renovation.html?IDC=9580> (consulté le 06/04/23)

Études

- ATHEBA. (s.-d.). Connaissance du bâti ancien. Maisons paysannes de France. En ligne : <https://maisons-paysannes.org/actions/economies-denergie/atheba-amelioration-thermique-du-bati-ancien/> (consulté le 17/03/23)
- BLUMBERGA, A., BLUMBERGA, D., FREUDENBERG, P. et al. (s.-d.). Robust internal thermal insulation of historic building. RIBuild. En ligne : <https://www.ribuild.eu/knowledge-base/#research> (consulté le 06/04/23)
- CETE de l'Est. (2013). HYGROBA : étude de la réhabilitation hygrothermique des parois anciennes, maisons paysannes de France. Rapport. En ligne : <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/hygroba-etude-la-rehabilitation-hygrothermique-des-parois-anciennes> (consulté le 05/04/23)
- CETE de l'Ouest. (2012). Etat de l'art et définition d'une typologie. HUMIBATex.
- CSTB. (2017). Guide de recommandations techniques HUMIBATex : Prise en compte des risques hygrothermiques en réhabilitation du bâti existant. E, ligne : <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/guide-humibatex> (consulté le 17/05/23)
- CSTC. (1997). NIT 205 : pierres naturelles. En ligne : <http://qc.spw.wallonie.be/fr/qualiroutes/doc/NIT%20205.pdf> (consulté le 24/07/24)
- Département de l'Energie et du Bâtiment Durable SPW – DG04. (2013). Etude CO-ZEB : Rapport final de projet. En ligne : <https://energie.wallonie.be/fr/etude-co-zeb-cout-optimum.html?IDC=7224&IDD=97766> (consulté le 06/04/23)
- ENTPE ; CETE de l'Est et de l'Ouest ; MPF ; INSA de Strasbourg. (2011). Modélisation du comportement thermique du bâtiment ancien avant 1948 : Rapport de synthèse. BATAN. En ligne : <https://www.rehabilitation-bati-ancien.fr/espace-documentaire/batan-modelisation-du-comportement-thermique-du-batiment-ancien-1948> (consulté le 06/04/23)

- EVRARD, A., BRANDERS, A., De HERDE, A. (2011). Isolation thermique par l'intérieur des murs existants en briques plaines : guides d'aide à la conception. SPW – DG04 : Jambes, 98 pages. En ligne : <http://hdl.handle.net/2078.1/72467> (consulté le 01/04/23)
- IEE. (2009). TABULA (Typology Approach for Building Stock Energy Assessment). En ligne : https://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/scientific/BE_TABULA_ScientificReport_VITO.pdf (consulté le 05/04/23)
- ICEDD (Institut de Conseil et d'Etudes en Développement Durable), (2022). Bilan énergétique de la Wallonie 2019 : Bilan global. En ligne : <https://energie.wallonie.be/fr/bilan-energetique-global-2019.html?IDC=6288&IDD=158398> (consulté le 02/03/23)
- MORADIAS, P.-A., SILVA, P., CASTRO-GOMES, J.-P., SALAZAR, M.-V., PIRES, L. (2012). Experimental study on hygrothermal behaviour of retrofit solutions applied to old building walls, Construction and building materials. En ligne : https://scholar.google.be/scholar?q=Experimental+study+on+hygrothermal+behaviour+of+retrofit+solutions+applied+to+old+building+walls&hl=fr&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholar (consulté le 09/04/23)
- R.E.D. (2013). Patrimoine et Energie - Projet Interrégional ERFIN.
- R.E.D. (2011). Energie et Patrimoine : 25 cas pratiques. Le bâti ancien, entre enjeux patrimoniaux et énergétiques.
- STIERNON, D., TRACHTE, S., DUBOIS, S., et al. (2017). Heritage value combined with energy and sustainable retrofit – representative types of old wallonian dwellings built before 1914. En ligne : <https://hdl.handle.net/2268/290993> (consulté le 06/04/23)
- STIERNON, D. & TRACHTE, S. (2018). P-RENEWAL (rénovation énergétique du bâti wallon d'avant-guerre (1914) à valeur patrimoniale). En ligne : https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/fr/object/boreal%3A222676/datastream/PDF_01/view (consulté le 18/01/22)

Mémoires/thèses

- CALLEBAUT, K. (2000). Characterisation of historical lime mortars in Belgium : implication for restoration mortar, unpublished PhD-thesis, K.U.Leuven.
- GERARD, E., STIERNON, D., VANDENBROUCKE, D., & GILLIS, C. (). Réhabiliter les fermes à cour attenantes à leurs terres agricoles : un appui pour la culture locale ? Faculté d'architecture – ingénierie architecturale – urbanisme (LOCI), Louvain-la-Neuve. Promotrice : Dorothée Stiernon.
- LIEGEOIS, Q. (2020). Comportement thermique de murs en moellon de pierre naturelle. Faculté d'architecture – ingénierie architecturale – urbanisme (LOCI), Louvain-la-Neuve. Promotrice : Sophie Trachte.
- MINDEN, C. (2023). Bâti rural wallon, quelles solutions durables et circulaires pour sa rénovation énergétique ? Faculté d'architecture, Uliège. Promotrice : Sophie Trachte.
-

BIBLIOGRAPHIE SECONDAIRE

Ouvrages consultés

- DELVIESMAISON, S., HOTTOIS, M., ANTOINE, D. (2018). Les fermes-blocs : recommandations pour leur avenir. Fondation Rurale de Wallonie, Namur, 127 pages.
- GENICOT, L.-F., BUTIL, P., JONGHE, S., et al. (1996). Le patrimoine rural de Wallonie. La maison paysanne. T. I : Des modèles aux réalités. Volume 2. Crédit Communal, Bruxelles, 353 pages, ISBN : 2871932298.
- MARDAGA, P. (1986). Hesbaye Liégeoise. Liège, 215 pages, MARDAGA, P. édition. ISBN : 2802100637
- PASQUASY, F. (1970). Si Polleur m'était conté. Exemplaire n°106.

Études

- HENS, H. (1998). *Performance predictions for masonry walls with inside insulation using calculation procedures and laboratory testings*. Journal of thermal environment and building science, 22 (1) : 32-48.

Mémoires

- MATHY, A. (2020). L'avenir des fermes à cour en Hesbaye namuroise. Faculté d'architecture, Université de Liège. Promotrice : Sibrine Durnez.
- MOUREAUX, D. (2020). La rénovation du stock bâti, levier ou frein à la reconstruction urbaine durable ? Faculté d'architecture – ingénierie architecturale – urbanisme (LOCI), Louvain-la-Neuve. Promotrice : Dorothée Stiernon et Sophie Trachte.

ANNEXES

Annexe 1: tableau illustrant la tonalité des fermes à cour et les matériaux utilisés par région agro-géographique.

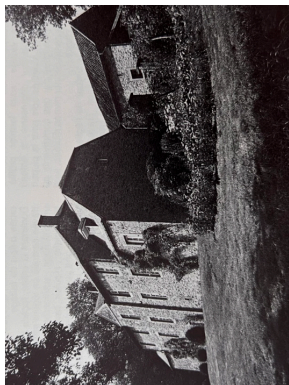
MATERIAUX				
	description	murs	illustrations	toiture
R E G I O N S	Plateaux limoneux hennuyer			
	Plateaux limoneux brabançon			
	Hesbaye			
	Condroz			
	Fagne-Famenne			
	Lorraine			
	Ardenne			
	Pays de Herve			
Cas d'étude : Ardenne Herbagère				

Annexe 2 : illustration des fermes à cour en Ardenne Herbagère

Ferme de la drève de Maison bois :

Localisation : Maison bois,
Verviers.





Ferme et manoir de Chinru:

Localisation : Chinru, Theux.

Ferme et « manoir de Chinru », composés de deux bâtiments parallèles datant des 18^e et 19^e siècles, réalisés en moellons de grès de Staneux, de pierres calcaires et de briques, ouverts sur une cour pavée et clôturée.



Sasserotte, n° 4 :

Localisation : Sasserotte, Theux.

Ferme clôturée du 17^e siècle, en moellons de grès et calcaire, composée d'une habitation parallèle aux granges, étables et remise. Accès à l'époque par un porche aujourd'hui accolé au mur pignon du corps de logis. Il est doté d'annexes sous appentis. Il présente une façade arrière de moellonnage perturbé de grès jaunâtres.





Ferme de la Tour Fr. Wolff :

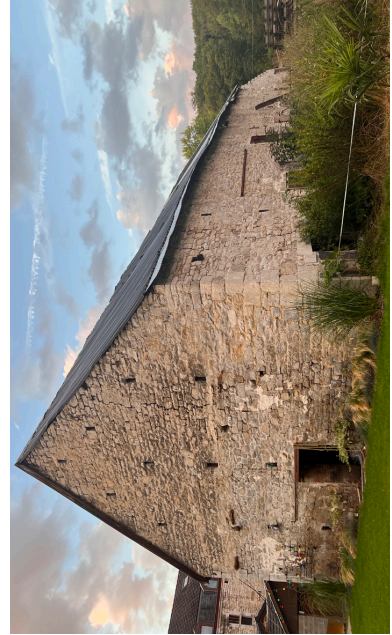
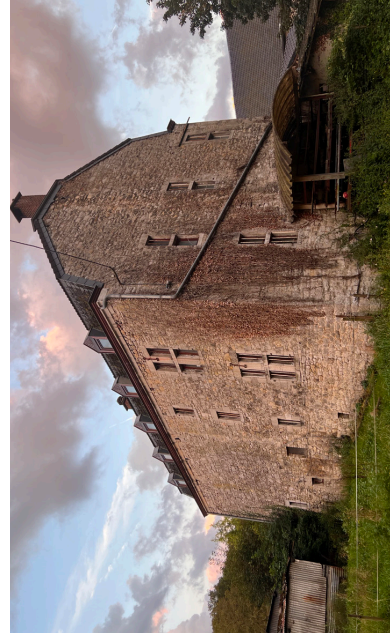
Localisation : Oneux, Theux.

