LIÈGE université Library

https://lib.uliege.be https://matheo.uliege.be

Mémoire de fin d'études Confrontation des besoins en isolants et des capacités de production biosourcées en Wallonie : quel potentiel pour la rénovation énergétique du parc résidentiel à l'horizon 2050 ?

Auteur : Vogrig, Victor
Promoteur(s) : Schmitz, Dimitri
Faculté : Faculté d'Architecture
Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme
Année académique : 2025-2026
URI/URL : http://hdl.handle.net/2268.2/27413

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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

Université de Liège – Faculté d'Architecture

Confrontation des besoins en isolants et des capacités de production biosourcées en Wallonie : quel potentiel pour la rénovation énergétique du parc résidentiel à l'horizon 2050 ?

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

Sous la direction de : Dimitri SCHMITZ

Année académique 2025 – 2026

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu Monsieur Dimitri Schmitz, promoteur de ce travail, pour les discussions régulières que nous avons eues tout au long de la recherche. Ses conseils et ses orientations m'ont permis de structurer ma démarche et de faire avancer ce travail à chacune de ses étapes.

Je remercie également Madame Sophie Trachte, dont l'accompagnement lors du séminaire d'initiation à la recherche a été déterminant dans la construction de la problématique. Les documents qu'elle m'a transmis à cette occasion ont constitué un point de départ précieux pour la suite du travail.

Mes remerciements vont ensuite à Monsieur Guirec Ruellan et à Madame Pauline Gillet, qui ont accepté d'être lecteurs de ce travail. Je remercie tout particulièrement Pauline Gillet, dont l'étude constitue la base de cette recherche. Elle m'en a transmis l'outil de calcul, m'en a expliqué sa construction et a répondu à mes questions. Ce travail ne serait pas le même sans cette disponibilité.

Je remercie enfin les différents acteurs de la filière des isolants biosourcés avec lesquels j'ai pu échanger dans le cadre de cette recherche. Le temps qu'ils m'ont accordé et les informations qu'ils ont accepté de partager ont nourri ce travail à plusieurs de ses étapes.

Résumé

Le secteur du bâtiment constitue un levier majeur de la transition environnementale en raison de sa consommation importante de ressources et de son rôle dans les émissions de gaz à effet de serre. En Wallonie, l'atteinte des objectifs de rénovation énergétique implique une augmentation significative des besoins en matériaux isolants. Dans ce contexte, ce travail évalue dans quelle mesure les ressources biosourcées et recyclées disponibles localement sont susceptibles de répondre à cette demande.

La recherche s'appuie sur une analyse critique d'un modèle de quantification existant, dont les hypothèses et les limites sont examinées avant le développement d'un modèle amélioré. Celui-ci repose sur une caractérisation du parc résidentiel wallon, l'estimation des surfaces à isoler et l'élaboration de plusieurs scénarios de rénovation fondés sur différents choix de matériaux. Les besoins calculés sont ensuite confrontés aux capacités de production régionales et aux gisements de ressources disponibles.

Les résultats montrent que la quantité produite localement n'est pas le facteur déterminant. Selon la manière dont les isolants sont affectés aux parois, la part biosourcée que la production wallonne peut soutenir varie de 5 à 61 %, et le rythme de rénovation atteignable de 2 à 4 % par an, sans qu'aucune capacité nouvelle ne soit nécessaire. Les résultats montrent également que les contraintes identifiées se concentrent sur un seul matériau, dont la place dans les scénarios détermine à elle seule le niveau atteignable.

Le modèle développé constitue également un outil reproductible, dont chaque hypothèse est explicite et modifiable. Adaptable à de nouvelles données ou à d'autres territoires, il offre un support d'aide à l'évaluation des besoins en matériaux d'isolation dans le cadre de stratégies de rénovation.

Mots-clés

Rénovation énergétique, isolants biosourcés, parc résidentiel wallon, ressources locales, quantification des besoins, trajectoires de rénovation

Note sur l'utilisation de l'IA

Dans le cadre de ce travail, des outils d'intelligence artificielle ont été utilisés comme outils d'assistance pour certaines tâches spécifiques. Ils ont notamment servi à rechercher des documents, à traduire ponctuellement des passages de documents rédigés dans une langue autre que le français et à reformuler certains textes afin d'en améliorer la qualité rédactionnelle. Ces outils ont également été utilisés lors de la construction du modèle Excel, principalement pour proposer les formules nécessaires à sa mise en œuvre.

L'intelligence artificielle est ainsi intervenue comme un outil d'aide à la recherche, à la rédaction et au développement du modèle, sans intervenir dans l'élaboration des hypothèses, de la méthodologie ou de l'interprétation des résultats présentées dans ce travail.

Table des matières

Liste des abréviations et notations 6

1 Introduction 8

1.1 Présentation du contexte général 8

1.2 Question de recherche et objectifs 10

2 État de l'art 12

3 Méthodologie 19

4 Reconstruction et compréhension du modèle de référence 22

4.1 Description de la méthodologie utilisée 23

4.2 Carte conceptuelle du modèle Valbiom 27

4.3 Hypothèses posées 28

4.4 Synthèse 31

5 Analyse comparative d'autres travaux existants 32

5.1 L'étude prospective de l'ADEME 33

5.2 La thèse de Gourovitch 35

5.3 Le rapport de Delem 37

5.4 Les travaux de Suray et Palumbo 40

5.5 Synthèse 41

6 Identification des limites et des pistes d'amélioration 43

6.1 Les incohérences internes de la chaîne de calcul 44

6.2 Les simplifications assumées 45

6.3 Les apports issus de l'analyse comparative 48

6.4 Les pistes retenues 50

6.5 Les pistes écartées 52

6.6 Synthèse 53

7 Construction du modèle amélioré 54

7.1 Principes de construction et sources mobilisées 54

7.2 Caractérisation du parc bâti 56

7.3 Objectifs de rénovation et calcul des volumes d'isolants 58

7.4 Répartition entre les matériaux 60
7.5 Estimation de l'offre industrielle 63
7.6 Estimation de la ressource agricole 65
7.7 Échelonnement du calendrier 67
7.8 Impact environnemental 69
7.9 Déchets de mise en œuvre 71
7.10 Confrontations et analyse de sensibilité 73
7.11 Hypothèses posées 75
7.12 Carte conceptuelle du modèle amélioré 77
7.13 Synthèse 78
8 Sortie des résultats 79
8.1 Robustesse du modèle et lecture de l'analyse de sensibilité 79
8.2 Ordre de grandeur du besoin et confrontation aux travaux comparables 82
8.3 Sept trajectoires pour rénover le parc wallon 85
8.4 La répartition figée et ce qu'elle interdit 88
8.5 Déplacer la matière plutôt que l'accroître 93
8.6 Construire la filière 97
8.7 L'emprise sur le sol wallon 100
8.8 Le bilan environnemental des trajectoires 103
8.9 La hiérarchie des leviers 107
9 Conclusion 108
9.1 Réponses aux questions de recherche 108
9.2 Apports du travail 110
9.3 Limites du travail 111
9.4 Perspectives de recherche 113
10 Liste des figures 114
11 Liste des tableaux 115
12 Bibliographie 117
Annexes 132

Liste des abréviations et notations

ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (France)
APUR	Atelier parisien d'urbanisme
BBC	Bâtiment basse consommation
BPIE	*Buildings Performance Institute Europe*
CGDD	Commissariat général au développement durable (France)
COZEB	*Cost-Optimal Zero Energy Buildings*, étude wallonne du niveau de performance énergétique optimal en fonction des coûts
DENA	*Deutsche Energie-Agentur*, agence allemande de l'énergie
DMC	*Domestic Material Consumption*, consommation intérieure de matières
EPD	*Environmental Product Declaration*, déclaration environnementale de produit
EPISCOPE	*Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks*
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
FDES	Fiche de déclaration environnementale et sanitaire
INIES	Base de données française de référence sur les déclarations environnementales et sanitaires des produits de construction
ITE	Isolation thermique par l'extérieur
ITI	Isolation thermique par l'intérieur
IWEPS	Institut wallon de l'évaluation, de la prospective et de la statistique
MFA	*Material flow analysis*, analyse des flux de matières
MMG	*Milieugerelateerde Materiaalprestatie van Gebouwelementen*, méthode belge d'évaluation environnementale des éléments de construction
ONRB	Observatoire national des ressources en biomasse (France)
OVAM	*Openbare Vlaamse Afvalstoffenmaatschappij*, agence publique flamande des déchets et matériaux
PACTE	Programme d'action pour la qualité de la construction et la transition énergétique (France)

PBL	*Planbureau voor de Leefomgeving*, agence néerlandaise d'évaluation environnementale
RE2020	Réglementation environnementale 2020 (France)
SAU	Superficie agricole utilisée
SNBC	Stratégie nationale bas carbone (France)
SPW	Service public de Wallonie
PEB	Performance énergétique des bâtiments
SRLT	Stratégie de rénovation à long terme
TABULA	*Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*
TOTEM	*Tool to Optimise the Total Environmental impact of Materials*
UE	Union européenne
VEA	*Vlaams Energieagentschap*, agence flamande de l'énergie

λ	Conductivité thermique du matériau, en W/m.K
U	Coefficient de transmission thermique d'une paroi, en $W/m^2.K$
R	Résistance thermique d'une paroi, en $m^2.K/W$
e	Épaisseur d'isolant à poser, en m
p_bio	Part des rénovations mobilisant des isolants biosourcés
CO_2 éq	Dioxyde de carbone équivalent

1 Introduction

1.1 Présentation du contexte général

Le parc immobilier de la Wallonie, ancien et énergivore, est composé d'un grand nombre de bâtiments qui ne répondent pas aux normes actuelles en matière de consommation d'énergie (Anfrie *et al.*, 2019). Le rapport du Conseil Central de l'Économie (2021) stipule que la majorité des bâtiments ont été construits avant la mise en œuvre des normes énergétiques. Les bâtiments dans leur ensemble sont responsables d'environ 40 % de la consommation énergétique totale de l'Union européenne et de 36 % de ses émissions de gaz à effet de serre provenant de l'énergie, ce qui fait du secteur du bâtiment l'un des principaux consommateurs d'énergie et contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre (International Resource Panel, 2020).

La transition vers un parc immobilier énergétiquement performant occupe donc une position centrale dans le plan de relance européen « *Next Generation EU* ». Le pacte vert pour l'Europe, lancé en 2021, a pour objectif d'atteindre la neutralité carbone pour l'Europe d'ici 2050 (Commission européenne, 2021). La stratégie établie par la Wallonie dans le cadre de la rénovation énergétique à long terme du bâtiment vise donc à atteindre la neutralité carbone au plus tard en 2050, en passant par une étape intermédiaire de réduction des émissions de gaz à effet de serre de 55 % d'ici 2030 (par rapport aux taux de 1990) (Gouvernement wallon, 2019). Néanmoins, la Commission européenne a fait l'état, dans sa communication expliquant sa stratégie pour une vague de rénovations, du taux annuel de rénovation énergétique : seulement 1 % des rénovations portent sur la performance énergétique des bâtiments (Commission européenne, 2020). En ce qui concerne les bâtiments résidentiels en Belgique, le taux de rénovation énergétique moyenne (réduction de la consommation d'énergie primaire de 30 % à 60 %) se situe également à 1 % par an. Ce chiffre descend à 0,2 % par an lorsqu'il s'agit de rénovations énergétiques profondes (réduction de la consommation d'énergie primaire de plus de 60 %). Or, le parc résidentiel de la Wallonie, composé d'environ 1 500 000 logements à rénover en 30 ans, devrait subir 45 000 rénovations énergétiques par an pour atteindre ses objectifs, à savoir un taux de rénovation énergétique de 3 % par an qui devrait être maintenu depuis 2020 (Gouvernement wallon, 2020).

En cause, de nombreux obstacles persistent, et ce à toutes les étapes du processus de rénovation, malgré la consolidation des normes de performance énergétique et la mise en place de politiques incitatives en faveur de la rénovation (Conseil Central de l'Économie, 2021). Outre une pénurie

de main-d'œuvre et d'entreprises ou encore un manque de moyens financiers (Kints, 2008 ; Conseil Central de l'Économie, 2021), l'un de ces obstacles est l'incertitude sur les ressources disponibles. En effet, la raréfaction de certaines ressources et les contraintes croissantes sur leur exploitation constituent une entrave au plan de rénovation massive prévu par la Commission européenne et sont les raisons qui ont notamment conduit l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) à établir une étude prospective sur la quantité de matériaux nécessaires pour la rénovation énergétique en France (Léonardon *et al.*, 2019).

De plus, dans sa communication pour « Un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques », la Commission européenne prône le développement d'alternatives locales afin de réduire la dépendance aux importations et d'ainsi sécuriser la disponibilité des ressources nécessaires à la transition écologique (Commission européenne, 2023). Également, la nouvelle directive européenne 2024/1275/UE sur la performance énergétique des bâtiments, d'application depuis mai 2024 et faisant suite à la règlementation environnementale française RE2020, fait évoluer le statut de la certification PEB dans ce sens (Parlement européen, 2024). Cette dernière ne prend plus seulement en compte la consommation d'énergie des bâtiments, mais fait maintenant écho aux exigences des bâtiments à émissions nulles (SPW énergie, 2024) et prend donc en compte les émissions carbone liées à la phase de construction ou de rénovation du bâtiment.

Dans ce cadre réglementaire et politique en évolution rapide, la rénovation énergétique du parc immobilier wallon s'inscrit dans une dynamique de transformation profonde du secteur du bâtiment. Cette évolution déplace le choix des matériaux d'isolation, longtemps arbitré sur la seule conductivité thermique et le prix, vers une décision architecturale qui engage désormais la ressource et le bilan carbone du projet. L'atteinte des objectifs climatiques implique une augmentation significative du rythme de rénovation et une montée en performance des interventions, ce qui entraîne mécaniquement une mobilisation accrue de matériaux de construction. Parallèlement, l'intégration progressive des émissions carbone liées aux phases de construction et de rénovation dans les cadres réglementaires européens met en évidence la nécessité d'une approche plus globale de la transition du bâti, intégrant à la fois les dimensions énergétiques, matérielles et environnementales. Ce contexte justifie l'attention croissante portée, dans la littérature scientifique et institutionnelle, aux interactions entre scénarios de rénovation énergétique et contraintes liées aux ressources, qui constituent désormais un élément structurant des stratégies de transition du parc bâti.

1.2 Question de recherche et objectifs

L'utilisation de ressources locales apparaît comme un levier central pour accélérer la transition énergétique du bâti wallon. Compte tenu de l'augmentation significative du taux annuel de rénovation énergétique nécessaire pour atteindre les objectifs climatiques à l'horizon 2050, la question de l'approvisionnement en matériaux d'isolation devient un enjeu structurant de la faisabilité même de cette transition. À cet égard, la Wallonie se caractérise par la présence d'un tissu de producteurs d'isolants biosourcés et recyclés déjà bien identifié, reposant sur des matières premières d'origines variées et sur des procédés industriels distincts, et couvrant une large gamme de solutions d'isolation adaptées à la rénovation du bâti existant.

Plusieurs filières sont en effet déjà actives ou en phase de structuration sur le territoire belge, dont certaines en Wallonie. Elles incluent notamment la production d'isolants en fibre d'herbe (Gramitherm, s. d.), en ouate de cellulose issue de papiers recyclés (ISOCELL, s. d. ; ISOPROC, s.d.), en panneaux et blocs de chanvre (Chanvre-eco, s. d. ; Exie, s. d. ; IsoHemp, s. d.), en panneaux de fibres de bois recyclé (Lenoo, s. d.), en laines animales (Woolconcept, s. d.), en granulats et panneaux de liège recyclé (De Vlaspit, s. d. ; Isoliège, s. d. ; Kurk, s. d.), en isolants textiles issus de fibres recyclées (IsoFabric, s. d.) ou encore de miscanthus en vrac (Promisc, s. d.). L'existence de ces filières se traduit par la présence d'acteurs industriels couvrant un spectre large de matières premières renouvelables et recyclées, reflétant une diversification progressive de l'offre d'isolants biosourcés en Wallonie. Par ailleurs, le développement annoncé de nouvelles lignes de production sur le territoire, par exemple avec la naissance du projet IsoFabric (s. d.), indique une dynamique d'expansion du secteur et suggère une montée en capacité potentielle des filières biosourcées à moyen terme, tout en posant la question de leur aptitude à accompagner une massification rapide de la rénovation énergétique.

Une partie de ces isolants repose d'ailleurs sur des matières premières recyclées plutôt que sur des cultures dédiées. La ouate de cellulose est ainsi fabriquée à partir de papiers recyclés, les isolants textiles à partir de fibres de récupération ou encore le liège sous forme de granulats recyclés. La disponibilité de ces gisements en Belgique, qu'il s'agisse des déchets de bois, de papier ou de textile, conforte l'intérêt de ces filières (Commission européenne, 2023 ; Grigoletto & Courard, 2018), sans que le présent travail ait vocation à en quantifier les volumes. C'est en effet sur les isolants produits localement, à l'échelle de la Wallonie, qu'ils soient d'origine biosourcée ou recyclée, que porte l'analyse.

Deux restrictions de périmètre encadrent cette analyse et méritent d'être posées d'emblée. Le travail porte sur le seul parc résidentiel unifamilial wallon, qui en constitue la part prépondérante, et laisse de côté les logements collectifs, pour des raisons exposées ultérieurement. Il ne retient par ailleurs, parmi les filières évoquées ci-dessus, que celles dont les lignes de production se situent en Wallonie et pour lesquelles des données de production ont pu être établies, soit huit producteurs et sept matériaux biosourcés. Certaines filières citées, dont le liège, n'entrent dès lors pas dans la quantification.

Dans ce contexte, la question n'est pas uniquement celle de la disponibilité théorique des ressources, mais celle de la capacité conjointe des filières wallonnes existantes et émergentes à transformer ces ressources en produits d'isolation en quantités compatibles avec les objectifs de rénovation énergétique du parc bâti. Il s'agit dès lors d'interroger la cohérence entre les besoins induits par des scénarios de rénovation énergétique ambitieux avec les capacités de production actuelles et futures des producteurs wallons, et les compatibilités constructives qui déterminent, pour chaque paroi, les matériaux que l'architecte peut effectivement mettre en œuvre.

Les questions de recherche qui structurent ce travail sont ainsi les suivantes :

- Quelles sont les ressources biosourcées et recyclées mobilisables en Wallonie pour la production d'isolants, en quelles quantités sont-elles disponibles au regard des capacités de production existantes et quel est le volume potentiel atteignable par les filières locales ?
- Dans quelle mesure ces ressources et ces filières locales peuvent-elles contribuer à la rénovation énergétique du parc résidentiel unifamilial wallon, et quel taux annuel de rénovation énergétique permettraient-elles d'atteindre ?

Quatre objectifs organisent la recherche. Le premier consiste à disposer d'un outil de quantification, la Wallonie disposant déjà d'une estimation publiée dont ce travail entend éprouver puis prolonger la portée. Le deuxième vise à évaluer, au moyen de cet instrument, les besoins en matériaux isolants induits par différentes trajectoires de rénovation du parc unifamilial wallon. Le troisième consiste à estimer la quantité d'isolants biosourcés et recyclés pouvant être produite localement, puis à confronter ces deux grandeurs, tant du point de vue des capacités industrielles que de celui des gisements agricoles régionaux. Le quatrième évalue enfin le coût environnemental de ces trajectoires, rapporté aux objectifs climatiques et matériels de la Région, afin que la réponse ne se réduise pas à une question de volumes disponibles. L'analyse vise, au terme de ce parcours, à déterminer quelle part du parc pourrait être rénovée sur cette base et à quel rythme annuel.

2 État de l'art

Les travaux existants relatifs à la rénovation énergétique du parc bâti et à la disponibilité des ressources nécessaires à sa mise en œuvre peuvent être regroupés autour de plusieurs approches complémentaires, allant des études territoriales directement comparables à la présente recherche aux cadres méthodologiques globaux sur les flux et stocks de matériaux.

La quantification des besoins matériels de la rénovation à l'échelle territoriale

En Belgique, plusieurs études ont déjà cherché à quantifier l'impact de la transition du parc bâti sur les matériaux. En Région flamande, l'étude *The impact of materials needed for renovation and new housing* évalue, à l'aide de l'outil TOTEM, l'impact environnemental des matériaux mobilisés par la rénovation et la construction neuve sur l'ensemble de leur cycle de vie, en le mettant en balance avec les consommations énergétiques d'exploitation. À partir de quelques bâtiments de référence extrapolés à l'ensemble du parc flamand selon différents niveaux d'ambition et rythmes de rénovation à l'horizon 2050, elle interroge la compatibilité entre objectifs climatiques et impact environnemental des matériaux, ce qui constitue un parallèle direct avec la présente recherche, bien qu'elle ne cible pas spécifiquement les isolants biosourcés (Delem *et al.*, 2020). En Wallonie, le travail académique de Suray pose une question très proche de celle du présent travail en évaluant dans quelle mesure les ressources agricoles régionales peuvent répondre aux besoins d'isolation des maisons wallonnes. Il croise les besoins du parc résidentiel avec une capacité de production estimée à partir des surfaces cultivées et des rendements agricoles régionaux, offrant ainsi un cadre méthodologique directement transposable (Suray, 2025). En Région bruxelloise, un travail analogue s'attache aux flux de matériaux induits par la rénovation énergétique du parc résidentiel. À partir d'une classification du bâti en types représentatifs et d'un cas d'étude correspondant à la maison bourgeoise d'avant 1945, il décline plusieurs scénarios de rénovation par paroi, en croisant différents degrés de démolition avec un choix de matériaux tantôt courant tantôt biosourcé, et quantifie pour chacun les matériaux entrants comme les déchets sortants, à performance thermique équivalente. Il met ainsi en évidence l'ampleur des écarts de consommation de matière que recouvrent des solutions pourtant équivalentes du point de vue énergétique (Gobbo *et al.*, 2019). Ces approches quantitatives s'inscrivent dans la continuité de travaux belges consacrés à la détermination des niveaux de performance énergétique optimaux du parc bâti wallon en fonction des coûts, en application de la directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments. Le projet COZEB établit ainsi, à partir de typologies de logements

représentatives, les niveaux d'exigence conciliant performance et coût, ce qui suppose une mobilisation importante de matériaux d'isolation (Leveau *et al.*, 2018). Cette étude a fait l'objet, plus récemment, d'une mise à jour et d'une extension de ses typologies et de ses résultats (Carbonelle *et al.*, 2023).

À l'échelle française, l'étude prospective menée par l'ADEME constitue un jalon fondamental sur le sujet. Elle vise à quantifier les besoins en matériaux nécessaires pour rénover le parc résidentiel français selon différents scénarios de rénovation énergétique aux horizons 2035 et 2050. La logique méthodologique, à savoir une traduction d'objectifs énergétiques en volumes de matériaux, rejoint celle mobilisée dans la présente recherche, bien que le périmètre couvre l'ensemble des matériaux et non uniquement les isolants. La quantification reste néanmoins circonscrite à l'enveloppe du bâtiment : même lorsque les simulations portent sur une rénovation globale incluant les équipements et l'éclairage, seuls les matériaux d'enveloppe sont comptabilisés, ce qui rapproche le périmètre de l'étude, centré sur la matière, de celui retenu dans le présent travail. Elle se distingue par ailleurs des autres références mobilisées en intégrant une quantification des déchets générés par la rénovation, apportant ainsi un éclairage complémentaire sur l'aval du processus de transformation du parc bâti (Léonardon *et al.*, 2019). Ces travaux s'inscrivent dans un ensemble plus large de réflexions nationales sur les trajectoires de rénovation, tel le travail du CGDD qui simule différents scénarios de rénovation du parc tertiaire français et leurs effets sur les consommations énergétiques, les émissions et les coûts à l'horizon 2050, éclairant ainsi les rythmes et niveaux d'ambition qui conditionnent, en amont, l'ampleur des besoins matériels (CGDD *et al.*, 2020).

Les analyses centrées sur les matériaux biosourcés

Ces travaux sont prolongés par des analyses spécifiquement centrées sur les matériaux biosourcés. L'étude publiée par Valbiom constitue une référence centrale, puisqu'elle cherche explicitement à déterminer si les ressources biosourcées produites en Wallonie sont suffisantes pour permettre la rénovation énergétique du bâti à l'horizon 2050. Elle croise les besoins en isolants avec les gisements de ressources locales, posant une question strictement analogue à celle développée dans ce travail (Gillet, 2024). Une interrogation comparable est formulée à l'échelle française dans l'article de Construction21, qui synthétise des travaux visant à évaluer la suffisance des ressources biosourcées pour accompagner la rénovation énergétique des logements, en mettant en évidence les tensions potentielles entre ambitions politiques et capacités réelles des filières (Gourovitch, 2024). Le travail doctoral du même auteur approfondit

cette démarche en mettant en regard la production et les besoins en isolants biosourcés à plusieurs échelles territoriales, de l'échelle nationale à celle du bâtiment, et en déclinant différents scénarios de rénovation et de production. Il reprend à cette fin la segmentation typologique du parc résidentiel élaborée par l'ADEME, ce qui l'inscrit dans une logique directement comparable à celle de la présente recherche (Gourovitch, 2025). Cette réflexion est également développée à l'échelle européenne dans des travaux récents analysant le potentiel et les limites des isolants biosourcés face aux objectifs climatiques, en soulignant l'importance de confronter les performances environnementales aux capacités réelles de production des filières (Trachte & Stiernon, 2025b). À une échelle plus large encore, d'autres travaux examinent le potentiel des matières biosourcées à croissance rapide, comme la paille, pour répondre aux besoins d'isolation du parc existant, en mettant en regard la ressource agricole mobilisable et la demande induite par la rénovation (Göswein *et al.*, 2022). Dans une perspective analogue, une étude espagnole évalue la disponibilité des coproduits de cultures comme matière première pour les isolants et la confronte à des scénarios de demande de rénovation, concluant que la ressource agricole disponible suffirait à couvrir les besoins estimés, selon un raisonnement offre-besoin directement comparable à ce travail (Palumbo *et al.*, 2015). Par ailleurs, l'évaluation des performances des isolants eux-mêmes fait l'objet de travaux dédiés, tel le classement des matériaux d'isolation biosourcés et conventionnels établi à partir des déclarations environnementales françaises, qui éclaire le choix des matériaux mobilisés dans la rénovation (Gourovitch *et al.*, 2024). Dans une perspective voisine, un ouvrage récent compare une cinquantaine de matériaux d'isolation présents sur le marché belge et limitrophe, en croisant leurs propriétés techniques, leurs conditions de mise en œuvre, leur impact environnemental et leur aptitude à s'inscrire dans une gestion circulaire des ressources (Trachte & Stiernon, 2023b). Ses autrices défendent une approche multicritère du choix des isolants, complémentaire à l'analyse de cycle de vie, en soulignant que ces matériaux demeurent aujourd'hui sélectionnés principalement sur la base de leur conductivité thermique et de leur prix de mise en œuvre, alors que les ressources dont ils procèdent et les transformations qu'elles subissent pèsent lourdement sur le bilan environnemental de la rénovation (Trachte & Stiernon, 2023a).

Ces analyses se prolongent dans des travaux consacrés à la structuration des filières biosourcées elles-mêmes et aux conditions de leur déploiement. Le rapport des Amis de la Terre analyse le potentiel des écomatériaux et interroge la capacité des filières biosourcées à répondre à une montée en charge de la rénovation, posant des questions proches de celles relatives à la structuration des filières wallonnes (Conteville & Den Hartigh, 2009). Le travail de fin d'études

d'Ulrich s'inscrit dans cette continuité en étudiant la fibre de bois comme matériau biosourcé pour la transition énergétique, en analysant la ressource forestière, les capacités industrielles et les limites environnementales (Ulrich, 2019). Des travaux plus récents portant sur la paille comme matériau d'isolation évaluent la possibilité de mobiliser des ressources agricoles locales pour répondre aux besoins de la rénovation énergétique à grande échelle (Gourovitch *et al.*, 2025). La thèse de Daniel complète ces approches en étudiant l'optimisation énergétique du bâti, offrant un cadre de réflexion sur les niveaux de performance qui conditionnent les besoins en matériaux (Daniel, 2023).

La modélisation du parc bâti et des scénarios de rénovation

À l'échelle européenne, plusieurs projets structurants ont contribué à la modélisation du parc bâti et des scénarios de rénovation. Les projets TABULA et EPISCOPE ont développé des typologies harmonisées du parc résidentiel européen, y compris pour la Belgique, permettant de relier caractéristiques du bâti, performances énergétiques et scénarios de rénovation, constituant un socle indispensable pour toute estimation des besoins matériels (Cyx *et al.*, 2011 ; Stein *et al.*, 2016). Le projet Hotmaps s'inscrit dans cette continuité en proposant un outil de cartographie et de modélisation de la demande énergétique du parc bâti européen, facilitant l'analyse territoriale des impacts de la rénovation énergétique (Pezzutto *et al.*, 2019). Le projet AmBIENCe prolonge ces travaux en développant des bases de données et des modèles intégrant performance énergétique, matériaux et émissions de CO_2, posant ainsi la question de la compatibilité entre rénovation, électrification et disponibilité des ressources (Vastiau, 2023). Ces bases de données sont notamment mobilisées par le Buildings Performance Institute Europe (BPIE) pour estimer le potentiel d'économies d'énergie lié à l'amélioration de l'isolation des logements européens, montrant comment les scénarios énergétiques reposent implicitement sur des volumes importants de matériaux d'isolation (BPIE, 2023). Dans cette même logique de modélisation ascendante du parc par typologies, périodes et zones climatiques, des travaux académiques récents estiment le potentiel de réduction de la demande énergétique de parcs résidentiels nationaux et identifient l'isolation des murs et des toitures comme les leviers les plus déterminants de la rénovation, un constat qui rejoint la place centrale accordée à ces parois dans l'estimation des besoins en isolants (Kınay *et al.*, 2023).

À l'échelle wallonne, un travail doctoral récent élargit cette modélisation du parc en y intégrant les caractéristiques socio-économiques des occupants, jusque-là absentes des modèles fondés sur les seules données techniques du bâti (Ruellan, 2026). Articulé autour de plusieurs

publications, il croise les certificats de performance énergétique avec les données de revenu et de statut d'occupation, et met en évidence la moindre performance des maisons mitoyennes et trois façades ainsi que des logements occupés par les ménages les moins aisés (Ruellan *et al.*, 2021). Il construit ensuite des profils représentatifs associant un type de logement à un profil d'occupant, et montre que les logements peu performants habités par des ménages à faibles revenus constituent plus de 17 % du parc wallon, tandis que ceux occupés par des ménages à hauts revenus en représentent encore plus de 11 % (Ruellan *et al.*, 2025). Confrontés à une étude de terrain menée dans un quartier liégeois, ces résultats conduisent à conclure que l'inertie de la rénovation ne s'explique pas par les seules déficiences techniques du bâti et que des politiques uniformes s'accordent mal à l'hétérogénéité du parc et de ses occupants.

Les filières d'isolation et la disponibilité des matières premières

Parallèlement, plusieurs études européennes et internationales analysent les filières de matériaux d'isolation et leurs contraintes. L'étude sur le paysage concurrentiel de l'industrie européenne des matériaux isolants examine les capacités de production, les dépendances aux importations et les perspectives de croissance du secteur, fournissant un cadre industriel essentiel pour comprendre les limites potentielles de la massification de la rénovation (Pavel & Blagoeva, 2018). Des travaux récents interrogent également la disponibilité des matières premières nécessaires aux isolants conventionnels, mettant en évidence des vulnérabilités dans les chaînes d'approvisionnement qui renforcent l'intérêt des alternatives biosourcées et recyclées (Zandonella Callegher *et al.*, 2023).

Les stocks et flux de matériaux du parc bâti

Un ensemble important de travaux repose sur l'analyse des stocks et flux de matériaux du parc bâti, généralement désignée sous le terme de MFA, *material flow analysis*. Les cadres méthodologiques développés par Müller (2005), Tanikawa *et al.* (2015), Fishman *et al.* (2014) et Krausmann *et al.* (2020) constituent les fondements théoriques de ces approches. Ils visent à relier les stocks bâtis existants aux flux futurs de matériaux nécessaires à leur entretien, leur rénovation ou leur remplacement, en modélisant l'évolution du parc bâti sur le long terme. Ces travaux ont en commun de poser la question de la quantité de matériaux requise pour maintenir ou transformer un parc immobilier donné, indépendamment de considérations strictement énergétiques, fournissant ainsi un socle conceptuel essentiel pour toute quantification prospective des besoins matériels.

Ces approches ont ensuite été étendues à des échelles plus larges par la constitution de bases de données de contenus matériels des bâtiments et leur intégration dans des modèles prospectifs globaux. Ces travaux cherchent à estimer l'évolution des stocks et flux de matériaux du parc résidentiel mondial à moyen et long terme, en tenant compte de la croissance démographique, de l'urbanisation et du renouvellement du bâti. Ils montrent que, même dans des scénarios de transition énergétique ou de circularité accrue, la demande en matériaux de construction reste structurellement élevée, ce qui pose la question de la disponibilité des ressources à l'échelle globale (Marinova *et al.*, 2019 ; Deetman *et al.*, 2019).

À des échelles plus fines, ces méthodes ont été appliquées à de nombreux contextes urbains et régionaux afin de quantifier les flux de matériaux induits par la transformation du parc bâti. En Suisse, des études ont analysé les stocks et flux de matériaux liés à la rénovation et à la densification urbaine, mettant en évidence les implications matérielles des politiques de transition du bâti (Heeren & Hellweg, 2018). Aux Pays-Bas, des travaux similaires ont mobilisé des modèles dynamiques pour analyser l'évolution des stocks bâtis et les besoins en matériaux associés à différents scénarios de développement urbain (Yang *et al.*, 2022). En Italie et en Autriche, des études de cas ont appliqué ces approches à des contextes urbains spécifiques, en quantifiant les flux de matériaux liés à la rénovation et à la transformation du bâti existant (Miatto *et al.*, 2018 ; Kalcher *et al.*, 2016). En Espagne, l'étude menée à Saragosse applique également une approche de type MFA pour évaluer les flux de matériaux associés à différents scénarios de transformation du parc bâti urbain, en mettant l'accent sur les effets combinés de la rénovation énergétique et de l'évolution morphologique de la ville, illustrant la transférabilité de ces méthodes à des contextes urbains méditerranéens (Monzón-Chavarrías *et al.*, 2026).

D'autres recherches ont étendu ces analyses à des contextes extraeuropéens, notamment en Australie et en Chine, afin d'évaluer l'impact matériel des stratégies de rénovation, de densification ou de renouvellement urbain. Ces travaux montrent que, quels que soient les contextes géographiques, les politiques de transformation du parc bâti s'accompagnent de flux matériels importants, qui doivent être pris en compte dans l'évaluation de leur soutenabilité à long terme (Stephan & Athanassiadis, 2017 ; Gao *et al.*, 2020).

Les cadrages institutionnels des ressources

Les études nordiques et anglo-saxonnes complètent ce panorama en analysant les implications matérielles et carbone de la rénovation et de la construction bas carbone. En Norvège, plusieurs

travaux évaluent les flux de matériaux et les émissions associées à différents scénarios de rénovation, mettant en évidence le rôle croissant des matériaux dans l'empreinte environnementale du secteur du bâtiment (Sartori *et al.*, 2016 ; Lausselet *et al.*, 2020 ; Sandberg *et al.*, 2021 ; Lien *et al.*, 2022). Au Royaume-Uni et aux États-Unis, des études mobilisent des approches similaires pour analyser les stocks bâtis et leurs implications matérielles, sans toutefois confronter explicitement ces besoins aux capacités de production locales d'isolants (Ajayebi *et al.*, 2020 ; Arehart *et al.*, 2022).

Enfin, plusieurs rapports institutionnels viennent cadrer ces analyses en soulignant l'importance stratégique des ressources. Les travaux du *Fraunhofer Institute* et de l'agence allemande DENA (l'Agence allemande de l'énergie, équivalent de l'ADEME française) insistent sur la nécessité d'intégrer la contrainte matière dans les stratégies de rénovation et de construction, en lien avec les objectifs climatiques (*Fraunhofer-Gesellschaft*, 2024 ; Alkasabreh *et al.*, 2024). Le rapport du PBL néerlandais sur l'économie circulaire montre que la demande en matériaux du secteur du bâtiment reste un facteur déterminant des impacts environnementaux, même dans des scénarios de transition ambitieuse (Hanemaaijer & Muller, 2025). Les statistiques forestières britanniques illustrent quant à elles comment la quantification des ressources locales peut être mise en regard des besoins du secteur de la construction, offrant un parallèle méthodologique direct avec l'évaluation des gisements wallons de ressources biosourcées (Forest Research, 2025).

Positionnement de la présente recherche

L'ensemble de ces travaux montre que si la rénovation du parc bâti est largement étudiée sous l'angle énergétique, climatique ou industriel, la question de la disponibilité matérielle, en particulier pour les isolants biosourcés et recyclés, n'a été abordée à l'échelle régionale que par un nombre restreint de travaux, dont aucun ne livre un instrument dont la construction puisse être vérifiée. Les études de l'ADEME et les travaux européens récents sur les isolants biosourcés constituent des références structurantes, mais leur transposition territoriale demeure limitée. La présente recherche s'inscrit ainsi dans la continuité directe de ces travaux en cherchant à évaluer, pour la Wallonie, dans quelle mesure les ressources biosourcées et recyclées produites localement peuvent soutenir un taux de rénovation énergétique compatible avec les objectifs climatiques, en articulant scénarios de rénovation, besoins en isolants et gisements de ressources disponibles.

3 Méthodologie

La méthodologie de ce travail ne consiste pas à élaborer un modèle d'estimation à partir de zéro, mais à s'appuyer sur un modèle existant, celui de l'étude publiée par Valbiom, à en analyser la construction, puis à le faire évoluer. Ce modèle de référence confronte les besoins en isolants induits par la rénovation énergétique du parc résidentiel wallon à la production locale de matériaux biosourcés et recyclés. La démarche se déroule en cinq temps, qui correspondent aux sections suivantes du travail et permettent de répondre aux questions de recherche. Ces cinq temps sont détaillés ci-après, puis réunis dans la carte conceptuelle de la figure 1, qui clôt la section et met en regard, pour chacun d'eux, l'objectif poursuivi, la méthode employée et le résultat attendu.

Reconstruction et compréhension du modèle de référence

La démarche s'ouvre sur la reconstitution et l'analyse du modèle de référence, à partir de l'article publié et du fichier de calcul qui lui a servi de support. Il s'agit d'en comprendre en détail la chaîne de raisonnement, depuis la caractérisation du parc résidentiel jusqu'à la confrontation des besoins en isolants avec la production locale, ainsi que les hypothèses posées à chaque étape. Cette compréhension constitue la base à partir de laquelle le modèle est ensuite examiné et amélioré.

Analyse comparative d'autres travaux existants

Le modèle de référence est ensuite confronté à d'autres travaux, choisis parmi ceux mobilisés dans l'état de l'art. Si l'ensemble de ces travaux présente un intérêt pour la recherche, seuls sont retenus ici ceux qui entretiennent un lien direct avec la démarche du modèle de référence et qui apportent, sur au moins un point, un enrichissement à cette démarche. Cette analyse comparative vise à dégager, dans les travaux sélectionnés, les apports méthodologiques susceptibles d'éclairer les choix du modèle de référence et d'en nourrir l'évolution.

Identification des limites et des pistes d'amélioration

Vient alors l'examen critique du modèle de référence, qui distingue les simplifications assumées des incohérences internes. À la lumière de cet examen et des enseignements tirés de l'analyse comparative, des pistes d'amélioration sont identifiées, puis retenues ou écartées en vue de la construction d'un modèle amélioré.

Construction du modèle amélioré

Sur cette base, un modèle amélioré est construit. Son volet demande caractérise le parc résidentiel par typologies, puis traduit les objectifs de rénovation en surfaces d'enveloppe à isoler et en volumes d'isolants, répartis entre les différents matériaux selon leur compatibilité constructive avec chaque paroi. Son volet offre estime la production locale d'isolants, dans sa situation actuelle comme dans son potentiel, ainsi que la ressource mobilisable à l'échelle régionale. La construction s'attache à dépasser les limites relevées et à intégrer les apports jugés pertinents.

Sortie des résultats

La démarche se referme sur l'exploitation du modèle amélioré en vue d'en produire des résultats. Le modèle est mis en œuvre selon plusieurs trajectoires de rénovation, de manière à comparer les besoins estimés et la production locale sous des hypothèses contrastées, là où le modèle de référence n'en présentait qu'une seule configuration. Cette sortie de résultats permet d'évaluer, pour chaque scénario, la part du parc pouvant être rénovée à partir des ressources étudiées et les taux annuels de rénovation qu'elles permettraient d'atteindre. Une analyse de sensibilité accompagne ces résultats afin d'en apprécier la robustesse au regard des incertitudes pesant sur les principales variables.

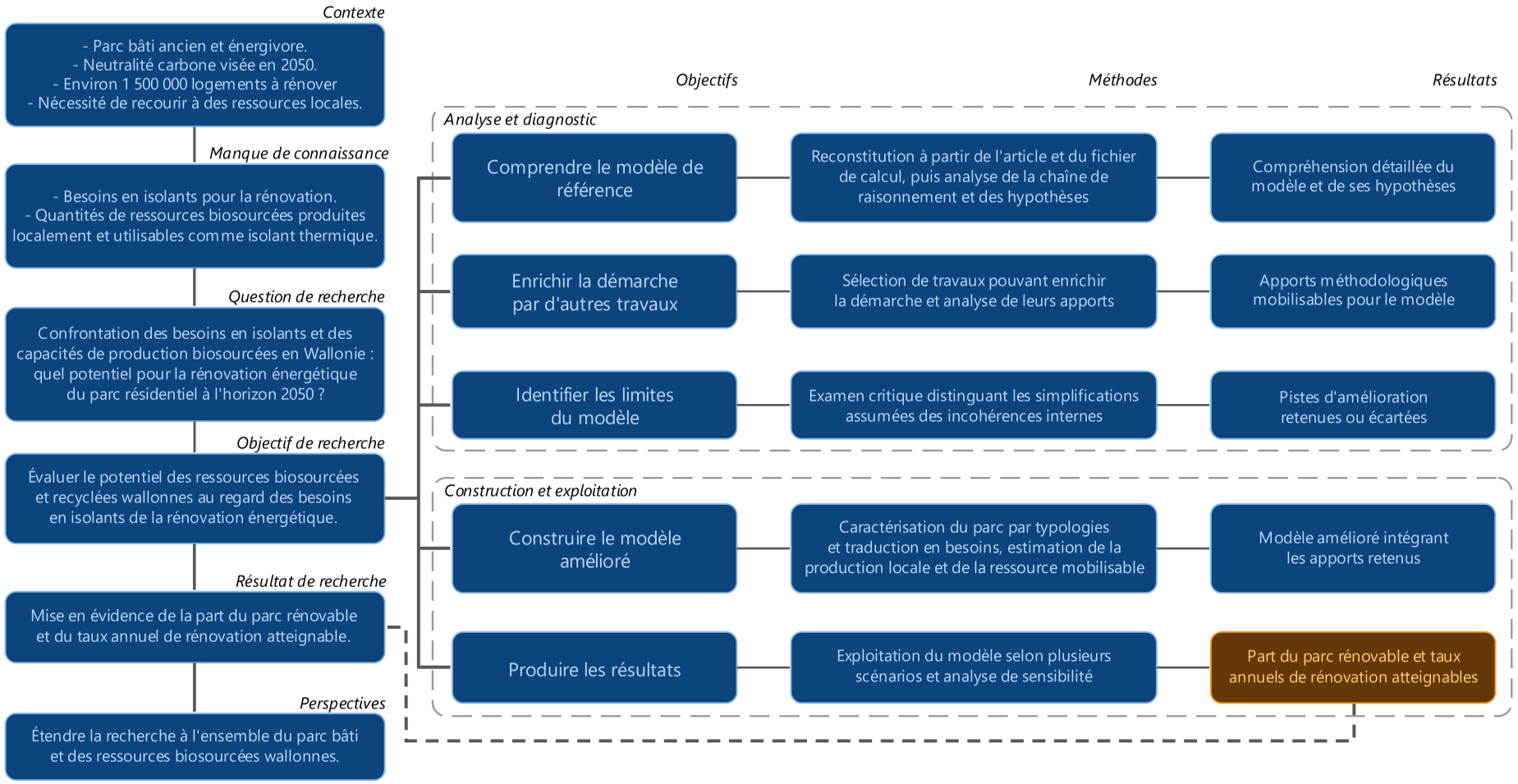


Figure 1 - Carte conceptuelle de la méthodologie du travail, articulée autour des cinq temps de la démarche. Réalisation personnelle.

4 Reconstruction et compréhension du modèle de référence

Valbiom se présente comme le centre de référence de l'économie biosourcée en Wallonie. Active depuis 2002, cette structure a pour objectif de faire émerger, de promouvoir et de pérenniser de nouvelles activités économiques axées sur la valorisation non alimentaire de la biomasse, au service tant d'acteurs publics que privés (Valbiom, 2024). C'est à ce titre qu'elle s'est intéressée à la capacité des filières wallonnes à fournir les isolants nécessaires à la rénovation énergétique du parc bâti.

L'étude analysée ci-après, intitulée « Quelle quantité d'isolant biosourcé pour permettre la rénovation du bâti wallon en 2050 ? », a été réalisée à la fin de l'année 2023 à la suite d'une sollicitation de Greenwin, pôle de compétitivité wallon qui fédère les acteurs de l'innovation dans les technologies propres pour les secteurs de la chimie, de la construction et de l'environnement (Greenwin, 2024). Elle s'inscrit dans le cadre du « Challenge de la Construction » organisé le 28 novembre 2023, au cours duquel Valbiom a animé un panel consacré à la place des matériaux biosourcés dans la massification de la rénovation wallonne et aux obstacles à leur déploiement. Cette sollicitation prolonge les travaux menés par le pôle sur l'identification et la quantification des gisements de matières secondaires exploitables en Wallonie et sur les possibilités de leur valorisation industrielle (Greenwin, 2019), auxquels se rattache directement la question des isolants issus de matières recyclées. Les résultats de l'étude ont été publiés sur le site de Valbiom le 19 janvier 2024 (Gillet, 2024).

L'analyse qui suit s'appuie à la fois sur l'article publié en ligne et sur le fichier de calcul ayant servi de base méthodologique, transmis par Pauline Gillet, autrice de l'étude. L'objectif est de reconstituer de manière rigoureuse la démarche adoptée, d'en expliciter les choix structurants et d'en comprendre les mécanismes de calcul. La première partie porte sur la description, illustrée à l'aide des feuilles de calcul de Valbiom, de la méthodologie mobilisée. Une carte conceptuelle en résume ensuite la logique d'ensemble. La dernière partie présente les hypothèses posées pour parvenir aux résultats annoncés.

4.1 Description de la méthodologie utilisée

La méthodologie développée par Valbiom repose sur une approche descendante (*top-down*) visant à estimer les besoins totaux en matériaux isolants nécessaires pour atteindre un état cible de rénovation énergétique du parc résidentiel wallon à l'horizon 2050. Elle s'appuie sur une chaîne de calcul logique partant du parc bâti existant, traduisant celui-ci en surfaces d'enveloppe à isoler, puis en volumes d'isolants nécessaires. L'objectif n'est pas de modéliser une trajectoire temporelle de la rénovation ni des rythmes annuels, mais de quantifier un besoin cumulé final correspondant à un parc bâti considéré comme entièrement rénové sur le plan de l'isolation.

Données relatives au parc bâti wallon

La première étape de la méthodologie consiste à caractériser le parc résidentiel wallon à partir de données statistiques existantes. Les données mobilisées dans l'étude sont issues des statistiques cadastrales du parc de bâtiments de 2023 (Statbel, 2023). Cela donne une vue globale sur le nombre total de logements en Wallonie, leur répartition entre logements individuels 2, 3 ou 4 façades et logements collectifs, ainsi que des données relatives aux surfaces bâties.

Les variables prises en compte, que présente le tableau 1, comprennent quatre catégories de surfaces bâties au sol moyennes ainsi qu'une segmentation selon les quatre typologies de logement citées ci-dessus, permettant d'obtenir des ordres de grandeur relatifs à la composition du parc dans sa globalité. Cette caractérisation est réalisée de manière globale, le parc étant traité comme un ensemble homogène, sans distinction fine par période de construction, système constructif, morphologie urbaine ou état structurel des bâtiments.

Typologie du bâtiment	Nombre total	<45 m²	45-64 m²	65-104 m²	>104 m²
Maison unifamiliale					
4 façades	517,107	2,225	6,302	97,619	410,961
3 façades	378,343	10,673	48,904	146,840	171,926
2 façades	422,203	30,490	101,777	192,716	97,220
Immeuble	53,835	–	–	–	–
Total	**1,371,488**	**43,388**	**156,983**	**437,175**	**680,107**

Tableau 1 - Composition du parc résidentiel wallon selon la typologie de logement et la surface bâtie au sol. Mise en forme personnelle d'après les statistiques cadastrales de Statbel (2023), telles que mobilisées par Valbiom (Gillet, 2024).

État initial de l'isolation

À partir d'une répartition des logements dont les murs sont déjà isolés, établie sur base de l'Enquête sur la qualité de l'habitat en Région wallonne 2006-2007 (Albarello *et al.*, 2007) et de l'Enquête socio-économique 2001 – Le logement en Belgique (Vanneste *et al.*, 2007), Valbiom déduit, par typologie de logement et selon l'époque de construction, le nombre de bâtiments dont les murs restent à isoler. Cette proportion de bâtiments déjà isolés est exclue des besoins futurs, tandis que la part restante est considérée comme devant être isolée d'ici 2050. Le tableau 2 donne les parts ainsi obtenues, typologie par typologie.

Typologie	Nombre de bâtiments	Déjà isolés (murs)	À isoler (murs)	Part à isoler
Habitations 2 façades	422,203	79,772	342,431	81.1%
Habitations 3 façades	378,343	101,964	276,379	73.0%
Habitations 4 façades	517,107	253,318	263,789	51.0%
Immeubles à appartements	53,835	22,272	31,563	58.6%
Total	**1,371,488**	**457,326**	**914,162**	**66.7%**

Tableau 2 - Part des bâtiments dont les murs sont à isoler, selon la typologie. Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

Estimation des surfaces à isoler

À partir du nombre de logements, des surfaces moyennes par logement et des taux d'isolation existants, la méthodologie calcule les surfaces résiduelles à isoler pour les différents éléments de l'enveloppe. Cette estimation repose sur des coefficients géométriques simplifiés permettant d'évaluer les surfaces de murs, de dalles de sol et, selon deux scénarios, de toitures ou de planchers de comble. Le tableau 3 donne un exemple pour les murs des maisons quatre façades.

Murs pour isolation combles						
	4 façades : isolation de toutes les façades					
	Surface au sol (m²)	**Longueur (m)**	**Largeur (m)**	**Surface de murs à isoler (m²)**	**Nombre de batiments à isoler**	**Surface totale (m²)**
	40.0	7.7	5.2	118.5	0.0	0.0
	54.5	9.0	6.0	138.3	1,229.9	170,142.2
	84.5	11.3	7.5	172.3	12,299.2	2,118,566.7
	120.0	13.4	8.9	205.3	47,966.9	9,846,208.2
	Surface totale de mur à isoler					12,134,917.0

Tableau 3 - Exemple de calcul des surfaces de murs à isoler pour les maisons quatre façades, selon la tranche de surface bâtie au sol (cet exemple ne couvre qu'un des deux scénarios de toiture : le cas de l'isolation du plancher des combles). Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

Le résultat de cette étape est une estimation globale des surfaces d'enveloppe à isoler, exprimée en mètres carrés, correspondant à la part des bâtiments identifiés comme non isolés, déterminée à partir des taux d'isolation appliqués au nombre total de logements du parc résidentiel wallon.

Calcul du volume de matériau

La dernière étape consiste à convertir les surfaces à isoler en volumes d'isolants nécessaires. Cette conversion nécessite au préalable des données techniques relatives aux isolants : d'une part les conductivités thermiques (λ) des différents isolants repris dans l'étude, d'autre part les résistances thermiques cibles (R cible) pour les toitures, les murs et les dalles de sol (seuls les R cibles des toitures et des murs sont conservés pour la suite du calcul, les sols étant écartés). Les R cibles utilisés par Valbiom sont les résistances thermiques à atteindre pour prétendre aux primes de la Région wallonne au moment de la réalisation de l'étude. Ces paramètres techniques, que reprend le tableau 4, sont utilisés de manière uniforme pour l'ensemble du parc bâti, indépendamment du type de bâtiment ou du contexte constructif.

Paroi	R cible (m².K/W)
Toit	5
Murs	4
Sols	3.5
Isolant	**λ (W/m.K)**
Béton de chanvre	0.07
Ouate de cellulose	0.038
Fibre de bois	0.0445
Miscanthus	0.05
Panneaux semi-rigides	0.041
Panneaux rigides	0.039

Tableau 4 - Paramètres techniques du calcul des volumes : résistances thermiques cibles par paroi (R cible) et conductivités thermiques des isolants (λ). Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

La conversion suppose par ailleurs de répartir les bâtiments entre les différents systèmes constructifs de rénovation, à savoir l'isolation par l'extérieur, par l'intérieur ou par la coulisse. Le fichier de calcul comporte à ce sujet des statistiques issues de la coopérative spécialisée dans la rénovation énergétique Corenove, qui établissent cette répartition à partir d'un échantillon de rénovations énergétiques. Ces données ne sont toutefois pas exploitées dans le calcul final : la répartition effectivement retenue repose sur des pourcentages posés par Valbiom.

Le tableau 5 illustre ce calcul pour les murs des maisons quatre façades. Les volumes sont ensuite rassemblés pour obtenir des besoins totaux en isolants, exprimés par type de matériau, pour l'ensemble du parc résidentiel wallon. Ces résultats correspondent à un besoin cumulé à l'horizon 2050, sans prise en compte des rythmes annuels de rénovation ou des capacités de production industrielle.

				Surface de murs (m²)	Épaiseur d'isolant (m)	Pourcentage	Volume d'isolant (m³)
Murs	Maison 4 façades	Extérieur	Béton de chanvre	28,012,976.57	0.21	6%	352,963.50
			Ouate de cellulose	28,012,976.57	0.15	1%	42,579.72
			Fibre de bois	28,012,976.57	0.18	0.5%	24,931.55
			Miscanthus	28,012,976.57	0.20	0.5%	28,012.98
			Panneaux semi-rigides	28,012,976.57	0.16	2%	91,882.56
		Intérieur	Miscanthus	28,012,976.57	0.20	3%	168,077.86
			Fibre de bois	28,012,976.57	0.18	3%	149,589.29
			Ouate de cellulose	28,012,976.57	0.15	3%	127,739.17
			Panneaux semi-rigides	28,012,976.57	0.16	9%	413,471.53
			Béton de chanvre	28,012,976.57	0.21	72%	4,235,562.06

Tableau 5 - Exemple de calcul des volumes d'isolant pour les murs des maisons quatre façades, par système de rénovation (extérieur, intérieur) et par matériau. Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

Cette étape comprend également le calcul du volume de bois nécessaire à la rénovation énergétique du parc bâti, d'une part pour poser l'isolant et d'autre part pour le bardage dans le cas d'une isolation par l'extérieur.

Ressources et production

Les besoins ainsi obtenus sont enfin mis en regard des capacités de la filière. Les volumes que les producteurs d'isolants biosourcés actifs en Wallonie génèrent actuellement, ainsi que leur production maximale s'ils atteignent leur plein potentiel, sont confrontés aux besoins totaux estimés, afin d'évaluer dans quelle mesure la production wallonne peut couvrir la demande à l'horizon 2050. Le tableau 6 détaille ces capacités, producteur par producteur.

Producteur	Cap. 2023 (m³/an)	Cap. potentielle (m³/an)
Woolconcept	550	2,800
Gramitherm	40,000	200,000
IsoHemp	60,000	150,000
ISOPROC	222,222	513,333
ISOCELL	290,909	381,818
Total	613,681	1,247,951

Tableau 6 - Capacités de production annuelle et potentielle des fabricants wallons d'isolants biosourcés pris en compte dans l'étude, en m³/an. Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

4.2 Carte conceptuelle du modèle Valbiom

La figure 2 réunit en une vue unique la chaîne de calcul décrite ci-dessus, depuis les données statistiques d'entrée jusqu'aux volumes publiés. Elle en fait apparaître le caractère linéaire, chaque étape découlant de la précédente sans retour, ainsi que la place restreinte qu'y occupent les paramètres techniques, réunis en un seul palier appliqué uniformément à l'ensemble du parc.

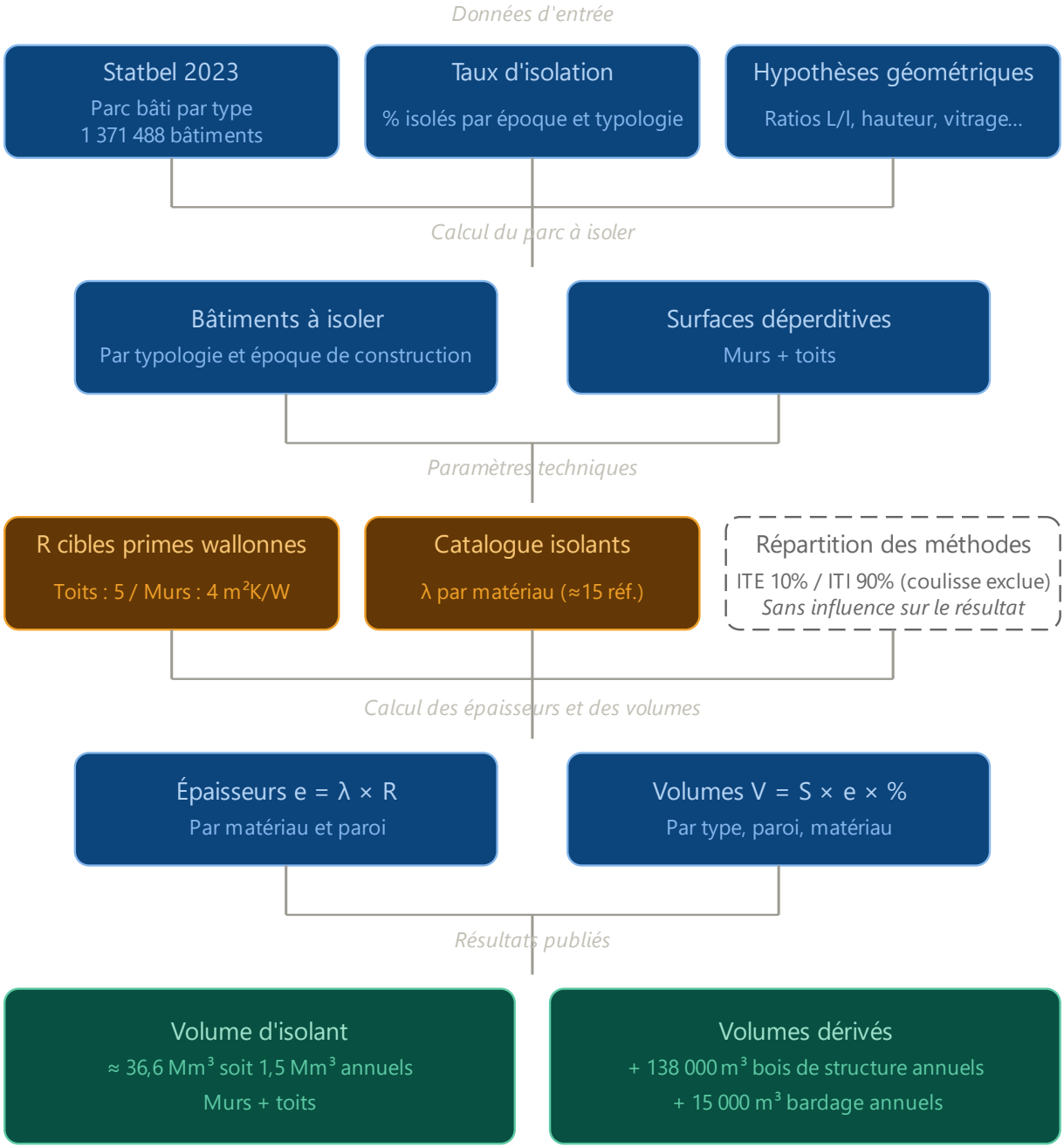


Figure 2 - Carte conceptuelle de la méthodologie de Valbiom, de la caractérisation du parc bâti wallon jusqu'aux volumes d'isolants et aux volumes de bois dérivés. Réalisation personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

4.3 Hypothèses posées

L'objet de cette section est de restituer, dans l'ordre où elles interviennent au fil de la démarche, les hypothèses posées par Valbiom pour aboutir à son estimation finale. Deux motivations principales les justifient : combler un manque de données chiffrées ou, à l'inverse, alléger le processus de calcul.

À ce stade, ces hypothèses sont exposées de manière descriptive. L'examen de leur bien-fondé est mené séparément, à la section consacrée aux limites du modèle.

Hypothèses relatives au parc bâti

La méthodologie s'ouvre sur la description du parc résidentiel wallon. Le calcul lui-même ne repose sur aucune hypothèse : le parc est classé en quatre typologies de logements (habitations 2, 3 et 4 façades, immeubles à appartements), croisées avec la surface bâtie au sol des logements. Ces catégories proviennent directement des données statistiques issues de Statbel et forment la base chiffrée sur laquelle repose la suite du travail. Deux hypothèses sont néanmoins posées à ce stade : elles ne concernent pas la manière de compter le parc, mais le cadre dans lequel il est envisagé.

La première porte sur l'évolution du parc, considéré comme statique à l'horizon 2050. Le nombre total de logements est supposé constant sur toute la période étudiée, sans tenir compte des démolitions, des nouvelles constructions, des transformations du bâti existant ni des changements d'usage.

La seconde porte sur la manière dont la rénovation est envisagée. Valbiom ne modélise pas de trajectoires dans le temps : l'ensemble des surfaces non isolées à l'état initial est supposé rénové à l'horizon 2050, sans rythme annuel de déploiement ni distinction entre rénovations partielles et complètes. Le résultat est un besoin cumulé, correspondant à un parc considéré comme entièrement rénové en fin de période, et non une trajectoire année par année.

Hypothèses relatives à l'état initial de l'isolation

Une fois le parc décrit, Valbiom cherche à estimer la part des bâtiments déjà isolés, afin de ne conserver que ceux qui restent à traiter.

Pour les murs, l'estimation s'appuie sur des sources statistiques : l'enquête-qualité de 2007 (Albarello *et al.*, 2007), qui donne le pourcentage de logements dont les murs sont déjà isolés

selon leur époque de construction (de 11 % pour les bâtiments antérieurs à 1900 à 100 % pour les constructions postérieures à 2011), ainsi que de l'Enquête socio-économique 2001 (Vanneste *et al.*, 2007), spécifiant la répartition des logements selon leur époque de construction. À partir de ces valeurs, Valbiom calcule, pour chacune des quatre typologies retenues (habitations 2, 3 et 4 façades et immeubles à appartements), le nombre de bâtiments qu'il reste à isoler. Ce nombre sert ensuite de point de départ au calcul des surfaces de murs à isoler.

Pour les toitures, l'enquête-qualité de 2007 (Albarello *et al.*, 2007) renseigne que 52 % des bâtiments disposent déjà d'un toit isolé. Valbiom utilise cette donnée et l'applique de manière identique, quelle que soit l'époque de construction, aux quatre typologies de logements retenues.

Hypothèses relatives à l'estimation des surfaces à isoler

À partir du nombre de bâtiments à isoler, répartis selon leur typologie et leur surface bâtie au sol, Valbiom calcule la surface que cela représente pour les toitures, les murs et les sols. Ce passage du nombre de bâtiments à une surface demande de poser un ensemble d'hypothèses sur la géométrie des bâtiments. Celles-ci concernent les proportions des façades des bâtiments (à savoir le rapport entre les murs pignons et les murs gouttereaux), la hauteur moyenne de ces bâtiments ainsi que le pourcentage de couverture non vitrée.

Valbiom distingue par ailleurs deux cas de figure pour le traitement de la toiture : les logements dont on isole les versants, et ceux dont on isole le plancher des combles. Ce choix n'est pas neutre, car il modifie aussi la surface de murs à prendre en compte : dans la mesure où l'isolation suit la pente du toit ou le plancher, la hauteur de murs concernée n'est pas la même. Le tableau 7 réunit les valeurs retenues.

Hypothèses géométriques – 2, 3 et 4 façades	
Paramètre	**Valeur**
Rapport longueur/largeur (4 façades)	1.5
Rapport longueur/largeur (3 façades)	1
Rapport longueur/largeur (2 façades)	0.5
Hauteur du bâtiment	5.4
Couverture non-vitrée	85 %
Part isolation des versants de toiture	50 %
Part isolation du plancher des combles	50 %

Hypothèses géométriques – Immeubles	
Paramètre	**Valeur**
Rapport longueur/largeur	2
Hauteur du bâtiment	8.1
Couverture non-vitrée	85 %

Tableau 7 - Hypothèses géométriques retenues pour les maisons unifamiliales (à gauche) et pour les immeubles (à droite). Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

Hypothèses relatives au calcul du volume de matériau

Une fois les surfaces à isoler connues, Valbiom les convertit en volumes de matériau. Cette conversion revient à multiplier chaque surface par une épaisseur d'isolant, ce qui suppose de déterminer au préalable l'épaisseur nécessaire pour chaque matériau, puis de répartir les bâtiments entre les différents systèmes de rénovation.

L'épaisseur dépend de deux éléments. D'une part, la performance thermique à atteindre, fixée par le R cible, valeur qui découle des résistances thermiques à atteindre pour prétendre aux primes de la Région wallonne. D'autre part, la conductivité thermique de chaque isolant, tirée des caractéristiques des matériaux réellement disponibles. L'épaisseur qui en résulte n'est donc pas une hypothèse : elle se déduit directement du R cible et du λ retenu. La simplification se situe ailleurs : chaque matériau se voit attribuer un seul λ, considéré comme fixe pour l'ensemble du parc, sans tenir compte des écarts entre produits, entre fabricants, ni des évolutions possibles de ces performances au fil du temps.

La répartition des systèmes constructifs de rénovation constitue, en revanche, une hypothèse à part entière. Les pourcentages attribués à chaque système ne reposent sur aucune donnée statistique établie à l'échelle régionale, ils sont posés de manière à disposer d'un cadre applicable uniformément à tout le parc.

Hypothèses relatives aux ressources et à la production

Contrairement aux étapes précédentes, l'estimation des ressources et de la production ne repose sur aucune hypothèse théorique. Valbiom a pris contact avec les producteurs d'isolants biosourcés actifs en Wallonie pour recueillir leurs volumes de production actuels ainsi que leur marge de progression à pleine capacité. Les données proviennent donc directement des acteurs industriels concernés, sans modélisation prospective de la disponibilité future des ressources.

4.4 Synthèse

Les sections précédentes ont reconstitué la démarche de Valbiom : une approche descendante qui part du parc résidentiel wallon, le traduit en surfaces d'enveloppe à isoler, puis en volumes d'isolants nécessaires à l'horizon 2050. Cette chaîne de calcul s'appuie donc sur des données statistiques pour caractériser le parc et sur un ensemble d'hypothèses (de cadrage, géométriques et techniques) pour combler les données manquantes ou simplifier le traitement.

Cette reconstitution n'avait pas pour but d'évaluer le modèle, mais de le comprendre. L'examen critique de ses choix méthodologiques, la distinction entre simplifications assumées et incohérences internes, ainsi que les pistes pour les dépasser, font l'objet de la section 6 de ce travail.

Avant d'y parvenir, il est utile de confronter le modèle de Valbiom à d'autres démarches existantes. La section suivante étudie ainsi plusieurs modèles comparables, dont l'analyse éclaire différemment certains des choix posés ici et fournira des éléments pour la construction d'un modèle amélioré.

5 Analyse comparative d'autres travaux existants

L'étude de Valbiom, détaillée précédemment, constitue le modèle de référence de ce travail. Elle n'est toutefois pas la seule à confronter les besoins de rénovation énergétique d'un parc résidentiel à la disponibilité des matériaux nécessaires pour les satisfaire. Cette section examine d'autres modèles qui abordent une question comparable, afin de situer la démarche de Valbiom parmi les approches existantes, d'en éclairer les choix méthodologiques et d'identifier ce qui peut en nourrir ou en nuancer les résultats.

Tous les travaux évoqués dans l'état de l'art ne se prêtent pas à un tel examen. Le critère de sélection retenu est double. Un document n'est développé ici que s'il entretient un lien direct avec l'étude de Valbiom, c'est-à-dire s'il traite d'une confrontation analogue entre besoins de rénovation et ressources, et s'il apporte, sur au moins un axe, quelque chose que Valbiom ne développe pas.

Quatre ensembles de travaux répondent à ce double critère et feront l'objet d'une sous-section qui leur est propre. L'étude de l'ADEME propose une modélisation prospective des besoins en matériaux pour la rénovation du parc résidentiel français aux horizons 2035 et 2050 (Léonardon *et al.*, 2019). La thèse de Gourovitch met en regard la production et les besoins en isolants biosourcés à plusieurs échelles territoriales et selon différents scénarios de rénovation et de production (Gourovitch, 2025). Le rapport de Delem *et al.* (2020) évalue l'impact environnemental des matériaux mobilisés par la rénovation et la construction neuve du parc flamand au moyen de l'outil TOTEM. Enfin, les travaux de Suray et de Palumbo estiment l'offre de matières premières à partir de la ressource agricole, respectivement wallonne et espagnole, et la confrontent aux besoins d'isolation (Suray, 2025 ; Palumbo *et al.*, 2015).

D'autres documents évoqués dans l'état de l'art ne sont pas développés ici, faute de satisfaire ce double critère. Plutôt que de les passer en revue un à un, il paraît plus clair d'exposer les trois motifs qui ont conduit à les écarter. Le premier tient à la redondance, plusieurs publications reprenant sous une forme condensée un volet d'un travail plus large déjà retenu ici, ce qui est notamment le cas des articles de Marceau Gourovitch dont les résultats sont développés dans sa thèse examinée plus loin (Gourovitch, 2024 ; Gourovitch *et al.*, 2024 ; Gourovitch *et al.*, 2025). Le deuxième tient à l'objet, la majeure partie des travaux recensés ne mettant pas en regard un besoin de rénovation et une ressource disponible. Certains modélisent les stocks et les flux de matériaux du parc bâti sans les rapporter à une capacité de production, d'autres établissent des

typologies du parc ou en simulent les consommations énergétiques, d'autres encore analysent le secteur industriel de l'isolation, comparent les propriétés des matériaux ou étudient les déterminants socio-économiques de la décision de rénover. Le troisième tient à l'échelle, plusieurs travaux abordant la question à un niveau trop général, continental ou mondial, pour se prêter à une comparaison détaillée avec un modèle régional, tandis que d'autres se situent à l'échelle du bâtiment ou du quartier. Ces travaux n'en éclairent pas moins la présente recherche et plusieurs seront mobilisés lors de la discussion des résultats.

Les points suivants développent les quatre ensembles retenus dans l'ordre suivant, à savoir l'étude de l'ADEME, la thèse de Gourovitch, le rapport de Delem, puis les travaux de Suray et de Palumbo.

5.1 L'étude prospective de l'ADEME

Objet et périmètre

L'étude conduite pour l'ADEME (Léonardon *et al.*, 2019) vise à estimer les quantités de matériaux nécessaires pour rénover l'ensemble du parc résidentiel français au niveau basse consommation à l'horizon 2050. Son périmètre est étroitement délimité. Seul le résidentiel antérieur à 2012 est considéré, seuls les travaux à caractère énergétique sont retenus, et la cible est le niveau BBC rénovation de la règlementation thermique existante, soit environ 80 kWh/m²/an en zone climatique H2b. Chaque bâtiment n'est par ailleurs rénové qu'une seule fois d'ici 2050. Un point est déterminant pour cerner la portée de l'étude, seuls les matériaux d'enveloppe sont quantifiés, même si la rénovation des équipements est prise en compte pour atteindre le niveau de performance visé. À la différence de l'étude de Valbiom, l'ADEME ne confronte pas cette demande à une ressource ou à une production disponible. Elle estime uniquement la demande en matériaux et les déchets qu'engendre la rénovation. C'est précisément la finesse de ce volet de demande qui justifie de développer l'étude ici, et non une proximité avec la logique de confrontation.