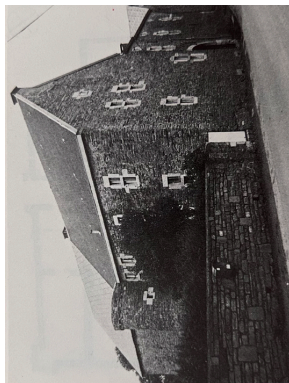
Ensemble semi-clôturé datant du début du 17^e siècle, en moellons de grès et en calcaire. A l'entrée de cet ensemble, tour jadis défensive du début du 17^e, voire du 16^e siècle, en moellons calcaire et au rejointoiement ferrugineux.



Ferme de Louheau :

Localisation : Louheau,
Pepinster.

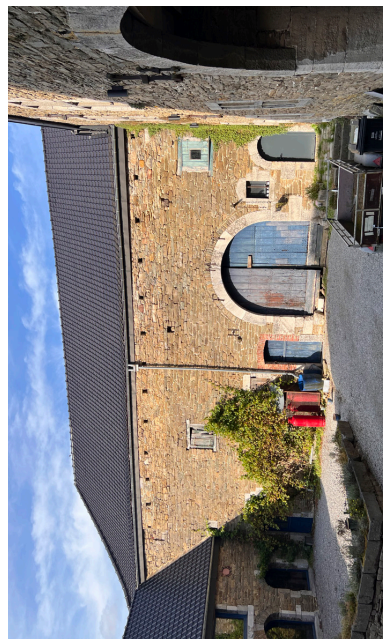


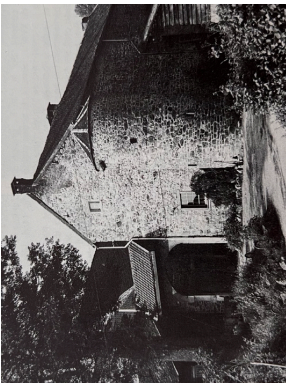


Ferme de la Dime :

Localisation : Jevoumont, Theux.

Vaste quadrilatère du 17^e siècle, en moellons de grès, pisé d'une tour carrée. Il s'agit d'un ensemble remanié et aménagé exclusivement en habitations. Entrée dans la cour par un portail cintré dont la clé est datée 1827.



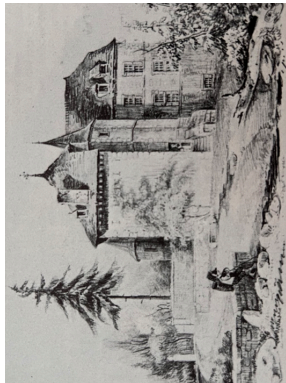


Ferme de Wislez :

Localisation : Wislez, Theux.

Volumes de la fin du 17^e siècle, en moellons de grès et en calcaire, isolés dans un site de prairies et de bosquet. Ferme clôturée, habitée au 18^e siècle par la famille de Fraipont et défensive avec une tour d'angle circulaire. Les bâtiments sont disposés autour d'une cour oblongue et pavée, accessible par un porche à arc en anse de panier, avec une clé centrale datée de 1770. La façade du logis est dotée d'ancres formant le nombre 1681, l'année de construction du bâtiment. Le logis fut remanié au cours du 18^e siècle ainsi qu'au cours des siècles suivants.

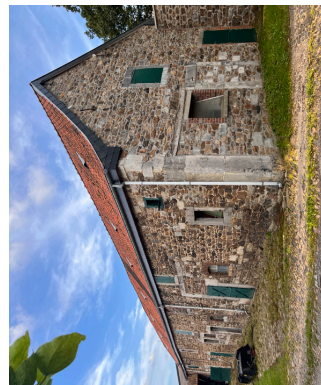
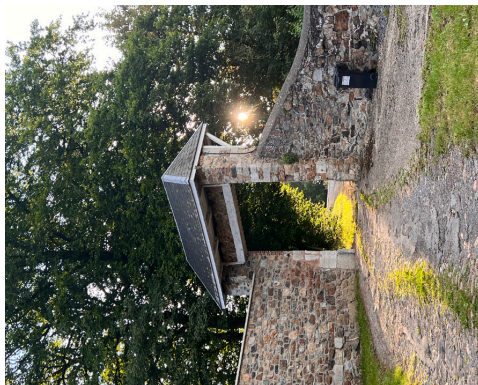
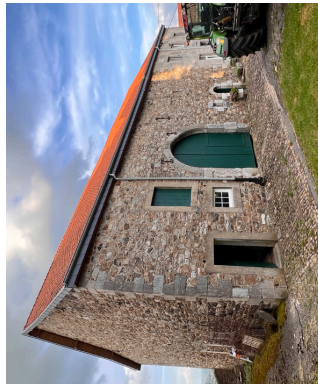


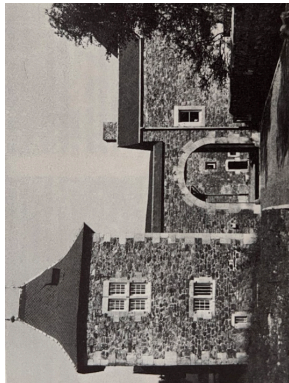


Château de Hautregard :

Localisation : Hautregard, Theux.

Le château est joint à une ferme et résulte d'une construction en plusieurs temps difficilement lisible. Le château date du 17^e siècle et est maçonné en moellons de grès sombres, moellons calcaires notamment. Ses baies furent remaniées au milieu du 17^e siècle et après 1850. A cette même date, élévation d'une nouvelle façade et adjonction de deux tours d'angle. Le château est accompagné d'une ferme qui semble avoir conservé quelques parties anciennes. Elle comprend des bâtiments d'époques différentes dont un bâtiment qui date de la fin du 16^e ou début du 17^e siècles construit en moellons de grès et logeant la grange et une étable. La cour, en pente, est accessible par deux porches, dont un est daté 1826.



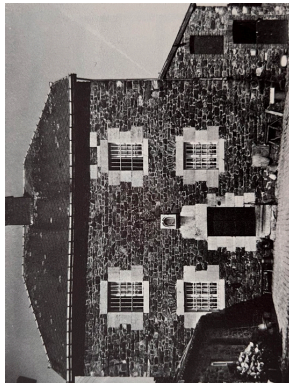


Ferme de la Chapelle :

Localisation : Jehoster, Theux.

Vaste quadrilatère du 17^e siècle, en moellons de grès, piqué d'une tour carrée. Il s'agit d'un ensemble remanié et aménagé exclusivement en habitations. Entrée dans la cour par un portail cintré dont la clé est datée 1827.





Ferme de la Porte-de-Fer :

Localisation : Jehoster, Theux.

Exploitation agricole du début du 17e siècle, isolée, et composée de bâtiments en moellons de grès, en briques et en calcaire, disposés autour d'une cour pavée.



Ferme des Loups :

Localisation : Trooz, Olne.



Annexe 3 : illustration des paysages et du style bâti de Polleur.