Segmentation du parc en typologies

Le parc est d'abord séparé en maisons individuelles et en logements collectifs, puis découpé en typologies selon l'année de construction, le système constructif et le mode de chauffage. Cette segmentation s'appuie sur des travaux existants, notamment le programme PACTE, le projet européen TABULA, Renovact, l'APUR et le guide ABC. Sept typologies principales de maisons individuelles sont retenues, complétées par des variantes qui traduisent les écarts de géométrie

et d'énergie de chauffage, une typologie 2000-2011 étant ajoutée à partir de TABULA et deux typologies trop rares étant écartées. À chaque typologie correspond un cas type qui sert de support aux calculs. Cette segmentation typologique fine est aussi celle que reprend la thèse de Gourovitch, ce qui relie les deux documents.

De l'objectif énergétique aux travaux

Chaque typologie est modélisée dans son état actuel, puis des simulations sont menées à l'aide du moteur réglementaire RTex afin de déterminer, indépendamment des matériaux, les bouquets de travaux et les niveaux de performance à atteindre par poste pour parvenir au niveau BBC. Les quantités de matériaux sont ensuite déduites des métrés de chaque cas type. Le passage de l'objectif énergétique aux travaux repose donc sur une simulation réglementaire menée poste par poste, et non sur l'application directe de cibles de performance imposées. Cette étape de simulation constitue l'un des traits distinctifs de la démarche.

Les scénarios de rénovation

L'étude articule deux familles de scénarios. La première réunit deux scénarios techniques de nature qualitative, définis par des parts de marché par poste sur deux sous-périodes, 2018-2034 puis 2035-2049. Le premier est tendanciel, fondé sur les solutions et les matériaux actuels, avec une part d'isolation par l'extérieur qui progresse. Le second est innovant, marqué par une rénovation industrialisée par panneaux, le recours à des isolants sous vide et à des aérogels, et une utilisation accrue des matériaux biosourcés. La seconde famille réunit trois scénarios quantitatifs de volume de rénovation, un scénario de continuité, un scénario volontariste et un scénario politique, qui conduisent respectivement à 45 %, 75 % et 100 % des bâtiments antérieurs à 1975 rénovés en 2050. Le découpage en deux sous-périodes distinctes permet en outre de faire évoluer les hypothèses techniques au fil du temps plutôt que de les figer sur l'ensemble de la période d'étude.

Consommation de matériaux et production de déchets

Les résultats livrent les volumes et les masses d'isolants nécessaires, de l'ordre de plusieurs millions de tonnes selon les scénarios pour les seules maisons individuelles. La laine de verre est l'isolant le plus consommé dans tous les cas, en volume comme en masse, suivie en masse par la ouate de cellulose puis par la laine de bois. L'étude fournit également une consommation moyenne rapportée à la surface, de l'ordre de 213 dm^3 d'isolant par mètre carré pour une maison individuelle dans le scénario tendanciel. Au total, 21 matériaux sont étudiés, isolants et autres

produits confondus. L'étude quantifie enfin les déchets générés par la rénovation, en distinguant les déchets de dépose des matériaux existants et les chutes de mise en œuvre, au moyen de taux de chutes appliqués à chaque produit. Cette quantification couvre à ce titre les isolants, mais aussi les menuiseries déposées, les volets, les portes et les couvertures.

Positionnement par rapport à Valbiom

La démarche de l'ADEME repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices assumées, à savoir la limitation aux seuls matériaux d'enveloppe, l'hypothèse d'une rénovation unique par bâtiment d'ici 2050 et le recours à une zone climatique moyenne unique. L'axe que l'étude développe et que le modèle de Valbiom n'aborde pas tient à la finesse de son volet de demande, par sa segmentation typologique détaillée, par la détermination des travaux au moyen d'une simulation réglementaire, par l'articulation de deux familles de scénarios et par la quantification des déchets. L'ADEME complète ainsi le modèle de Valbiom sur l'estimation de la demande, sans en reproduire la confrontation entre besoins et ressources.

5.2 La thèse de Gourovitch

Cadre général et posture

La thèse de Gourovitch (2025) porte sur les possibilités d'usage des matériaux isolants biosourcés locaux pour la réhabilitation du parc de logements français à l'horizon 2050. Elle se construit autour d'une notion structurante, la résilience, entendue comme la capacité des matériaux à tenir face à trois tensions futures, à savoir le changement climatique, l'approvisionnement énergétique et la disponibilité des ressources. Le raisonnement procède du général au particulier, du national au régional puis au bâtiment. Cette posture multiscalaire est revendiquée par l'auteur comme le trait méthodologique central du travail et commande l'architecture de l'ensemble du document.

Le classement multicritère des matériaux

Le premier volet établit un classement des isolants selon leur résilience. L'auteur écarte les classements usuels fondés sur les seuls critères du carbone et de l'énergie grise et retient cinq indicateurs tirés des fiches de déclaration environnementale et sanitaire vérifiées de la base INIES, à savoir le changement climatique, la consommation de ressources fossiles, l'énergie primaire non renouvelable, la distance de transport et l'épuisement des ressources abiotiques en éléments. Les résultats sont rapportés à une unité fonctionnelle normalisée, un mètre carré

de paroi isolée à une résistance thermique de 5 m².K/W. Onze isolants sont classés, biosourcés et conventionnels confondus, et la paille obtient le meilleur score global devant la ouate de cellulose. La sélection des seuls matériaux disposant de FDES vérifiées sur INIES est présentée comme une garantie de maturité industrielle et d'assurabilité, le périmètre étant restreint aux matériaux couramment produits en France comptant au moins cinq FDES issues d'au moins deux fabricants.

L'estimation de la production nationale

Pour la quantification, l'analyse se restreint à quatre biosourcés : la ouate de cellulose, la paille, le chanvre et la fibre de bois. L'estimation de la production part de données agricoles issues notamment d'Agreste, de l'ONRB, d'Interchanvre et de la FAO, puis applique des coefficients d'usage afin de ne retenir que les volumes réellement disponibles pour le bâtiment, en déduisant par exemple la litière et le paillage pour la paille et en appliquant une clé de répartition pour la part destinée au bâtiment. La thèse décline ensuite trois scénarios prospectifs de production à l'horizon 2050, à savoir le maintien de la production actuelle, une diminution liée à la baisse des rendements agricoles et une augmentation liée à une politique publique favorisant la valorisation des coproduits agricoles et forestiers.

L'estimation du besoin national

Le besoin est estimé à partir d'une segmentation typologique du parc reprise de l'étude de l'ADEME, chaque typologie se voyant affecter des matériaux selon la paroi et selon la position de l'isolant, avec un partage entre isolation par l'intérieur et isolation par l'extérieur. La thèse décline ensuite quatre scénarios de besoin. Le scénario B1, dit « SNBC », vise la rénovation exhaustive du parc au niveau basse consommation. Le scénario B2, dit « Pareto », cible les logements les plus déperditifs selon une logique où une minorité de logements concentre l'essentiel des gains. Le scénario B3, dit « *business as usual* », prolonge le rythme réel observé et fait apparaître que les toitures sont aujourd'hui davantage rénovées que les murs pour des raisons de faisabilité et de coût. Le scénario B4, dit « réflexion inversée », part des volumes de matériaux disponibles et en déduit le nombre de gestes techniques réalisables, dans une logique pilotée par l'offre.

La confrontation et les échelles territoriales

La thèse confronte ensuite l'offre et le besoin, matériau par matériau et scénario par scénario. Il en ressort que la production actuelle suffit dans la plupart des cas à condition d'accepter des substitutions entre matériaux, la paille et la fibre de bois rigide étant largement disponibles, tandis que la ouate et le chanvre deviennent insuffisants dans le scénario le plus ambitieux. L'analyse descend ensuite à l'échelle des régions françaises, où l'auteur introduit la notion de souveraineté régionale en matériaux et identifie plusieurs régions déjà potentiellement autonomes, sous l'hypothèse qu'aucun échange interrégional n'a lieu et que chaque région ne mobilise que ses propres ressources. Un cas d'étude à l'échelle du bâtiment teste enfin, en conditions réelles, la faisabilité technique et environnementale d'une réhabilitation atteignant le niveau visé au moyen de matériaux biosourcés locaux.

Positionnement par rapport à Valbiom

La thèse énonce clairement ses propres limites. Elle se restreint aux matériaux facilement assurables et écarte de ce fait une famille de coproduits qu'elle nomme les matériaux oubliés, dont la paille de colza, les anas de lin, la moelle de tournesol, le miscanthus ou les balles de riz. Elle se limite au résidentiel et aux seuls isolants, exclut explicitement les planchers bas du champ des biosourcés, adopte une modélisation statique à l'horizon 2050 et n'aborde pas la fin de vie des matériaux. Par rapport au modèle de Valbiom, la thèse développe plusieurs axes que celui-ci n'aborde pas, à savoir un classement environnemental multicritère des isolants adossé à une base de données vérifiée, une variation de la production selon plusieurs scénarios prospectifs, une pluralité de logiques de besoin dont une logique pilotée par l'offre, et une lecture régionale de l'adéquation entre production et besoin. La thèse partage en revanche avec Valbiom la confrontation d'un besoin de rénovation à une ressource, qu'elle enrichit de ces différents apports.

5.3 Le rapport de Delem

Objet et positionnement

Le rapport de Delem *et al.* (2020), publié par l'OVAM et réalisé par le laboratoire Performance environnementale de Buildwise, évalue l'impact environnemental des matériaux mobilisés pour la rénovation et la construction neuve de logements dans le cadre du plan climat flamand. Son point de départ réglementaire est l'objectif de réduction de 35 % des émissions de CO_2 liées à l'énergie opérationnelle des bâtiments à l'horizon 2030 par rapport à 2005. La question posée

n'est pas celle de la disponibilité d'une ressource, mais celle d'un arbitrage. Les auteurs cherchent à mettre en balance, d'une part, les émissions de CO_2 évitées grâce à la rénovation énergétique et, d'autre part, l'impact généré par les matériaux ajoutés sur l'ensemble de leur cycle de vie, production, mise en œuvre et fin de vie comprises. L'objectif affiché est d'éviter le transfert de charge, c'est-à-dire de vérifier que le gain sur l'énergie opérationnelle ne soit pas annulé par un surcoût environnemental lié aux matériaux, autrement dit à leur énergie grise. Cet arbitrage entre énergie grise des matériaux et énergie opérationnelle constitue le cœur du rapport.

Méthodologie d'évaluation environnementale

L'évaluation repose sur l'analyse de cycle de vie et mobilise deux indicateurs. Le premier est le potentiel de réchauffement climatique exprimé en kilogrammes de CO_2 équivalent. Le second est un score environnemental global monétisé exprimé en euros, qui regroupe 17 catégories d'impact au moyen de facteurs de monétisation. Les calculs suivent la méthodologie MMG, qui fonde également l'outil TOTEM. La période d'étude de référence retenue est de 30 ans, de 2020 à 2050, afin de coller à l'horizon politique flamand, et l'analyse considère la production, le transport, la mise en œuvre, les remplacements, l'énergie opérationnelle et la fin de vie. Pour les cas de rénovation, seuls les matériaux nouvellement ajoutés sont évalués, l'impact des matériaux existants ou démolis étant rattaché au cycle de vie antérieur du bâtiment.

L'étude s'appuie sur quatre bâtiments de référence issus des études VEA sur les niveaux coût-optimaux. Trois sont des cas de rénovation, une maison mitoyenne de 1920, un immeuble à appartements de 1970 et une maison quatre façades de 1985, et un cas de construction neuve, une maison trois façades supposée bâtie en 2020. Pour chaque cas, des scénarios sont définis en croisant un niveau d'ambition, un niveau minimal correspondant à environ trois mesures, un niveau E60 et un niveau E30, et un rythme de rénovation.

Mise à l'échelle du parc bâti

Les résultats obtenus sur les cas de référence sont ensuite extrapolés au parc résidentiel flamand. L'extrapolation s'appuie sur les statistiques de Statbel, soit 2 673 410 bâtiments en Flandre en 2018, dont 2 257 019 logements répartis par typologie. L'impact de chaque bâtiment de référence est multiplié par le nombre de logements de sa typologie. Faute de cas dédié, l'impact de la maison trois façades est fixé à la moyenne de celui de la maison mitoyenne et de la maison quatre façades. Deux vitesses de rénovation sont retenues : 1 % par an en scénario tendanciel et 3 % en scénario accéléré. Cinq scénarios combinant le niveau d'ambition et le rythme sont ainsi

simulés, du scénario minimal à 1 % jusqu'au scénario E30 à 3 %, chacun reposant sur un gabarit qui croise l'ambition et le rythme. L'étude intègre par ailleurs un besoin démographique de 20 000 logements neufs supplémentaires par an.

Enseignements sur le compromis matériaux et énergie

Pour les cas de rénovation, l'impact des matériaux demeure faible au regard de l'impact de l'énergie opérationnelle, si bien que la rénovation énergétique produit des gains nets. Le rapport souligne toutefois que ce compromis s'inverse en construction neuve, où le CO_2 incorporé des matériaux devient égal ou supérieur aux émissions liées à l'énergie opérationnelle sur 30 ans, et où cette prépondérance est encore plus marquée sur le score monétisé que sur le seul CO_2. Ce résultat établit que l'impact incorporé des matériaux pèse d'autant plus lourd que le bâtiment est performant sur le plan énergétique. À l'échelle du parc, l'étude montre enfin que la seule prise en compte des nouveaux logements suffit à annuler, pour le score monétisé, les gains permis par la rénovation à faible rythme, les matériaux et installations de ces logements représentant un impact de l'ordre de 740 millions d'euros par an. L'étude en conclut que le score environnemental global monétisé devient déterminant dans la construction neuve.

Positionnement par rapport à Valbiom

Le rapport de Delem occupe une place particulière parmi les documents retenus, car il ne procède pas à une confrontation entre une demande et une ressource disponible. Son objet est l'impact environnemental, et son lien avec l'étude de Valbiom est complémentaire plutôt que parallèle. Ce lien tient d'abord à une logique structurelle analogue : des cas de référence extrapolés au parc, un horizon 2050 et des scénarios croisant niveau d'ambition et rythme de rénovation. Il tient surtout aux deux axes que le rapport développe et que le modèle de Valbiom n'aborde pas, d'une part l'évaluation de l'impact environnemental des matériaux par la méthodologie MMG qui fonde TOTEM, et d'autre part la mise en balance de l'énergie grise des matériaux et de l'énergie opérationnelle. Ces apports reposent sur des hypothèses simplificatrices qu'il convient de noter, le périmètre flamand, un choix de matériaux fixé en amont, une période de référence de 30 ans et un niveau d'incertitude que les auteurs reconnaissent eux-mêmes du fait des quatre seuls bâtiments de référence. Delem complète ainsi le modèle de Valbiom sur le volet de l'impact environnemental et de l'extrapolation au parc, plutôt qu'il n'en reproduit la confrontation entre besoins et ressources.

5.4 Les travaux de Suray et Palumbo

Le travail de Suray

Le travail de fin d'études de Suray (2025) évalue le potentiel d'isolation biosourcée du parc de logements wallon à partir des ressources agricoles régionales, à l'horizon 2050. Sa structure suit un enchaînement proche de celui de l'étude de Valbiom, une analyse du parc wallon par typologie, une évaluation des besoins d'isolation limitée aux toitures et aux murs, un inventaire des ressources agricoles wallonnes, un calcul du volume de matière et enfin une confrontation à la capacité de production régionale. La partie enquête, adressée à des agriculteurs, a été construite avec l'appui de Valbiom.

La méthode d'estimation de l'offre constitue le point saillant de ce travail. Plutôt que de partir de la production des fabricants, l'autrice part des surfaces cultivées en Wallonie, auxquelles elle applique un rendement par culture puis une masse volumique par matériau. L'inventaire recense ainsi une superficie agricole utilisée de 734 309 hectares, dont 254 161 hectares de céréales, le froment d'hiver étant la culture la plus répandue avec 111 712 hectares, aux côtés du lin, du chanvre, du miscanthus, du colza et des prairies. En croisant ces surfaces avec les rendements, par exemple 8 890 kg par hectare pour le froment d'hiver, et avec la masse volumique propre à chaque conditionnement, l'étude aboutit à une capacité totale de production de l'ordre de 87,98 millions de mètres cubes par an. L'autrice relativise aussitôt ce chiffre, puisqu'il correspond à l'ensemble des surfaces et intègre tous les usages, alimentaire, textile, litière et énergie, et non la seule fraction que l'on pourrait consacrer à l'isolation. Elle en déduit que cette capacité constitue un plafond théorique et construit alors des scénarios d'attribution d'une fraction seulement des terres, concluant qu'une réaffectation de l'ordre de 2 % des surfaces suffirait à couvrir les besoins.

Le travail de Palumbo

L'article de Palumbo *et al.* (2015) évalue la disponibilité des coproduits de cultures en Espagne comme matière première pour des isolants naturels, puis la confronte à une estimation de la demande. Sa structure est parallèle à celle de l'étude de Valbiom, une estimation de l'offre confrontée à une estimation du besoin, et sa conclusion est celle d'une suffisance, moins de 17 % des coproduits disponibles suffiraient à couvrir la demande de matériaux d'isolation du bâtiment, les seuls coproduits de maïs suffisant à isoler entre 250 000 et 450 000 logements par an.

Au-delà de ce résultat, l'article apporte deux éléments de méthode. Le premier est une conversion du volume d'isolant en masse de matière première, qui part du volume nécessaire et de la masse volumique de l'isolant, retranche la part de liants et additifs et ajoute une part de pertes en transport et en production. Le second, et c'est le plus important, est un cadre qui distingue les coproduits totaux et les coproduits réellement disponibles, ces derniers s'obtenant en retranchant des premiers la fraction destinée à d'autres usages et la fraction réincorporée au sol pour en maintenir la fertilité. Ce cadre formalise le passage d'un gisement brut à un gisement réellement mobilisable au moyen de taux d'extraction sourcés.

Positionnement par rapport à Valbiom

Ces deux travaux se rattachent à l'étude de Valbiom par leur objet, la confrontation d'un besoin de rénovation à une ressource. L'axe qu'ils développent et que Valbiom n'aborde pas tient à la manière d'estimer l'offre. Valbiom mesure la ressource au niveau de la production des fabricants, tandis que Suray et Palumbo la mesurent au niveau de la ressource agricole, en amont de sa transformation. Les deux approches ne mesurent donc pas la même chose, l'une la sortie industrielle disponible, l'autre le potentiel de la matière première au champ. Suray et Palumbo se distinguent par ailleurs l'un de l'autre sur un point que leur rapprochement met en lumière. La capacité calculée par Suray demeure un plafond théorique, faute de déduire systématiquement les usages concurrents et la restitution au sol, alors que Palumbo fournit précisément le cadre qui manque pour ramener ce plafond à un gisement réaliste. Ces travaux complètent ainsi le modèle de Valbiom sur l'estimation de l'offre à partir du gisement agricole, l'un à l'échelle wallonne, l'autre par la rigueur de son cadre de disponibilité.

5.5 Synthèse

Les quatre ensembles de travaux examinés dans cette section éclairent, chacun sous un angle propre, la démarche de l'étude de Valbiom.

L'étude de l'ADEME en affine le volet de demande, par une segmentation typologique détaillée du parc résidentiel, par la détermination des travaux au moyen d'une simulation réglementaire conduite pour chaque cas type, et par une double structuration en scénarios, les uns qualitatifs et définis par les parts de marché des solutions techniques, les autres quantitatifs et portant sur le volume de bâtiments rénovés, tous répartis en deux sous-périodes successives. Elle quantifie en outre les déchets générés par la rénovation, en distinguant les chutes de mise en œuvre des matériaux déposés. La thèse de Gourovitch prolonge cette segmentation typologique et lui

adjoint plusieurs axes que Valbiom n'aborde pas, à savoir une affectation des matériaux par paroi et par époque assortie d'un partage entre isolation par l'intérieur et par l'extérieur, un classement environnemental multicritère des isolants adossé à une base de données vérifiée, une production que l'on fait varier selon des scénarios prospectifs, une pluralité de logiques de besoin et une lecture régionale de l'adéquation entre offre et besoin, complétée par un cas d'étude à l'échelle du bâtiment.

Le rapport de Delem déplace la question vers l'impact environnemental des matériaux, évalué sur l'ensemble de leur cycle de vie au moyen de la méthodologie qui fonde l'outil TOTEM, met en balance l'énergie grise des matériaux et l'énergie opérationnelle, et extrapole des bâtiments de référence à l'ensemble du parc selon une matrice croisant le niveau d'ambition et le rythme de rénovation. Les travaux de Suray et de Palumbo, enfin, estiment l'offre à partir du gisement agricole plutôt qu'à partir de la production des fabricants, et Palumbo fournit le cadre qui permet de ramener un plafond théorique à un gisement réellement mobilisable, ainsi qu'une formule de conversion d'un volume d'isolant en masse de matière première.

Deux enseignements transversaux se dégagent de ce panorama. Le premier tient à la manière de mesurer l'offre. Selon que l'on se place au niveau de la ressource agricole ou au niveau de la sortie industrielle des fabricants, l'ordre de grandeur de la ressource disponible change radicalement, ce qui invite à préciser à quel maillon de la filière se situe réellement la contrainte. Le second tient à la nature de ce que l'on cherche à optimiser. Plusieurs de ces travaux montrent qu'un objectif de performance énergétique ne suffit pas à garantir la meilleure performance environnementale, et que l'impact incorporé des matériaux mérite d'être considéré pour lui-même.

Ce parcours a permis de situer l'étude de Valbiom parmi les approches existantes et d'identifier, pour chacune, ce qu'elle développe et que Valbiom n'aborde pas. Il reste à confronter ces apports au modèle de référence lui-même. La section suivante rassemble à cette fin les limites de l'étude de référence, celles que l'analyse détaillée de sa méthodologie a mises au jour dans la section 4 et celles que la comparaison avec les autres travaux fait apparaître dans la présente section, afin d'en dégager les pistes d'amélioration et de préciser lesquelles seront retenues pour la construction du modèle.

6 Identification des limites et des pistes d'amélioration

La reconstitution du modèle de référence et l'analyse comparative qui précèdent ont produit deux matières distinctes. La première tient à l'examen du modèle lui-même, dont la chaîne de calcul et les hypothèses révèlent des faiblesses de deux ordres. La seconde tient aux travaux comparables, dont chacun développe un aspect que l'étude de Valbiom n'aborde pas. La présente section rassemble ces deux apports afin d'en dégager les pistes d'amélioration, puis de préciser lesquelles seront effectivement mobilisées pour la construction du modèle amélioré et lesquelles ne le seront pas.

Une distinction préalable s'impose au sein des limites relevées dans le modèle de référence. Certaines relèvent de simplifications assumées, qui allègent le traitement ou comblent une donnée manquante au prix d'une perte de finesse, et qu'un modèle plus détaillé peut dépasser. D'autres relèvent d'incohérences internes, c'est-à-dire d'écarts entre ce que la chaîne de calcul est censée produire et ce qu'elle produit effectivement. Ces dernières ne se corrigent pas à proprement parler, puisqu'elles concernent une étude publiée, mais elles justifient à elles seules la reconstruction d'un nouveau modèle de calcul. Elles sont examinées en premier lieu, en raison de leur portée.

Chacune de ces deux matières fait l'objet d'un tableau récapitulatif. Le premier rassemble les limites constatées lors de l'analyse du modèle de référence, en précisant leur nature et la piste d'amélioration qu'elles appellent, et numérote chacune d'elles de L1 à L13. Le second rassemble les apports issus de l'analyse comparative en indiquant leur origine, et les numérote de A1 à A13. Ces tableaux se limitent à inventorier les limites et les apports, la décision de les retenir ou non relevant du texte qui suit. Les deux dernières parties de la section précisent en effet, en s'appuyant sur ces numéros, lesquels sont mobilisés pour la construction du modèle amélioré et lesquels ne le sont pas.

6.1 Les incohérences internes de la chaîne de calcul

Le report d'un effectif d'une paroi à l'autre

La section 4 a montré que Valbiom établit l'état initial de l'isolation selon deux méthodes distinctes, des taux différenciés par époque pour les murs et un taux unique de 52 % pour les toitures. Ces deux méthodes produisent logiquement deux effectifs différents de bâtiments à isoler. Or, l'examen du fichier de calcul révèle que l'effectif retenu pour établir les surfaces de toiture n'est pas celui qui découle du taux propre aux toitures, mais celui qui a été calculé pour les murs. Le taux de 52 %, pourtant déterminé et documenté, ne produit donc aucun effet sur le résultat, et les surfaces de toiture sont établies sur une base qui ne leur correspond pas.

L'absence de taux d'isolation pour les sols

Ce même effectif, établi pour les murs, est utilisé une troisième fois pour calculer les surfaces de sols. Aucun taux d'isolation propre aux planchers bas n'a pourtant été défini en amont, alors que l'état initial de cette paroi diffère sensiblement de celui des murs. Les surfaces de sols reposent ainsi sur une hypothèse implicite qui n'est pas énoncée, à savoir que la proportion de planchers déjà isolés serait identique à celle des murs.

L'application d'un coefficient de répartition à une paroi qui n'en comporte pas

La troisième incohérence est la plus lourde de conséquences sur le résultat global. Comme l'a exposé la section 4, Valbiom distingue deux configurations de toiture, l'isolation des versants et celle du plancher des combles, et répartit à cette fin les bâtiments en deux groupes égaux. Ce partage justifie de n'appliquer chaque configuration qu'à la moitié de l'effectif, tant pour les toitures que pour les murs pignons dont la hauteur en dépend. Les sols, en revanche, ne connaissent qu'une seule configuration d'isolation. C'est donc la totalité de l'effectif qui aurait dû être retenue à cette étape, et non la moitié. Le coefficient de 50 % leur est pourtant appliqué, ce qui divise par deux les surfaces de planchers à isoler et, par voie de conséquence, les volumes d'isolants correspondants.

La reproductibilité des résultats publiés

À ces trois écarts s'ajoute un constat d'ensemble. Les surfaces à isoler qui figurent dans l'article publié ne correspondent pas à celles que produit la chaîne de calcul encore présente dans le fichier. Tout indique que ces surfaces ont été recalculées à partir de données modifiées en cours d'étude, sans que la chaîne correspondante ait été conservée, de sorte que le fichier transmis

repose sur une base de calcul antérieure, abandonnée. Ce constat n'invalide pas les ordres de grandeur avancés par l'étude, mais il empêche d'en vérifier la construction et ne permet donc pas d'en évaluer les hypothèses.

Ces quatre constats convergent vers une même exigence pour le modèle amélioré, à savoir une chaîne de calcul dont chaque valeur découle d'une formule explicite, dont chaque paroi dispose de ses propres paramètres, et dont chaque hypothèse demeure documentée et modifiable.

6.2 Les simplifications assumées

La représentation du parc bâti

Le parc est traité comme un ensemble statique, dont l'effectif demeure constant jusqu'en 2050, sans démolition, reconstruction, extension, ni changement d'usage. Ces dynamiques modifient pourtant les besoins matériels sur une période de 30 ans. Le parc est en outre traité à un niveau très global, les surfaces d'enveloppe étant déduites de valeurs moyennes par typologie et de ratios géométriques fixés par défaut, faute de statistiques disponibles à ce niveau de détail. Or ces ratios conditionnent directement l'ensemble des surfaces de murs calculées. Ce traitement global pèse particulièrement sur les immeubles à appartements, dont le rapport entre surface de murs et surface habitable diffère fortement de celui des maisons unifamiliales, et qui ne représentent que 53 835 unités sur un parc d'environ 1 371 488 bâtiments.

L'état initial de l'isolation

Les taux d'isolation retenus ne procèdent pas d'une enquête menée à l'échelle régionale pour les besoins de l'étude, mais d'une lecture de données existantes. L'application aux toitures d'un taux unique, indépendant de l'époque de construction, introduit une asymétrie de traitement avec les murs, pour lesquels des taux différenciés sont pourtant mobilisés. Cette uniformisation est difficilement défendable, un bâtiment postérieur à 2000 présentant nécessairement un état d'isolation différent de celui d'une construction antérieure à 1945. Elle conduit à sous-estimer les besoins du bâti ancien et à les surestimer pour le bâti récent. Par ailleurs, les bâtiments considérés comme isolés sont intégralement exclus des besoins futurs, sans que la performance de l'isolation en place soit évaluée. Une isolation ancienne, insuffisante au regard des exigences actuelles, appelle pourtant une mise à niveau que le modèle ne prend pas en compte.

La définition de l'objectif de rénovation

Les résistances thermiques cibles retenues procèdent du barème des primes régionales en vigueur au moment de l'étude, ce qui ancre le calcul dans un cadre existant, mais en fait dépendre l'objectif technique d'un dispositif de subvention. Ces valeurs sont en outre supposées constantes jusqu'en 2050, alors que la directive 2024/1275/UE et l'évolution vers des bâtiments à émissions nulles laissent présager un renforcement des exigences, lequel impliquerait des épaisseurs et donc des volumes supérieurs. Une même cible est enfin appliquée à l'ensemble du parc, sans considération pour les contraintes constructives ou patrimoniales propres à chaque typologie. Un bâtiment ancien à valeur patrimoniale et une construction récente se voient ainsi assigner le même objectif, alors que ni leur état initial ni leur potentiel d'intervention ne sont comparables. L'étude repose par ailleurs sur une configuration unique visant un état final, sans trajectoire ni rythme annuel. Elle ne permet donc pas de comparer des scénarios de rénovation contrastés ni d'évaluer la faisabilité industrielle d'un tel programme dans le temps.

Le traitement des matériaux

Chaque matériau se voit attribuer une conductivité thermique unique, valable pour l'ensemble du parc et pour toutes les parois, alors que les produits peuvent présenter des différences selon leur destination et selon les fabricants. L'épaisseur qui en découle est de ce fait identique pour toutes les situations constructives. Le modèle ne répartit par ailleurs pas les matériaux entre les parois, de sorte qu'il ne dit pas quel isolant est mobilisé et à quel endroit. Quant à la répartition entre les systèmes de rénovation, les données d'échantillon dont dispose le fichier ne sont pas exploitées au profit de pourcentages posés, appliqués uniformément à tout le parc, si bien que cette distinction demeure sans effet sur les volumes obtenus.

La confrontation finale entre les besoins et la production demeure par ailleurs globale. Les volumes requis sont comparés à une production totale, sans distinguer la situation de chaque filière, ce qui peut masquer qu'un matériau se trouve en net déficit quand un autre est excédentaire. Le tableau 8 récapitule l'ensemble de ces limites, incohérences internes et simplifications confondues, et associe à chacune la piste d'amélioration qu'elle appelle.

N°	Limite constatée	Nature	Piste d'amélioration
L1	Effectif des surfaces de toiture emprunté au calcul des murs, taux propre aux toitures sans effet	I	Attribution à chaque paroi de son propre effectif de bâtiments à isoler
L2	Surfaces de sols établies sans taux d'isolation propre aux planchers	I	Définition d'un taux d'isolation existant propre aux planchers
L3	Coefficient de 50 % appliqué aux sols malgré leur configuration unique, surfaces divisées par deux	I	Prise en compte de la totalité de l'effectif pour les sols
L4	Surfaces publiées non reproductibles, chaîne conservée fondée sur une base antérieure abandonnée	I	Reconstruction d'une chaîne de calcul traçable, chaque valeur issue d'une formule explicite
L5	Parc supposé statique jusqu'en 2050, sans démolition, reconstruction ni changement d'usage	S	Intégration de la dynamique du parc, démolitions, reconstructions et changements d'usage
L6	Surfaces d'enveloppe déduites de valeurs moyennes et de ratios géométriques posés par défaut	S	Segmentation du parc en typologies détaillées, dotées de leurs surfaces déperditives propres
L7	Taux d'isolation des toitures appliqué uniformément, sans distinction d'époque	S	Différenciation des taux d'isolation existants par époque et par paroi, avec pondération
L8	Bâtiments réputés isolés exclus sans évaluation de la performance de l'isolation en place	S	Conditionnement de l'épaisseur à l'isolant en place et appréciation de la performance existante
L9	Cible de performance unique pour tout le parc, calquée sur le barème des primes et figée jusqu'en 2050	S	Différenciation des cibles par typologie et sélectionnables par scénario
L10	État final visé, sans trajectoire ni rythme de rénovation	S	Déclinaison en scénarios et calendrier de rénovation échelonné jusqu'en 2050
L11	Conductivité thermique unique par matériau, pour toutes les parois	S	Différenciation des conductivités selon la paroi et le matériau
L12	Matériaux non répartis entre les parois, répartition des systèmes de rénovation sans effet	S	Répartition des matériaux par paroi et par famille, partage intérieur-extérieur opérant
L13	Confrontation entre besoins et production menée globalement	S	Confrontation conduite matériau par matériau

Tableau 8 - Limites du modèle de référence, selon leur nature (I pour incohérence, S pour simplification), et pistes d'amélioration correspondantes. Réalisation personnelle.

6.3 Les apports issus de l'analyse comparative

Les limites qui précèdent, qu'il s'agisse des incohérences de la chaîne de calcul ou des simplifications assumées, appellent des réponses méthodologiques. Or plusieurs d'entre elles se trouvent précisément dans les travaux examinés à la section précédente, qui abordent chacun un aspect que l'étude de Valbiom ne développe pas. Ces apports se regroupent en six thèmes.

Le premier concerne la finesse de la caractérisation du parc. L'étude de l'ADEME segmente le parc résidentiel en typologies croisant l'année de construction, le système constructif et le mode de chauffage, et associe à chacune un cas type dont les métrés fournissent les quantités de matériaux. Cette segmentation constitue le socle que reprend également la thèse de Gourovitch.

Le deuxième concerne la répartition des matériaux. La thèse de Gourovitch affecte à chaque typologie et à chaque paroi un matériau et une position d'isolant, en distinguant l'isolation par l'intérieur de l'isolation par l'extérieur selon les caractéristiques du bâti, et décrit les conditions de mise en œuvre propres à chaque produit.

Le troisième concerne l'estimation de l'offre. Le travail de Suray établit une capacité de production à partir des surfaces cultivées et des rendements agricoles wallons, tandis que le travail de Palumbo fournit le cadre permettant de ramener un plafond théorique à un gisement réellement disponible, par déduction des usages concurrents et de la part restituée aux sols, ainsi qu'une formule de conversion d'un volume d'isolant en masse de matière première tenant compte des liants et des pertes. La thèse de Gourovitch applique une logique voisine au moyen de coefficients d'usage.

Le quatrième concerne la scénarisation et la temporalité. L'étude de l'ADEME décline des scénarios de volume de rénovation répartis en deux sous-périodes, ce qui permet de faire évoluer les hypothèses au fil du temps. La thèse de Gourovitch décline quatre logiques de besoin et trois trajectoires de production, faisant ainsi varier l'offre autant que la demande. Le rapport de Delem croise pour sa part un niveau d'ambition et un rythme de rénovation.

Le cinquième concerne la dimension environnementale. Le rapport de Delem évalue l'impact des matériaux sur l'ensemble de leur cycle de vie selon la méthodologie qui fonde l'outil TOTEM, et met cet impact en balance avec l'énergie consommée en phase d'exploitation, en montrant que le poids relatif des matériaux croît à mesure que le bâtiment devient performant. La thèse de Gourovitch montre de son côté que le seul critère carbone ne suffit pas à hiérarchiser les isolants, et propose une méthode de classement fondée sur plusieurs indicateurs

environnementaux. L'étude de l'ADEME quantifie enfin les déchets de rénovation, en distinguant les chutes de mise en œuvre des matériaux déposés.

Le sixième et dernier concerne la robustesse des résultats. Aucun des travaux examinés ne conduit d'analyse de sensibilité ni ne documente systématiquement l'incertitude pesant sur ses variables. Ce constat, qui vaut également pour l'étude de Valbiom, désigne moins un apport à reprendre qu'une lacune commune à l'ensemble du corpus, et que le présent travail tente de combler. Le tableau 9 reprend ces apports et en indique l'origine.

N°	Apport	Origine
A1	Segmentation du parc en typologies croisant l'année de construction, le système constructif et le mode de chauffage	ADEME, reprise par Gourovitch
A2	Affectation des matériaux par paroi et par typologie, partage intérieur-extérieur et conditions de mise en œuvre	Gourovitch
A3	Estimation de la capacité de production à partir des surfaces cultivées et des rendements agricoles régionaux	Suray
A4	Passage d'un plafond théorique de ressource à un gisement réellement disponible, et conversion d'un volume d'isolant en masse de matière première	Palumbo, approche voisine chez Gourovitch
A5	Déclinaison en scénarios répartis en sous-périodes, faisant varier les besoins comme la production	ADEME, Gourovitch et Delem
A6	Évaluation de l'impact environnemental des matériaux sur le cycle de vie, mise en balance avec l'énergie d'exploitation	Delem
A7	Hiérarchisation des isolants sur plusieurs indicateurs environnementaux	Gourovitch
A8	Estimation des déchets de mise en œuvre par taux de chutes	ADEME
A9	Estimation des déchets de dépose des matériaux existants retirés	ADEME
A10	Approche multiscalaire et cas d'étude à l'échelle du bâtiment	Gourovitch
A11	Filtre de maturité fondé sur les déclarations environnementales vérifiées	Gourovitch
A12	Détermination des travaux par simulation thermique réglementaire	ADEME
A13	Extension de la quantification à l'ensemble des matériaux de construction	ADEME

Tableau 9 - Apports issus de l'analyse comparative et leur origine. Réalisation personnelle.

6.4 Les pistes retenues

Les pistes qui précèdent ne peuvent pas toutes être mobilisées. Trois critères ont guidé la sélection, à savoir la cohérence avec le périmètre de ce travail, centré sur les isolants biosourcés et recyclés produits en Wallonie, la disponibilité effective des données à l'échelle régionale, et la contribution réelle de chaque piste à la fiabilité ou à la portée du modèle.

Les incohérences L1 à L4 ne relèvent pas d'un choix, mais d'une correction nécessaire. Elles sont toutes traitées, chaque paroi recevant son propre effectif de bâtiments à isoler et ses propres paramètres, et la chaîne de calcul étant intégralement reconstruite de sorte que chaque valeur découle d'une formule explicite.

Les pistes retenues répondent ensuite aux faiblesses relevées dans la caractérisation du parc. Celui-ci est segmenté en typologies détaillées, dotées chacune de ses surfaces déperditives et de ses coefficients de transmission thermique propres (L6), ce qui substitue des données mesurées par typologie aux ratios géométriques posés par défaut et rend son traitement plus juste pour les catégories minoritaires. Cette segmentation reprend le principe mis en œuvre par l'étude de l'ADEME (A1), sans en reprendre les typologies, établies pour le parc français et donc inadaptées au contexte wallon. Les taux d'isolation existants sont par ailleurs différenciés par époque pour toutes les parois, ce qui met fin à l'asymétrie relevée entre murs et toitures (L7), et pondérés par le poids réel de chaque période dans le parc.

Les objectifs de performance deviennent différenciés par typologie et sélectionnables selon le scénario (L9), ce qui affranchit le modèle d'une cible unique adossée à un barème de primes. L'épaisseur à mettre en œuvre tient compte de l'isolant déjà en place, de sorte qu'une paroi déjà conforme ne génère aucun besoin (L8), et l'isolation des planchers est réintégrée avec ses paramètres propres.

Le traitement des matériaux est ensuite affiné. Les conductivités thermiques sont différenciées selon la paroi (L11), une règle de répartition attribue les matériaux à chaque paroi selon la famille de typologies, et la distinction entre isolation par l'intérieur et par l'extérieur devient opérante en fonction de l'époque de construction (L12). Cette répartition s'inspire de la méthode d'affectation développée dans la thèse de Gourovitch (A2). Des matériaux conventionnels sont en outre introduits, permettant de représenter une multitude de situations, par exemple plus réalistes plutôt qu'un scénario intégralement biosourcé.

Du côté de l'offre, la capacité des producteurs est distinguée selon qu'elle est actuelle ou potentielle, et complétée par une estimation de la ressource agricole régionale établie à partir des surfaces cultivées et des rendements, selon la démarche du travail de Suray (A3). Cette ressource est ramenée à un gisement réellement mobilisable par déduction des usages concurrents, au moyen du cadre proposé par Palumbo (A4). Cette double lecture répond directement au premier enseignement transversal dégagé de l'analyse comparative, à savoir que l'ordre de grandeur de l'offre dépend étroitement du maillon de la filière auquel on se place.

Le modèle est par ailleurs décliné en plusieurs scénarios de cibles et de volumes, et assorti d'un calendrier de rénovation échelonné jusqu'en 2050 (A5). Cet échelonnement répond à l'absence de trajectoire temporelle du modèle de référence, qui raisonnait sur un état final sans rythme annuel (L10), et s'accompagne d'une production elle-même susceptible d'évoluer dans le temps.

Aux corrections qui précèdent s'ajoutent deux enrichissements directement issus de l'analyse comparative. Le premier est un volet environnemental, fondé sur un nombre restreint d'indicateurs et rapporté à un seuil admissible ramené à l'échelle régionale, qui emprunte au rapport de Delem son évaluation sur le cycle de vie (A6) et à la thèse de Gourovitch sa hiérarchisation multicritère des isolants (A7). Le second est une estimation des déchets de mise en œuvre, reprise de la méthode de l'ADEME, dont seules les chutes de pose sont retenues (A8).

La confrontation entre besoins et production est enfin conduite matériau par matériau (L13), ce qui répond à son caractère global dans le modèle de référence. L'ensemble est accompagné d'une analyse de sensibilité croisant l'influence propre de chaque variable et l'incertitude réaliste qui l'affecte. Aucun des travaux examinés ne conduit une telle analyse, de sorte que cet ajout ne procède pas de l'analyse comparative, mais comble une lacune commune à l'ensemble du corpus. Chaque donnée y est rattachée à sa source avec une vérification de sa cohérence.

6.5 Les pistes écartées

Six pistes ont été écartées, pour des motifs distincts.

La prise en compte de la dynamique du parc, à savoir les démolitions, reconstructions et changements d'usage jusqu'en 2050 (L5), n'a pas été retenue. Sa modélisation supposerait des projections démographiques et immobilières qui constituent un champ d'études en soi, et son incidence demeure secondaire au regard des ordres de grandeur recherchés. Cette piste est renvoyée aux perspectives de recherche.

L'approche multiscalaire de la thèse de Gourovitch et le cas d'étude conduit à l'échelle du bâtiment (A10) n'ont pas non plus été retenus, le présent travail se situant à la seule échelle régionale. La question qu'ils soulèvent demeure néanmoins pertinente, puisqu'elle invite à s'interroger sur la part de la production wallonne qui demeure effectivement sur le territoire.

Le filtre appliqué par la même thèse, qui ne retient que les matériaux disposant de fiches de déclaration environnementale vérifiées (A11), n'a pas été repris. Il conduirait à écarter plusieurs filières wallonnes émergentes, alors que ce sont précisément ces filières que ce travail entend prendre en considération. Ce choix est assumé et sera rappelé lors de la discussion des résultats.

La détermination des travaux au moyen d'une simulation thermique réglementaire, telle que la pratique l'étude de l'ADEME (A12), n'a pas été retenue non plus. Les objectifs de performance mobilisés ici procèdent de valeurs cibles établies pour le parc wallon, ce qui évite le recours à un moteur de calcul propre à un cadre réglementaire étranger.

L'extension de la quantification à l'ensemble des matériaux de construction, également pratiquée par l'ADEME (A13), dépasse le cadre de ce travail, centré sur les isolants à mettre en œuvre.

Cette même étude quantifie enfin les déchets de dépose, à savoir les matériaux existants retirés lors de la rénovation (A9), un volet qui n'a pas été retenu, à la différence des chutes de pose. Là où ces dernières se déduisent directement des volumes d'isolants posés au moyen d'un taux de chutes, la quantification des matériaux déposés suppose d'inventorier au préalable la composition du parc existant, menuiseries, couvertures, portes et revêtements, au moyen de nombreuses hypothèses sur les surfaces, les densités et la répartition des matériaux par typologie et par époque. Cet inventaire du bâti existant constitue un travail à part entière, également distinct de la présente étude.

6.6 Synthèse

L'examen du modèle de référence a fait apparaître deux ordres de limites. Quatre incohérences internes affectent la chaîne de calcul et compromettent la reproductibilité des résultats publiés, tandis qu'un ensemble de simplifications en réduisent la finesse sans en fausser la logique d'ensemble. L'analyse comparative a fourni, sur la plupart de ces points, des réponses méthodologiques transposables, auxquelles s'ajoutent quelques enrichissements qui débordent le périmètre initial du modèle. Sur l'ensemble des limites et apports ainsi inventoriés, six ont été écartés, soit parce qu'ils supposaient un champ d'investigation propre, soit parce qu'ils procédaient d'un cadre territorial ou réglementaire étranger à celui de ce travail.

Cet examen conduit à une observation qui dépasse le cas du modèle de référence. La plupart des faiblesses relevées ne tiennent pas à des erreurs de raisonnement, mais au fait que les hypothèses ne sont ni explicitées ni vérifiables. Une valeur moyenne appliquée uniformément, une cible unique empruntée à un barème de primes ou un même nombre de bâtiments reporté d'une paroi à l'autre ne posent pas problème en tant que tels, ils le deviennent dès lors qu'ils demeurent implicites et figés, et que leur influence sur le résultat échappe à toute appréciation. L'amélioration recherchée ne consiste donc pas tant à ajouter de la complexité qu'à rendre chaque hypothèse visible et discutable, ce dont procèdent aussi bien la déclinaison en scénarios que l'analyse de sensibilité.

Deux acquis de l'analyse comparative orientent par ailleurs la construction qui suit. Le premier tient à ce que l'ordre de grandeur de l'offre dépende étroitement du maillon de la filière auquel on se place, ce qui justifie de mesurer la production à la fois au stade industriel et au stade de la ressource. Le second tient à ce que la performance environnementale d'une rénovation ne se confonde pas avec sa performance énergétique, ce qui justifie d'adjoindre au calcul des volumes une évaluation des impacts. La section suivante expose la manière dont ces choix ont été mis en œuvre.

7 Construction du modèle amélioré

7.1 Principes de construction et sources mobilisées

Le modèle amélioré ne procède pas d'une reconstruction indépendante, mais prolonge la méthodologie développée par Valbiom (Gillet, 2024), dont les sections précédentes ont établi la valeur et relevé les limites internes. Son objet reste identique, estimer les volumes d'isolant nécessaires à la rénovation énergétique du parc résidentiel unifamilial wallon à l'horizon 2050, puis les mettre en regard de ce que le territoire est en mesure de fournir. Le modèle de référence opérait déjà cette mise en regard, mais du seul côté de la production industrielle. Le modèle amélioré en étend la portée. Il confronte le besoin non plus à une offre, mais à deux, en ajoutant la ressource agricole à la capacité des producteurs, et il approfondit cette confrontation en y intégrant l'échelonnement de la rénovation dans le temps, l'impact environnemental des matériaux et une analyse de sensibilité, évaluant la robustesse des résultats. C'est de cet élargissement que procèdent ses enseignements.

Principes de construction

Le principe directeur est celui d'un besoin confronté à deux offres. Le besoin découle des typologies du parc, des objectifs thermiques visés et des matériaux retenus, et il est estimé par type de matériau. Il est ensuite mis en regard de deux offres de nature différente. La première est industrielle, elle correspond aux capacités de production des fabricants wallons. La seconde est agricole, elle équivaut au gisement que les cultures régionales sont susceptibles de mobiliser. Cette structure distingue deux contraintes que le modèle de référence tendait à confondre, la capacité à transformer une matière et la ressource à cultiver, et elle met en évidence, pour chaque matériau, laquelle des deux commande effectivement sa disponibilité.

Trois exigences ont présidé à la construction. La première tient au rattachement des données, chaque valeur renvoie à une source identifiée et aucune donnée n'est introduite sans y être associée. La deuxième tient au caractère réglable du modèle, qui ne se fige pas sur un scénario unique, mais se pilote par quelques paramètres : la proportion de rénovations mobilisant des isolants biosourcés, l'ambition thermique et le rythme de rénovation, afin de simuler des trajectoires contrastées. La troisième tient à la clarté de l'ensemble, le fichier ne comporte que quatre feuilles : les résultats, sous forme de synthèse, les paramètres, rassemblant toutes les entrées, les calculs, abritant la chaîne de calcul, et l'analyse de sensibilité. Les annexes en

donnent le détail, en reproduisant les répartitions des matériaux selon les parois, la feuille de résultats pour deux configurations distinctes et l'analyse de sensibilité.

Le présent chapitre s'attache à la logique et aux choix, et les illustre par les tableaux de paramètres qui les fondent, avant d'en réunir la chaîne complète dans une carte conceptuelle au terme de la section.

Sources mobilisées

Les sources se répartissent selon leur fonction dans le modèle. La caractérisation du parc s'appuie sur les typologies de l'étude COZEB 3 (Carbonelle *et al.*, 2023) et sur les statistiques cadastrales du parc de bâtiments (Statbel, 2025), complétées par les certificats de performance énergétique de l'Open Data Wallonie-Bruxelles (2026) pour la répartition des labels. Le calcul des volumes reprend les résistances thermiques cibles issues de COZEB 3 (Carbonelle *et al.*, 2023) et la logique de conversion en matière première de Palumbo *et al.* (2015). L'estimation de l'offre industrielle provient d'une enquête menée auprès des producteurs wallons dans le cadre du présent travail, à savoir IsoHemp, Gramitherm, PROMisc, Woolconcept, Lenoo, Isocell et Isoproc, à laquelle s'ajoute IsoFabric, dont la ligne de production est établie à Bruxelles. L'estimation de la ressource agricole mobilise les surfaces et les rendements établis par Suray (2025) ainsi que le cadre de disponibilité de Palumbo *et al.* (2015). L'échelonnement du calendrier s'appuie sur les échéances de labels fixées par le Gouvernement wallon (2025), croisées avec la répartition des certificats de performance énergétique de l'Open Data Wallonie-Bruxelles (2026). Le volet environnemental repose sur les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) et les déclarations environnementales de produit (EPD) propres à chaque matériau, issues de la base de données INIES (s. d.), complétées par l'outil TOTEM (s. d.) pour le miscanthus, ainsi que sur les seuils régionaux établis par le bilan des progrès de la Wallonie vers les objectifs de développement durable (IWEPS, 2023) et par la Troisième Stratégie wallonne de développement durable (Gouvernement wallon, 2022). Enfin, les propriétés des matériaux, leurs compatibilités de mise en œuvre et les freins qui les entourent s'appuient sur l'ouvrage *Isolants thermiques en rénovation* de Trachte et Stiernon (2023b) et sur le *Guide pratique des isolants biosourcés/recyclés et de leur mise en œuvre* de Buildwise (Claude *et al.*, 2025).

7.2 Caractérisation du parc bâti

La caractérisation du parc constitue la première étape de la chaîne de calcul, comme dans le modèle de référence, mais elle est ici conduite à un plus grand niveau de détail. Là où Valbiom distinguait quatre typologies de logement, le modèle amélioré s'appuie sur les quatorze typologies établies par l'étude COZEB 3 (Carbonelle *et al.*, 2023) et restreint son champ aux seules maisons unifamiliales.

Périmètre et nombre de logements retenu

Le modèle porte sur le parc résidentiel unifamilial wallon, qui en forme la part prépondérante, et laisse de côté les logements collectifs. Ce choix ne traduit pas une limite de la méthode. L'étude COZEB 3 fournit d'ailleurs, à son annexe A.2, des typologies d'immeubles à appartements qui permettraient d'en étendre le champ (Carbonelle *et al.*, 2023). Il relève d'une délimitation assumée, dictée par le cadre de ce travail et par la complexité déjà importante du modèle, qu'une intégration des logements collectifs viendrait accroître, tant par le nombre de typologies supplémentaires que par les particularités de leur rénovation, du partage de l'enveloppe au cadre de la copropriété. Cette extension constitue à ce titre une perspective ouverte pour des travaux ultérieurs.

Le parc unifamilial retenu compte 1 327 396 maisons (Statbel, 2025), réparties en 423 250 maisons fermées, 382 047 maisons demi-fermées et 522 099 maisons ouvertes, cette dernière catégorie incluant les fermes et les bâtiments assimilés. Ce périmètre, plus restreint que celui du parc résidentiel dans son ensemble, explique que le nombre retenu diffère des chiffres avancés par les études portant sur la totalité des logements.

Typologies retenues

Les quatorze typologies de l'étude COZEB 3 couvrent l'ensemble des périodes de construction, depuis la maison vernaculaire antérieure à 1945 jusqu'à la villa quatre façades des années 1996 à 2008, en passant par les maisons ouvrières mitoyennes, les villas des premières extensions périurbaines et les maisons des lotissements. Chaque typologie se voit attribuer une part du parc et un nombre de bâtiments correspondant, dont le détail figure dans le tableau 10. Ce découpage, plus fin que celui du modèle de référence, répond à un objectif précis. Il permet de traiter distinctement l'enveloppe et l'état initial de chaque typologie, ce qui prend toute son importance lorsque les objectifs thermiques conduisent à ne poser aucun isolant sur les parois

dont la performance initiale atteint déjà la cible, situation qui varie précisément d'une typologie à l'autre.

Surfaces déperditives

Typologie	Part du parc	Description	Époque	Nombre de bâtiments
HE1	6.19%	Maison vernaculaire	<1945	82,166
HE2	4.12%	Maison ouvrière 3 façades	<1945	54,689
HE3	15.46%	Maison ouvrière mitoyenne	<1945	205,215
HE4	4.12%	Maison villageoise	<1945	54,689
HE5	16.49%	Maison urbaine mitoyenne	<1945	218,888
HE6	10.31%	Villa premières extensions	1946-1970	136,855
HE7	6.19%	Villa de plain-pied	1946-1970	82,166
HE8	4.12%	Maison bel-étage mitoyenne	1946-1970	54,689
HE9	12.37%	Villa lotissement	1971-1984	164,199
HE10	3.09%	Barre logement social	1971-1984	41,017
HE11	6.19%	Villa 4 façades K70	1985-1995	82,166
HE12	2.06%	Maison 3 façades K70	1985-1995	27,344
HE13	2.06%	Mitoyenne bel-étage K70	1985-1995	27,344
HE14	7.22%	Villa 4 façades K55	1996-2008	95,838

Tableau 10 - Typologies du parc résidentiel unifamilial wallon retenues dans le modèle. Mise en forme personnelle d'après l'étude COZEB 3 (Carbonelle et al., 2023) et les statistiques cadastrales de Statbel (2025).

À chaque typologie sont associées les surfaces déperditives par bâtiment, distinguées selon les trois éléments de l'enveloppe considérés, la toiture, les murs et le plancher bas. Ces surfaces proviennent de l'annexe A.1 de l'étude COZEB 3 (Carbonelle *et al.*, 2023). Le périmètre retenu comprend les surfaces en contact avec l'extérieur et avec les espaces adjacents non chauffés, à l'exclusion des parois mitoyennes, la toiture étant remplacée par le plancher du grenier lorsque celui-ci constitue un espace non chauffé. Multipliées par le nombre de bâtiments de chaque typologie, ces surfaces par bâtiment fournissent les surfaces totales à isoler pour chaque élément de l'enveloppe, qui constituent le point de départ du calcul des volumes développé à la section suivante.

7.3 Objectifs de rénovation et calcul des volumes d'isolants

Une fois le parc caractérisé, le modèle détermine, pour chaque typologie et chaque paroi, l'épaisseur d'isolant à poser pour atteindre une performance visée, puis le volume qui en découle. Cette étape reprend la logique du modèle de référence, mais elle en affine les objectifs et introduit un filtrage que Valbiom ne pratiquait pas.

Objectifs de rénovation

La performance visée s'exprime par le coefficient de transmission thermique U à atteindre pour chaque paroi, ou de façon équivalente par sa résistance thermique R, qui en est l'inverse. Le modèle propose à ce sujet trois scénarios. Le premier reprend les objectifs uniformes de Valbiom, une résistance de 5, 4 et 3,5 pour la toiture, les murs et le plancher, identique pour toutes les typologies (Gillet, 2024). Le deuxième retient les cibles optimales au regard des coûts établies par l'étude COZEB 3, dites Optimum SRLT, qui varient d'une typologie à l'autre et traduisent le niveau de rénovation économiquement optimal (Carbonelle *et al.*, 2023). Le troisième vise le standard passif, une valeur de 0,15 sur toutes les parois, soit le niveau le plus exigeant. Le choix du scénario actif ajuste l'ensemble du calcul.

État initial et calcul de l'épaisseur

La performance initiale de chaque typologie est donnée par les coefficients existants, établis paroi par paroi à partir des valeurs moyennes de l'étude COZEB 3 (Carbonelle *et al.*, 2023). Le tableau 11 met ces valeurs en regard des cibles retenues. Ces valeurs rendent compte de l'état moyen du bâti, depuis les typologies anciennes faiblement isolées jusqu'aux typologies récentes déjà partiellement performantes. L'épaisseur à poser découle alors de la relation $e = \lambda \times (1/U_{cible} - 1/U_{existant})$, qui traduit en épaisseur le gain de résistance thermique nécessaire pour passer de l'état existant à la cible, au moyen de la conductivité du matériau.

Cette épaisseur n'est toutefois calculée que là où la paroi existante demeure moins performante que la cible. La manière de traiter les parois déjà isolées distingue ici le modèle amélioré du modèle de référence. Valbiom raisonnait de façon binaire, une paroi déjà isolée était écartée du calcul, tandis qu'une paroi non isolée y entrait entièrement. Le modèle amélioré procède autrement, il réintègre les parois déjà isolées et les complète lorsque leur performance reste inférieure à la cible, ne renonçant à poser de l'isolant que dans le seul cas où l'objectif est déjà atteint. Ce traitement s'opère typologie par typologie et paroi par paroi. Il évite aussi bien de

comptabiliser de l'isolant sur des parois qui n'en requièrent pas que d'ignorer le complément nécessaire sur des parois partiellement isolées.

U existants				Scénario SRLT (Umoy COZEB Optimum SRLT)			
Typologie	**U_toit**	**U_murs**	**U_sol**	**Typologie**	**U_toit**	**U_murs**	**U_sol**
HE1	1.76	2.2	0.81	**HE1**	0.2	0.24	0.81
HE2	1.62	2.29	0.83	**HE2**	0.2	0.2	0.24
HE3	1.62	2.29	0.83	**HE3**	0.2	0.2	0.83
HE4	1.77	1.62	0.95	**HE4**	0.2	0.2	0.95
HE5	2.31	2.39	0.61	**HE5**	0.2	0.2	0.61
HE6	1.7	1.61	1.62	**HE6**	0.2	0.2	0.24
HE7	1.77	1.07	0.84	**HE7**	0.15	0.2	0.2
HE8	1.71	0.93	2.28	**HE8**	0.2	0.2	0.24
HE9	0.88	0.86	0.73	**HE9**	0.2	0.2	0.73
HE10	0.94	1.54	1.64	**HE10**	0.2	0.2	0.24
HE11	0.55	0.7	0.78	**HE11**	0.2	0.2	0.24
HE12	0.47	0.76	0.6	**HE12**	0.2	0.2	0.24
HE13	0.35	0.59	0.41	**HE13**	0.35	0.59	0.41
HE14	0.33	0.49	0.49	**HE14**	0.24	0.49	0.49

Tableau 11 - Valeurs U existantes (à gauche) et cibles (à droite, pour le scénario SRLT) par typologie et par paroi, pour les quatorze typologies d'habitations existantes. Mise en forme personnelle d'après l'étude COZEB 3 (Carbonelle et al., 2023).

Des volumes par bâtiment au parc

L'épaisseur, multipliée par la surface déperditive correspondante, fournit le volume d'isolant par bâtiment pour chaque paroi. Rapporté au nombre de bâtiments de la typologie, puis additionné sur les quatorze typologies, ce volume donne le volume total par paroi, toiture, murs et plancher, dont la somme constitue le volume nécessaire à l'échelle du parc. Chaque matériau possédant sa propre conductivité, une même cible se traduit par une épaisseur différente selon l'isolant retenu, point développé à la section suivante consacrée à la répartition entre les matériaux.

7.4 Répartition entre les matériaux

Le volume calculé pour chaque paroi doit ensuite être réparti entre les différents matériaux, puisque chacun possède sa propre conductivité et sa propre compatibilité avec les parois. Cette répartition repose sur trois éléments : l'ensemble des matériaux retenus, le regroupement des typologies en familles et les grilles de répartition proprement dites, le tout étant commandé par un paramètre qui fixe la part biosourcée.

Les matériaux retenus

La sélection des matériaux procède de la production wallonne elle-même. Six isolants biosourcés ou recyclés y sont fabriqués : la ouate de cellulose, le chaux-chanvre, la laine de mouton, la fibre d'herbe, le miscanthus et la fibre de bois. Un septième matériau, le textile de coton recyclé, fait exception, son producteur IsoFabric étant établi à Bruxelles. À ces sept matériaux s'ajoutent cinq isolants conventionnels : le polyuréthane, la laine de verre, la laine de roche et les polystyrènes extrudé et expansé, retenus comme point de comparaison. À chaque matériau est attachée sa conductivité par paroi, issue des fiches producteurs présentées à la section 7.1. Certaines valeurs sont différenciées, comme celle de la fibre de bois, dont la conductivité varie selon qu'elle est insufflée en caisson ou soufflée en comble.

Les familles de typologies

Les quatorze typologies d'habitation sont regroupées en trois familles selon leur époque de construction, car cette époque détermine la nature constructive de l'enveloppe. Ce regroupement traduit ainsi des logiques constructives distinctes auxquelles l'architecte répond par des dispositifs différents. La première réunit le bâti antérieur à 1945, en maçonnerie pleine et mortier de chaux, hygroscopique, et représente près de la moitié du parc. La deuxième couvre la période 1946 à 1984, marquée par la maçonnerie creuse et une isolation faible. La troisième rassemble le bâti récent de 1985 à 2008, déjà partiellement isolé. Ce regroupement oriente la répartition, une paroi ancienne et hygroscopique appelant des matériaux ouverts à la vapeur et plutôt une isolation par l'intérieur, une paroi récente se prêtant davantage à une isolation par l'extérieur.

Les grilles de répartition

Chaque matériau se voit attribuer une répartition sur les différentes parois et familles de typologies, l'ensemble sommant à 100 %. Ces parts traduisent les compatibilités entre matériaux et parois établies par le guide de Buildwise (Claude *et al.*, 2025) ainsi que l'ouvrage de Trachte et Stiernon (2023b), cités au début de la présente section. Certains matériaux sont donc écartés de certaines parois, à l'image des blocs de chaux-chanvre absents des toitures et des sols. Pour les murs s'ajoute une répartition entre isolation par l'intérieur et isolation par l'extérieur, propre à chaque famille, davantage intérieure pour les typologies anciennes, davantage extérieure pour les typologies récentes. Cette distinction entre les deux systèmes commande les matériaux mobilisés et donc les volumes. La grille se construit ainsi par deux filtres successifs. Le premier écarte de chaque paroi les matériaux dont la mise en œuvre y est impossible ou déconseillée. Le second attribue aux matériaux restant un poids selon leur pertinence constructive, les isolants ouverts à la vapeur pesant davantage dans le bâti ancien, les solutions rigides dans le bâti récent. Le tableau 12 l'illustre pour les murs, dans une trajectoire entièrement biosourcée. Les parts qui y figurent combinent déjà les deux systèmes selon leur poids respectif dans chaque famille, de sorte qu'elles donnent directement la part effective de chaque matériau. Les quatre grilles complètes, matériau par matériau, sont reportées à l'annexe 1, où elles font face à une répartition révisée que la section 8.5 établira.

Répartition des matériaux pour l'isolation des murs (combinant ITI et ITE) dans un scénario tout biosourcé			
Matériau	**F1**	**F2**	**F3**
Ouate de cellulose	14%	13%	8%
Chaux-chanvre	45%	29%	12%
Laine de mouton	4%	3%	2%
Herbe	14%	26%	34%
Miscanthus	4%	3%	2%
Textile coton recyclé	10%	18%	25%
Fibre de bois	11%	10%	9%
Polyuréthane (recours)	0%	0%	10%

Tableau 12 - Répartition des matériaux pour l'isolation des murs, combinant l'ITI et l'ITE, par famille de typologies et dans un scénario tout biosourcé. Réalisation personnelle.

Ces parts traduisent les arbitrages qu'opère un auteur de projet entre la performance recherchée, la nature du support et le mode de mise en œuvre, sans qu'aucun relevé n'en atteste la fréquence réelle en Wallonie. Cette répartition décrit donc ce que la compatibilité technique et les logiques constructives recommandent, indépendamment de ce que les producteurs sont en mesure de fournir. Elle suppose implicitement que la disponibilité de chaque matériau suit la demande qui lui est adressée, hypothèse que la section 8 mettra à l'épreuve.

La double voie

Au-dessus de ces répartitions, un paramètre unique, noté p_bio, fixe la part de rénovations mobilisant des isolants biosourcés. Lorsqu'il vaut 1, la répartition puise dans les seuls matériaux biosourcés, le polyuréthane n'intervenant qu'en recours, là où les solutions biosourcées ne sont pas envisageables. Ce recours se concentre sur les planchers bas, les parois en contact avec le sol, ainsi qu'une fraction de toitures plates ou chaudes qui appellent un isolant rigide et fermé à la vapeur. Lorsqu'il vaut 0, elle puise dans les seuls matériaux conventionnels, et entre les deux, elle pondère les deux ensembles. Cette structure à double voie fait de la part biosourcée un paramètre de scénario plutôt qu'une hypothèse figée, et elle compte parmi les principaux leviers mobilisés dans la section des résultats pour construire des trajectoires contrastées.

Concernant la position actuelle sur cet intervalle, selon Trachte et Stiernon (2023a), les isolants biosourcés représentent environ 7 % du marché de l'isolation en 2021, valeur que le modèle retient pour décrire la situation présente. Cette transposition appelle trois réserves. La donnée porte sur le marché de l'isolation dans son ensemble, qui additionne la construction neuve et la rénovation alors que le modèle ne traite que la seconde, dont les pratiques constructives diffèrent sensiblement. Elle s'exprime en part de marché, grandeur ordinairement mesurée en valeur ou en masse, quand le modèle raisonne en volume. Les isolants biosourcés étant plus denses que les laines minérales, la part exprimée en volume est vraisemblablement inférieure à celle qui est annoncée. L'hypothèse retenue se révèle dès lors prudente au regard de la contrainte industrielle, puisqu'elle attribue à la filière biosourcée une sollicitation plutôt supérieure à celle qu'elle connaît réellement. Aucune donnée établie sur le périmètre exact de la rénovation du parc unifamilial wallon n'étant disponible, cette valeur demeure la meilleure estimation mobilisable.

7.5 Estimation de l'offre industrielle

La première des deux offres est industrielle et correspond à la capacité des producteurs à transformer la matière en isolant. Valbiom en avait déjà dressé le tableau à partir d'une enquête menée auprès des fabricants wallons en 2023 (Gillet, 2024). Le modèle amélioré reprend cette démarche en l'actualisant, une nouvelle enquête ayant été conduite dans le cadre de ce travail afin de disposer de données récentes et plus détaillées, de vérifier si les capacités avaient évolué depuis 2023, et d'étendre le panel à des producteurs absents de l'étude de référence.

L'actualisation de l'enquête

Recensés à la section 7.1, sept fabricants wallons ainsi qu'un bruxellois ont été interrogés sur trois points : le volume qu'ils produisent annuellement, la part de cette production qui demeure commercialisée en Belgique plutôt qu'exportée, et la capacité maximale qu'ils seraient en mesure d'atteindre. Le choix d'inclure IsoFabric à cette enquête impose de considérer sa production comme mobilisable en Wallonie, en permettant en contrepartie d'ajouter un matériau supplémentaire au modèle. De cette enquête découle, pour chaque matériau, une capacité actuelle et une capacité potentielle, la première mesurant l'offre disponible aujourd'hui, la seconde le plafond envisageable à moyen terme. Isocell n'ayant pas donné suite, ses capacités, ainsi que la capacité actuelle de Gramitherm (non transmise dans l'enquête), sont reprises des valeurs recueillies en 2023. Les volumes d'Isocell et d'Isoproc, tous deux producteurs de ouate de cellulose, sont par ailleurs comptés au titre d'un même matériau du côté des besoins, mais distingués du côté de l'offre.

Ces valeurs restent néanmoins des déclarations provenant des producteurs eux-mêmes et n'ont pu faire l'objet d'une vérification indépendante. La capacité potentielle relève en outre d'une estimation de leur part plutôt que d'une mesure. La réserve pèse d'autant plus que c'est cette seconde valeur, la plus favorable à la filière, qui sert de référence à l'ensemble des confrontations conduites par la suite.

La base retenue

La capacité inscrite au modèle est la production totale, sans que les exportations en soient retranchées. Ce parti pris assure la continuité avec l'étude de référence et évite de fixer le plafond sur une part exportée difficile à établir avec certitude. La variante qui déduit ces exportations, plus restrictive puisqu'elle rapproche l'offre de la seule consommation intérieure, est reportée à l'analyse de sensibilité, où elle teste l'effet de cette hypothèse sur le résultat. Les matériaux conventionnels échappent en revanche à ce plafond, leur production européenne étant supposée non limitante, de sorte que la contrainte industrielle ne pèse que sur la voie biosourcée. L'ensemble de ces capacités, exprimées en mètres cubes par an et rapportées ensuite au besoin annuel, figure au tableau 13.

Producteur	Cap. actuelle (m^3/an)	Cap. potentielle (m^3/an)
ISOCELL	290,909	381,818
ISOPROC	181,818	454,545
IsoHemp	17,188	43,000
Woolconcept	1,600	16,000
Gramitherm	40,000	200,000
PROMisc	250	15,000
IsoFabric	10,000	35,000
Lenoo	20,000	80,000

Tableau 13 - Capacités de production annuelle et potentielle des fabricants d'isolants biosourcés retenus dans le modèle, en m^3/an. Réalisation personnelle d'après l'enquête menée auprès des producteurs, complétée par le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024).

7.6 Estimation de la ressource agricole

La seconde offre porte non plus sur la transformation de la matière, mais sur la matière première elle-même, celle que les cultures wallonnes sont susceptibles de fournir. Elle constitue l'apport propre du modèle sur ce point, en réponse à l'une des limites relevées à la section 6.

Le gisement wallon

Trois cultures alimentent les matériaux biosourcés concernés : le chanvre, le miscanthus, et l'herbe de prairie. Pour chacune, la surface cultivée en Wallonie et le rendement à l'hectare sont repris du travail de Suray (2025), dont le produit fournit un gisement brut, à savoir la masse théoriquement récoltée chaque année. Ce gisement ne saurait toutefois être entièrement mobilisé pour l'isolation, une partie de la récolte revenant à d'autres usages ou étant restituée au sol. Un taux de disponibilité de 37 %, établi par Palumbo *et al.* (2015), est dès lors appliqué aux trois cultures. Tiré de la moyenne des céréales et des cultures industrielles, il convient au chanvre, mais demeure optimiste pour le miscanthus et surtout pour l'herbe, dont l'essentiel part au fourrage. La pratique du seul producteur wallon confirme cette réserve, puisque Gramitherm valorise de l'herbe fauchée le long des routes, des canaux ou encore des pistes d'aéroports plutôt que le fauchage des prairies, précisément afin de ne pas entrer en concurrence avec l'usage fourrager (Cluster Eco-construction, 2025). Retenir l'ensemble des surfaces de prairies comme gisement mobilisable revient donc à supposer une concurrence que la filière évite aujourd'hui délibérément. Constater un déficit, en dépit de la générosité considérée, n'en serait alors que plus significatif dans les résultats. Cette réserve sur l'herbe est toutefois mise à l'épreuve dans l'analyse de sensibilité.

La confrontation en matière première

La mise en regard s'effectue en masse. D'un côté, le gisement mobilisable résulte de la surface, du rendement et du taux de disponibilité. De l'autre, le besoin se déduit du volume d'isolant, de sa masse volumique, d'un facteur de pertes et de la fraction de matière première propre à chaque matériau. Cette fraction s'élève à 80 % pour le chaux-chanvre, d'après le guide de Buildwise (Claude *et al.*, 2025), à 70 % pour l'herbe, selon la fiche du producteur (Gramitherm, s. d.), et à 90 % pour le miscanthus, retenu par hypothèse faute de fiche propre à ce vrac quasi pur. Le facteur de pertes, fixé à 1,2 d'après Palumbo *et al.* (2015), traduit les 20 % de matière perdus entre le champ et la pose. Le tableau 14 rassemble ces paramètres, culture par culture.