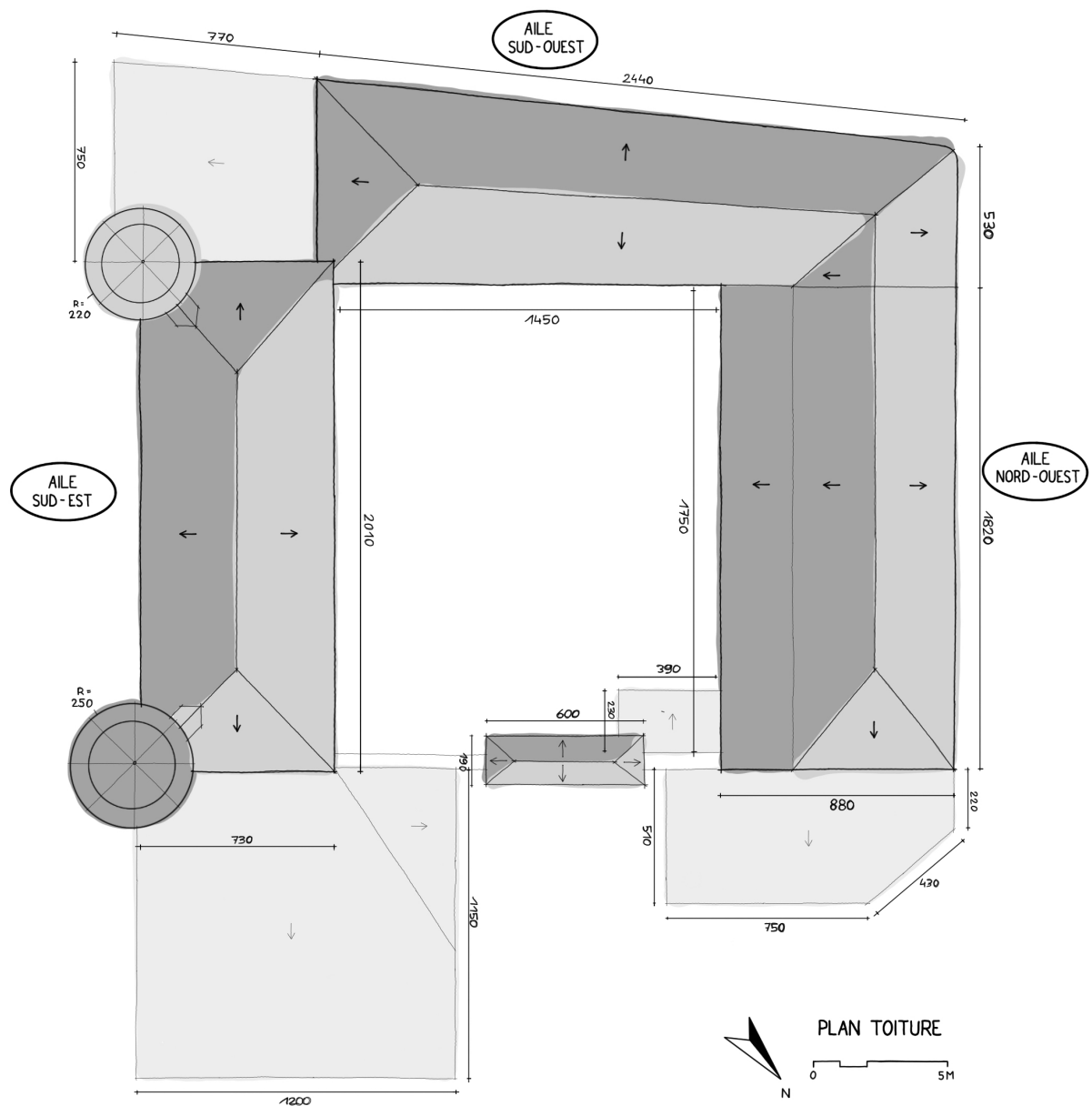


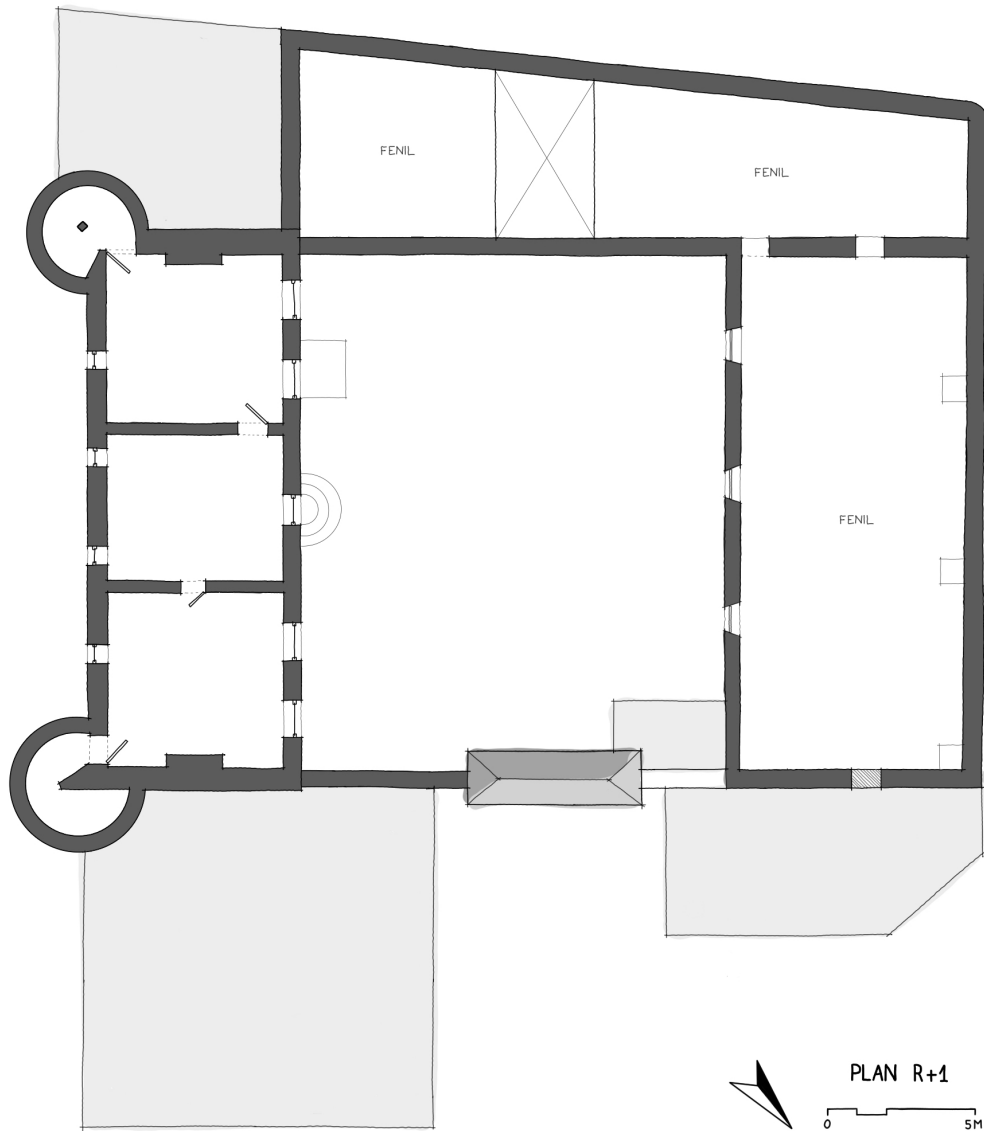


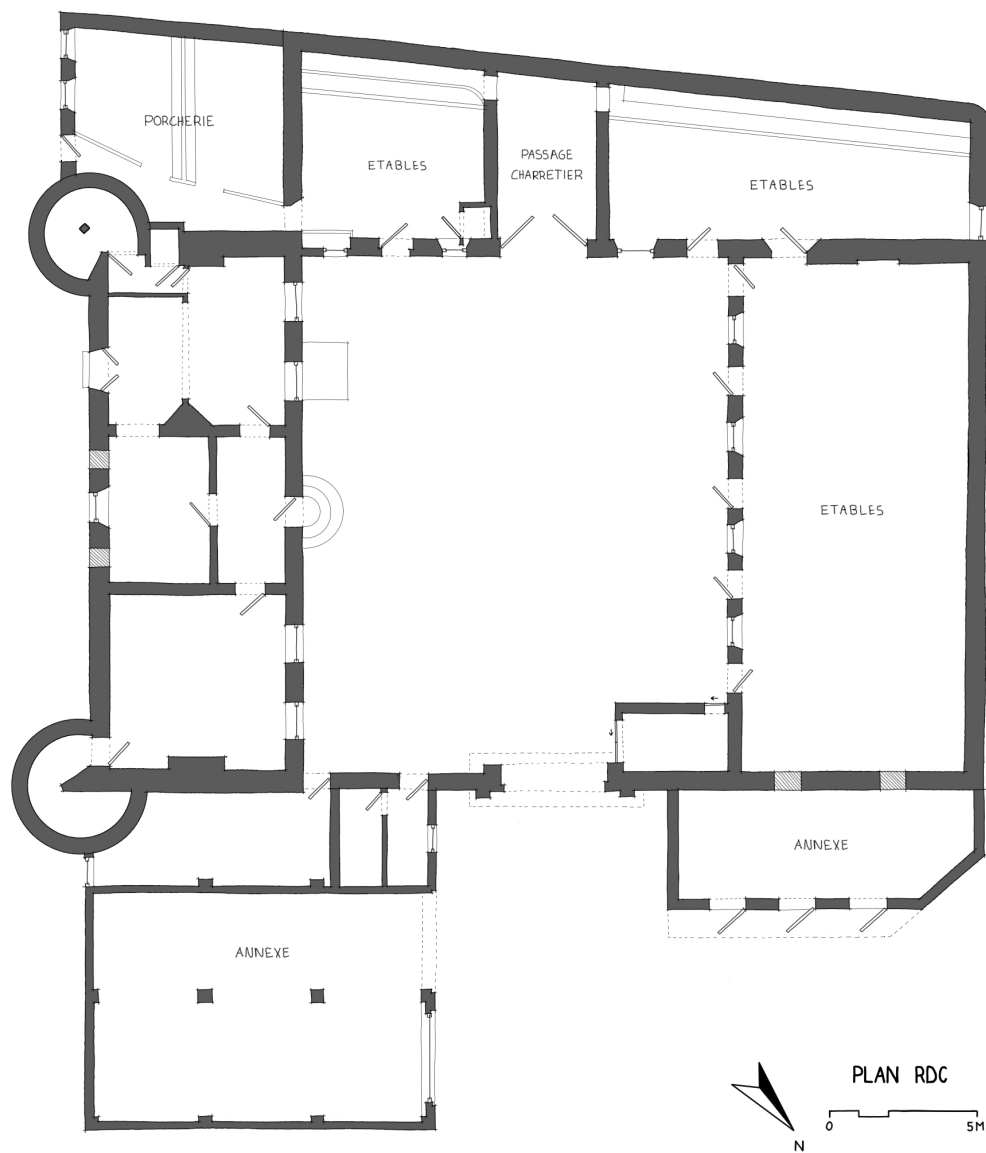


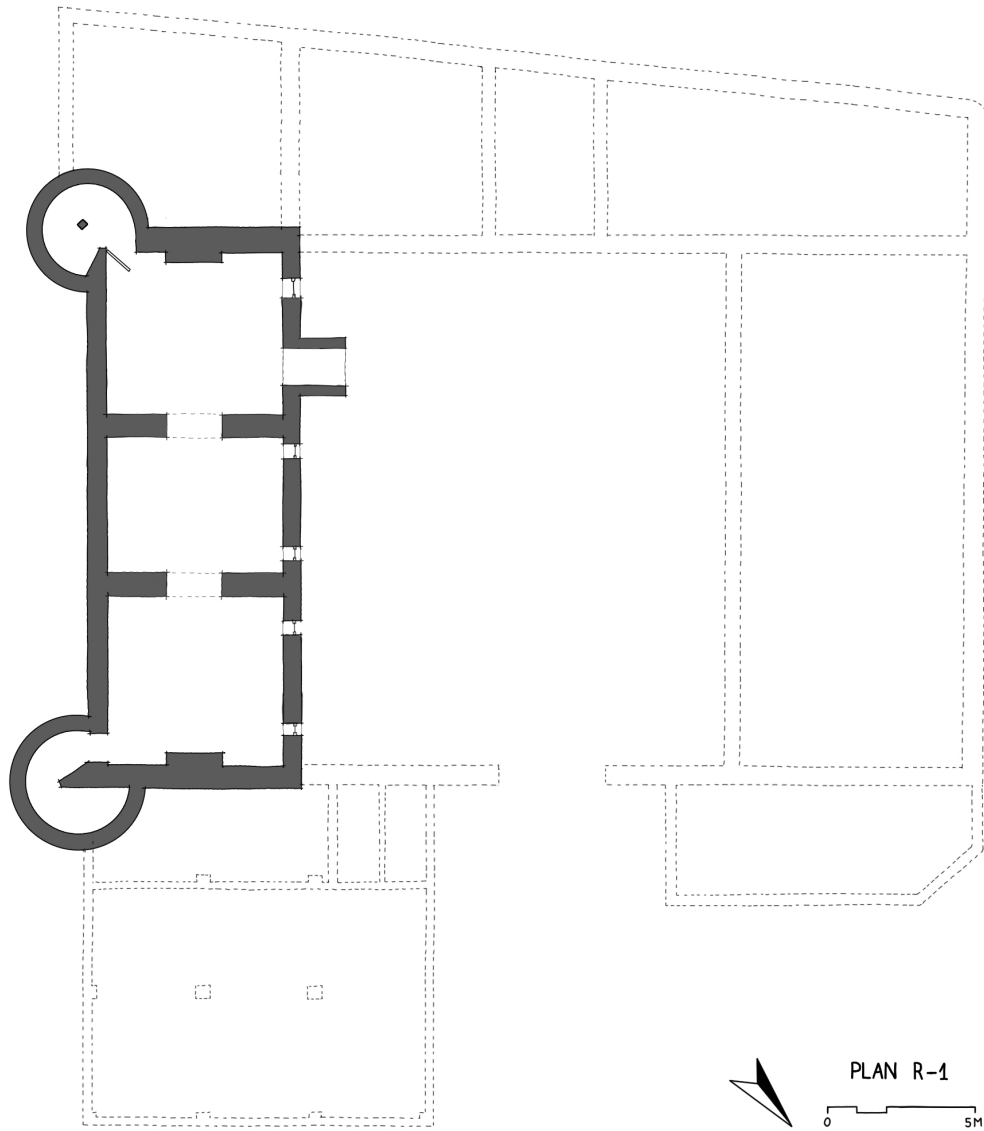


Annexe 4 : relevés manuels de la ferme.









Annexe 5 : tableaux et graphiques illustrant les données récoltées des tests d'humidité.

Valeur en DIGITS		MURS					
		logis cour		logis jardin		étable	
		intérieur	extérieur	intérieur	extérieur	intérieur	extérieur
D A T E S	sem. 1	22,98333333	44,51666667	24,2	33,8	43,26666667	43,68333333
	sem. 2	24,96666667	45,28333333	24,8	37,11666667	51	46,78333333
	sem. 3	23,5	45,36666667	25,5	34,93333333	49,88333333	47,35
	sem. 4	21,46666667	44,98333333	24,36666667	34,88333333	47,33333333	46,36666667
	sem. 5	23,26666667	43,1	23,21666667	36,63333333	48,85	45,43333333
	sem. 6	22,73333333	45,66666667	25,63333333	36,95	51,1	47,75
	sem. 7	20,925	43,775	24,125	36,8	51,575	45,45
	sem. 8	20,58333333	44,8	23,63333333	39,76666667	50,88333333	47,56666667
	sem. 9	19,21666667	45,01666667	21,58333333	40,96666667	47,88333333	47,55
	sem. 10	19,75	45,45	23,45	35,125	45,4	43,025
	sem. 11	19,45	44,775	22,525	34,2	50,2	45
	sem. 12	19,08333333	44,66666667	23,58333333	34,4	53,65	47,68333333
	sem. 13	19,925	44,475	23,725	35,375	45,05	47,95
	sem. 14	20	44,475	24,225	37,175	49,975	47,875
	sem. 15	19,98333333	44,6	22,63333333	34,61666667	49,81666667	48,5
	sem. 16	18,85	45,05	22,75	38,2	48,675	47,9
	sem. 17	19,48333333	43,61666667	23,36666667	35,01666667	44,05	46,5
	sem. 18	21,95	44,35	19,5	34,3	43,65	46,6
	sem. 19	19,5	43,4	23,65	34,7	44,8	46,75
	sem. 20	21,25	46,825	21	38,1	46,55	48,65
	sem. 22	20,21666667	44,73333333	22,45	34,95	43,8	47,46666667
	sem. 23	19,65	47,425	23	35,625	46,025	47,8
	sem. 24	18,975	44,625	21,85	32,275	42,05	45,9
	sem. 25	19	45,36666667	21,6	32,61666667	44,58333333	47,96666667
	sem. 26	19,15	44,775	18,675	33,975	43,575	47,6
	sem. 27	17,61666667	43,28333333	18,2	31,88333333	42,83333333	45,75
	sem. 28	18,025	44,975	20,25	33,475	45,35	47,275
	sem. 29	17,18333333	45,33333333	20,35	32,95	45,31666667	47,43333333
	sem. 30	16,2	44,975	19,775	32,075	45,4	46,725
	sem. 31	16,625	44,25	18,6	32,15	44,25	45,475
	sem. 32	16,53333333	44,33333333	19,08333333	31,3	43	46,16666667
	sem. 33	17,45	43,8	20,675	32,525	46	45,75
	sem. 34	16,55	42,7	17,85	30,45	41,15	43,05
	sem. 35	17,25	44,4	19,53333333	32,93333333	43,68333333	44,55
	sem. 36	17,46666667	44,3	18,73333333	31,86666667	43,9	43,86666667
	sem. 37	17	43,15	18,15	33,65	42,65	43,45
	sem. 38	16,05	44,1	17,725	31,5	42,1	43,025
	sem. 39	15,6	42,65	17,45	29,575	40,325	43,85
	sem. 40	15,65	43,325	19	32,25	40,525	41,8

Figure 112 : tableau illustrant les moyennes hebdomadaires de relevés d'humidité sur différents murs de la ferme Lemaire – Illustration © Antoine GUSBIN

Valeur en DIGITS	
------------------	--

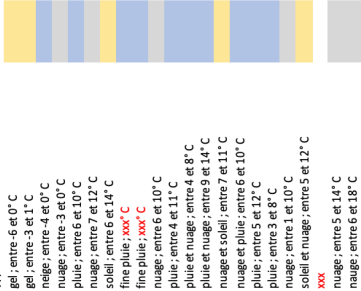
M U R S											
logis cour				logis jardin				étable			
intérieur		extérieur		intérieur		extérieur		intérieur		extérieur	
min	max	moyenne	min	max	moyenne	min	max	moyenne	min	max	moyenne

	sem. 1	06.11.23
		08.11.23
		11.11.23
	sem. 2	13.11.23
		15.11.23
		19.11.23
	sem. 3	21.11.23
		23.11.23
		26.11.23
	sem. 4	28.11.23
		30.11.23
		03.12.23
	sem. 5	05.12.23
		07.12.23
		09.12.23
	sem. 6	11.12.23
		13.12.23
		16.12.23
	sem. 7	18.12.23
		21.12.23
	sem. 8	25.12.23
		27.12.23
		29.12.23
	sem. 9	02.01.24
		04.01.24
		06.01.24
	sem. 10	10.01.24
		12.01.24
	sem. 11	16.01.24
		19.01.24
	sem. 12	22.01.24
		24.01.24
		28.01.24
	sem. 13	31.01.24
		02.02.24
	sem. 14	05.02.24
		08.02.24
	sem. 15	12.02.24
		14.02.24
		17.02.24
	sem. 16	19.02.24
		22.02.24
		26.02.24
	sem. 17	28.02.24
		03.03.24
	sem. 18	04.03.24
	sem. 19	17.03.24
	sem. 20	22.03.24