Culture	Surface (ha)	Rendement (kg/ha)	Disponibilité (Ba/Bt)	Densité isolant (kg/m³)	Fraction matière 1ère
Chanvre	33.95	4,500	0.37	320	80%
Miscanthus	312.92	16,000	0.37	130	90%
Herbe	311,287	10,000	0.37	40	70%

Tableau 14 - Paramètres des cultures wallonnes : surface cultivée, rendement, taux de disponibilité, masse volumique de l'isolant et fraction de matière première. Mise en forme personnelle d'après Suray (2025), Palumbo et al. (2015), Buildwise (Claude et al., 2025) et Gramitherm (s.d.).

Le cas du chanvre

Le chanvre appelle un traitement distinct. Sa culture wallonne étant trop restreinte pour couvrir plus qu'une fraction infime du besoin, le modèle établit pour lui une ligne d'import comblant l'écart avec le gisement local, dont l'origine française et allemande est documentée par le guide de Buildwise (Claude *et al.*, 2025) et par Trachte et Stiernon (2023b). Le chanvre se trouve ainsi soumis à un double plafond, la matière disponible au champ d'abord, la capacité à la transformer ensuite. Le résultat chiffré de cette confrontation, comme de la précédente, relève de la section 8.

7.7 Échelonnement du calendrier

Le modèle de référence livrait un volume unique à l'horizon 2050, sans le situer dans le temps. La question n'est pourtant pas seulement de savoir si ce volume peut être fourni, mais s'il peut l'être au rythme qu'impose la rénovation. Le modèle amélioré introduit à cette fin un échelonnement, qui répartit la demande de 2025 à 2050 en suivant les obligations réglementaires wallonnes.

La trajectoire réglementaire

Cet échelonnement s'appuie sur l'obligation faite aux propriétaires de logements existants d'atteindre un label de performance énergétique minimal, relevé par paliers successifs, le label F devant être acquis en 2031, puis E en 2036, D en 2041, C en 2046 et enfin B en 2050 (Gouvernement wallon, 2025). Pour situer le parc au regard de cette trajectoire, la répartition des logements entre labels est tirée des certificats PEB de l'Open Data Wallonie-Bruxelles (2026), restreinte aux maisons unifamiliales puis rapportée à l'ensemble du parc. Le croisement des deux détermine, pour chaque échéance, le nombre de logements appelés à franchir un seuil, ceux déjà classés B ou mieux demeurant hors programme. Le tableau 15 récapitule ces échéances et les effectifs qu'elles concernent.

Période	Échéance	Label minimal exigé	Logements à rénover sur la période	Cumul des rénovations
2025-2031	2031	F	147,832	147,832
2031-2036	2036	E	89,474	237,306
2036-2041	2041	D	102,754	340,060
2041-2046	2046	C	104,203	444,263
2046-2050	2050	B	79,453	523,716
Total	**2050**	**B**	**523,716**	**523,716**

Tableau 15 - Échelonnement de la rénovation du parc unifamilial par période, échéance de label et nombre de logements concernés, selon les obligations wallonnes. Mise en forme personnelle d'après les certificats PEB de l'Open Data Wallonie-Bruxelles (2026) et le communiqué du Gouvernement wallon (2025).

Le phasage des volumes

Le volume total établi précédemment est ensuite distribué sur les cinq périodes selon cette trajectoire, sans que la somme en soit modifiée, chaque échéance amenant une part cumulée du parc au label requis. Ce phasage repose sur une hypothèse simplificatrice, le volume moyen par bâtiment étant supposé uniforme d'un logement à l'autre. Cette uniformité tend à sous-estimer l'effort concentré sur les logements les plus dégradés, ceux classés G, qui réclament l'isolation la plus épaisse tout en n'étant comptés qu'à la moyenne. Ainsi ramenée à l'année, la demande peut alors être confrontée non plus au seul volume disponible, mais au rythme annuel que la filière est en mesure de soutenir, confrontation dont les résultats relèvent de la section 8.

L'horizon retenu

La période court de 2025 à 2050, soit 25 années. Ce point de départ correspond à celui des données qui décrivent le parc, dont le recensement et les certificats de performance énergétique fixent l'état à cette date, de sorte que faire courir la rénovation depuis cette même année assure la cohérence entre l'état initial et l'effort qui en découle. Il correspond également à l'année où les obligations de labels ont été arrêtées, et découpe la période en cinq intervalles réguliers qui suivent les échéances successives. Retenir 2025 plutôt que l'année en cours revient par ailleurs à répartir la demande sur une durée légèrement plus longue, donc à en abaisser le rythme annuel, hypothèse favorable à la filière dont il faudra tenir compte au moment d'apprécier les résultats. Toutefois, l'horizon constitue un paramètre du modèle et non une donnée fixe, si bien que toute autre durée peut lui être substituée, ce dont la section consacrée aux résultats fera usage.

7.8 Impact environnemental

Établir les volumes nécessaires et vérifier que la Wallonie serait en mesure de les produire ne dit encore rien de ce que cette production coûterait. Deux matériaux couvrant la même surface pour une même performance thermique peuvent pourtant différer d'un ordre de grandeur quant au carbone et à l'énergie que mobilise leur fabrication, de sorte qu'une filière capable de fournir les volumes attendus ne serait pas pour autant soutenable. Le modèle amélioré adjoint donc à la confrontation des volumes un volet environnemental, qui emprunte au rapport de Delem *et al.* (2020) le principe d'une évaluation sur le cycle de vie restreinte aux seuls matériaux ajoutés lors de la rénovation, et à la thèse de Gourovitch (2025) celui de retenir un couple réduit d'indicateurs puis de rapporter les résultats obtenus aux totaux du territoire considéré.

Le périmètre retenu

L'évaluation se limite aux étapes de production, soit les modules A1 à A3 de la norme, et ne porte que sur les isolants posés lors de la rénovation. Le transport, la mise en œuvre, les remplacements éventuels et la fin de vie en sont écartés, de même que l'énergie économisée par la rénovation, dont la mise en balance avec l'impact des matériaux constitue l'objet propre du rapport de Delem et déborde la question posée ici. Ce périmètre volontairement étroit tient à ce que la variable étudiée est le matériau lui-même, et non la performance globale du bâtiment rénové. L'impact se déduit dès lors du volume posé multiplié par un impact unitaire, appliqué aux volumes par matériau du scénario actif, de manière que toute modification des valeurs U cibles ou de la part biosourcée s'y répercute directement.

Les indicateurs et leurs sources

Deux indicateurs sont retenus : le carbone fossile exprimé en tonnes de CO_2 équivalent et l'énergie non renouvelable exprimée en gigajoules, auxquels s'ajoute la masse totale d'isolant mise en œuvre. Le score global monétisé que Delem mobilise par ailleurs a été laissé de côté, non qu'il manque de pertinence, mais parce qu'une valeur unique exprimée en euros ne peut se confronter à un budget carbone régional ni à un objectif de consommation de matière, alors que les trois grandeurs retenues ici s'y prêtent directement. Les valeurs unitaires proviennent des FDES ainsi que des EPD rassemblées sur la base de données INIES (s. d.), le miscanthus faisant exception puisque, faute de fiche propre, sa valeur carbone est tirée de la base de données TOTEM (s. d.). Le tableau 16 rassemble ces valeurs.

Matériau	Carbone fossile (kg CO2/m³)	Énergie non renouv. (MJ/m³)	Densité (kg/m³)
Ouate de cellulose	7.5	153	55
Chaux-chanvre	172.8	1,272	320
Laine de mouton	21.4	175	25
Herbe	11	316	40
Miscanthus	18.1	379	130
Textile coton recyclé	25	1,010	22
Fibre de bois	18.5	379	50
Polyuréthane	207.2	4,080	30
Laine de verre	43.9	1,297	18
Laine de roche	136.4	2,046	40
Polystyrène expansé	76	2,434	20
Polystyrène extrudé	191.9	4,800	32

Tableau 16 - Impacts unitaires de production (A1-A3) des isolants retenus dans le modèle : carbone fossile, énergie non renouvelable et densité. Mise en forme personnelle d'après les FDES (INIES, s. d.) et, pour le miscanthus, d'après TOTEM (TOTEM, s. d.).

Le carbone biogénique, capté par la plante durant sa croissance, n'est en revanche pas décompté. Ce stockage demeure temporaire, la matière relâchant en fin de vie ce qu'elle avait absorbé, et le comptabiliser reviendrait à porter au bilan de la rénovation un bénéfice que celle-ci ne fait que différer (Trachte & Stiernon, 2023b). De même, l'énergie retenue est la seule part non renouvelable, ce qui exclut l'énergie contenue dans la biomasse. Ces deux partis pris s'écartent de ceux de Gourovitch, qui intègre le stockage biogénique et obtient de ce fait des émissions négatives pour ses scénarios entièrement biosourcés. Ils désavantagent délibérément les matériaux biosourcés, en les privant de ce qui leur est le plus favorable, et rendent d'autant plus solide tout avantage qui subsisterait malgré eux.

Les seuils wallons

Un impact ne prend sens que rapporté à ce que le territoire peut absorber. Les résultats sont donc ramenés à l'année, sur l'horizon de rénovation de 25 ans, puis confrontés à deux seuils régionaux exprimés eux aussi en flux annuels. Le premier est un budget carbone résidentiel, construit en appliquant au plafond d'émissions visé pour 2030, fixé à 24 736 kilotonnes équivalent CO_2, la part que le logement représente dans les émissions wallonnes, soit 18,2 % en 2021. Cela conduit à environ 4,5 millions de tonnes par an. Le second est la cible de consommation intérieure de matière (DMC) fixée à 45,06 millions de tonnes par an, qui traduit la diminution d'un quart par rapport à 2013 reprise de la Troisième Stratégie wallonne de développement durable (Gouvernement wallon, 2022). L'un et l'autre sont établis par le bilan des progrès de la Wallonie vers les objectifs de développement durable (IWEPS, 2023). Rapporter l'impact de la rénovation à ces deux seuils permet ainsi de mesurer la place que le seul poste de l'isolation occuperait dans les marges régionales, et de comparer dans les résultats une trajectoire entièrement biosourcée à une trajectoire conventionnelle.

7.9 Déchets de mise en œuvre

La rénovation ne consomme pas seulement la matière qu'elle met en œuvre, elle en rejette également une part, qui n'apparaît pas dans le calcul des volumes puisqu'elle ne se retrouve pas dans la paroi. L'étude de l'ADEME distingue à cet égard deux gisements, les déchets issus de la dépose des matériaux existants et les chutes produites au moment de la mise en œuvre (Léonardon *et al.*, 2019). Le modèle ne retient que les secondes.

Ce choix tient à la nature des données disponibles. Quantifier la dépose supposerait de connaître la composition des parois existantes, que les typologies mobilisées ne renseignent pas, celles-ci décrivant des performances thermiques et non des compositions constructives. La dépose relève par ailleurs du cycle de vie antérieur du bâtiment plutôt que de la rénovation elle-même, distinction que pose également le rapport de Delem *et al.* (2020) lorsqu'il n'évalue que les matériaux nouvellement ajoutés. Les chutes de pose, à l'inverse, découlent directement des volumes que le modèle vient de calculer.

Le principe de calcul

Le gisement se déduit du volume posé multiplié par un taux de chute propre à chaque matériau, appliqué aux volumes pondérés par la part biosourcée, puis ramené à l'année sur l'horizon de rénovation. Le calcul suit ainsi la même logique que le volet environnemental, en ce qu'il applique un coefficient unitaire à des volumes déjà établis, et se trouve de la même manière sensible au scénario retenu.

Les taux retenus

Les taux documentés proviennent des fiches de déclaration environnementale de la base INIES (s. d.) et s'échelonnent de 1 à 5 % selon les matériaux, comme le rassemble le tableau 17. Cet écart traduit avant tout la forme sous laquelle l'isolant se pose. Les panneaux rigides ou semi-rigides, qu'il faut recouper aux dimensions de la paroi, engendrent les pertes les plus importantes, tandis que les isolants en vrac, insufflés ou soufflés, remplissent le volume sans découpe et n'en produisent quasiment pas. Le miscanthus fait exception au relevé documentaire puisqu'il ne dispose pas de fiche propre, un taux volontairement bas lui étant attribué par hypothèse au vu de sa pose en vrac.

Matériau	Taux de chute	Source
Ouate de cellulose	2%	*FDES INIES*
Chaux-chanvre	3%	*FDES INIES*
Laine de mouton	5%	*FDES INIES*
Herbe	2%	*FDES INIES*
Miscanthus	0.5%	*Hypothèse, pose en vrac*
Textile coton recyclé	2%	*FDES INIES*
Fibre de bois	1%	*FDES INIES*
Polyuréthane	5%	*FDES INIES*
Laine de verre	2%	*FDES INIES*
Laine de roche	2%	*FDES INIES*
Polystyrène expansé	5%	*FDES INIES*
Polystyrène extrudé	5%	*FDES INIES*

Tableau 17 - Taux de chute de mise en œuvre retenus par matériau. Mise en forme personnelle d'après les FDES de la base INIES (s. d.), complétées par une hypothèse pour le miscanthus.

Portée et limites

Il découle de cette construction que le taux de chute global n'est pas un paramètre du modèle, mais un résultat, puisqu'il dépend de la répartition des différents matériaux et varie donc avec la part biosourcée. Une trajectoire donnée peut ainsi réduire les volumes tout en augmentant la proportion de matière perdue, ou l'inverse. Deux réserves accompagnent néanmoins cette estimation. Les taux sont des moyennes de fiches produits et ne rendent pas compte des écarts entre chantiers, que la géométrie des parois et le soin apporté à la pose font pourtant varier. Le modèle ne préjuge enfin pas du devenir de ces chutes, qu'il se limite à quantifier, la question de leur valorisation, de leur réemploi ou de leur mise en décharge relevant d'un travail que le présent périmètre n'aborde pas.

7.10 Confrontations et analyse de sensibilité

Les sous-sections précédentes ont établi séparément une demande, deux offres et trois modules dérivés. Il reste à décrire la manière dont ces éléments sont mis en regard, puis celle dont la solidité du résultat obtenu est éprouvée. Ces deux opérations forment la dernière étape du modèle et fournissent la matière de la section consacrée aux résultats.

La confrontation à double plafond

La demande est d'abord ramenée à l'année en la divisant par l'horizon de rénovation, de sorte qu'elle s'exprime dans la même unité que les capacités recueillies auprès des producteurs. Le rapport entre ce besoin annuel et la capacité disponible fournit alors un indicateur unique, dont la lecture est immédiate, une valeur supérieure à 1 signalant que la production ne suffit pas. Le modèle calcule ce rapport deux fois, une première fois au regard de la capacité actuelle, une seconde au regard de la capacité potentielle, et fonde son verdict sur la seconde afin de juger la filière sur ce qu'elle pourrait devenir plutôt que sur son état présent. Trois appréciations en découlent selon que le besoin dépasse cette capacité, qu'il en mobilise plus de la moitié, ou qu'il s'y loge aisément.

La confrontation agricole suit la même logique, mais s'exprime en masse de matière première, puisque c'est en tonnes que se mesure un gisement. Le rapport y oppose le besoin en matière au gisement mobilisable, et le modèle en déduit, lorsque le premier excède le second, le tonnage qu'il faudrait importer pour combler l'écart.

Ces deux lectures se rejoignent enfin pour les trois matériaux issus d'une culture wallonne, qui sont soumis à l'une et à l'autre. Le modèle place alors les deux rapports côte à côte et retient comme contrainte dominante celle dont la valeur est la plus élevée, ce qui revient à distinguer les matériaux bloqués au champ, faute de matière, de ceux bloqués à l'usine, faute de capacité de transformation. Cette distinction importe pour la suite, car les deux situations n'appellent pas les mêmes réponses, la première relevant de la surface cultivée et la seconde de l'investissement industriel.

À ces deux confrontations s'ajoute celle du rythme, issue de l'échelonnement du calendrier. Le volume annuel exigé par chaque période y est rapporté à la capacité biosourcée potentielle, ce qui déplace la question de la quantité vers la cadence et permet de vérifier si la filière pourrait suivre non seulement en volume cumulé, mais aussi au moment où la demande se concentre.

L'épreuve de la sensibilité

Les rapports issus de ces confrontations reposent sur une trentaine de paramètres estimés, ce qui appelle une vérification. Celle-ci ne vise pas à désigner les données qu'il conviendrait d'affiner, mais à établir que les écarts constatés procèdent bien de la réalité de la filière et non de l'imprécision des entrées. L'analyse de sensibilité agit donc comme une épreuve de solidité du résultat.

Elle se construit en deux temps. Le premier tableau soumet chaque variable à une variation uniforme de 10 puis de 20 %, à la hausse comme à la baisse, toutes les autres demeurant fixées. Cette perturbation ne décrit aucune incertitude réelle, puisqu'il serait absurde de supposer que le nombre de logements et la conductivité d'un isolant soient connus avec le même degré de précision, mais elle isole la réponse propre du modèle. Le second tableau introduit précisément ce que le premier laisse de côté, en associant à chaque variable une plage d'incertitude plausible, justifiée par la nature de sa source, plus étroite pour un effectif issu du recensement, plus large pour une surface déperditive dont la variabilité au sein d'une même typologie est considérable. Le produit de cette plage par l'effet d'une variation de 1 % fournit un impact total, dont le classement décroissant mesure l'amplitude maximale que l'incertitude peut exercer sur le volume. Ces tableaux sont reportés à l'annexe 4, la lecture de leurs résultats relevant de la section suivante.

Le statut particulier de la part biosourcée

La part biosourcée échappe à ce dispositif. Bien qu'elle soit le paramètre le plus structurant du modèle, elle ne relève pas de l'incertitude, mais du choix, puisqu'elle traduit une orientation de politique publique et non une méconnaissance de la réalité. La perturber au même titre qu'une surface reviendrait à confondre ce que l'on ignore et ce que l'on décide. Elle est donc exclue des deux tableaux et fait l'objet d'une variation distincte, parcourue de 0 à 1, dont l'amplitude sera comparée à celle des variables d'incertitude. C'est de cette comparaison que les scénarios de la section suivante tirent leur légitimité, puisqu'elle établit lequel des paramètres du modèle mérite d'être érigé en levier.

7.11 Hypothèses posées

Comme pour le modèle de référence, le modèle amélioré repose sur des hypothèses visant à combler un manque de données ou à alléger le processus. Leur nombre s'est accru à mesure que le modèle gagnait en finesse, chaque module ajoutant ses propres approximations. Plusieurs hypothèses du modèle de référence ne sont pas levées, mais déplacées, un traitement plus détaillé appelant de nouvelles approximations. Elles sont présentées ci-après dans leur ordre d'intervention, leur portée étant discutée dans les sections consacrées aux résultats.

Hypothèses relatives au parc bâti

Le parc est considéré comme statique à l'horizon 2050, son effectif demeurant celui du recensement le plus récent, sans tenir compte des démolitions, des constructions neuves, ni des changements d'usage. Chaque typologie se voit attribuer une part du parc et des surfaces déperditives moyennes, ce qui suppose une géométrie comparable entre bâtiments d'une même catégorie, alors que la variabilité interne y demeure considérable, ce dont l'analyse de sensibilité rend compte. Le périmètre retenu suppose enfin que les parois mitoyennes n'appellent aucune isolation et que le plancher du grenier se substitue à la toiture lorsque celui-ci n'est pas chauffé.

Hypothèses relatives aux objectifs et aux épaisseurs

L'état initial de chaque typologie est décrit par des coefficients de transmission moyens, qui supposent une homogénéité de l'existant au sein d'une même catégorie. Le calcul de l'épaisseur suppose de son côté que le gain de résistance provient du seul isolant ajouté, sans considérer les ponts thermiques ni l'apport des autres couches de la paroi. Il suppose également qu'une paroi n'est rénovée qu'une fois sur l'ensemble de la période, et qu'aucun isolant n'est posé là où la performance initiale atteint déjà la cible.

Hypothèses relatives à la répartition entre les matériaux

La répartition entre les isolants procède de grilles de répartitions par époque de construction et par paroi, qui supposent que les compatibilités techniques et les pratiques constructives puissent être décrites par des parts fixes. La distribution entre isolation par l'intérieur et par l'extérieur repose sur le même principe. La part biosourcée s'applique quant à elle uniformément à toutes les typologies et à toutes les parois, alors qu'elle pourrait en pratique varier selon les situations. Les conductivités, enfin, sont celles que les producteurs déclarent, supposées représentatives des produits effectivement mis en œuvre.

Hypothèses relatives à l'offre industrielle

La capacité retenue est la production totale, dont les exportations ne sont pas retranchées. Cette production alimente en réalité l'ensemble du marché belge, mais elle est confrontée à la seule demande wallonne, comme si elle lui était entièrement destinée, ce qui surestime l'offre disponible. Les valeurs reprises de l'étude de référence pour les producteurs n'ayant pas répondu sont supposées toujours valables. Les matériaux conventionnels échappent enfin à tout plafond, leur production européenne étant supposée non limitante.

Hypothèses relatives à la ressource agricole

Les surfaces cultivées et les rendements sont supposés constants sur toute la période, sans évolution des répartitions des cultures ni des pratiques. Le taux de disponibilité s'applique uniformément aux trois cultures, hypothèse favorable pour l'herbe et le miscanthus. La fraction de matière première du miscanthus est posée faute de fiche produit, et le facteur de pertes est supposé identique, quel que soit le matériau. L'import destiné à combler le déficit en chanvre est enfin supposé disponible sans limite de volume.

Hypothèses relatives au calendrier

La répartition des logements entre labels est établie à partir des certificats délivrés, supposés représentatifs de l'ensemble du parc unifamilial alors qu'ils n'en couvrent qu'une part. Les échéances réglementaires sont supposées respectées. La période est en outre supposée courir depuis l'année des données du parc, ce qui allonge légèrement la durée disponible par rapport à l'année en cours et abaisse d'autant le rythme annuel exigé. Le volume moyen par bâtiment est enfin considéré comme uniforme, ce qui sous-estime l'effort concentré sur les logements les plus dégradés.

Hypothèses relatives au volet environnemental et aux déchets

L'évaluation se limite aux étapes de production et suppose que les autres phases du cycle de vie n'entrent pas dans la comparaison entre matériaux. Le carbone biogénique n'est pas décompté, hypothèse défavorable aux biosourcés. Les valeurs unitaires sont supposées représentatives des produits wallons, alors que les FDES concernent en partie des fabricants étrangers. Les seuils régionaux sont enfin supposés répartis uniformément sur la période, et le taux de chute du miscanthus est supposé, faute de fiche propre.

7.12 Carte conceptuelle du modèle amélioré

La figure 3 réunit de la même manière la chaîne du modèle amélioré, des données d'entrée jusqu'aux résultats. La comparaison avec la figure 2 fait apparaître que l'essentiel des ajouts se situe en aval du calcul des volumes, dans les données de confrontation et les modules qui en découlent.

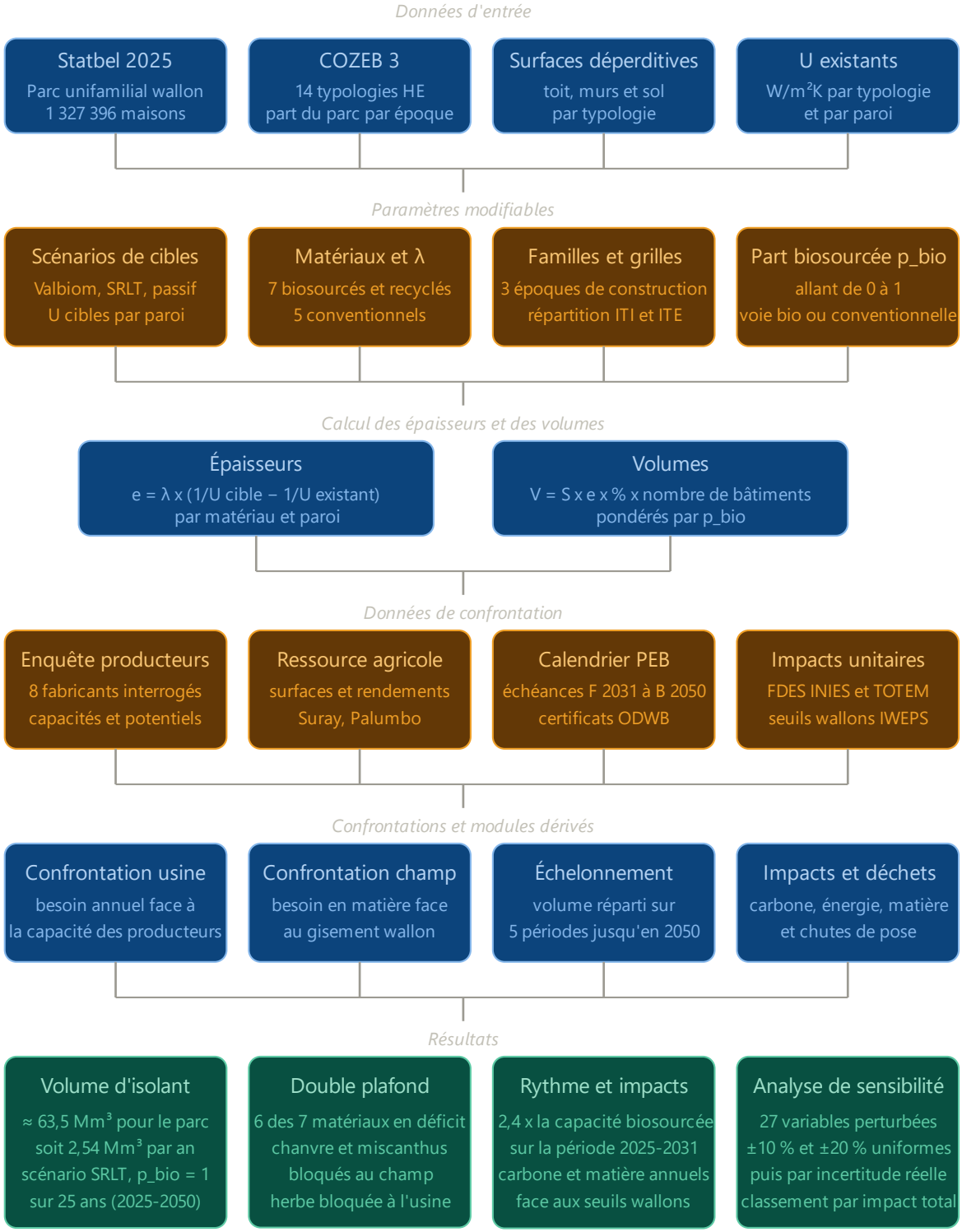


Figure 3 - Carte conceptuelle de la méthodologie du modèle amélioré, des données d'entrée jusqu'à la confrontation à double plafond et aux modules dérivés. Réalisation personnelle.

7.13 Synthèse

Le modèle amélioré conserve la logique du modèle de référence, une chaîne descendante qui part du parc bâti pour aboutir à des volumes d'isolant, mais il en corrige les failles et en élargit la portée. Les incohérences relevées à la section 6 sont levées, chaque paroi disposant de ses propres paramètres et chaque valeur découlant d'une formule explicite. Les simplifications les plus lourdes le sont également, le parc étant décrit par quatorze typologies plutôt que quatre, les objectifs thermiques variant selon la typologie, les parois partiellement isolées étant complétées plutôt qu'écartées, et chaque matériau recevant sa conductivité propre selon la paroi qu'il occupe.

À ces corrections s'ajoutent quatre modules qui débordent du périmètre initial. La confrontation ne porte plus sur la seule capacité des producteurs, mais aussi sur la ressource agricole, ce qui distingue les matériaux bloqués au champ de ceux bloqués à l'usine. L'échelonnement du calendrier substitue une cadence à un volume cumulé, en rapportant la demande aux échéances réglementaires. Le volet environnemental mesure ce que cette rénovation coûterait en carbone, en énergie et en matière, rapporté à ce que la Wallonie peut absorber. Le module des déchets, enfin, quantifie la part de matière perdue lors de la mise en œuvre. L'analyse de sensibilité accompagne l'ensemble, non pour désigner les données à affiner, mais pour établir que les écarts constatés procèdent de la filière et non de l'imprécision des entrées.

Ce faisant, le modèle cesse de livrer un résultat unique. Trois paramètres le pilotent, la part biosourcée, l'ambition thermique et l'horizon de rénovation, dont la combinaison décrit des trajectoires très différentes pour un même parc. C'est de leur maniement que procède la suite du travail, où le modèle n'est plus décrit, mais employé.

8 Sortie des résultats

Les sections précédentes ont montré la construction du modèle, et celle-ci s'attache à l'utiliser et à en montrer les résultats. La démarche se déroule en trois temps. D'abord, il faut établir dans quelle mesure les réponses du modèle sont fiables, ce qui suppose de lire l'analyse de sensibilité construite à la section 7.10. Il faut ensuite situer l'ordre de grandeur du besoin et le confronter à celui que produisent les travaux comparables, afin de vérifier la cohérence des chiffres. Enfin, il devient alors possible de décliner des trajectoires de rénovation et d'en tirer les conséquences industrielles, agricoles et environnementales pour la Wallonie.

8.1 Robustesse du modèle et lecture de l'analyse de sensibilité

Le modèle amélioré mobilise 27 variables principales, réparties en six familles allant du nombre de bâtiments aux conductivités thermiques. Avant d'interpréter les résultats, il convient d'établir lesquelles de ses réponses sont solides et lesquelles dépendent d'hypothèses fragiles. La méthodologie à deux tableaux exposée à la section 7.10 sépare précisément ces deux questions, et ces tableaux sont reproduits à l'annexe 4. Le premier tableau mesure la réponse du modèle à une perturbation uniforme, indépendamment de ce que l'on sait réellement de chaque variable. Le second croise cette réponse avec l'incertitude effective de la donnée, ce qui permet de désigner les points faibles. L'ensemble est établi sur le cas de référence, soit un volume de 63 499 066 m³ obtenu avec les cibles Optimum SRLT et une part biosourcée totale.

La réponse du modèle à ses propres variables

Le nombre total de bâtiments se comporte comme une variable linéaire. Une variation de 20 % produit exactement 20 % de volume supplémentaire, ce qui confirme la proportionnalité stricte de la chaîne de calcul et permet de lire toutes les autres réponses par rapport à celle-ci.

Les surfaces déperditives et les conductivités thermiques présentent une propriété qui mérite d'être relevée. Leurs amplitudes sont rigoureusement identiques, 23,40 % pour les murs et 13,36 % pour les toitures, et leurs réponses sont parfaitement symétriques, une réduction de 20 % abaissant le volume de 11,70 % et une augmentation équivalente le relevant d'autant. Cette symétrie provient du fait que l'épaisseur posée s'écrit comme le produit de la conductivité par l'écart des résistances cibles et existantes, et le volume comme le produit de cette épaisseur par la surface. La surface et la conductivité entrent donc de la même manière dans la formule, si

bien qu'une incertitude sur la performance annoncée d'un isolant a exactement le même poids qu'une incertitude sur la géométrie du bâtiment.

Les coefficients de transmission cibles se comportent tout autrement. Une réduction de 20 % de la cible attribuée aux murs accroît le volume de 17,84 %, alors qu'un relèvement du même ordre ne l'abaisse que de 11,49 %. Ainsi, tout renforcement d'une exigence réglementaire coûte davantage en matière qu'un assouplissement équivalent n'en économise, ce qui signifie que le besoin en isolants croît plus vite que l'ambition thermique. Ce constat sera repris au moment d'examiner la variante dans laquelle la cible thermique correspond au standard passif.

Un dernier enseignement se lit dans la dernière ligne du tableau. La typologie HE13, maison mitoyenne bel étage de la période 1985 à 1995, affiche un impact nul, parce que ses coefficients existants se situent déjà sous les cibles Optimum SRLT sur les trois parois et qu'elle ne requiert donc aucun isolant. Le filtrage évoqué à la section 6 produit ici son effet le plus visible et démontre que la répartition en quatorze typologies n'est pas redondante, puisqu'une moyenne unique aurait attribué un besoin à un ensemble de bâtiments qui n'en ont aucun.

De la sensibilité mesurée à l'incertitude réelle

Le second tableau associe à chaque variable une plage d'incertitude documentée et multiplie cette plage par l'impact unitaire. Le classement qui en résulte diffère profondément du premier, et c'est là tout l'intérêt de l’analyse de sensibilité.

Le nombre de bâtiments, premier au tableau des sensibilités, tombe au septième rang avec un impact total de 2 %. Il est en effet la variable la mieux connue de tout le modèle, puisque Statbel en fournit le décompte à quelques pour cent près. À l'inverse, la surface de murs passe du troisième au premier rang avec 8,8 %, non parce que le modèle y répond plus fortement, mais parce que l'annexe A.1 de COZEB 3 documente une variabilité réelle de l'ordre de 15 % au sein de chaque typologie, liée à la volumétrie, à l'orientation et à la mitoyenneté.

L'enseignement est que la variable la plus influente n'est pas la plus incertaine. Un modèle très sensible à une donnée bien établie demeure plus robuste qu'un modèle modérément sensible à une donnée mal connue, et c’est ce que la confrontation des deux tableaux permet de voir.

Aucune variable ne renverse une conclusion

La variable la plus critique du modèle déplace le volume de 8,8 %, et l'ensemble des 14 coefficients de pondération typologique, pris simultanément, ne dépasse pas 10 %.

Ce constat est décisif pour la suite. Les écarts qui seront constatés entre le besoin et les capacités de production wallonnes s'expriment en facteurs allant de 1,7 à 18,6 selon les matériaux, alors qu'aucune variable prise isolément ne déplace le volume de plus d'un dixième. Une vérification complémentaire a été menée en poussant simultanément à leur limite la plus favorable aux matériaux biosourcés les 13 variables qui peuvent l'être. Cette vérification applique aux surfaces une réduction de 15 %, aux conductivités et aux coefficients de transmission existants une réduction de 10 %, au nombre de bâtiments une réduction de 2 %, et relève les coefficients cibles de 10 %, chaque perturbation étant portée à la limite de son incertitude dans le sens le plus favorable aux matériaux biosourcés. Cette configuration extrême abaisse le volume de 35 % et le porte à 41 298 513 m^3, sans qu'aucun des 6 déficits ne se referme, l'herbe restant la plus proche de l'équilibre avec un rapport de 1,12. Le déficit est donc établi indépendamment de la valeur donnée aux paramètres, et la discussion qui suit peut porter sur l'ampleur de ce déficit plutôt que sur son existence.

Le statut particulier de la part biosourcée

Comme expliqué à la section 7.10, la part biosourcée a été volontairement écartée des deux tableaux. Portée de 0 à 1, elle fait passer le volume total de 45,2 à 63,5 millions de mètres cubes, soit une amplitude de 40,4 %. Elle déplace ainsi le résultat 4,6 fois plus que la variable la plus influente du modèle, et sa réponse est quasi linéaire.

La part biosourcée n'est pas une incertitude, mais bien un choix à assumer. En effet, elle ne relève pas de la connaissance imparfaite du parc, elle relève de la décision publique, de la prescription des architectes et de la stratégie industrielle. C'est à ce titre qu'elle constitue le levier des trajectoires examinées à la section 8.3, et c'est aussi la raison pour laquelle son amplitude ne saurait figurer dans un classement d'incertitudes sans en fausser la lecture.

8.2 Ordre de grandeur du besoin et confrontation aux travaux comparables

Les ordres de grandeur du besoin estimé par le modèle doivent maintenant être validés en les confrontant aux travaux qui ont posé la même question. Pour ce faire, les chiffres produits par le modèle sont confrontés, en les ramenant à des unités communes, à ceux de trois travaux comparables, à savoir l'étude de référence ainsi que les travaux de l'ADEME et de Gourovitch, présentés en section 5. Cette confrontation poursuit deux objectifs. Elle vérifie d'abord que le modèle produit des ordres de grandeur défendables, et elle isole ensuite les écarts, dont l'explication constitue en elle-même un apport, puisqu'elle désigne précisément ce que le modèle fait différemment.

Le volume unitaire au regard de l'étude de l'ADEME

L'étude de l'ADEME consacrée à la consommation de matériaux pour la rénovation énergétique du parc résidentiel français fournit la comparaison la plus transposable, puisqu'elle isole les maisons individuelles et exprime ses résultats en volume. Ses trois scénarios quantitatifs (de continuité, volontariste et politique) aboutissent respectivement à 175,7, 293,5 et 398,6 millions de mètres cubes d'isolants, pour un nombre de maisons rénovées de 7,0, 11,7 et 16,4 millions.