	21,8	23,9	22,85	43,8	45,4	44,6	24,4	26,2	25,3	32,1	33,9	33	42,6	45,6	44,1	41,9	44,2	43,05
	22	23,6	22,8	42,2	44	43,1	23,9	25,7	24,8	30,6	32,4	31,5	41	43,6	42,3	42,6	44,5	43,55
	22,5	24,1	23,3	44,9	46,8	45,85	21,8	23,2	22,5	36	37,8	36,9	41	45,8	43,4	43,3	45,6	44,45
	23,9	25,5	24,7	44	47,5	45,75	21,8	24,8	23,3	36,5	38,3	37,4	51,4	53,2	52,3	44	46,1	45,05
	23,8	25,9	24,85	45	46,6	45,8	24,7	26,9	25,8	35,7	37,3	36,5	48	49,6	48,8	46,9	49,6	48,25
	24,1	26,6	25,35	43,5	45,1	44,3	24,5	26,1	25,3	36,4	38,5	37,45	51,1	52,7	51,9	46	48,1	47,05
	21,6	23,5	22,55	43,5	45,8	44,65	23,5	25,3	24,4	31,4	33,3	32,35	47,4	50,9	49,15	46	47,9	46,95
	21,4	23	22,2	42,9	44,5	43,7	24	25,3	24,65	32,7	34,6	33,65	47,2	50,8	49	44,5	46,3	45,4
	25,1	26,4	25,75	47	48,5	47,75	26,6	28,3	27,45	37,9	39,7	38,8	50,6	52,4	51,5	48,8	50,6	49,7
	17,9	19,7	18,8	44	45,9	44,95	22,3	24,2	23,25	34,6	36,7	35,65	46,4	48,4	47,4	47,5	49,5	48,5
	20,8	22,6	21,7	43,1	45	44,05	23,3	25,8	24,55	33,9	35,5	34,7	46,6	48,4	47,5	45,4	47,3	46,35
	23,1	24,7	23,9	45	46,9	45,95	24,5	26,1	25,3	33,4	35,2	34,3	46,2	48	47,1	43,5	45	44,25
	23,2	24,9	24,05	41,5	44,1	42,8	20,6	22,5	21,55	43,2	35,9	39,55	47,8	49,7	48,75	45	46,9	45,95
	22,4	24,5	23,45	42,9	45	43,95	23,6	25,9	24,75	32,1	33,9	33	47,2	49,1	48,15	44,7	47	45,85
	21,2	23,4	22,3	41,6	43,5	42,55	22,4	24,3	23,35	36,4	38,3	37,35	48,1	51,2	49,65	43,7	45,3	44,5
	22,2	24,5	23,35	44	45,9	44,95	23,9	25,9	24,9	35,6	38,1	36,85	50	52,1	51,05	46,6	47,9	47,25
	21,5	23,8	22,65	43,8	45,6	44,7	23,1	25,2	24,15	34,5	36,3	35,4	48,6	51,2	49,9	45,8	47,9	46,85
	21,4	23	22,2	46,4	48,3	47,35	27,1	28,6	27,85	37,7	39,5	38,6	51	53,7	52,35	48	50,3	49,15
	22,2	24	23,1	45,3	46,9	46,1	25,4	27,3	26,35	35,1	37,4	36,25	48,5	50,1	49,3	47,1	49	48,05
	17,8	19,7	18,75	40,5	42,4	41,45	20,8	23	21,9	36,5	38,2	37,35	52,9	54,8	53,85	41,9	43,8	42,85
	21,4	23,2	22,3	44,6	46	45,3	22,8	24,6	23,7	47,8	49,4	48,6	54,5	56,3	55,4	47,4	49,2	48,3
	18,5	20,4	19,45	42,8	44,9	43,85	22,5	24,1	23,3	34,5	36,3	35,4	47,2	50,2	48,7	46,5	47,7	47,1
	19,2	20,8	20	44,2	46,3	45,25	23,1	24,7	23,9	34,4	36,2	35,3	47,4	49,7	48,55	46,5	48,1	47,3
	17,5	19,7	18,6	43,3	45	44,15	19,5	21,1	20,3	49,6	50,7	50,15	48,6	50,5	49,55	45,2	47	46,1
	18,7	20,7	19,7	42,8	44,6	43,7	20,9	23,2	22,05	35,6	37,2	36,4	46	47,8	46,9	46,2	48	47,1
	18,4	20,3	19,35	46,3	48,1	47,2	21,6	23,2	22,4	35,4	37,3	36,35	46,3	48,1	47,2	48,3	50,6	49,45
	18,4	21	19,7	44,1	46,8	45,45	22,7	23,9	23,3	34	35,9	34,95	42,7	44,3	43,5	41,8	43,9	42,85
	19	20,6	19,8	44,4	46,5	45,45	22,9	24,3	23,6	34,4	36,2	35,3	46,5	48,1	47,3	42,4	44	43,2
	18,6	20	19,3	44,3	45,6	44,95	21,8	23,6	22,7	33,7	34,9	34,3	46	50,9	49,95	42,4	44	43,2
	18,7	20,5	19,6	43,7	45,5	44,6	21,4	23,3	22,35	33,2	35	34,1	49,5	51,4	50,45	45,9	47,7	46,8
	17,9	19,5	18,7	43,7	45,5	44,6	23	24,6	23,8	33,3	34,9	34,1	57,2	59,1	58,15	46,2	48	47,1
	18,5	20,4	19,45	43	45,1	44,05	22,7	25,2	23,95	33,1	35	34,05	56,1	58,6	57,35	46,2	49	47,6
	18,3	19,9	19,1	44,4	46,3	45,35	22,2	23,8	23	34,1	36	35,05	44,4	46,5	45,45	47,2	49,5	48,35
	18,5	20,6	19,55	43,2	45,1	44,15	22,9	24,8	23,85	33,6	35,5	34,55	43,9	45,8	44,85	46,4	48,5	47,45
	19,5	21,1	20,3	43,9	45,7	44,8	22,6	24,6	23,6	35,4	37	36,2	44,3	46,2	45,25	47,5	49,4	48,45
	18,4	20,2	19,3	43,3	45,4	44,35	22,9	25	23,95	36,2	38,7	37,45	49,5	51,5	50,5	47,2	49	48,1
	19,9	21,5	20,7	43,8	45,4	44,6	23,8	25,2	24,5	36	37,8	36,9	48,5	50,4	49,45	46,7	48,6	47,65
	18,1	19,7	18,9	43	44,9	43,95	23,1	24,9	24	33,9	35,7	34,8	48,1	49,9	49	47,6	49,4	48,5
	19,5	21,2	20,35	44,9	46,6	45,75	22,8	25,4	24,1	34,9	36,9	35,75	49,3	52,6	50,95	48,2	49,8	49
	19,9	21,5	20,7	43,3	44,9	44,1	18,8	20,8	19,8	32,5	34,1	33,3	48,6	50,4	49,5	47,2	48,8	48
	/	/	/	43,4	45,5	44,45	/	/	/	35,6	37,2	36,4	47,1	48,5	47,8	45,5	47,3	46,4
	19,9	19,8	18,85	44,6	46,7	45,65	21,8	23,7	22,75	39,6	41,0	40	48,5	50,9	49,55	48,5	50,3	49,4
	18,2	19,8	19	43,6	44,2	43,4	22,6	24,4	23,5	35,4	36,8	36,1	49,3	49,9	49,1	46	47,9	46,95
	18,4	20,2	19,3	45	46,8	45,45	23,7	25,3	24,5	34,3	36,1	35,2	49,5	49,5	44,7	45,7	47,6	46,55
	19,1	20,3	20,15	46,6	48,5	47,55	18,7	20,3	22,1	32,9	34,6	33,75	47,9	48,4	43,35	45,7	46,9	46
	18,2	19,8	21,95	43,4	45,3	44,55	18,7	20,3	19,5	33,8	35,8	34,7	49,6	49,6	43,85	45,7	47,8	46,8
	19,6	20,4	19,5	42,5	44,8	43,4	22,7	24,8	23,85	33,8	35,8	34,7	49,6	49,6	44,8	45,7	47,8	46,75
	19,5	21,1	20,5	42,9	45,7	43,85	20,2	21,8	21	33,8	35,8	34,8	49,2	49	44,1	45,9	47,8	46,85
	21,3	23,1	22,2	49,9	50,7	49,8	20,2	21,8	21	40,4	42,4	41,4	48,2	49,8	49	49,8	51,1	50,45

Commentaire météo :

vent et nuage; entre 6 et 10°C
 vent, nuage et pluie; entre 6 et 10°C
 nuage, soleil; entre 4 et 7°C
 grosse pluie; entre 7 et 14°C
 nuage, fine pluie; entre 7 et 10°C
 nuage, pluie et soleil; entre 6 et 11°C
 fine pluie; entre 5 et 9°C
 nuage; entre 3 et 10°C
 nuage; entre 3 et 10°C
 nuage, neige et soleil; entre -2 et 3°C
 vent et nuage; **xxx°C**
 vent, nuage et neige; entre -1 et 3°C
 pluie; entre 1 et 6°C
 pluie et vent; entre 5 et 9°C
 nuages; **xxx°C**
 nuages; **xxx°C**
 soleil et nuage; entre 2 et 8°C
 nuages; entre 3 et 7°C
 pluie; entre 5 et 10°C
 pluie et vent; entre 8 et 10°C
 nuage; entre 4 et 9°C
 nuage et pluie; entre 7 et 9°C
 pluie; **xxx°C**
 nuage et pluie; entre 6 et 8°C
 ???
 gel; entre -6 et 0°C
 gel; entre -3 et 1°C
 neige; entre -4 et 0°C
 nuage; entre 3 et 10°C
 pluie; entre 6 et 12°C
 soleil; entre 6 et 14°C
 fine pluie; **xxx°C**
 fine pluie; **xxx°C**
 nuage; entre 6 et 10°C
 pluie; entre 4 et 11°C
 pluie et nuage; entre 4 et 8°C
 pluie et nuage; entre 9 et 14°C
 nuage et soleil; entre 7 et 11°C
 nuage et pluie; entre 6 et 10°C
 pluie; entre 5 et 12°C
 pluie; entre 3 et 8°C
 nuage; entre 1 et 10°C
 soleil et nuage; entre 5 et 12°C
xxx
 nuage; entre 5 et 14°C
 nuage; entre 6 et 16°C
xxx



Valeur en DIGITS	
------------------	--

sem. 21	25.03.24
sem. 22	30.03.24
sem. 23	04.04.24
sem. 24	07.04.24
sem. 25	10.04.24
sem. 26	14.04.24
sem. 27	17.04.24
sem. 28	19.04.24
sem. 29	21.04.24
sem. 30	23.04.24
sem. 31	25.04.24
sem. 32	27.04.24
sem. 33	29.04.24
sem. 34	01.05.24
sem. 35	03.05.24
sem. 36	05.05.24
sem. 37	07.05.24
sem. 38	09.05.24
sem. 39	11.05.24
sem. 40	13.05.24
sem. 41	15.05.24
sem. 42	17.05.24
sem. 43	19.05.24
sem. 44	21.05.24
sem. 45	23.05.24
sem. 46	25.05.24
sem. 47	27.05.24
sem. 48	29.05.24
sem. 49	31.05.24
sem. 50	02.06.24
sem. 51	04.06.24
sem. 52	06.06.24
sem. 53	08.06.24
sem. 54	10.06.24
sem. 55	12.06.24
sem. 56	14.06.24
sem. 57	16.06.24
sem. 58	18.06.24
sem. 59	20.06.24
sem. 60	22.06.24
sem. 61	24.06.24
sem. 62	26.06.24
sem. 63	28.06.24
sem. 64	30.06.24
sem. 65	02.07.24
sem. 66	04.07.24
sem. 67	06.07.24
sem. 68	08.07.24
sem. 69	10.07.24
sem. 70	12.07.24
sem. 71	14.07.24
sem. 72	16.07.24
sem. 73	18.07.24
sem. 74	20.07.24
sem. 75	22.07.24
sem. 76	24.07.24
sem. 77	26.07.24
sem. 78	28.07.24
sem. 79	30.07.24
sem. 80	31.07.24
sem. 81	01.08.24
sem. 82	03.08.24
sem. 83	05.08.24
sem. 84	07.08.24
sem. 85	09.08.24
sem. 86	11.08.24
sem. 87	13.08.24
sem. 88	15.08.24
sem. 89	17.08.24
sem. 90	19.08.24
sem. 91	21.08.24
sem. 92	23.08.24
sem. 93	25.08.24
sem. 94	27.08.24
sem. 95	29.08.24
sem. 96	31.08.24
sem. 97	02.09.24
sem. 98	04.09.24
sem. 99	06.09.24
sem. 100	08.09.24

M U R S														
logis cour				logis jardin				étable						
intérieur		extérieur		intérieur		extérieur		intérieur		extérieur		extérieur		
min	max	moyenne	min	max	moyenne	min	max	moyenne	min	max	moyenne	min	moyenne	
17,8	19,4	18,45	41,7	43,5	42,6	20,5	21,4	20,95	30,6	32,7	31,65	40,1	41,9	41
20,8	22,7	21,75	43,3	45,3	44,3	23,1	24,7	23,9	35,9	37,7	36,8	42,8	44,8	43,8
19,5	21,4	20,45	46,4	48,2	47,3	21,6	23,4	22,5	35,6	37,2	36,4	45,7	47,5	46,6
19,3	21,1	20,2	49,1	50,9	50	23,2	25	24,1	38,1	40,1	39,1	48,4	50,2	49,3
18,2	20	19,1	43,8	45,9	44,85	21	22,8	21,9	31,2	33,1	32,15	41,7	43,8	42,75
17,7	19,3	18,5	43,6	45,5	44,55	21,7	23,8	22,75	32,2	34	33,1	40,8	42,7	41,75
18,6	20,3	19,45	43,8	45,6	44,7	20	21,9	20,95	30,5	32,4	31,45	41,4	43,3	42,35
17,7	19,5	18,6	45,7	47,6	46,65	20	21,8	20,9	31,7	33,3	32,5	43,2	45,1	44,15
18,5	20,3	19,4	43,8	45,4	44,6	21,5	23,1	22,3	31,8	33,7	32,75	43,8	45,7	44,75
/	/	/	43,9	45,8	44,85	/	/	/	31,9	33,3	32,6	43,9	45,8	44,85
17,3	19	18,15	43,7	45,3	44,5	19,2	21	20,1	30,8	32,6	31,7	43	45,5	44,25
17,1	18,9	18	42,2	44	43,1	21	22,8	21,9	31,8	33,4	32,6	41,9	43,8	42,85
17,9	19,7	18,8	42,9	44,8	43,85	19,7	21,6	20,65	32,6	34,4	33,5	42,7	44,5	43,6
18,1	20	19,05	43,4	45,2	44,3	18,1	20	19,05	32,4	34,2	33,3	41,6	43,2	42,4
18,3	20,2	19,25	44,3	46,2	45,25	17,6	19	18,3	33,6	35,7	34,65	43,6	45,9	44,75
17,5	19,4	18,45	43,7	45,6	44,65	17,9	19,2	18,55	32,2	34,3	33,25	43,9	46	44,95
16,8	18,9	17,85	42,4	44,2	43,3	17,2	18,9	18,05	31,2	33,1	32,15	42,4	44,2	43,3
15,6	17,5	16,55	41	42,8	41,9	16,9	19,1	18	29,3	31,2	30,25	39,1	41,4	40,25
16,8	18,7	17,75	43,2	44,8	44	18,3	20,2	19,25	30,1	32	31,05	42,5	44,6	43,55
17,3	19,3	18,3	45	46,9	45,95	20,3	22,2	21,25	34,8	37	35,9	46,2	48,1	47,15
18,3	19,9	19,1	46,2	48,1	47,15	21,3	22,9	22,1	34,3	36,2	35,25	46,9	48,7	47,8
15,8	17,4	16,6	44	45,8	44,9	18,6	20,5	19,55	30,2	31,9	31,05	43,3	45,1	44,2
14,7	17	15,85	43	44,9	43,95	18,6	20,2	19,4	31,6	33,5	32,55	43	44,9	43,95
15,4	17,2	16,3	44,2	46,7	45,45	18,6	20,3	19,45	30,7	32,6	31,65	42,1	44,2	43,15
14,7	17,5	16,1	43,7	45,3	44,5	19,2	21	20,1	31,8	33,2	32,5	46,7	48,6	47,65
14,7	16,4	15,55	44	45,8	44,9	16,5	18,5	17,5	32	33,7	32,85	45,1	47	46,05
16,8	18,6	17,7	42,7	44,5	43,6	18,9	20,5	19,7	30,5	32,4	31,45	41,5	43,4	42,45
16,7	18,4	17,55	43,2	45	44,1	19,3	21,1	20,2	31,1	33	32,05	43	44,6	43,8
15,8	17,6	16,7	44	46,5	45,25	18,6	20,5	19,55	30,5	32,3	31,4	41,9	44	42,95
14,4	16,3	15,35	42,7	44,6	43,65	16,6	18,4	17,5	29,4	31,3	30,45	41,1	43,4	42,5
16,4	18,3	17,35	44,2	46,1	45,15	19,9	21,5	20,7	31,7	33,3	32,5	46,5	48,4	47,45
16,6	18,5	17,55	41,5	43,4	42,45	19,7	21,6	20,65	31,6	33,5	32,55	43,6	45,5	44,55
15,6	17,5	16,55	41,8	43,6	42,7	16,8	18,9	17,85	29,2	31,7	30,45	40,1	42,2	41,15
17,3	18,9	18,1	43,6	46	44,8	20,1	21,9	21	32,3	34,2	33,25	43	45,3	44,15
15,3	17,1	16,2	42,6	44,5	43,55	16,5	18,3	17,4	29,9	32	30,95	43,1	45	44,05
16,5	18,4	17,45	43,9	45,8	44,85	19,3	21,1	20,2	33,7	35,5	34,6	41,6	44,1	42,85
16,4	18,1	17,25	42,7	44,5	43,6	18,1	19,7	18,9	30,9	32,8	31,85	41,3	43,4	42,35
16,7	18,5	17,6	44,3	46,1	45,2	16,9	18,8	17,85	31,5	33,1	32,3	44,5	46,6	45,55
16,6	18,5	17,55	43,2	45	44,1	17,9	21	19,45	30,5	32,4	31,45	42,5	45,1	43,8
16,1	17,9	17	42,2	44,1	43,15	17,1	19,2	18,15	32,3	35	33,65	41,6	43,7	42,65
14,5	16,1	15,3	41,5	43,4	42,45	18	19,6	18,8	29,6	31,3	30,45	37,6	39,4	38,5
15,9	17,7	16,8	44,8	46,7	45,75	15,6	17,7	16,65	31,7	33,4	32,55	45	46,4	45,7
15,1	16,9	16	41,5	43,1	42,3	18,1	19,7	18,9	28,5	30,4	29,45	40,6	42,4	41,5
14,3	16,1	15,2	42,1	43,9	43	15,2	16,8	16	29	30,4	29,7	38,1	40,2	39,15
14,7	17	15,85	41,8	43,4	42,6	17,7	19,4	18,55	33,1	35	34,05	39,9	42	40,95
14,5	16,4	15,45	43,1	45	44,05	18,5	20,4	19,45	29,5	31,4	30,45	38,8	41,4	40,1

Commentaire météo :

xxx

xxx

soliel ; entre 7 et 13° C

nuage et pluie ; entre 8 et 14° C

nuage ; entre 13 et 21° C

soliel ; entre 5 et 14° C

nuage ; entre 9 et 17° C

pluie et nuage ; entre 4 et 10° C

pluie ; entre 4 et 10° C

nuage et fine pluie ; entre 1 et 10° C

soliel et nuage ; entre 2 et 9° C

nuage et pluie ; entre 3 et 12° C

nuage et soli ; entre 7 et 16° C

soliel et nuage ; entre 7 et 17° C

soliel et nuage ; entre 11 et 24° C

soliel et nuage ; entre 6 et 16° CC

soliel ; entre 13 et 24° C

pluie ; entre 7 et 15° C

soliel et peu de pluie ; entre 12 et 19° C

nuage et pluie ; entre 9 et 16° C

nuage ; entre 10 et 17° C

soliel et nuage ; entre 11 et 19° C

nuage et pluie ; entre 8 et 18° C

pluie ; entre 10 et 17° C

soliel ; entre 7 et 20° C

soliel et nuage ; entre 8 et 22° C

pluie ; entre 11 et 17° C

soliel et nuage ; entre 10 et 18° C

pluie ; xxx

pluie ; xxx

soliel et nuage ; entre 15 et 26° C

nuage ; entre 12 et 18° C

nuage ; entre 9 et 15° C

nuage ; entre 12 et 19° C

soliel ; entre 14 et 26° C

soliel et nuage ; entre 15 et 22° C

pluie ; entre 12 et 17° C

soliel et nuage ; entre 14 et 18° C

pluie ; entre 9 et 19° C

soliel ; entre 15 et 28° C

nuage et soli ; entre 13 et 22° C

nuage et pluie ; entre 12 et 24° C

soliel ; entre 13 et 26° C



(pris le matin)