Rapportées au bâtiment, ces valeurs sont remarquablement stables, soit 24,9, 25,0 et 24,4 m^3 par maison individuelle. Le modèle amélioré produit 35,0 m^3 dans la trajectoire conventionnelle et 47,8 m^3 en substitution intégrale. L'écart va donc d'un facteur de 1,4 à 1,9.

Trois raisons l'expliquent, et aucune ne relève d'une erreur. La première tient à la cible. L'ADEME vise le niveau BBC rénovation, soit une consommation globale de 80 kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré, objectif qui peut être partiellement atteint par les équipements. Le modèle amélioré impose au contraire une exigence paroi par paroi, celle de l'Optimum SRLT, qui ne tolère aucune compensation entre l'enveloppe et les systèmes. La deuxième tient au mélange de matériaux. Les volumes de l'ADEME sont dominés par la laine de verre, dont la conductivité est sensiblement inférieure à celle du mélange biosourcé wallon, et particulièrement à celle du chaux-chanvre. La troisième tient au parc lui-même, la maison individuelle française et la maison unifamiliale wallonne ne présentant ni les mêmes surfaces déperditives ni la même distribution par époque de construction.

L'enseignement est double : le modèle se situe dans le bon ordre de grandeur, puisqu'il s'en écarte d'un facteur inférieur à 2, et son écart est intégralement attribuable à des choix documentés.

La confrontation à l'étude Valbiom

L'étude de référence constitue le point de comparaison le plus exigeant, puisqu'elle porte sur le même territoire et sur la même question. La confrontation y révèle une configuration inattendue, faite d'une convergence sur les surfaces et sur les capacités de production, et d'une divergence marquée sur les volumes.

Sur les surfaces, l'accord est presque parfait. Valbiom aboutit à 5 890 000 m² de murs à isoler chaque année. Le modèle amélioré en produit 6 157 288, ce qui représente un écart de 4,5 %. Cette proximité est d'autant plus notable que les deux périmètres diffèrent, Valbiom intégrant les appartements, mais ne retenant que 66 % des bâtiments comme nécessitant une isolation des murs, là où le modèle amélioré se restreint à l'unifamilial, mais en retient 90,7 % au terme du filtrage paroi par paroi.

Sur les capacités de production, les deux enquêtes se rejoignent. Valbiom conclut que la filière wallonne peut porter rapidement sa production à 1 225 000 m³ par an, et l'enquête menée dans le cadre du présent travail aboutit à 1 225 363 m³. Cette proximité tient pour partie à ce que la capacité d'Isocell, faute de réponse, a été reprise de l'étude de référence, et elle représente à elle seule près du tiers du total. Elle tient surtout à ce que les producteurs interrogés ont confirmé les ordres de grandeur transmis trois ans plus tôt, l'un des objets de cette nouvelle enquête étant justement d'établir si les capacités avaient évolué depuis 2023. Il apparaît qu'elles n'ont pas varié sensiblement, ce qui conforte la valeur retenue sans qu'il faille y voir une confirmation entièrement indépendante.

Sur les volumes, en revanche, la divergence est nette. Valbiom estime le besoin annuel à environ 1,5 million de mètres cubes. Le modèle amélioré aboutit à près de 2,5 millions de mètres cubes pour la voie biosourcée intégrale, soit deux tiers de plus. Deux écarts méthodologiques rendent compte de cette différence. Le modèle amélioré intègre les planchers et les murs enterrés, absents de l'étude de référence, qui représentent près de 9 % du volume. De plus, il retient, au terme du filtrage typologie par typologie, une proportion de bâtiments à isoler nettement supérieure aux taux moyens issus de l'enquête qualité de 2007.

La conséquence de cette configuration constitue le résultat central de la présente section. Les deux travaux s'accordent sur ce que la Wallonie peut produire et divergent sur ce dont elle a besoin. Valbiom en conclut que la filière couvrirait environ 85 % des besoins. Le modèle reconstruit, rapportant la même capacité potentielle à un besoin réévalué, aboutit à 49,5 %. Le

désaccord ne porte donc pas sur la capacité industrielle, mais entièrement sur l'estimation de la demande, c'est à dire précisément sur ce que la section 6 a entrepris de corriger.

Les taux de couverture par matériau au regard de la thèse de Gourovitch

La thèse de Gourovitch procède par matériau plutôt que par volume global et raisonne en proportion de gestes de rénovation réalisables. Son quatrième scénario, que l'auteur nomme « réflexion inversée », contraint le besoin par la disponibilité de la ressource et constitue une analogie directe avec un scénario de rénovation examiné plus loin.

Ses résultats à l'échelle française sont les suivants. La ouate de cellulose y couvre entre 10,9 et 11,2 % des gestes nécessaires, les panneaux de chanvre 11,7 % et le béton de chanvre entre 11,5 et 19,9 %, tandis que la fibre de bois rigide atteint 95,4 % et la paille la totalité.

Deux enseignements se dégagent de cette comparaison. Le premier est que la hiérarchie des matériaux diffère radicalement selon le territoire. La paille assure en France le rôle de ressource abondante que l'herbe assure en Wallonie, tandis que la ouate de cellulose, très contrainte en France, dispose au contraire de réserve par rapport au cas wallon. La disponibilité n'est donc pas une propriété du matériau, mais de la relation entre une filière et un territoire, ce qui invalide toute transposition directe des conclusions françaises. Le second est que les taux de couverture obtenus à l'échelle nationale française, compris entre 11 et 20 % pour les matériaux contraints, sont du même ordre de grandeur que les résultats wallons présentés plus loin, ce qui confirme que le déficit constaté n'est pas une anomalie du modèle, mais une caractéristique partagée des filières biosourcées européennes.

Ce que la confrontation établit

Le modèle amélioré produit un volume unitaire inférieur au double de celui de l'ADEME, une surface de murs à isoler dont l'écart est de 4,5 % par rapport à celle de Valbiom, et des taux de couverture par matériau du même ordre que ceux de Gourovitch. Il s'inscrit donc dans le spectre des travaux comparables.

Son écart le plus significatif, celui qui le sépare de l'étude de référence sur le volume total, ne procède d'aucune divergence sur la capacité de production wallonne, sur lequel les deux enquêtes s'accordent, mais de la réévaluation de la demande issue de la section 6. C'est cette réévaluation qui fait passer le taux de couverture de la filière de 85 à 50 %, et c'est elle qui justifie l'examen des trajectoires auquel procèdent les sous-sections suivantes.

8.3 Sept trajectoires pour rénover le parc wallon

L'analyse de sensibilité a établi que la part de matériaux biosourcés ne relève pas de la connaissance imparfaite du parc, mais de la décision. Elle déplace le résultat quatre fois plus que la variable la plus influente du modèle, et rien dans les données ne permet de lui assigner une valeur juste. Il n'existe donc pas un résultat unique que le modèle produirait, mais une famille de résultats dont chacun correspond à un choix, ce qui justifie de raisonner par cas contrastés plutôt que par une valeur centrale assortie d'une marge. Ces cas sont désignés dans la suite comme des trajectoires, afin de les distinguer des scénarios de cibles thermiques introduits en section 7, ces derniers ne constituant que l'un des quatre leviers mobilisés.

Ce qui varie et ce qui demeure

Quatre leviers seulement suffisent à engendrer l'ensemble des trajectoires simulées. Le premier est la part biosourcée, qui pondère les deux voies d'approvisionnement. Le deuxième est la cible thermique, selon que l'on retienne l'Optimum SRLT ou l'exigence du standard passif. Le troisième est le rythme de rénovation, qui ne modifie pas le volume total, mais détermine la cadence à laquelle il doit être produit. Le quatrième est la répartition des volumes entre matériaux.

Tout le reste demeure fixe. Le parc unifamilial wallon compte le même nombre de bâtiments répartis en quatorze typologies, dont les surfaces déperditives, les coefficients de transmission existants et les épaisseurs requises ne varient d'aucune trajectoire à l'autre. Les capacités de production sont celles relevées auprès des producteurs wallons en 2026 et sont maintenues constantes jusqu'en 2050. Les gisements agricoles et les facteurs environnementaux sont ceux établis aux sections 7.6 et 7.8. Chaque trajectoire est donc un réglage du même outil, et les écarts constatés entre elles sont dus aux seuls leviers actionnés.

L'enchaînement des sept trajectoires retenues

Les cinq premières partagent une hypothèse commune, celle d'une répartition des matériaux conforme aux pratiques observées. Elles n’ont donc que trois paramètres qui varient, et leur succession forme un raisonnement.

La première décrit ce qui advient si rien ne change. Elle n'est pas une proposition, mais un point de départ, et elle sert de mesure à toutes les autres. La deuxième tient les échéances wallonnes, mais avec les matériaux d'aujourd'hui, ce qui en fait le cas de référence auquel chaque trajectoire

biosourcée devra être comparée. La troisième bascule intégralement vers la voie biosourcée, et révèle l'ampleur du déficit. La quatrième cherche jusqu'où la part biosourcée peut être poussée sans qu'aucun producteur ne décroche, et mesure ainsi la marge réellement disponible. La cinquième relève l'exigence thermique au standard passif, et montre qu'une ambition accrue sur l'enveloppe aggrave considérablement la contrainte sur la matière.

Ces cinq trajectoires conduisent à une impasse, dont la sixième propose la sortie. Elle débloque l'hypothèse commune aux précédentes et traite la répartition entre matériaux comme un levier, en cherchant la part biosourcée maximale compatible avec les capacités existantes et les contraintes de mise en œuvre propres à chaque paroi.

La septième procède autrement. Elle ne produit aucun volume et ne figure donc pas dans le tableau comparatif ci-après. Partant du besoin établi par les précédentes, elle renverse la question et détermine l'effort industriel qu'il faudrait fournir pour y répondre, en croissance annuelle de la filière et en délai.

Une grille de lecture commune

Chaque trajectoire est éprouvée selon les six sorties du modèle. Le volume d'isolant requis, exprimé pour l'ensemble du parc et par année. La confrontation industrielle, qui rapporte le besoin annuel de chaque matériau à la capacité de son producteur. La confrontation agricole, qui rapporte le besoin en matière première au gisement wallon mobilisable. Le calendrier, qui compare le rythme exigé par les échéances de certification à la capacité disponible. Le bilan environnemental, restreint au carbone incorporé et à l'énergie non renouvelable de production. Les déchets de mise en œuvre enfin, qui mesurent la part de matière perdue à la pose.

Les trois premières lectures accompagnent chaque trajectoire au fil de son exposé. Les trois dernières, dont la comparaison d'ensemble est plus éclairante que la répétition trajectoire par trajectoire, font l'objet des sous-sections 8.7 et 8.8, qui se veulent transversales.

Le tableau ci-après rassemble les six trajectoires productrices de volume, afin de disposer préalablement des ordres de grandeur au moment d'aborder chaque trajectoire. Les résultats de deux d'entre elles font l'objet d'une reproduction complète en annexe, la substitution intégrale à l'annexe 2 et le déplacement de la matière à l'annexe 3.

Trajectoire	Part bio	Cible	Volume total (m^3)	Volume annuel (m^3/an)	Matériaux insuffisants	Part du budget carbone	Énergie grise (TJ)	Déchets (m^3/an)
Ne rien changer	7%	SRLT	11,627,012	465,080	0 sur 7	1.02%	23,808	13,137
Accélérer sans changer de matière	7%	SRLT	46,508,046	1,860,322	1 sur 7	4.1%	95,231	52,546
Substituer intégralement	100%	SRLT	63,499,066	2,539,963	6 sur 7	3.92%	47,989	56,070
Pousser la part biosourcée à sa limite	5.4%	SRLT	46,212,074	1,848,483	0 sur 7	4.1%	96,054	52,485
Élever l'exigence thermique	100%	Passif	109,340,911	4,373,636	6 sur 7	6.46%	86,570	96,966
Déplacer la matière	61.1%	SRLT	48,125,047	1,925,002	0 sur 7	2.19%	50,129	45,785

Tableau 18 - Vue d'ensemble des six trajectoires de rénovation productrices de volume, selon leurs réglages et les six indicateurs du modèle. La première suit le rythme actuel et porte donc sur le quart du parc atteint en 2050, les cinq autres sur sa totalité. Réalisation personnelle.

8.4 La répartition figée et ce qu'elle interdit

Comme dit précédemment, les cinq trajectoires qui suivent, rassemblées dans cette sous-section, partagent l'hypothèse de ne pas s'écarter de la répartition des volumes entre matériaux conforme aux pratiques observées. Cette répartition s'est faite à partir des compatibilités techniques propres à chaque paroi et des usages courants de chaque isolant. Le bloc de chaux-chanvre n'y intervient qu'en murs, la ouate en est écartée pour l'isolation par l'extérieur, et ainsi pour les cinq autres. Cette répartition paraît anodine, puisqu'elle ne fait que traduire ce que chaque matériau permet. Elle est en réalité l'hypothèse la plus lourde de tout le système, et la succession des cinq trajectoires a précisément pour objet de le démontrer.

Avant d'entrer dans le détail, il est nécessaire de rappeler que les producteurs interrogés ont communiqué deux niveaux de capacité : celle qu'ils atteignent aujourd'hui et celle qu'ils pourraient atteindre en mobilisant leurs lignes existantes à plein régime. Les verdicts qui suivent retiennent la seconde, plus favorable à la filière. Le rappel de la première n'intervient que lorsque l'écart entre les deux devient éclairant.

Ne rien changer

Au rythme observé, proche de 1 % par an, la Wallonie aura rénové 331 849 maisons unifamiliales en 2050. Il en restera 995 547 à traiter, soit les trois quarts du parc, alors que la dernière échéance de certification sera passée depuis longtemps.

Le besoin en isolants s'établit à 11 627 012 m³ sur la période, soit 465 080 m³ par an. Aucune tension n'apparaît, aucun producteur ne décroche, et la filière biosourcée, fixée à 7 % des rénovations comme décrit en section 7.4, dispose d'une marge considérable. Ce confort n'a pourtant rien d'un succès, car il ne tient qu'à l'absence de demande. La trajectoire la plus reposante pour la production industrielle wallonne est aussi celle qui abandonne les trois quarts du parc.

Deux signaux méritent néanmoins d'être relevés, car ils annoncent la suite. Rapporté à la production effectivement réalisée aujourd'hui, le besoin en miscanthus dépasse déjà de près de 10 fois ce que le producteur wallon met sur le marché. Et le chanvre nécessaire à la fabrication des blocs de chaux-chanvre excède de 76 fois le gisement wallon mobilisable, ce qui impose d'importer 4 238 tonnes de chènevotte par an. Même en ne faisant rien, la Wallonie dépend déjà de l'étranger pour un matériau qu'elle prescrit volontiers.

Accélérer sans changer de matière

Cette trajectoire tient les échéances wallonnes en portant le rythme à 4 % par an, mais sans modifier les matériaux employés. Elle constitue la référence à laquelle toutes les suivantes doivent être comparées, puisqu'elle isole le seul effet du calendrier.

Le volume total, ne dépendant pas du rythme, ne change pas. Ce sont 46 508 046 m³ qu'il faut produire, mais désormais en 25 ans plutôt qu'en 100, soit 1 860 322 m³ par an, 4 fois davantage.

Le verdict industriel bascule aussitôt, quoique modestement. Un seul matériau décroche, le chaux-chanvre, dont le besoin excède de 30 % la capacité potentielle de son producteur. La part biosourcée n'est pourtant que de 7 %. Dit autrement, la filière est déjà en tension avant même d'avoir augmenté la part biosourcée actuelle.

Le rappel des capacités effectivement atteintes aujourd'hui donne à ce constat une tout autre portée. Rapporté à la production réelle et non au potentiel, ce sont cinq matériaux sur sept qui sont dépassés, le miscanthus par un facteur de 39, la laine de mouton et le chaux-chanvre par un facteur de 3. La marge dont dispose la filière n'existe donc que dans l'hypothèse où chaque producteur mobiliserait immédiatement toutes ses lignes de production.

Cette trajectoire porte enfin la plus lourde consommation d'énergie non renouvelable de toutes celles examinées, 95 231 térajoules, et la dépendance à la chènevotte importée s'y établit à 17 120 tonnes par an. Tenir l'échéance sans changer de matière a donc un coût, et ce coût est d'abord énergétique.

Substituer intégralement

La substitution complète des isolants conventionnels par des isolants biosourcés produit un premier résultat attendu. Le volume à mettre en œuvre augmente de plus d'un tiers, passant à 63 499 066 m³, soit 47,8 m³ par bâtiment contre 35 précédemment.

Cette inflation n'est pas un choix, mais une conséquence physique. Les isolants biosourcés conduisent davantage la chaleur que les laines minérales et les mousses synthétiques, et il en faut donc une épaisseur supérieure pour atteindre la même performance. Le chaux-chanvre, dont la conductivité s'établit à 0,09 contre 0,038 pour la ouate, en est le principal responsable, puisqu'il concentre à lui seul 31,4 % du volume total tout en n'intervenant que dans les murs.

Le verdict industriel devient sans appel. Six matériaux sur sept sont hors d'atteinte, et les écarts s'échelonnent du simple au décuple entre eux. Le chaux-chanvre exigerait 18,5 fois la capacité

potentielle wallonne, le miscanthus plus de 9 fois, le textile et la fibre de bois plus de 6 fois, la laine de mouton 5 fois. L'herbe, la moins éloignée, dépasse toutefois sa capacité de 1,73 fois. Seule la ouate de cellulose échappe au constat, avec un besoin qui n'absorbe que la moitié de la capacité disponible.

Cette dispersion est le fait le plus instructif de la trajectoire, davantage que le déficit lui-même. Elle signifie que la filière wallonne n'est pas uniformément insuffisante, mais qu'elle est sollicitée très inégalement par la répartition en vigueur. Rapportée à l'ensemble, la production potentielle couvrirait 49,5 % du besoin, alors qu'un seul matériau en réclame 18 fois trop et qu'un autre dispose du double de ce qu'on lui demande.

La contrainte agricole se referme au même moment. Le chanvre nécessaire dépasse de plus de 4 000 fois le gisement wallon, ce qui suppose d'importer 245 317 tonnes de chènevotte chaque année, et le miscanthus manque d'un facteur de 10. L'herbe seule demeure abondante.

Pousser la part biosourcée à sa limite

Puisque la substitution intégrale est hors de portée, la question devient celle du maximum atteignable. En cherchant la part biosourcée la plus élevée pour laquelle aucun producteur ne décroche, on obtient 5,38 %. Ce chiffre appelle une lecture attentive, car il est inférieur à la part biosourcée actuelle, estimée à 7 %. Il ne signifie pas que cette part serait aujourd'hui insoutenable, puisque la première trajectoire montrait au contraire une filière confortable. Il signifie qu'elle le devient dès que le rythme de rénovation quadruple pour tenir les échéances. À part inchangée, accélérer revient à demander chaque année quatre fois plus de matière, et le chaux-chanvre franchit son plafond bien avant que le parc ne soit traité. La Wallonie ne peut donc pas conserver sa part biosourcée actuelle tout en respectant son propre calendrier, elle devrait la réduire de près d'un quart.

Cette part biosourcée à 5,4 % est le chiffre le plus sévère du travail, et il appelle deux commentaires.

Le premier tient à ce qui le détermine. Cette limite n'est pas fixée par la filière dans son ensemble, mais par un seul matériau. La part biosourcée s'arrête exactement là où le chaux-chanvre atteint sa capacité, tandis que la ouate n'utilise encore que le vingtième de la sienne. Une répartition figée impose en effet à tous les matériaux de croître ensemble, si bien que le plus rare commande le rythme de tous les autres.

Le second tient à la similitude de cette trajectoire avec la voie conventionnelle. Elle en est en effet le jumeau presque exact, avec 46 212 074 m³ et 34,8 m³ par bâtiment, et elle ne se distingue en rien de significatif, ni en volume, ni en énergie grise, ni en déchets. La part biosourcée réellement soutenable, à répartition inchangée, ne modifie donc pratiquement pas la trajectoire qu'elle prétend dévier.

De plus, même à ce niveau, le chanvre reste en déficit d'un facteur de 234 et réclame encore 13 145 tonnes d'importation annuelle. La part dite soutenable ne l'est qu'à la condition d'importer la matière première du matériau qui la borne.

Élever l'exigence thermique

Il reste à énoncer l'hypothèse inverse, celle où l'ambition thermique serait relevée du niveau Optimum SRLT à celui du standard passif, la substitution vers la voie biosourcée demeurant intégrale.

Le volume s'établit alors à 109 340 911 m³, soit 82,4 m³ par bâtiment et 72 % de plus que la trajectoire précédente. Cette progression illustre une propriété du modèle établie à la section 8.1, tout renforcement de la cible coûte davantage en matière qu'un assouplissement équivalent n'en économise.

Le nombre de matériaux en tension ne varie pas, mais leur situation se dégrade partout. Le chaux-chanvre passe d'un facteur de 18,5 à 27, l'herbe cesse d'être à portée, et la ouate elle-même, qui conservait une marge confortable, dépasse désormais ce que ses deux producteurs mettent effectivement sur le marché. La chènevotte importée atteint 359 113 tonnes par an.

Le résultat environnemental s’inscrit dans la continuité de ces résultats. Cette trajectoire consomme 6,46 % du budget carbone résidentiel wallon, contre 3,92 pour la substitution intégrale au niveau SRLT, et sa consommation d'énergie non renouvelable remonte à 86 570 térajoules, effaçant l'essentiel du bénéfice attendu du recours aux biosourcés.

Élever la cible thermique ne desserre aucune contrainte, cela les resserre toutes. Le nombre de matériaux hors d'atteinte demeure identique, tandis que les écarts se creusent et que la dépendance à la matière importée croît de moitié. Une trajectoire visant le standard passif appliquée à l'ensemble du parc unifamilial se heurte donc à une impossibilité industrielle, indépendamment de ses mérites thermiques.

Ces mérites, le modèle ne les évalue pas. Son périmètre s'arrêtant à la production des isolants, il mesure une dépense de matière sans lui opposer l'énergie que la rénovation permet d'économiser. Savoir si le surcroît d'épaisseur exigé par le standard passif est compensé par les économies d'usage relève d'une mise en balance que le rapport de Delem conduit sur le parc flamand et que la section 9 reprend au titre des limites du présent travail. Ce qui est établi ici est plus restreint, le standard passif ne peut constituer une trajectoire de rénovation massive en matériaux biosourcés, faute d'une industrie capable de la soutenir.

Le constat commun aux cinq trajectoires

Prises ensemble, ces cinq trajectoires dessinent une impasse. Ne rien changer abandonne les trois quarts du parc. Tenir l'échéance au conventionnel maximise la dépense énergétique. Substituer intégralement place six matériaux sur sept hors d'atteinte. Se limiter à ce que la filière peut fournir revient à ne presque rien changer. Élever l'exigence thermique aggrave chacune de ces difficultés.

Cette impasse n'est pourtant pas celle de la ressource. Le fait le plus significatif des cinq trajectoires est ailleurs, et il se dissimule dans la répartition figée des isolants aux différentes parois. Au moment même où le chaux-chanvre réclame 18 fois la capacité disponible, la ouate n'en utilise que la moitié. La matière ne manque pas partout, elle manque là où la répartition la concentre.

C'est cette observation qui justifie de lever l'hypothèse commune aux cinq trajectoires et de traiter la répartition non plus comme une donnée, mais comme le levier qu'elle constitue.

8.5 Déplacer la matière plutôt que l'accroître

Les cinq trajectoires précédentes ont donc buté sur un même obstacle, la rareté du chaux-chanvre, en laissant inutilisée la moitié de la capacité de production de ouate. Cette configuration ne découle pas d'une contrainte physique, mais bien de la répartition des volumes entre matériaux.

Ces grilles de répartition ont été construites à partir des compatibilités entre matériaux et parois et des usages courants de chaque isolant, sans qu'aucun relevé n'atteste de la mise en œuvre réelle. Elles constituent donc une hypothèse plausible, non une observation sourcée. La question posée cesse d'être celle de la quantité disponible pour devenir celle de sa destination. Non plus combien la Wallonie peut produire, mais où elle place ce qu'elle produit.

Ce que chaque paroi autorise

Le déplacement ne peut s'opérer librement, car les contraintes de mise en œuvre propres à chaque paroi limitent les matériaux que l'architecte peut y employer.

Les toitures et les planchers admettent la plupart des isolants biosourcés, à l'exception du chaux-chanvre. L'isolation des murs par l'intérieur les admet tous, sept matériaux y étant compatibles. L'isolation par l'extérieur est en revanche la plus fermée, puisqu'elle exclut la mise en œuvre d'isolants en vrac, insufflés ou soufflés, ainsi que les matelas souples. Trois matériaux seulement y demeurent, le chaux-chanvre, l'herbe et le textile de coton recyclé.

Cette asymétrie commande tout. Le chaux-chanvre se répartit presque également entre les deux systèmes d'isolation des murs, 10 268 178 m³ par l'intérieur et 9 700 377 m³ par l'extérieur. La première moitié peut être redistribuée sans difficulté, six matériaux étant disponibles pour l'accueillir. La seconde ne dispose que de deux substituts, l'herbe et le textile de coton recyclé, dont ce dernier plafonne à 35 000 m³ par an.

La part atteignable

La recherche de ce maximum se base donc sur la paroi la plus contraignante : l'isolation des murs par l'extérieur, qui n'accepte que trois isolants biosourcés, là où les toitures, les planchers et l'isolation par l'intérieur en admettent cinq ou davantage.

Le raisonnement consiste à demander à chacun de ces trois matériaux quelle part de cette paroi il serait capable de couvrir à lui seul, compte tenu de ce que son producteur peut fournir et de

l'épaisseur que sa conductivité impose. L'herbe en couvrirait près de la moitié, le textile un dixième, le chaux-chanvre un vingtième. La somme de ces trois parts, soit 61,1 %, est la proportion de l'isolation de murs par l'extérieur que la filière wallonne est en mesure d'assurer, et constitue par conséquent la part biosourcée maximale pour l'ensemble du parc.

Il reste à s'assurer que les autres parois absorbent ce que cette part leur destine, ce qu'elles font, la seule marge disponible se logeant dans la ouate de cellulose. Les proportions retenues sont identiques pour les trois familles au sein de chaque paroi, ce qui écarte les combinaisons arbitraires que la seule contrainte de capacité aurait autorisées. Les parts ainsi obtenues ont été réintroduites dans les répartitions du modèle, qui en restitue toutes les conséquences. Cette répartition révisée est reproduite à l'annexe 1, en regard de la répartition initiale à laquelle elle se substitue.

La part biosourcée atteignable s'établit donc à 61 %, contre 5,4 % lorsque la répartition demeure figée. Elle est 11 fois plus grande, et ce sans qu'aucune ligne de production nouvelle ne soit construite. Elle désigne la proportion des rénovations conduites en biosourcé, et non celle du volume d'isolant qui en résulte.

Le chaux-chanvre ne conserve plus que 2,2 % du volume total contre 31,4 % auparavant, cantonné à l'isolation par l'extérieur où il demeure difficilement remplaçable. Mais la redistribution ne fait pas que soulager les matériaux rares, elle réduit aussi le volume à mettre en œuvre, qui passe de 63 499 066 à 48 124 823 m^3, soit 36,3 m^3 par bâtiment au lieu de 47,8. Déplacer la matière vers les isolants les moins conducteurs diminue en effet l'épaisseur nécessaire. La ouate de cellulose, dont la conductivité s'établit à 0,038 contre 0,09 pour le chaux-chanvre, en devient le matériau dominant avec 41,3 % du volume total et les deux tiers du volume biosourcé.

Un bilan environnemental positif par rapport à la substitution intégrale

Le résultat le plus frappant de cette trajectoire ne tient pas à la part atteinte, mais à ce qu'elle produit.

Une trajectoire rénovant 61 % du parc en matériaux biosourcés consomme 2,19 % du budget carbone résidentiel wallon, contre 3,92 % pour la substitution intégrale et 4,1 % pour la trajectoire conventionnelle. Sa consommation d'énergie non renouvelable s'établit à 50 129 térajoules, à peine au-dessus des 47 989 de la substitution intégrale alors qu'elle n'emploie des matériaux biosourcés que dans 61 % des rénovations. Ses déchets de mise en œuvre s'élèvent à

45 785 m³ par an, le niveau le plus bas de toutes les trajectoires tenant les échéances. La feuille de résultats complète de cette trajectoire est reproduite à l'annexe 3.

Autrement dit, un parc rénové à 61 % en biosourcé selon une répartition révisée l'emporte sur un parc rénové à quasiment 100 % selon la répartition initiale, et cela simultanément sur le volume, sur le carbone, sur les déchets et sur la faisabilité industrielle. La performance environnementale d'une trajectoire ne se mesure donc pas à la proportion de matériaux biosourcés qu'elle emploie, mais à la pertinence de leur affectation.

Ce que le déplacement ne résout pas

Trois difficultés subsistent, que la redistribution laisse entières.

La première tient au calendrier. Les échéances de certification demeurent hors d'atteinte sur la période 2025 à 2031, où le rythme exigé dépasse d'un peu plus de 10 % la capacité biosourcée disponible, avant de repasser sous ce seuil pour les quatre périodes suivantes. La contrainte n'est donc pas celle du calendrier dans son ensemble, mais celle de son entrée en vigueur, la première échéance concentrant l'essentiel de l'effort. Déplacer la matière résout le problème de la ressource, non celui de la cadence initiale, et c'est ce qui appelle la trajectoire suivante.

La deuxième tient à l'agriculture. Le chanvre demeure en déficit d'un facteur de 234 et réclame encore 13 153 tonnes de chènevotte importée chaque année, car les volumes de chaux-chanvre conservés en isolation par l'extérieur reposent intégralement sur une matière première étrangère. Le miscanthus, quant à lui, franchit tout juste le seuil du déficit.

La troisième difficulté est la plus sérieuse, car la solution ne laisse aucune marge de sécurité : six matériaux sur sept sont sollicités à 100 % de leur capacité potentielle, la ouate à 95 %. Une trajectoire dont chaque maillon fonctionne à saturation est une trajectoire sans résilience, où la défaillance d'un seul producteur compromet l'ensemble.

Ce que ce chiffre suppose

Aux limites du résultat s'ajoutent deux conditions qui pèsent sur son interprétation.

La répartition qui l'obtient est une construction et non une pratique. Elle porte la ouate à la quasi-totalité de l'isolation des murs par l'intérieur des typologies anciennes et à l'essentiel des toitures, ce qui est techniquement admissible puisque l'insufflation en contre-cloison et en caissons de toiture est courante. Cela prolonge par ailleurs une position déjà acquise, ce matériau représentant environ un cinquième du marché de l'isolation des combles perdus (Trachte & Stiernon, 2025a). Elle suppose néanmoins une déviation considérable des habitudes de mise en œuvre. De plus, le chiffre de 61 % est une borne supérieure, non une prévision. Il suppose que la redistribution s'opère sans friction et que la mise en œuvre la suive, deux conditions qui relèvent de la décision publique et professionnelle bien plus que de la capacité industrielle.

Le déplacement de la contrainte

Aucune de ces limites n'affaiblit le constat, elles en précisent seulement l'objet. Ce que cette trajectoire établit n'est pas que la Wallonie rénovera 61 % de son parc en matériaux biosourcés, mais que la conclusion sévère des trajectoires précédentes reposait entièrement sur une hypothèse que rien ne documente. Le déficit constaté n'est pas d'abord celui de la ressource, il est celui de son affectation.

8.6 Construire la filière

Les six trajectoires précédentes ont toutes procédé de la même manière, en confrontant un besoin calculé à une capacité maintenue comme donnée. Elles disent donc ce que la filière ne peut pas fournir, jamais ce qu'il faudrait bâtir pour qu'elle le puisse.

La dernière trajectoire inverse donc la démarche. Le besoin devient la donnée, la capacité l'inconnue, et le résultat s'exprime non plus en déficit, mais en effort, c'est-à-dire en croissance annuelle de la filière industrielle et en délai pour l'obtenir. Elle ne produit aucun volume propre et ne figure pas au tableau comparatif, puisqu'elle se greffe sur les trajectoires qui la précèdent.

Ce que la production wallonne permet

Cette inversion appelle d'abord une conversion. Les trajectoires expriment un besoin en mètres cubes par an, tandis que les objectifs wallons s'énoncent en proportion du parc rénové chaque année. Passer de l'un à l'autre suppose de rapporter le besoin annuel d'une trajectoire à la capacité de production disponible, puis de traduire le rapport obtenu en durée.

L'opération tient en trois temps. Le besoin annuel en isolants biosourcés est d'abord établi sur l'horizon de référence de 25 ans. Il est ensuite rapporté à la capacité disponible, ce qui donne le facteur dont la durée doit être allongée pour que la filière suive. Le rythme annuel s'obtient enfin en divisant l'unité par cette durée. Le volume retenu est celui des seuls matériaux biosourcés, à l'exclusion du polyuréthane, qui appartient à la voie biosourcée à titre de recours, mais ne sollicite aucun producteur wallon. Il représente 97,6 % du volume dans la substitution intégrale et 61,5 % dans la redistribution.

Appliquée à la substitution intégrale, cette conversion donne un résultat sévère. La trajectoire réclame 2 477 725 m³ par an sur 25 ans, quand la capacité potentielle wallonne s'établit à 1 225 363. La durée s'allonge donc à 50,6 ans et le rythme atteignable tombe à 1,98 % par an, ce qui reporterait l'achèvement du parc au-delà de 2075.

Appliquée à la redistribution, elle donne l'inverse. La trajectoire ne réclame plus que 1 183 558 m³ par an, soit un peu moins que la capacité disponible. La durée s'établit à 24,1 ans et le rythme atteignable à 4,14 % par an, niveau qui satisfait les échéances de certification.

Une même capacité de production autorise donc un rythme de rénovation deux fois plus élevé selon la destination donnée à la matière. Rapportée en revanche aux capacités effectivement

atteintes aujourd'hui, la redistribution retombe à 1,9 % par an, ce qui situe précisément l'enjeu de la montée en production examinée ci-après.

Un effort d'ensemble plus modeste qu'attendu

La trajectoire de redistribution appelle 1 183 558 m³ d'isolants biosourcés par an. Les huit producteurs recensés en mettent aujourd'hui 561 765 sur le marché. L'écart représente 621 793 m³ annuels, soit un doublement de la production wallonne.

Rapporté à l'horizon considéré, ce doublement correspond à une croissance de 3 % par an pendant 25 ans, un rythme modéré au regard des facteurs de 18 rencontrés dans les trajectoires à répartition figée. Une filière industrielle qui croît de 3 % par an ne connaît pas une expansion remarquable, elle suit simplement son marché.

Une seconde observation en atténue encore la portée. Ce besoin représente 96,6 % de la capacité que les producteurs déclarent pouvoir atteindre à équipement constant, en portant leurs lignes existantes à plein régime. L'effort principal ne consiste donc pas à bâtir des unités nouvelles, mais à faire fonctionner celles qui existent. La différence est considérable en termes d'investissement, de délai et de risque.

Pousser jusqu'à la substitution intégrale, toujours avec une répartition redistribuée, exigerait en revanche de porter les capacités à 2 004 694 m³ par an, soit 1,64 fois le potentiel actuellement déclaré et 3,6 fois la production effective. La croissance annuelle requise passe alors à 5,2 %, ce qui demeure atteignable, mais suppose cette fois de plus grands investissements de capacité.

Ces ordres de grandeur trouvent un appui dans les travaux français. Gourovitch construit trois scénarios de production à l'horizon 2050, dont le plus volontariste suppose une politique active de valorisation des coproduits agricoles et forestiers engagée dès 2035, et retient un facteur de 2 pour les produits du chanvre et un facteur de 3 pour la ouate et la fibre de bois (Gourovitch, 2025). L'effort que la présente trajectoire exige de la filière wallonne se situe donc dans le même intervalle. Le même travail montre par ailleurs qu'un scénario de diminution de la production sous l'effet du climat resterait de l'ordre de 7 % d'ici 2050, ce qui demeure marginal au regard des écarts examinés ici et conforte l'hypothèse de capacités maintenues constantes. Ce sont donc bien les décisions publiques, et non les aléas de la ressource, qui commandent le niveau de production atteignable.

Un effort très inégalement réparti

Ce chiffre d'ensemble, rassurant en apparence, masque une dispersion considérable, et c'est elle qui doit guider l'action publique.