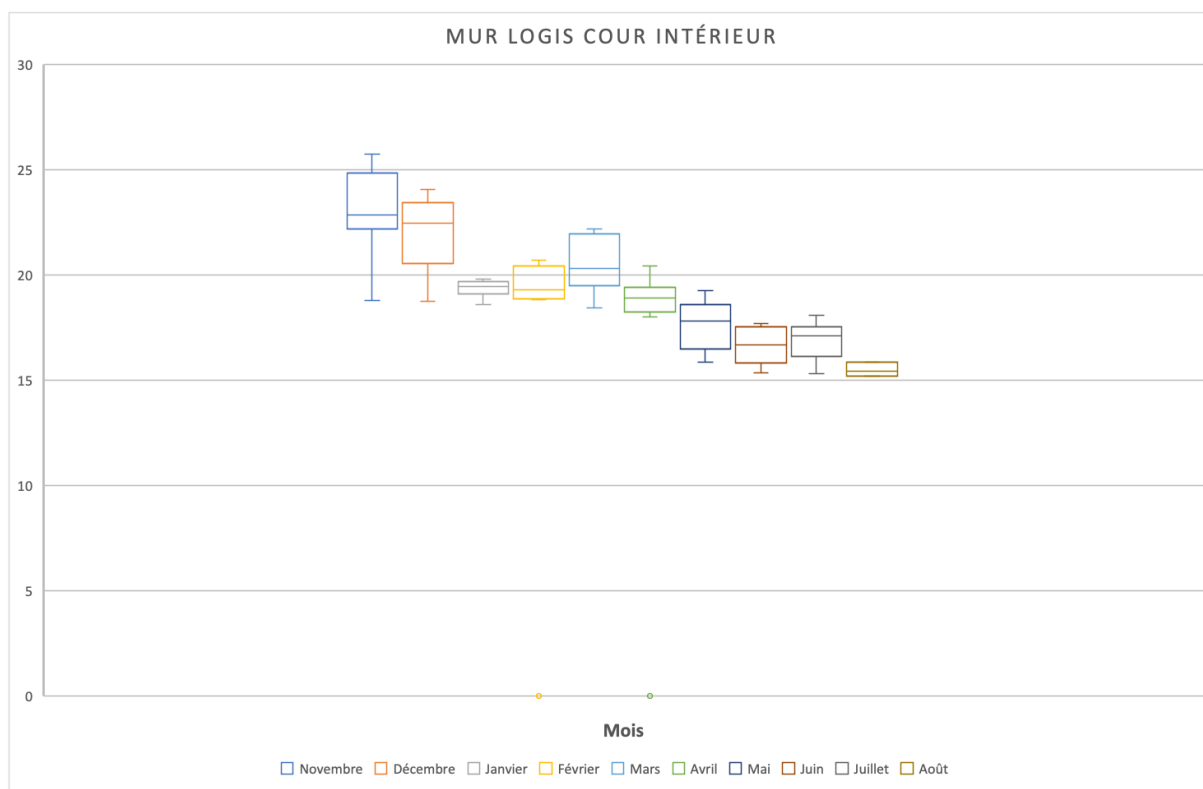


Figure 113 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie intérieure du mur N-O du logis, côté cour – Illustration © Nicolas HENNES

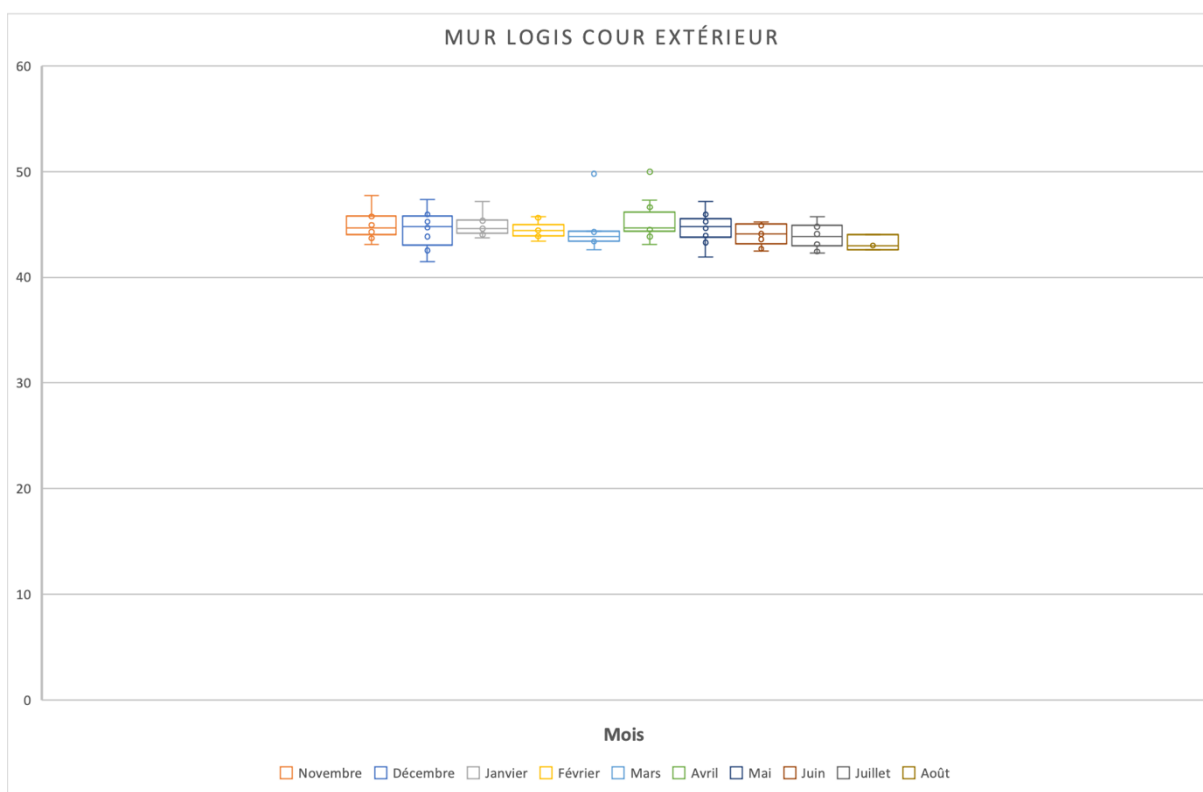


Figure 114 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie extérieure du mur N-O du logis, côté cour – Illustration © Nicolas HENNES

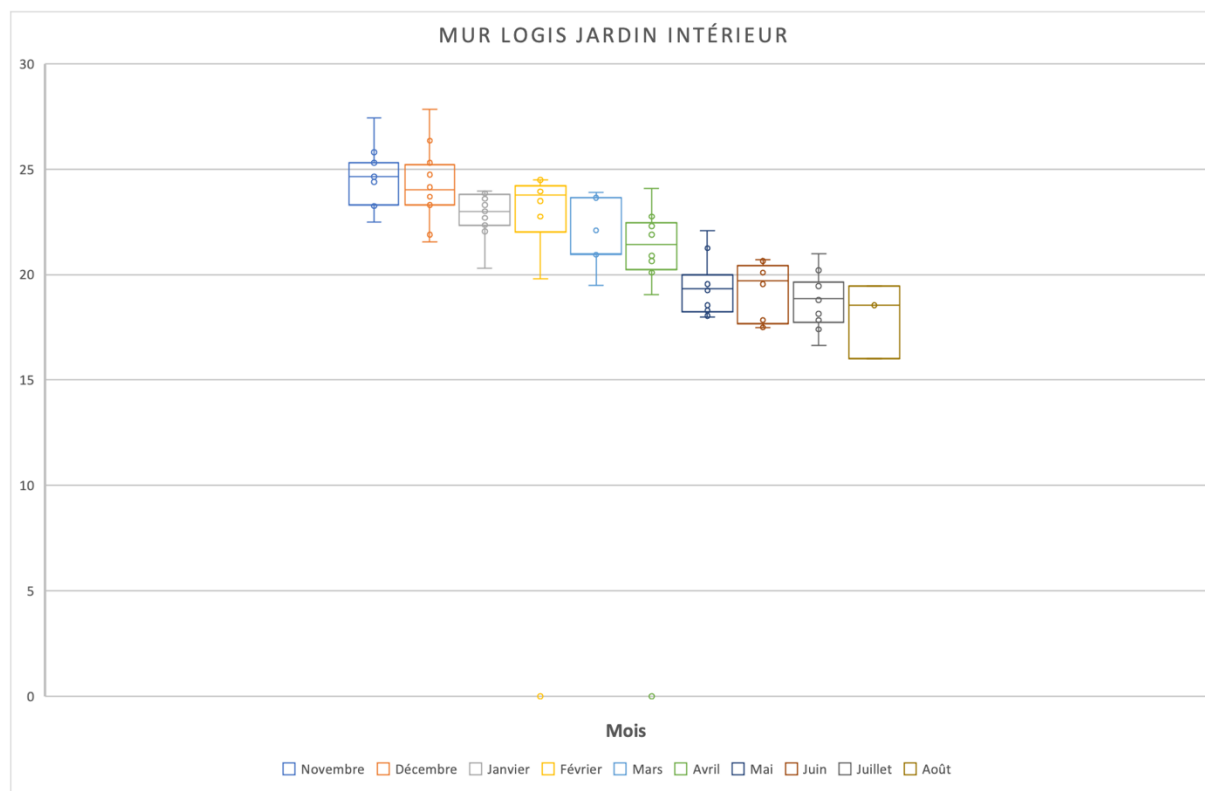


Figure 115 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie intérieure du mur S-E du logis, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

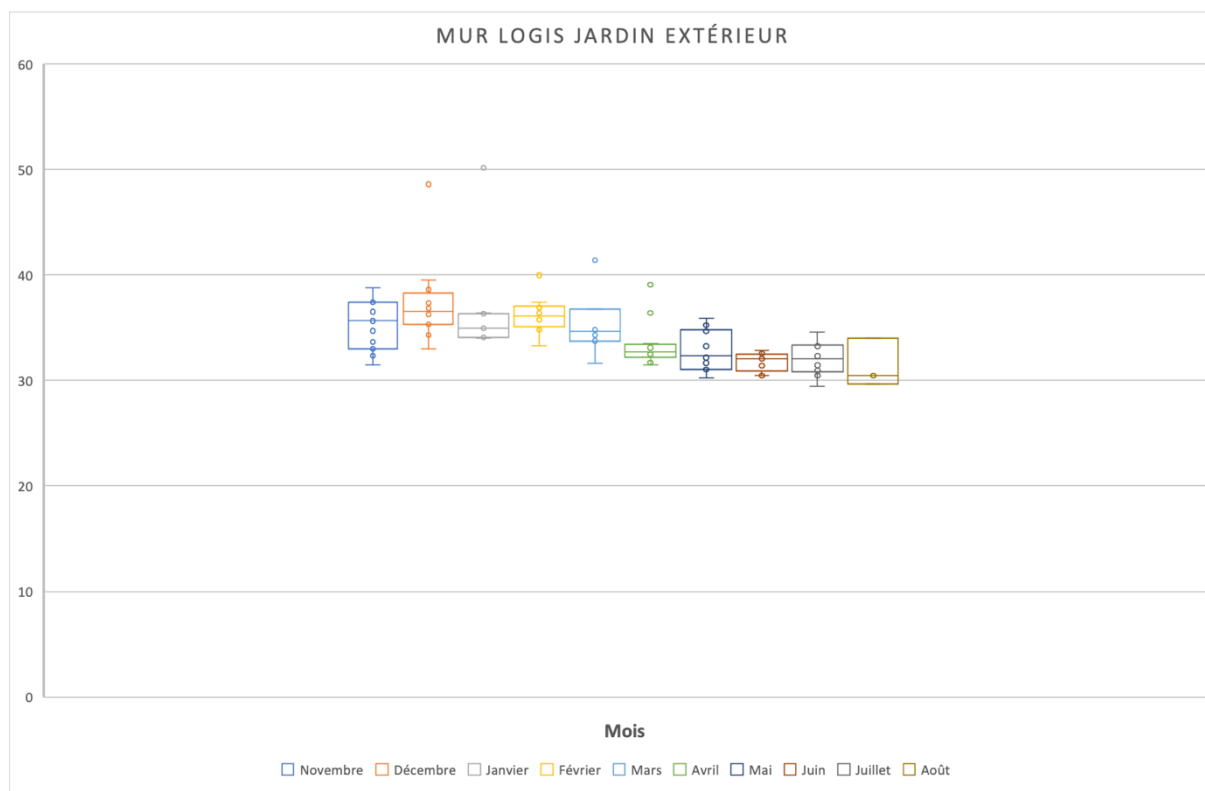


Figure 116 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie extérieure du mur S-E du logis, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

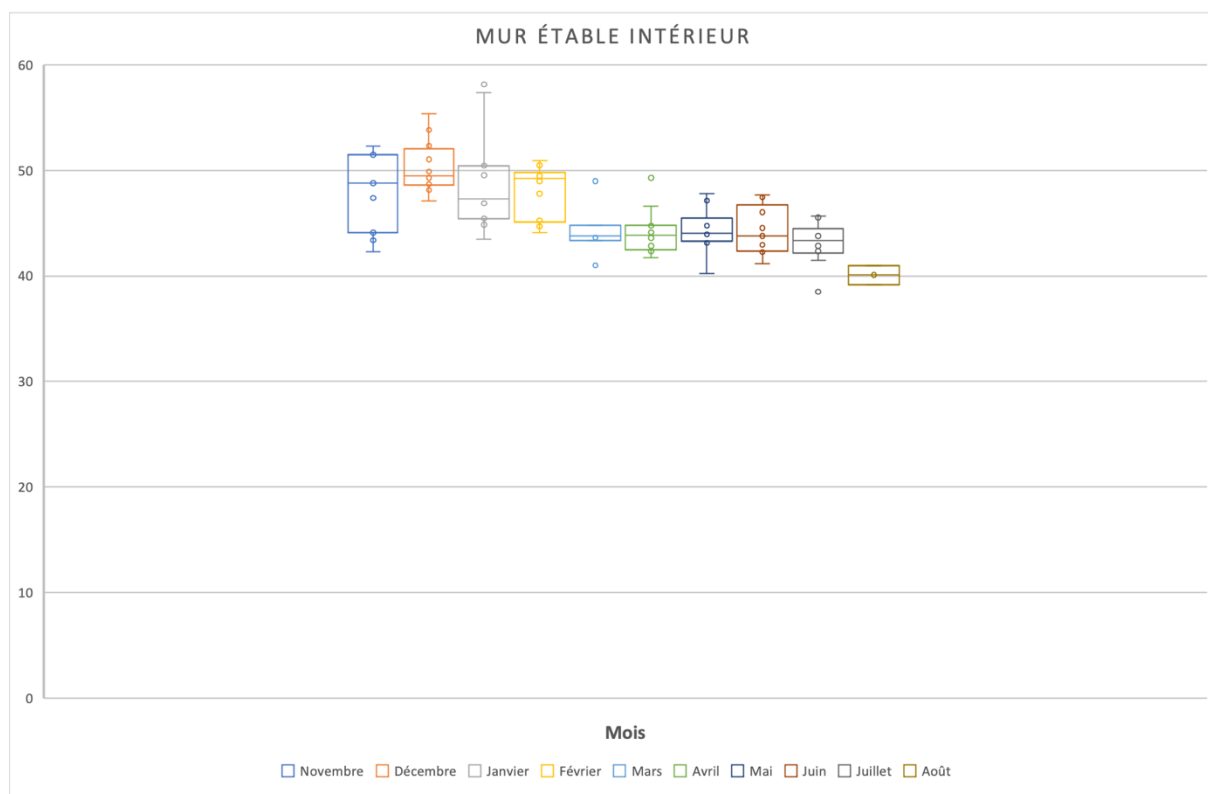


Figure 117 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie intérieure du mur N-O de l'étable, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES

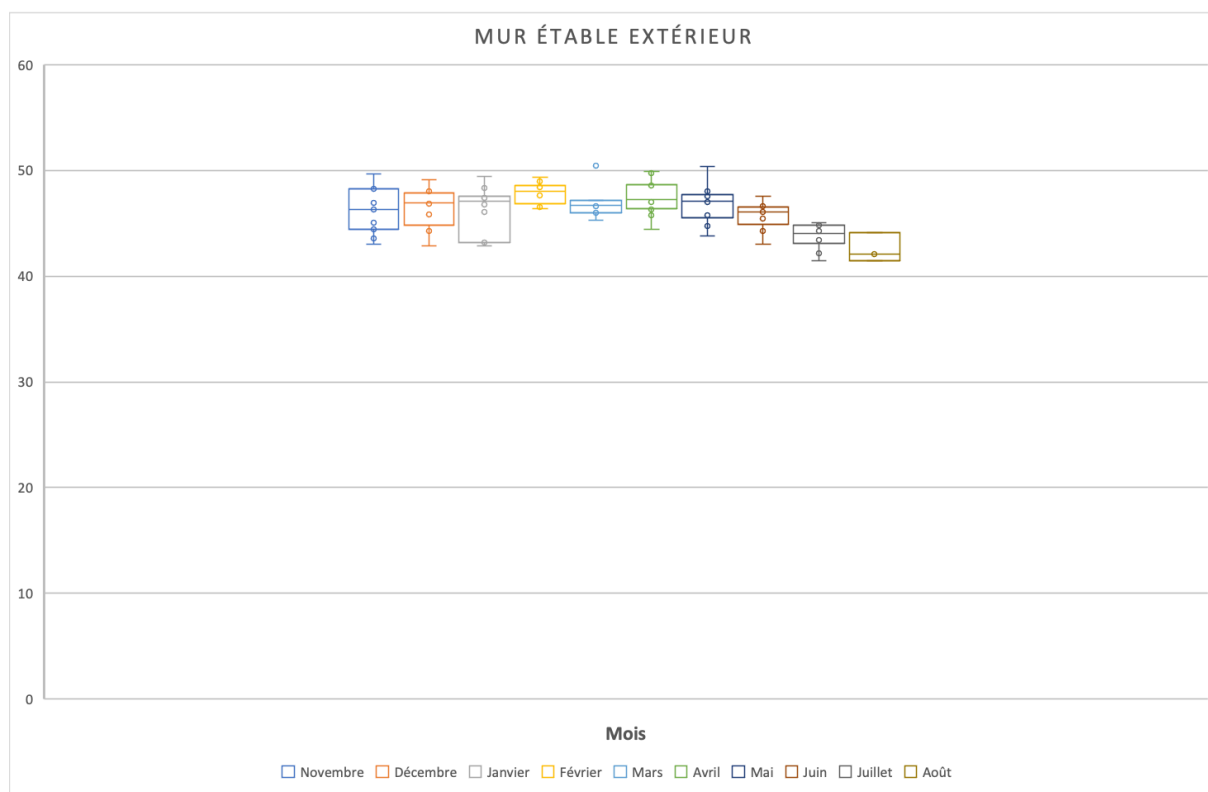


Figure 118 : graphique illustrant la variation d'humidité de la partie extérieure du mur N-O de l'étable, côté jardin – Illustration © Nicolas HENNES