La ouate de cellulose, qui porte pourtant les deux tiers du volume biosourcé, ne demande qu'un facteur de 1,7 et une croissance de 2 % par an. Le chaux-chanvre, dont les trajectoires précédentes faisaient le blocage du système, n'en réclame plus que 2,5 une fois cantonné à l'isolation par l'extérieur. Le textile de coton recyclé et la fibre de bois se situent entre 3,5 et 4, la laine de mouton à 10. Le miscanthus se détache absolument. Son unique producteur wallon met 250 m^3 par an sur le marché quand la trajectoire en réclame 15 000, soit un facteur de 60, ce qui suppose une croissance annuelle de 18 % maintenue pendant 25 ans. Ce cas n'est pas celui d'une filière à développer, mais d'une filière à créer.

Cette dispersion est la traduction industrielle de ce que la trajectoire précédente avait établi sur la matière. Un plan de soutien uniforme, calibré sur le chiffre d'ensemble de 3 %, laisserait quatre matériaux en dessous de ce que la trajectoire exige. L'effort doit être différencié, et il l'est d'autant plus qu'il porte sur des filières de tailles très inégales, la production de miscanthus wallonne représentant aujourd'hui le vingtième de celle de laine de mouton et le deux millième de celle de ouate.

Le calendrier plutôt que la capacité

En confrontant cet effort au temps disponible, c'est là que la difficulté apparaît. Les échéances wallonnes ne répartissent pas l'effort uniformément. La période 2025 à 2031, qui doit conduire l'ensemble du parc au label F, concentre la part la plus lourde du programme, et le rythme qu'elle impose atteint 1,13 fois la capacité biosourcée potentielle. Les quatre périodes suivantes redescendent entre 0,82 et 0,96, donc sous le seuil.

L'effort exigé sur cette première période, rapporté à la production effective d'aujourd'hui, représente une croissance de 16 % par an pendant six ans. Le contraste avec les 3 % calculés sur 25 ans est remarquable, et il tient entièrement à la structure du calendrier réglementaire.

C'est le résultat principal de cette trajectoire. La filière wallonne n'est pas confrontée à un problème de capacité, mais à un problème de délai. Ce qu'elle devrait produire en 2050 est à sa portée, ce qu'elle devrait produire dès 2031 ne l'est pas. Toute politique de soutien à la production d'isolants biosourcés qui raisonnerait à l'horizon 2050 manquerait donc l'obstacle, puisque celui-ci se présente dans les six premières années du calendrier.

8.7 L'emprise sur le sol wallon

Les trajectoires précédentes ont exprimé la contrainte agricole sous forme de rapports : un facteur de 4 000 pour le chanvre, un facteur de 10 pour le miscanthus. Ces nombres disent l'ampleur de l'écart, mais ne disent rien de ce qu'il représente pour le territoire. Les convertir en hectares donne à la contrainte une réalité que les résultats ne portaient pas jusqu'ici.

Le besoin annuel en matière première, exprimé en tonnes, est divisé par le rendement de la culture et par le taux de disponibilité de la ressource, soit 4 500 kilogrammes par hectare pour le chanvre, 16 000 pour le miscanthus et 10 000 pour l'herbe, affectés d'une disponibilité de 37 %. La surface obtenue est celle qu'il faudrait consacrer chaque année à ces cultures pour alimenter la trajectoire.

Trajectoire	Chanvre (ha)	Miscanthus (ha)	Herbe (ha)	Total (ha)	Part de la SAU
Ne rien changer	2,579	58	55	2,692	0.4%
Accélérer sans changer de matière	10,316	232	220	10,768	1.5%
Substituer intégralement	147,372	3,309	3,146	153,827	21%
Pousser la part biosourcée à sa limite	7,929	178	169	8,276	1.1%
Élever l'exigence thermique	215,717	4,763	5,205	225,685	30.8%
Déplacer la matière	7,934	356	1,816	10,106	1.4%

Tableau 19 - Surfaces agricoles annuelles nécessaires à l'alimentation de chaque trajectoire, en hectares, et part qu'elles représentent dans la superficie agricole utilisée wallonne. Réalisation personnelle.

Une contrainte entièrement portée par le chanvre

La superficie agricole utilisée (SAU) wallonne s'établit à 733 907 hectares en 2023, après un recul de 2,5 % depuis 1990 (État de l'environnement wallon, 2025). Rapportées à cette référence, les trajectoires se répartissent en deux groupes bien distincts.

Quatre d'entre elles demeurent sous le seuil de 2 %. La substitution intégrale et la trajectoire visant le standard passif en réclament respectivement 21 et 31 %, c'est-à-dire entre le cinquième et le tiers de toute la terre agricole wallonne, mobilisée chaque année pour produire des isolants.

Le chanvre porte à lui seul l'essentiel de cette emprise, 95 % dans la substitution intégrale. Les 34 hectares aujourd'hui cultivés en Wallonie devraient passer à 147 372, soit une multiplication par plus de 4 000. Aucune considération de rendement ou de politique agricole ne rend cette progression envisageable à l'horizon 2050, ce qui explique que l'importation de chènevotte atteigne 245 317 tonnes annuelles dans cette trajectoire.

Ce que le déplacement de la matière change au territoire

La trajectoire de redistribution ramène l'emprise à 10 106 hectares, soit 1,4 % de la superficie agricole wallonne et 15 fois moins que la substitution intégrale.

Ce résultat mérite d'être souligné, car il n'était pas recherché. La redistribution avait été construite pour desserrer la contrainte industrielle, en affectant la matière là où les capacités existent. Elle produit accessoirement un effet territorial considérable, en cantonnant le chaux-chanvre à l'isolation par l'extérieur et en réduisant du même coup la demande de chènevotte de 95 %.

L'importation subsiste néanmoins, à hauteur de 13 153 tonnes par an, car les 7 934 hectares encore nécessaires demeurent hors de portée d'une culture qui en occupe 34. La Wallonie continuerait donc de dépendre de l'étranger pour la matière première du seul isolant qu'elle ne peut remplacer en isolation par l'extérieur.

L'herbe, une question d'usage plutôt que de surface

Le cas de l'herbe se distingue de tous les autres et appelle une lecture différente.

Les 1 816 hectares que la redistribution lui assigne ne sont pas une emprise nouvelle. Ils sont prélevés sur les 311 287 hectares de prairies wallonnes déjà exploitées, dont ils représentent moins de 0,6 %. Aucune terre n'est convertie, aucune culture n'est déplacée, seule la destination d'une fraction de la récolte change.

La question n'est donc pas celle de la disponibilité territoriale, mais celle de la concurrence d'usage, puisque cette herbe est aujourd'hui destinée à l'alimentation animale. Le modèle traite cette concurrence par un taux de disponibilité de 37 %, valeur que Palumbo établit pour les céréales et les cultures industrielles et qui convient au chanvre. Appliquée à une ressource fourragère, elle constitue une simplification que la section 9 reprend au titre des limites, la disponibilité réelle de l'herbe pouvant se révéler nettement inférieure.

Le miscanthus, une contrainte qui n'est pas territoriale

Le miscanthus illustre une situation où la terre n'est pas l'obstacle. La redistribution en réclame 356 hectares, contre 313 aujourd'hui cultivés en Wallonie (Suray, 2025), soit un écart que la culture pourrait combler. Cette proximité est cependant trompeuse, car elle suppose que la totalité de la récolte soit destinée à l'isolation. Or le producteur wallon transforme aujourd'hui 2 500 mètres cubes par an, dont un dixième seulement prend la forme d'isolant, le reste alimentant d'autres usages. Les 250 mètres cubes qui parviennent effectivement au marché de l'isolation représentent ainsi le soixantième de ce que la trajectoire réclame, alors même que les surfaces cultivées en fournissent déjà la quasi-totalité.

Ce n'est donc ni la culture ni la surface qui font défaut, mais la destination de la récolte et la capacité à la transformer. Le miscanthus est le seul matériau du modèle dont la contrainte se situe entièrement entre le champ et l'usine, ce qui le distingue du chanvre, dont la ressource manque au champ, comme de la ouate, dont la ressource et l'industrie suffisent l'une et l'autre.

Une réserve sur la comparaison

Une précision s'impose sur le terme de cette comparaison. La superficie agricole utilisée comprend les prairies permanentes, qui couvrent 306 549 hectares (État de l'environnement wallon, 2025), soit 41,8 % du total, et qui ne sauraient accueillir une culture annuelle comme le chanvre. Les surfaces disponibles pour une telle culture se limitent donc à 427 000 hectares, dont la substitution intégrale mobiliserait plus du tiers et la trajectoire passif la moitié. À titre de comparaison, le froment d'hiver, première culture wallonne après les prairies permanentes, couvre 131 256 hectares. La substitution intégrale exigerait donc une surface de chanvre supérieure à l'ensemble des surfaces wallonnes cultivées en froment.

Ce que la lecture territoriale établit

Le sol wallon n'est pas sollicité graduellement. Rapportées aux terres susceptibles d'accueillir ces cultures, les trajectoires se répartissent en deux régimes que rien ne relie. Quatre d'entre elles en occupent de 0,6 à 2,5 %, les deux autres le tiers et jusqu'à la moitié, sans qu'aucune situation intermédiaire n'apparaisse. Ce qui sépare ces deux régimes n'est ni l'ambition thermique retenue ni la proportion de matériaux biosourcés employés, mais la seule place accordée au chaux-chanvre, qui porte 95 % de l'emprise agricole des trajectoires biosourcées. La contrainte territoriale se ramène donc à un unique matériau, et plus précisément à la paroi sur laquelle on choisit de l'employer.

8.8 Le bilan environnemental des trajectoires

Le module développé à la section 7.8 restreint volontairement son périmètre à la production des isolants, soit les modules A1 à A3 de la norme, et à deux indicateurs, le carbone fossile incorporé et l'énergie primaire non renouvelable. Il y ajoute la masse mobilisée, rapportée à la consommation intérieure de matières wallonne, et les chutes de pose. Ce qui suit ne mesure donc ni le bénéfice thermique de la rénovation ni les impacts de l'entretien ou de la fin de vie.

Trajectoire	Carbone (t CO_2 éq.)	Part du budget	Énergie (TJ)	Masse (t)	Part de la DMC	Chutes (m^3/an)	Taux de chute moyens
Ne rien changer	1,152,335	1.02%	23,808	435,672	0.04%	13,137	2.82%
Accélérer sans changer de matière	4,609,339	4.10%	95,231	1,742,688	0.15%	52,546	2.82%
Substituer intégralement	4,415,547	3.92%	47,989	8,570,497	0.76%	56,070	2.21%
Pousser la part biosourcée à sa limite	4,612,715	4.10%	96,054	1,623,752	0.14%	52,485	2.84%
Élever l'exigence thermique	7,263,761	6.46%	86,570	13,252,549	1.18%	96,966	2.22%
Déplacer la matière	2,458,791	2.19%	50,129	2,320,793	0.21%	45,785	2.38%

Tableau 20 - Bilan environnemental des six trajectoires, restreint à la production des isolants. Réalisation personnelle.

Deux indicateurs, deux verdicts

Le premier enseignement tient à ce que les deux indicateurs principaux ne classent pas les trajectoires dans le même ordre.

L'énergie non renouvelable se comporte comme attendu. Elle chute de moitié entre la trajectoire conventionnelle et la substitution intégrale, de 95 231 à 47 989 térajoules. C'est l'argument habituellement avancé en faveur des matériaux biosourcés, et le modèle le confirme sans réserve.

Le carbone ne suit pas. Substituer intégralement ne le réduit que de 4 %, de 4 609 339 à 4 415 547 tonnes, et la part du budget résidentiel wallon passe seulement de 4,10 à 3,92 %. Sur cet indicateur, remplacer tous les isolants conventionnels du parc par des isolants biosourcés ne change presque rien.

Ce résultat appelle une lecture attentive, car il tient pour partie au choix de l'indicateur. Comme l'expose la section 7.8, le carbone biogénique n'est pas décompté, parti pris qui prive

délibérément les matériaux biosourcés d'un avantage que d'autres travaux leur reconnaissent, Gourovitch obtenant des émissions négatives pour ses scénarios entièrement biosourcés. Ce que le modèle établit est donc plus restreint, mais aussi plus exigeant. Sur le seul carbone d'origine fossile, la substitution ne procure presque aucun gain, et le bénéfice attendu n'est pas une propriété de la catégorie, mais dépend de quels matériaux la composent.

Un matériau porte les quatre cinquièmes du carbone

Dans la substitution intégrale, le chaux-chanvre produit 3 450 566 tonnes de CO_2 équivalent, soit 78,1 % du total, alors qu'il ne représente que 31,4 % du volume. Il porte également 52,9 % de l'énergie non renouvelable.

Trois propriétés se conjuguent. La cuisson de la chaux libère du carbone fossile. La densité du matériau atteint 320 kilogrammes par mètre cube, contre 30 à 40 pour les isolants en vrac. Et sa conductivité de 0,09 impose une épaisseur près de 2,5 fois supérieure à celle de la ouate pour une même performance. Ce constat se retrouve dans les travaux de Trachte et Stiernon, qui identifient le chaux-chanvre parmi les isolants dont l'impact sur le réchauffement climatique est le plus élevé, et l'attribuent à la présence de chaux ainsi qu'à une masse volumique supérieure à celle des matériaux conventionnels, laquelle exige davantage de matière pour une même performance (Trachte & Stiernon, 2025a). Établi sur un mètre carré de paroi et à partir de déclarations environnementales, ce résultat rejoint celui que le modèle produit à l'échelle du parc.

Le gain obtenu sur les six autres matériaux biosourcés se trouve donc annulé par ce seul facteur. La trajectoire visant le standard passif le confirme, où le chaux-chanvre porte encore 69,5 % d'un carbone atteignant 6,46 % du budget résidentiel, ce qui en fait la trajectoire la plus émettrice de toutes.

Le déplacement de la matière au regard des quatre indicateurs

La redistribution produit le bilan carbone le plus favorable de toutes les trajectoires tenant les échéances. Il s'établit à 2 458 791 tonnes, soit 2,19 % du budget résidentiel, contre 3,92 pour la substitution intégrale et 4,10 pour la trajectoire conventionnelle. Une trajectoire employant des matériaux biosourcés pour 61 % du parc, avec des répartitions révisées, émet ainsi 44 % de carbone de moins qu'une trajectoire qui y recourt intégralement.

Ce résultat provient presque entièrement du seul chaux-chanvre, dont les émissions tombent de 3 450 566 à 185 760 tonnes une fois le matériau cantonné à l'isolation par l'extérieur. Ce gain excède largement le retour des isolants conventionnels dans les 39 % du parc que la trajectoire ne rénove pas en biosourcé.

Sur les autres indicateurs, l'avantage n'est pas acquis. L'énergie non renouvelable, à 50 129 térajoules, demeure supérieure de 4 % à celle de la substitution intégrale, écart qui constitue le prix de la part conventionnelle maintenue. La masse, à 2 320 793 tonnes, se situe au-dessus de celle des trajectoires largement conventionnelles, les laines minérales étant plus légères que la moyenne des isolants biosourcés. Elle représente néanmoins le quart de celle de la substitution intégrale et ne mobilise que 0,21 % de la consommation intérieure de matières wallonne.

Aucune trajectoire ne domine donc l'ensemble des indicateurs, ce qui constitue en soi un résultat. La redistribution l'emporte nettement sur le carbone et sur les chutes, cède marginalement sur l'énergie, et se situe en position intermédiaire sur la masse.

Les chutes de pose, une propriété du matériau

Le dernier indicateur produit un résultat contre-intuitif : le taux de chute baisse lorsque le volume augmente. La substitution intégrale mobilise 36 % de matière de plus que la trajectoire conventionnelle, mais en perd une part moindre à la pose, 2,21 contre 2,82 %.

L'explication tient aux matériaux de synthèse. Le polyuréthane et les deux polystyrènes portent le taux de chute le plus élevé, 5 %, et représentent à eux trois près de la moitié des chutes de la trajectoire conventionnelle pour un peu plus du quart de son volume. Les isolants biosourcés se situent entre 1 et 3 %, la fibre de bois descendant à 1 %, à l'exception de la laine de mouton qui atteint elle aussi 5 %.

La redistribution produit en valeur absolue le volume de chutes le plus faible de toutes les trajectoires tenant les échéances, 45 785 mètres cubes par an, sans pour autant afficher le taux de chute moyen le plus bas. Elle combine en effet un volume total modéré et une part importante de matériaux en vrac, la ouate portant à elle seule plus du tiers de ses chutes du fait de son poids dans le mélange.

Une réserve accompagne ces chiffres. Le taux retenu pour le miscanthus repose sur une hypothèse et non sur une déclaration environnementale, faute de fiche disponible pour ce matériau. Son poids dans le résultat demeure toutefois marginal.

Ce qui subsiste dans la meilleure trajectoire

Le détail du bilan de la redistribution révèle un déplacement du problème qui mérite attention. Les isolants conventionnels y totalisent 81,1 % du carbone, la laine de roche en portant à elle seule 30,2 %, alors qu'ils ne représentent que 38,5 % du volume. Le chaux-chanvre n'y figure plus qu'en cinquième position, avec 7,6 %.

Une fois la matière biosourcée correctement affectée, le carbone résiduel provient donc très majoritairement de la part conventionnelle. Le gain suivant ne se trouve plus dans l'optimisation de l'affectation des biosourcés, mais dans la réduction de cette part conventionnelle, laquelle suppose des capacités de production dont la Wallonie ne dispose pas encore. La lecture environnementale renvoie ainsi à la trajectoire de montée en capacité, et confirme que l'effort industriel qu'elle décrit porterait un bénéfice environnemental et non seulement une plus grande autonomie.

La portée de ce bilan

Ces chiffres mesurent une dépense de matière, sans lui opposer l'énergie que la rénovation permet d'économiser pendant l'usage du bâtiment. Ils ne disent donc pas quelle trajectoire est environnementalement souhaitable, mais seulement laquelle coûte le moins cher à produire. Le rapport de Delem, conduit sur le parc flamand avec l'outil TOTEM, établit que ce coût initial est compensé en trois ans environ par les économies d'énergie de chauffage. Le carbone quantifié ici constitue donc une avance et non une perte, et la section 9 revient sur ce que le périmètre retenu laisse hors du champ.

La convergence des trois lectures

Trois lectures ont désormais été conduites sur les mêmes trajectoires, selon des méthodes sans rapport entre elles. La confrontation industrielle rapporte le besoin aux capacités des producteurs. La lecture territoriale le convertit en hectares de terres wallonnes. Le bilan environnemental le traduit en carbone et en énergie.

Toutes trois désignent le même matériau. Le chaux-chanvre borne la part biosourcée à 5,4 %, il porte 95 % de l'emprise agricole, et il produit 80 % du carbone. Cette convergence, obtenue par des chemins entièrement distincts, donne au constat un fondement qu'aucune de ces lectures n'aurait eu isolément. Elle en fixe aussi la portée : ce n'est ni la filière biosourcée wallonne, ni la ressource, ni le territoire qui sont en cause. C'est la place qu'un seul isolant occupe dans la manière dont on rénove.

8.9 La hiérarchie des leviers

Quatre leviers ont été actionnés au fil de ces trajectoires, et leur efficacité s'échelonne de façon si inégale que ce classement constitue à lui seul un résultat.

Le plus puissant est celui qui n'était pas soupçonné lors de la construction du modèle : l'affectation de la matière. Décider quel isolant est employé sur quelle paroi fait passer la part biosourcée soutenable de 5,4 à 61 %, sans qu'aucune ligne de production ne soit construite. Aucun autre levier n'approche cette amplitude.

Le deuxième est celui que l'on actionne d'ordinaire, la proportion de matériaux biosourcés. Pris isolément, il ne mène nulle part. En effet, il a été montré que, poussé jusqu'à sa limite, il aboutit à une trajectoire dont le volume, l'énergie grise et les déchets ne se distinguent pas de la trajectoire conventionnelle qu'elle prétendait inverser.

Le troisième est la croissance de la production. Il est réel, mais lent, et son efficacité dépend entièrement du temps qu'on lui laisse. Le doublement nécessaire représente 3 % de croissance annuelle s'il est étalé jusqu'en 2050, mais 16 % s'il doit être obtenu avant la première échéance. C'est le seul levier dont l'ampleur dépende du moment où il est actionné.

Le quatrième, l'ambition thermique, va à l'encontre des trois autres. En effet, relever la cible du niveau Optimum SRLT au standard passif accroît le volume de 72 % et aggrave simultanément la tension industrielle, l'emprise agricole et le bilan environnemental, sans qu'aucune des difficultés rencontrées ne s'en trouve atténuée.

Un enseignement traverse cette hiérarchie. Les leviers les plus efficaces ne sont pas les plus coûteux. Le premier relève du choix des matériaux, donc de la conception et de la commande, quand le troisième suppose des investissements industriels.

9 Conclusion

9.1 Réponses aux questions de recherche

La première question portait sur les ressources biosourcées et recyclées mobilisables en Wallonie, sur les quantités disponibles au regard des capacités existantes et sur le volume atteignable par les filières locales. Les sections précédentes y ont répondu par les chiffres de l'enquête, une production wallonne de 561 765 mètres cubes par an, qu'un plein emploi des lignes existantes porterait à 1 225 363. Ce volume, que l'étude de référence avait déjà approché, n'est donc pas mis en cause. Ce que les trajectoires ajoutent est qu'il ne se confronte pas à un besoin unique, mais à un besoin qui varie du simple au double selon la façon dont la matière est affectée et la performance visée.

La seconde question demandait dans quelle mesure ces filières peuvent contribuer à la rénovation du parc unifamilial wallon, et quel taux annuel elles permettraient d'atteindre. C'est ici que la réponse se révèle la plus instructive, car ce taux n'est pas une propriété de la filière, mais de l'usage qu'on en fait. À répartition inchangée, la capacité potentielle wallonne soutient une rénovation entièrement biosourcée au rythme de 1,98 % par an, ce qui demanderait un peu plus de 50 ans et reporterait l'achèvement bien au-delà de 2050. En affectant chaque matériau là où la ressource existe et là où la paroi le permet, la même capacité, sans aucun investissement supplémentaire, soutient un rythme de 4,14 % par an, soit à peine plus de 24 ans, et satisfait donc les échéances de certification wallonnes.

Ce rythme ne se confond pas avec les 3 % annuels évoqués en introduction. Ces derniers portent sur l'ensemble du parc résidentiel wallon rénové en 30 ans, tandis qu'il est ici question du seul parc unifamilial conduit aux échéances de certification en 25 ans, ce qui explique l'écart entre les deux valeurs.

Une même filière, un même volume produit, et deux réponses opposées. Le modèle établit donc que le parc unifamilial wallon peut être rénové dans les délais fixés en recourant aux ressources locales, à trois conditions.

La première est d'affecter chaque matériau là où la ressource existe plutôt que là où l'usage le place. Elle commande toutes les autres, et elle ne relève ni de l'agriculture ni de l'industrie, mais du choix des matériaux. Elle suppose en revanche que les objectifs ne soient pas formulés en

part de matériaux biosourcés, puisque deux trajectoires affichant la même proportion peuvent se révéler l'une hors d'atteinte et l'autre confortable selon l'emploi qui en est fait.

La deuxième est celle de la mobilisation des capacités. Il s'agit d'un doublement de la production wallonne, effort réalisable pour la filière industrielle, mais qui suppose d'être engagé. Aux capacités d'aujourd'hui, le rythme atteignable retombe en effet à 1,9 % par an, soit exactement celui qu'une répartition figée permettrait avec le double de production. L'écart entre filières est par ailleurs tel, d'un facteur de 1,7 pour la ouate à un facteur de 60 pour le miscanthus, qu'un soutien réparti uniformément laisserait plusieurs d'entre elles très en dessous de ce qui est nécessaire.

La troisième est le calendrier. Les échéances wallonnes ne répartissent pas l'effort uniformément, et la première d'entre elles en concentre l'essentiel quand les suivantes se situent sous le seuil de tension. L'obstacle se présente donc dans les six premières années, et une politique de soutien raisonnant à l'horizon 2050 le manquerait entièrement.

Ces trois conditions ont un caractère commun : aucune ne relève de la ressource ni de la technique. Toutes relèvent de décisions, et c'est en cela que la réponse est plus encourageante que ne le laissaient présager les premières trajectoires. Un dernier élément achève d'ailleurs d'y répondre, puisque la trajectoire qui satisfait ces conditions n'est pas seulement la plus réalisable, elle est aussi celle dont le coût environnemental de production est le plus faible. Les deux exigences, celle de la faisabilité et celle du climat, désignent ici la même trajectoire.

9.2 Apports du travail

Le premier apport est un outil. Le modèle construit ici quantifie les besoins en isolants du parc unifamilial wallon à partir de quatorze typologies, de sept matériaux biosourcés et de cinq conventionnels, et confronte ces besoins aux capacités industrielles, aux gisements agricoles, au calendrier réglementaire et à des seuils environnementaux régionaux. Cet outil peut donc être repris, corrigé ou étendu, ce qui confère à ce travail de quantification une portée dépassant le cadre de cette étude.

Le deuxième apport est une critique documentée de la méthode existante. La reconstruction de l'étude de référence a mis la lumière sur quatre incohérences internes dans son raisonnement et neuf simplifications, dont plusieurs commandaient sa conclusion. Cette critique n'invalide pas l'étude, dont l'architecture générale a été conservée, mais elle explique l'écart entre les deux travaux. Ce désaccord ne porte ni sur la filière ni sur son potentiel, mais sur deux hypothèses, celle du volume de la demande et celle de la destination des matériaux, dont le présent travail montre qu'elles sont l'une et l'autre déterminantes. Ce dernier introduit par ailleurs, dans un exercice de quantification, une variable qui relève de la conception architecturale, celle de l'affectation des matériaux aux parois.

Le troisième apport est un résultat, et il constitue un raisonnement qui excède le cas wallon. Trois lectures menées selon des méthodes sans rapport entre elles, industrielle, territoriale et environnementale, désignent le même matériau et convergent vers la même conclusion. La contrainte qui pèse sur les isolants biosourcés n'est pas d'abord celle de la ressource disponible, elle est celle de sa destination. Étant donné que rien dans ce raisonnement ne dépend de la Wallonie ni des filières qui y sont établies, cette proposition est vérifiable ailleurs, avec d'autres filières et d'autres parcs résidentiels, et elle constitue une hypothèse de travail plutôt qu'une particularité régionale.

9.3 Limites du travail

Le périmètre est le premier facteur de limitation. Le travail porte sur le seul parc résidentiel unifamilial, et tous les volumes présentés demeurent donc inférieurs à ceux qu'appellerait la rénovation du parc résidentiel dans son ensemble. L'évaluation environnementale s'arrête par ailleurs aux étapes de production des isolants, sans comptabiliser la mise en œuvre, l'entretien, ni la fin de vie, et surtout sans opposer à cette dépense de matière aucune économie d'énergie de chauffage. Les chiffres présentés mesurent donc un coût et non un bilan. Le parc est enfin traité comme un ensemble figé, dont l'effectif demeure constant jusqu'en 2050, sans démolition ni construction neuve.

Les données constituent le deuxième facteur, et l'une d'elles appelle une mention particulière. La destination des volumes entre matériaux a été construite à partir des compatibilités techniques et des usages courants, sans qu'aucun relevé n'atteste de ce qui est effectivement mis en œuvre en Wallonie. C'est la seule hypothèse du modèle dépourvue de source, et les résultats ont montré qu'elle est la plus déterminante de toutes. Ce postulat constitue la faiblesse principale du travail. D'autres données appellent des réserves de moindre portée, la part biosourcée actuelle procédant d'une transposition depuis une part de marché, les capacités de production provenant des déclarations des producteurs eux-mêmes, et le taux de disponibilité établi par Palumbo pour les cultures industrielles s'appliquant difficilement à une ressource fourragère comme l'herbe.

Cette faiblesse mérite toutefois d'être située. La section 6 reprochait au modèle de référence des hypothèses uniformes, et dont l'influence sur le résultat échappait à toute appréciation. Le présent travail pose à son tour une hypothèse que rien ne source, mais la rend modifiable et en mesure l'effet, et c'est précisément cette mesure qui constitue son résultat principal. La différence ne tient donc pas à la présence d'un postulat, inévitable en l'absence de relevé, mais au fait qu'il soit devenu visible et discutable.

La méthode enfin comporte trois simplifications assumées. Les capacités de production sont maintenues constantes jusqu'en 2050, hypothèse que les travaux français conduisent à juger acceptable, mais qui demeure une simplification. La destination optimisée des matériaux sollicite six filières sur sept à 100 % de leur capacité, ce qui la prive de toute marge et en fait une borne supérieure plutôt qu'une prévision. Les seuils environnementaux procèdent d'une

répartition proportionnelle d'objectifs régionaux, construction explicite, mais dont d'autres clés conduiraient à des parts différentes.

À ces limites s'ajoute ce que le modèle ne mesure pas. Il compare des volumes, des capacités, des surfaces et des impacts, et ignore la régulation hygrothermique, l'inertie, la perméabilité à la vapeur ou l'aptitude d'un matériau à combler des maçonneries anciennes irrégulières. Les conclusions relatives au chaux-chanvre portent donc sur sa généralisation à l'échelle du parc, non sur son emploi là où ses propriétés le rendent préférable, question que le modèle serait incapable de trancher. Deux choix de périmètre méritent enfin d'être signalés pour ce qu'ils emportent. Le carbone biogénique n'est pas décompté, alors que Gourovitch, qui l'intègre, obtient des émissions négatives pour ses scénarios entièrement biosourcés, si bien que le constat d'une substitution intégrale sans effet sur le bilan carbone tient étroitement à l'indicateur retenu. Et l'énergie d'usage est absente, le rapport de Delem établissant que le coût initial des matériaux se trouve compensé en trois ans environ par les économies de chauffage. Ni l'un ni l'autre n'affecte en revanche les conclusions industrielles et territoriales, qui reposent sur des volumes et des surfaces.

Une dimension entière échappe enfin au modèle, celle des occupants et des entreprises. Le travail calcule des besoins et des capacités, et suppose que chaque rénovation intervient au moment où le calendrier réglementaire l'exige, sans jamais considérer qui décide, qui finance et qui met en œuvre. Ruellan établit pourtant que les facteurs socio-économiques, revenu, statut d'occupation et rapport à l'énergie, l'emportent fréquemment sur les considérations techniques dans la décision de rénover, et que plus de 17 % du parc wallon associe une mauvaise performance énergétique à un ménage à faibles revenus (Ruellan, 2026). Le rythme de 4,14 % par an retenu ici suppose donc une capacité d'investissement que ce même travail montre absente d'une part importante des propriétaires. La redistribution soulève une difficulté du même ordre du côté de la mise en œuvre, puisqu'elle déplace les volumes vers des isolants insufflés dont la pose exige un équipement et une qualification que l'hétérogénéité du bâti wallon rend précisément difficiles à généraliser. Les résultats présentés décrivent ainsi une possibilité matérielle, non une trajectoire probable.

9.4 Perspectives de recherche

La perspective la plus utile découle de la limite la plus sérieuse. La destination des matériaux se révélant le levier le plus puissant du système, et aucune donnée ne documentant celle qui prévaut aujourd'hui, l'établir constituerait l'apport le plus précieux à la connaissance du sujet. Les certificats de performance énergétique, les déclarations de chantier ou une enquête auprès des architectes, des entrepreneurs et des maîtres d'ouvrage y donneraient accès.

L'extension du champ constitue la deuxième piste, immédiatement réalisable pour le logement collectif dont l'annexe A.2 de l'étude COZEB 3 fournit les typologies. L'élargissement du périmètre environnemental relève de la même logique. Intégrer l'énergie d'usage permettrait de mettre en balance la dépense de matière et l'économie de chauffage, et donc d'arbitrer entre des niveaux d'ambition thermique que ce travail ne compare que sous l'angle de leur faisabilité. Le carbone biogénique et la fin de vie compléteraient cette balance.

Deux extensions changent en revanche de question, portant non plus sur ce que le modèle mesure, mais sur ce qui déterminera la réalisation des trajectoires. La dimension économique en est absente, alors qu'elle la conditionne autant que la disponibilité de la matière. Les travaux de Ruellan associent par ailleurs aux typologies techniques des profils d'occupants, ce qui permettrait de distinguer les segments où la contrainte est matérielle de ceux où elle est financière, et d'orienter la production vers les rénovations susceptibles d'avoir lieu.

Le prolongement le plus ambitieux consisterait à traiter le parc comme un flux plutôt que comme un stock. La modélisation dynamique des stocks décrit le bâti par ses entrées, ses sorties et ses durées de vie, et fait des matériaux posés aujourd'hui une ressource disponible demain. Elle permettrait de suivre le devenir des isolants mis en œuvre entre 2025 et 2050 et d'estimer les gisements que leur dépose libérera, plutôt que de supposer le parc immobile.

Le parc unifamilial wallon peut être rénové dans les délais que la Région s'est fixés avec les isolants que ses producteurs sont capables de fabriquer. Cette conclusion ne relève ni d'un progrès technique ni d'un accroissement de la ressource, mais du choix des matériaux et de leur affectation aux parois. Ce n'est pas la quantité d'isolants biosourcés disponible qui détermine ce que la Wallonie peut rénover, mais bien la destination qui leur est donnée.

10 Liste des figures

Figure 1 - Carte conceptuelle de la méthodologie du travail, articulée autour des cinq temps de la démarche. Réalisation personnelle. 21
Figure 2 - Carte conceptuelle de la méthodologie de Valbiom, de la caractérisation du parc bâti wallon jusqu'aux volumes d'isolants et aux volumes de bois dérivés. Réalisation personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024)..... 27
Figure 3 - Carte conceptuelle de la méthodologie du modèle amélioré, des données d'entrée jusqu'à la confrontation à double plafond et aux modules dérivés. Réalisation personnelle.... 77

11 Liste des tableaux

Tableau 1 - Composition du parc résidentiel wallon selon la typologie de logement et la surface bâtie au sol. Mise en forme personnelle d'après les statistiques cadastrales de Statbel (2023), telles que mobilisées par Valbiom (Gillet, 2024). 23
Tableau 2 - Part des bâtiments dont les murs sont à isoler, selon la typologie. Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024)..... 24
Tableau 3 - Exemple de calcul des surfaces de murs à isoler pour les maisons quatre façades, selon la tranche de surface bâtie au sol (cet exemple ne couvre qu'un des deux scénarios de toiture : le cas de l'isolation du plancher des combles). Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024). 24
Tableau 4 - Paramètres techniques du calcul des volumes : résistances thermiques cibles par paroi (R cible) et conductivités thermiques des isolants (λ). Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024). 25
Tableau 5 - Exemple de calcul des volumes d'isolant pour les murs des maisons quatre façades, par système de rénovation (extérieur, intérieur) et par matériau. Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024)..... 26
Tableau 6 - Capacités de production annuelle et potentielle des fabricants wallons d'isolants biosourcés pris en compte dans l'étude, en m^3/an. Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024). 26
Tableau 7 - Hypothèses géométriques retenues pour les maisons unifamiliales (à gauche) et pour les immeubles (à droite). Mise en forme personnelle d'après le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024)..... 29
Tableau 8 - Limites du modèle de référence, selon leur nature (I pour incohérence, S pour simplification), et pistes d'amélioration correspondantes. Réalisation personnelle. 47
Tableau 9 - Apports issus de l'analyse comparative et leur origine. Réalisation personnelle. .. 49
Tableau 10 - Typologies du parc résidentiel unifamilial wallon retenues dans le modèle. Mise en forme personnelle d'après l'étude COZEB 3 (Carbonelle et al., 2023) et les statistiques cadastrales de Statbel (2025)..... 57
Tableau 11 - Valeurs U existantes (à gauche) et cibles (à droite, pour le scénario SRLT) par typologie et par paroi, pour les quatorze typologies d'habitations existantes. Mise en forme personnelle d'après l'étude COZEB 3 (Carbonelle et al., 2023). 59

Tableau 12 - Répartition des matériaux pour l'isolation des murs, combinant l'ITI et l'ITE, par famille de typologies et dans un scénario tout biosourcé. Réalisation personnelle..... 61
Tableau 13 - Capacités de production annuelle et potentielle des fabricants d'isolants biosourcés retenus dans le modèle, en m³/an. Réalisation personnelle d'après l'enquête menée auprès des producteurs, complétée par le fichier de calcul de Valbiom (Gillet, 2024). 64
Tableau 14 - Paramètres des cultures wallonnes : surface cultivée, rendement, taux de disponibilité, masse volumique de l'isolant et fraction de matière première. Mise en forme personnelle d'après Suray (2025), Palumbo et al. (2015), Buildwise (Claude et al., 2025) et Gramitherm (s.d.). 66
Tableau 15 - Échelonnement de la rénovation du parc unifamilial par période, échéance de label et nombre de logements concernés, selon les obligations wallonnes. Mise en forme personnelle d'après les certificats PEB de l'Open Data Wallonie-Bruxelles (2026) et le communiqué du Gouvernement wallon (2025). 67
Tableau 16 - Impacts unitaires de production (A1-A3) des isolants retenus dans le modèle : carbone fossile, énergie non renouvelable et densité. Mise en forme personnelle d'après les FDES (INIES, s. d.) et, pour le miscanthus, d'après TOTEM (TOTEM, s. d.)..... 70
Tableau 17 - Taux de chute de mise en œuvre retenus par matériau. Mise en forme personnelle d'après les FDES de la base INIES (s. d.), complétées par une hypothèse pour le miscanthus. 72
Tableau 18 - Vue d'ensemble des six trajectoires de rénovation productrices de volume, selon leurs réglages et les six indicateurs du modèle. La première suit le rythme actuel et porte donc sur le quart du parc atteint en 2050, les cinq autres sur sa totalité. Réalisation personnelle..... 87
Tableau 19 - Surfaces agricoles annuelles nécessaires à l'alimentation de chaque trajectoire, en hectares, et part qu'elles représentent dans la superficie agricole utilisée wallonne. Réalisation personnelle..... 100
Tableau 20 - Bilan environnemental des six trajectoires, restreint à la production des isolants. Réalisation personnelle. 103

12 Bibliographie

Articles de revues scientifiques :

Ajayebi, A., Hopkinson, P., Zhou, K., Lam, D., Chen, H., & Wang, Y. (2020). *Spatiotemporal model to quantify stocks of building structural products for a prospective circular economy.* Resources Conservation and Recycling, 162, 105026. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105026. Consulté le 20/01/2026.

Arehart, J. H., Pomponi, F., D'Amico, B., & Srubar, W. V. (2022). *Structural material demand and associated embodied carbon emissions of the United States building stock: 2020–2100.* Resources Conservation and Recycling, 186, 106583. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106583. Consulté le 20/01/2026.

Deetman, S., Marinova, S., Van Der Voet, E., Van Vuuren, D. P., Edelenbosch, O., & Heijungs, R. (2019). *Modelling global material stocks and flows for residential and service sector buildings towards 2050.* Journal of Cleaner Production, 245, 118658. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118658. Consulté le 20/01/2026.

Fishman, T., Schandl, H., Tanikawa, H., Walker, P., & Krausmann, F. (2014). *Accounting for the material stock of nations.* Journal of Industrial Ecology, 18(3), 407–420. Disponible sur https://doi.org/10.1111/jiec.12114. Consulté le 20/01/2026.

Gao, X., Nakatani, J., Zhang, Q., Huang, B., Wang, T., & Moriguchi, Y. (2020). *Dynamic material flow and stock analysis of residential buildings by integrating rural–urban land transition: A case of Shanghai.* Journal of Cleaner Production, 253, 119941. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119941. Consulté le 20/01/2026.

Göswein, V., Arehart, J., Phan-Huy, C., Pomponi, F., & Habert, G. (2022). *Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings.* Buildings and Cities, 3(1), 745–755. Disponible sur https://doi.org/10.5334/bc.254. Consulté le 20/01/2026.

Gourovitch, M., Laratte, B., & Costes, J. (2024). *Insulation materials for building : dealing with climate change along with other challenges yet to come.* IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 1402(1), 012052. Disponible sur https://doi.org/10.1088/1755-1315/1402/1/012052. Consulté le 20/01/2026.

Gourovitch, M., Laratte, B., & Costes, J. (2025). *A strong straw policy can supply three quarters of the insulation needs for construction and renovation in France.* Energy and Buildings, 344, 116013. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116013. Consulté le 20/01/2026.

Hanemaaijer, A. & Muller, M. (2025). *INTEGRAL CIRCULAR ECONOMY REPORT – Assessment for the Netherlands 2025.* Disponible sur https://www.pbl.nl/system/files/document/2025-02/pbl-2025-integral-circular-economy-report-5849.pdf. Consulté le 20/01/2026.

Heeren, N., & Hellweg, S. (2018). *Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flows.* Journal of Industrial Ecology, 23(1), 253–267. Disponible sur https://doi.org/10.1111/jiec.12739. Consulté le 20/01/2026.

Kalcher, J., Praxmarer, G., & Teischinger, A. (2016). *Quantification of future availabilities of recovered wood from Austrian residential buildings.* Resources Conservation and Recycling, 123, 143–152. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.001. Consulté le 20/01/2026.

Kınay, U., Laukkarinen, A., & Vinha, J. (2023). *Renovation wave of the residential building stock targets for the carbon-neutral: Evaluation by Finland and Türkiye case studies for energy demand.* Energy Sustainable Development/Energy for Sustainable Development, 75, 1–24. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.04.014. Consulté le 20/01/2026.

Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Haberl, H. (2020). *Growing stocks of buildings, infrastructures and machinery as key challenge for compliance with climate targets.* Global Environmental Change, 61, 102034. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102034. Consulté le 20/01/2026.

Lausselet, C., Urrego, J. P. F., Resch, E., & Brattebø, H. (2020). *Temporal analysis of the material flows and embodied greenhouse gas emissions of a neighborhood building stock.* Journal of Industrial Ecology, 25(2), 419–434. Disponible sur https://doi.org/10.1111/jiec.13049. Consulté le 20/01/2026.

Lien, S. K., Sandberg, N. H., Lindberg, K. B., Rosenberg, E., Seljom, P., & Sartori, I. (2022). *Comparing model projections with reality: Experiences from modelling building stock energy use in Norway.* Energy and Buildings, 268, 112186. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112186. Consulté le 20/01/2026.

Marinova, S., Deetman, S., Van Der Voet, E., & Daioglou, V. (2019). *Global construction materials database and stock analysis of residential buildings between 1970-2050*. Journal of Cleaner Production, 247, 119146. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119146. Consulté le 20/01/2026.

Miatto, A., Schandl, H., Forlin, L., Ronzani, F., Borin, P., Giordano, A., & Tanikawa, H. (2018). *A spatial analysis of material stock accumulation and demolition waste potential of buildings: A case study of Padua*. Resources Conservation and Recycling, 142, 245–256. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.011. Consulté le 20/01/2026.

Monzón-Chavarrías, M., Sierra-Pérez, J., García-Pérez, S., & Guillén-Lambea, S. (2026). *Environmental impacts of standard building renovations: City-level extrapolation from a real case study in Spain*. Energy and Buildings, 354, 116938. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116938. Consulté le 20/01/2026.

Müller, D. B. (2005). *Stock dynamics for forecasting material flows—Case study for housing in The Netherlands*. Ecological Economics, 59(1), 142–156. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.09.025. Consulté le 20/01/2026.

Palumbo, M., Avellaneda, J., & Lacasta, A. (2015). *Availability of crop by-products in Spain: New raw materials for natural thermal insulation*. Resources Conservation and Recycling, 99, 1–6. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.012. Consulté le 20/01/2026.

Ruellan, G., Attia, S., & Haesbroeck, G. (2025). *Clustering of archetypal building-inhabitant pairs to improve energy efficiency: The case of the Walloon region in Belgium*. Energy and Buildings, 335, 115549. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115549. Consulté le 20/01/2026.

Ruellan, G., Cools, M., & Attia, S. (2021). *Analysis of the determining factors for the renovation of the Walloon residential building stock*. Sustainability, 13(4), 2221. Disponible sur https://doi.org/10.3390/su13042221. Consulté le 28/03/2025.

Sandberg, N. H., Næss, J. S., Brattebø, H., Andresen, I., & Gustavsen, A. (2021). *Large potentials for energy saving and greenhouse gas emission reductions from large-scale deployment of zero emission building technologies in a national building stock*. Energy Policy, 152, 112114. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112114. Consulté le 20/01/2026.

Sartori, I., Sandberg, N. H., & Brattebø, H. (2016). *Dynamic building stock modelling: General algorithm and exemplification for Norway*. Energy and Buildings, 132, 13–25. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.098. Consulté le 20/01/2026.

Stephan, A., & Athanassiadis, A. (2017). *Towards a more circular construction sector: Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks*. Resources Conservation and Recycling, 129, 248–262. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.022. Consulté le 20/01/2026.

Tanikawa, H., Fishman, T., Okuoka, K., & Sugimoto, K. (2015). *The Weight of Society over Time and Space: A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan*, 1945–2010. Journal of Industrial Ecology, 19(5), 778–791. Disponible sur https://doi.org/10.1111/jiec.12284. Consulté le 20/01/2026.

Trachte, S., & Stiernon, D. (2023a). *Choix équilibré d'un isolant thermique en rénovation. Comment répondre aux exigences de performance énergétique tout en limitant l'impact environnemental global et en favorisant la circularité des matières ?* Lieuxdits, 24, 14–21. Disponible sur https://doi.org/10.14428/ld.vi24.82263. Consulté le 28/03/2025.

Trachte, S., & Stiernon, D. (2024). *P-Renewal Project : A Reflexive Contribution to the Evolution of Energy Performance Standards for the Renovation of Historic Buildings*. Heritage, 7(3), 1539-1568. Disponible sur https://doi.org/10.3390/heritage7030074. Consulté le 28/03/2025.

Trachte, S., & Stiernon, D. (2025a). *L'intérêt des isolants thermiques biosourcés en réhabilitation énergétique*. Les dossiers techniques de la construction, 100, 3–66. Disponible sur https://hdl.handle.net/2078.5/272524. Consulté le 03/07/2026.

Yang, X., Hu, M., Zhang, C., & Steubing, B. (2022). *Key strategies for decarbonizing the residential building stock: Results from a spatiotemporal model for Leiden, the Netherlands*. Resources Conservation and Recycling, 184, 106388. Disponible sur https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106388. Consulté le 20/01/2026.

Zandonella Callegher, C., Grazieschi, G., Wilczynski, E., Oberegger, U.F., Pezzutto, S. (2023). *Assessment of Building Materials in the European Residential Building Stock: An Analysis at EU27 Level*. Sustainability 2023, 15, 8840. Disponible sur https://doi.org/10.3390/su15118840. Consulté le 09/12/2025.

Articles de conférences :

Gobbo, E., Trachte, S., & Massart, C. (2019). *Energy retrofit scenarios : Material flows and circularity.* IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 225(1), 012029. Disponible sur https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012029. Consulté le 28/03/2025.

Grigoletto, S., & Courard, L. (2018). *Matériaux biosourcés et recyclés : de nouvelles ressources pour construire mieux ?* Salon Énergie & Habitat. Disponible sur https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/228794/1/Isolants%20biosourc%C3%A9s%20-%20Energie%26Habitat%202018.pdf. Consulté le 28/03/2025.

Trachte, S., & Stiernon, D. (2025b). *Energy and Sustainable Renovation of Building Stock in Europe: The Environmental Benefits of Biobased Insulation Materials.* SBE 2025, Zurich, juin 2025. Disponible sur https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/335945/1/SBE25_FullPaper_Biobased%20insulation%20materials_revisedversion.pdf. Consulté le 28/03/2025.

Rapports :

Albarello, L., Bosschaert, B., & Carlier, P. (2007). *Enquête sur la qualité de l'habitat en Région wallonne 2006-2007*. Ministère de la Région wallonne. Direction générale de l'aménagement du territoire, du logement et du patrimoine. Division du logement. Disponible sur https://ediwall.wallonie.be/etudes-et-documents-logement-5-enquete-sur-la-qualite-de-lhabitat-en-region-wallonne-2006-2007-2007-059347. Consulté le 01/05/2025.

Alkasabreh, M., Kubin, K., Seefeldt, F. *et al.* (2024). *Fit für 2045 (Teil 2): Investitionsbedarf für die Transformation öffentlicher Nichtwohngebäude*. Deutsche Energie-Agentur (DENA). Disponible sur https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2024/STUDIE_Fit_fuer_2045.pdf. Consulté le 20/01/2026.

Anfrie, M.-N., Majcher, M., & Kryvobokov, M. (2019). *Rapport de recherche « Chiffres-clés du logement en Wallonie-Quatrième édition »*, Centre d'Études en Habitat Durable de Wallonie, Charleroi. Disponible sur https://awcclp.com/wp-content/uploads/2020/05/Chiffres-cl%C3%A9-du-logement-en-Wallonie.pdf. Consulté le 01/05/2025.

BPIE (Buildings Performance Institute Europe). (2023). *How to stay warm and save energy – insulation opportunities in European homes.* Disponible sur https://www.bpie.eu/publication/how-to-stay-warm-and-save-energy-insulationopportunities-in-european-homes/. Consulté le 09/12/2025

Carbonelle, S., Nourricier, S., Monfils, S., Lambert, J., Nijskens, I., Bruge, P. (2023). COZEB 3 : Mise à jour et extension de l'étude CO-ZEB déterminant le niveau de performance énergétique optimal en fonction des coûts conformément à la Directive 2010/31/EU et analyse de sensibilité des résultats obtenus. Étude Cost-optimum 2023.

CGDD, Domergue, S. & Vermont, B. (2020). *Scénarios de rénovation énergétique des bâtiments tertiaires. Quelles solutions pour quels coûts à l'horizon 2050 ?* Ministère de la Transition Écologique. Disponible sur : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/CGDD_scenarios_renovation_batiments_tertiaires_publication_20201203.pdf. Consulté le 17/12/2025.

Conseil Central de l'Économie. (2021). *Diagnostic du parc de bâtiment et des principaux obstacles à la rénovation.* Disponible sur https://www.ccecrb.fgov.be/p/fr/822/diagnostic-des-barrieres-a-la-renovation-energetique-des-batiments. Consulté le 01/05/2025.

Conteville, L., & Den Hartigh, C. (2009). *Les éco-matériaux en France : État des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements*. Montreuil : Les Amis de la Terre. Disponible sur https://www.amisdelaterre.org/wp-content/uploads/2013/05/rapport-atf-les-ecomateriaux-en-france-mars09-2.pdf. Consulté le 20/01/2026.

Cyx, W., Renders, N., Van Holm, M. & Verbeke, S. (2011). *Typology Approach for Building Stock Energy Assessment*; 2009–2012 Intelligent Energy Europe (IEE) Project: European Union. Disponible sur https://episcope.eu/iee-project/tabula. Consulté le 16/12/2025.

Delem, L., Janssen, A., Vrijders, J., Wastiels, L. (2020). *The impact of materials needed for renovation and new housing - A global environmental impact assessment of the policy actions in the flemish climate policy plan*. EASAC. Disponible sur https://emis.vito.be/sites/emis/files/articles/91/2020/THE%20IMPACT%20OF%20MATERIALS%20NEEDED%20FOR%20RENOVATION%20AND%20NEW%20HOUSING.pdf. Consulté le 17/12/2025.

Forest Research. (2025). *Forestry Statistics 2025 Introduction and Glossary*. The Research Agency of the Forestry Commission. Disponible sur https://www.forestresearch.gov.uk/tools-and-resources/statistics/publications/forestry-statistics/forestry-statistics-2025/. Consulté le 20/01/2026.

Fraunhofer-Gesellschaft. (2024). *Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Diskussionspapier*. Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – Materials. Disponible sur https://www.materials.fraunhofer.de/content/dam/materials/dokumente/broschueren_prospekte/Diskussionspapier%20Ressourceneffizienz-Resourceneffizienz-2024-11-Einzelseiten-150dpi.pdf. Consulté le 20/01/2026.

Gouvernement wallon. (2019). *Déclaration de politique régionale pour la Wallonie 2019-2024*. Service public de Wallonie – Département de l'Énergie et du Bâtiment durable, Direction des bâtiments durables. Disponible sur https://www.wallonie.be/sites/default/files/2019-09/declaration_politique_regionale_2019-2024.pdf. Consulté le 01/05/2025.

Gouvernement wallon. (2020). *Stratégie wallonne de rénovation énergétique à long terme du bâtiment*. Service public de Wallonie – Département de l'Énergie et du Bâtiment durable, Direction des bâtiments durables. Disponible sur https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/gw-201112-strategie-renovation-2020-rapport-complet-final.pdf?ID=60498. Consulté le 01/05/2025.

Gouvernement wallon. (2022). *Troisième Stratégie wallonne de développement durable. Ensemble vers les Objectifs de développement durable !* Service public de Wallonie. Disponible sur https://developpementdurable.wallonie.be/files/WallonieDurable/SWDD3_2022_complet.pdf . Consulté le 30/07/2026.

Greenwin. (2019). *Rapport WaloSCRAP II – Analyser les gisements et les flux de matières secondaires en Wallonie et stimuler leur valorisation industrielle.* Disponible sur https://www.greenwin.be/fr/page/waloscrap. Consulté le 01/05/2025.

Greenwin. (2024). *Feuille de route 2025-2030. Ambitions & priorités stratégiques pour stimuler l'innovation et le déploiement des Cleantech dans la chimie, construction et l'environnement en Wallonie.* Disponible sur https://www.greenwin.be/fr/news/consult/511/greenwin-vous-presente-sa-deuxieme-feuille-de-route-quinquennale-2025-2030. Consulté le 01/05/2025.

International Resource Panel. (2020). *Resource Efficiency and Climate Change : Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future.* Disponible sur https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change. Consulté le 01/05/2025.

IWEPS. (2023). Où en est la Wallonie par rapport aux objectifs de développement durable ? Bilan des progrès. Édition 2023. Disponible sur https://www.iweps.be/wp-content/uploads/2023/09/SPW-IWEPS-RapportODD2023-Complet.pdf. Consulté le 30/07/2026.

Kints, C. (2008). *La rénovation énergétique et durable des logements wallons, analyse du bâti existant et mise en évidence de typologies de logements prioritaires.* Architecture & Climat, Université catholique de Louvain. Consulté le 01/05/2025.

Léonardon, P., Jimenez, C., Favre, B., & Sénior, G. (2019). *Prospective de consommation de matériaux pour la rénovation énergétique BBC des bâtiments résidentiels aux horizons 2035 et 2050.* Disponible sur https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-34726-etude-ademe-besoin-materiaux-renovation-decembre2019.pdf. Consulté le 01/05/2025.

Leveau, C., Cherdon, M., Vismara, M., & Huberlant, B. (2018). *COZEB 2 : Rapport final du projet. Détermination du niveau de performance énergétique optimal des bâtiments en fonction des coûts.* Département de l'Énergie et du Bâtiment durable, SPW-DGO4. Disponible sur https://energie.wallonie.be/servlet/Repository/cozeb-2-rapport-final.pdf?ID=54806. Consulté le 01/05/2025.

Pavel, C. C., & Blagoeva, D. T. (2018). *Competitive landscape of the EU's insulation materials industry for energy-efficient buildings.* Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-96383-4, Disponible sur https://dx.doi.org/10.2760/750646. Consulté le 09/12/2025.

Pezzutto, S., Zambotti, S., Croce, S. *et al.* (2019). *Hotmaps - Open data set for the EU-28* (Deliverable D2.3). Heating and Cooling Open Source Tool for Mapping and Planning of Energy Systems (Hotmaps Project), Horizon 2020. Disponible sur https://doi.org/10.5281/zenodo.3361432. Consulté le 16/12/2025.

Stein, B., Loga, T., Diefenbach, N. *et al.* (2016). *Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks.* 2013–2016. Disponible sur https://episcope.eu/welcome/. Consulté le 16/12/2025.

Valbiom. (2024). *Présentation stratégique Valbiom – Centre de référence de l'économie biosourcée en Wallonie.* Édition 2024. Disponible sur https://www.valbiom.be/outils/presentation-strategique-valbiom. Consulté le 01/05/2025.

Vanneste, D., Thomas, I. & Goossens, L. (2007). *Le logement en Belgique. Enquête socio-économique 2001*, Monographies, DGSIE. Disponible sur http://hdl.handle.net/2078.1/107561. Consulté le 01/05/2025.

Vastiau, A. (2023). *AmBIENCe: Active buildings energy performance contracting – Publishable report* (Deliverable D6.5). Horizon 2020 Framework Programme of the European Union. Disponible sur https://www.ambience-project.eu/AmBIENCe_D6.5-Brief-Publishable-Report-combined-submitted_vf.pdf. Consulté le 16/12/2025.

Ouvrages :

Trachte, S., & Stiernon, D. (2023b). *Isolants thermiques en rénovation. Réaliser un choix équilibré entre confort, performance énergétique, approche environnementale et gestion circulaire des ressources*. Lausanne, EPFL Press (coll. Architecture), 280 p. ISBN : 288915534X.

Travaux de fin d'études et thèses :

Daniel, S. (2023). *Optimisation énergétique dans la rénovation du bâtiment.* INSA Lyon. Disponible sur https://theses.insa-lyon.fr/publication/2023ISAL0112/these.pdf. Consulté le 28/03/2025.

Gourovitch, M. (2025). *Vers une réhabilitation résiliente des logements : analyse multiscalaire des possibilités d'usage des matériaux biosourcés locaux en France.* École doctorale des sciencees pour l'ingénieur, Université Clermont Auvergne. Prom. : Costes, Jean-Philippe. Disponible sur https://doi.org/10.70675/aa78f489zdda8z432dz86bcz7d212e1257c1. Consulté le 20/01/2026.

Ruellan, G. (2026). *Energy Renovation of the Walloon Residential Building Stock : Determinants and Integrated Approaches.* Université de Liège, Faculté des Sciences appliquées. Prom. : Attia, Shady. Disponible sur https://hdl.handle.net/2268/337211. Consulté le 17/05/2026.

Suray, C. (2025). *Évaluation du potentiel d'isolation biosourcé des maisons en Wallonie à partir des ressources agricoles régionales.* Faculté d'architecture, Université de Liège. Prom. : Mabille, Georges. Disponible sur http://hdl.handle.net/2268.2/22313. Consulté le 28/03/2025.

Ulrich, J. (2019). *Le potentiel d'une solution biosourcée dans la transition énergétique en France : L'exemple de la fibre de bois.* Faculté d'architecture, Université de Liège. Prom. : Possoz, Jean-Philippe. Disponible sur https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/6262. Consulté le 28/03/2025.

Guides :

Claude, V., Charron, S., & Michaux, B. (2025). *Guide pratique des isolants biosourcés/recyclés et de leur mise en œuvre.* Buildwise. Innovation Paper 47. Disponible sur https://www.buildwise.be/fr/publications/innovation-papers/47/. Consulté le 04/07/2025.

Sitographie :

Chanvre-eco. (s. d.). *Accueil.* Disponible sur https://chanvre-eco.be/. Consulté le 26/01/2026.

Cluster Eco-construction. (2025). *Label Produit Biosourcé.* Brochure mars 2025. Disponible sur https://clusters.wallonie.be/eco-construction/home/l-eco-construction/label-produit-biosource/voir-la-brochure-2025.html. Consulté le 26/01/2026.

Commission européenne. (2020). *Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions. Une vague de rénovations pour l'Europe : verdir nos bâtiments, créer des emplois, améliorer la qualité de vie.* Disponible sur https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1603122220757&uri=CELEX:52020DC0662. Consulté le 28/03/2025.

Commission européenne. (2021). *Mise en œuvre du pacte vert pour l'Europe.* Disponible sur https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/deliveringeuropean-green-deal_fr. Consulté le 28/03/2025.

Commission européenne. (2023). *Communication de la commission au parlement européen, au conseil, au comité économique et social européen et au comité des régions. Un approvisionnement sûr et durable en matières premières critiques à l'appui de la double transition.* Disponible sur https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52023DC0165. Consulté le 28/03/2025.

De Vlaspit. (s. d.). *Recycork.* Disponible sur https://www.devlaspit.be/activiteiten/recycork. Consulté le 26/01/2026.

État de l'environnement wallon. (2025). *Utilisation de l'espace agricole.* Disponible sur https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AGRI%201.html. Consulté le 03/07/2026.

Exie. (s. d.). *Accueil.* Disponible sur https://www.exie.be/fr. Consulté le 26/01/2026.

Gillet, P. (2024). *Quelle quantité d'isolant biosourcé pour permettre la rénovation du bâti wallon en 2050 ?* Disponible sur https://www.valbiom.be/actualites/quelle-quantite-isolant-biosource-pour-permettre-la-renovation-du-bati-wallon-en-2050. Consulté le 17/12/2025.

Gourovitch, M. (2024). *Rénovation énergétique des logements avec des isolants biosourcés : les ressources seront-elles suffisantes ?* Disponible sur https://www.construction21.org/france/articles/h/renovation-energetique-des-logements-avec-des-isolants-biosources-les-ressources-seront-elles-suffisantes.html. Consulté le 17/12/2025.

Gouvernement wallon. (2025). Rénovation du bâti : la Wallonie développe une vision intégrée. Communiqué du 12/12/2025. Disponible sur https://neven.wallonie.be/home/communiques-de-presse/presses/renovation-du-bati-la-wallonie-developpe-une-vision-integree.html. Consulté le 03/07/2026.

Gramitherm. (s. d.). *Accueil.* Disponible sur https://gramitherm.eu/. Consulté le 28/03/2025.

INIES. (s. d.). Espace consultation. Disponible sur https://base-inies.fr/consultation/recherche. Consulté le 03/07/2026.

IsoHemp. (s. d.). *Accueil.* Disponible sur https://www.isohemp.com/fr. Consulté le 28/03/2025.

ISOCELL. (s. d.). *Ouate de cellulose ISOCELL F.* Disponible sur https://www.isocell.com/fr/produits/produits/zellulose-france. Consulté le 26/01/2026.

IsoFabric. (s. d.). *Le confort s'installe chez vous.* Disponible sur https://isofabric.odoo.com/. Consulté le 26/01/2026.

Isoliège. (s. d.). *Isoliège : isolation en liège. Isolation thermique et isolation acoustique en liège expansé*. Disponible sur https://isoliege.eu/. Consulté le 26/01/2026.

ISOPROC. (s. d.). *iQ3.* Disponible sur https://www.isoproc.be/fr/produits/iq3. Consulté le 26/01/2026.

Kurk. (s. d.). *Isolation en liège et en cocos.* Disponible sur https://www.kurk.be/fr/produits-en-li%C3%A8ge/isolation-en-liege-et-isolation-en-coco/. Consulté le 26/01/2026.

Lenoo. (s. d.). *Pour un avenir plus durable, choisissez Lenoo.* Disponible sur https://lenoo.be/. Consulté le 26/01/2026.

Open Data Wallonie-Bruxelles. (2026). *PEB - Bâtiments résidentiels existants.* Disponible sur https://www.odwb.be/explore/dataset/peb-certification-residentielle-batiment-existant/export/?disjunctive.communes&disjunctive.e_spec_label&sort=e_spec_label&refine.e_spec_label=G. Consulté le 03/07/2026.

Parlement européen. (2024). Directive (UE) 2024/1275 du Parlement européen et du Conseil du 24 avril 2024 sur la performance énergétique des bâtiments (refonte). Journal officiel de l'Union européenne. Disponible sur https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401275. Consulté le 03/07/2026.

Promisc. (s. d.). *Le Miscanthus, la ressource de l'avenir.* Disponible sur https://www.promisc.be/Promis/Le_Miscanthus___la_ressource_de_lavenir.html. Consulté le 26/01/2026.

SPW Énergie. (2024). *Nouvelle Directive PEB (UE) 2024/1275.* Disponible sur https://energie.wallonie.be/fr/20-06-2024-nouvelle-directive-peb-ue-2024-1275.html?IDC=8230&IDD=177380#:~:text=Cette%20Directive%20(UE)%202024%2F1275%20est%20entr%C3%A9e%20en%20vigueur,un%20nouvel%20Arr%C3%AAt%C3%A9%20d'application. Consulté le 28/03/2025.

Statbel. (2023). *Statistique cadastrale du parc de bâtiments.* Disponible sur https://statbel.fgov.be/fr/open-data/statistique-cadastrale-du-parc-de-batiments. Consulté le 01/05/2025.

Statbel. (2025). *Statistique cadastrale du parc de bâtiments.* Disponible sur https://bestat.statbel.fgov.be/bestat/crosstable.xhtml?view=43d7cdce-3647-4f5c-86f1-a4e0c864f692. Consulté le 01/05/2025.

TOTEM. (s. d.). Bienvenue sur TOTEM. Disponible sur https://www.totem-building.be/welcome.xhtml. Consulté le 03/07/2026.

Woolconcept. (s. d.). *Accueil.* Disponible sur https://woolconcept.be/. Consulté le 28/03/2025.

Annexes

Annexe 1 – Répartition des matériaux entre les parois

Répartition initiale. Établie à partir des compatibilités entre matériaux et parois et des logiques constructives propres à chaque famille de typologies, indépendamment des capacités de production. Elle est décrite à la section 7.4 et sert de base aux cinq premières trajectoires.

Répartition révisée. Obtenue en affectant chaque matériau à la paroi où il est le moins substituable, dans la limite de la capacité de son producteur. Elle est établie à la section 8.5 et sert à la sixième trajectoire. Les écarts d'un même matériau entre les trois familles (en ITE et en sols) ne tiennent qu'à la part du polyuréthane, fixée en section 7.4 et non révisée, qui réduit le restant à partager entre les biosourcés.

RÉPARTITION - TOITS (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	30%	30%	30%
Chaux-chanvre	0%	0%	0%
Laine de mouton	5%	5%	5%
Herbe	15%	15%	15%
Miscanthus	5%	5%	5%
Textile coton	10%	10%	10%
Fibre de bois	30%	30%	30%
Polyuréthane	5%	5%	5%

RÉPARTITION - MURS ITI (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	20%	25%	25%
Chaux-chanvre	40%	20%	5%
Laine de mouton	5%	5%	5%
Herbe	10%	15%	15%
Miscanthus	5%	5%	5%
Textile coton	5%	10%	15%
Fibre de bois	15%	20%	30%
Polyuréthane	0%	0%	0%

RÉPARTITION - MURS ITE (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	0%	0%	0%
Chaux-chanvre	56%	37%	14%
Laine de mouton	0%	0%	0%
Herbe	22%	38%	43%
Miscanthus	0%	0%	0%
Textile coton	22%	25%	29%
Fibre de bois	0%	0%	0%
Polyuréthane	0%	0%	14%

RÉPARTITION - SOLS (planchers + murs enterrés) (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	22%	22%	21%
Chaux-chanvre	0%	0%	0%
Laine de mouton	6%	6%	5%
Herbe	5%	5%	5%
Miscanthus	0%	0%	0%
Textile coton	0%	6%	11%
Fibre de bois	39%	39%	37%
Polyuréthane	28%	22%	21%

RÉPARTITION - TOITS (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	95%	95%	95%
Chaux-chanvre	0%	0%	0%
Laine de mouton	0%	0%	0%
Herbe	0%	0%	0%
Miscanthus	0%	0%	0%
Textile coton	0%	0%	0%
Fibre de bois	0%	0%	0%
Polyuréthane	5%	5%	5%

RÉPARTITION - MURS ITI (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	90%	90%	90%
Chaux-chanvre	0%	0%	0%
Laine de mouton	2%	2%	2%
Herbe	0%	0%	0%
Miscanthus	2%	2%	2%
Textile coton	0%	0%	0%
Fibre de bois	6%	6%	6%
Polyuréthane	0%	0%	0%

RÉPARTITION - MURS ITE (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	0%	0%	0%
Chaux-chanvre	7%	7%	6%
Laine de mouton	0%	0%	0%
Herbe	78%	78%	67%
Miscanthus	0%	0%	0%
Textile coton	15%	15%	13%
Fibre de bois	0%	0%	0%
Polyuréthane	0%	0%	14%

RÉPARTITION - SOLS (planchers + murs enterrés) (% par famille)			
Matériau	**F1 (HE1-5)**	**F2 (HE6-10)**	**F3 (HE11-14)**
Ouate de cellulose	31%	34%	34%
Chaux-chanvre	0%	0%	0%
Laine de mouton	5%	6%	6%
Herbe	0%	0%	0%
Miscanthus	0%	0%	0%
Textile coton	0%	0%	0%
Fibre de bois	36%	38%	39%
Polyuréthane	28%	22%	21%

Annexe 2 – Feuille de résultats du modèle, trajectoire de substitution intégrale

Résultats complets du modèle pour la trajectoire employant des matériaux biosourcés dans l'ensemble des rénovations, selon la répartition initiale reproduite à l'annexe 1. Réglages retenus : cibles thermiques Optimum SRLT, part biosourcée de 100 %, horizon de 25 ans. Cette trajectoire est celle qui sert de référence à la construction du modèle en section 7 et à la comparaison avec l'étude de référence en section 8.2.

RÉSULTATS - SYNTHÈSE DU MODÈLE

Réponse à la demande en isolants biosourcés et recyclés en Wallonie

Feuille de synthèse des résultats. Les paramètres modifiables se trouvent dans la feuille Paramètres. La feuille Analyse de sensibilité mesure l'influence de chaque paramètre sur le volume total d'isolant.

CONTEXTE ACTIF

Scénario de cibles thermiques	2 - SRLT (COZEB Optimum SRLT)	
Part biosourcée (p_bio)	1.00	*1 = tout biosourcé (contrainte maximale) / 0,07 = scénario actuel*
Horizon de rénovation (années)	25	

A. VOLUME TOTAL D'ISOLANT ET RÉPARTITION PAR MATÉRIAU

Volume total (parc entier, m³) **63,499,066** **Volume annuel (m³/an)** **2,539,963**

Code	Matériau	Toit (m³)	Murs (m³)	Sols (m³)	Total (m³)	% total
M1	Ouate de cellulose	5,742,887	3,087,476	1,160,113	**9,990,476**	15.7%
M2	Chaux-chanvre	0	19,968,554	0	**19,968,554**	31.4%
M3	Laine de mouton	982,336	717,873	297,857	**1,998,066**	3.1%
M4	Herbe	3,022,572	5,332,001	305,495	**8,660,067**	13.6%
M5	Miscanthus	2,015,048	1,472,560	0	**3,487,608**	5.5%
M6	Textile coton recyclé	1,863,920	3,441,496	310,867	**5,616,283**	8.8%
M7	Fibre de bois	6,951,916	2,972,926	2,297,220	**12,222,062**	19.2%
M8	Polyuréthane	629,703	148,916	777,329	**1,555,947**	2.5%
M9	Laine de verre	0	0	0	**0**	0.0%
M10	Laine de roche	0	0	0	**0**	0.0%
M11	Polystyrène expansé	0	0	0	**0**	0.0%
M12	Polystyrène extrudé	0	0	0	**0**	0.0%
	TOTAL PARC	**21,208,382**	**37,141,803**	**5,148,881**	**63,499,066**	**100.0%**

B. CONFRONTATION INDUSTRIELLE - PLAFOND DES PRODUCTEURS WALLONS

Besoin annuel (m³/an) confronté aux capacités des producteurs d'isolants biosourcés. Ratio > 100 % = production insuffisante.

Code	Matériau	Producteur(s)	Besoin (m³/an)	Cap. act. (m³/an)	Cap. pot. (m³/an)	Ratio act.	Ratio pot.	Verdict
M1	Ouate de cellulose	ISOCELL + ISOPROC	399,619	472,727	836,363	85%	48%	Confortable
M2	Chaux-chanvre	IsoHemp	798,742	17,188	43,000	4647%	1858%	Insuffisant
M3	Laine de mouton	Woolconcept	79,923	1,600	16,000	4995%	500%	Insuffisant
M4	Herbe	Gramitherm	346,403	40,000	200,000	866%	173%	Insuffisant
M5	Miscanthus	PROMisc	139,504	250	15,000	55802%	930%	Insuffisant
M6	Textile coton recyclé	IsoFabric	224,651	10,000	35,000	2247%	642%	Insuffisant
M7	Fibre de bois	Lenoo	488,882	20,000	80,000	2444%	611%	Insuffisant

C. CONFRONTATION AGRICOLE - PLAFOND DU GISEMENT WALLON

Trois matériaux issus d'une culture wallonne. Besoin en matière première (tonnes/an) confronté au gisement disponible.

Culture	Matériau	Gisement dispo (t/an)	Besoin (t/an)	Ratio	Import (t/an)	Verdict
Chanvre	Chaux-chanvre	56.5	245,373.6	4341.1	245,317.1	Déficit
Miscanthus	Miscanthus	1,852.5	19,586.4	10.6	17,733.9	Déficit
Herbe	Herbe	1,151,761.9	11,639.1	0.0	0.0	Suffisant

D. SYNTHÈSE À DOUBLE PLAFOND - QUELLE CONTRAINTE DOMINE ?

Pour les trois matériaux agricoles, le verdict industriel (usine) et le verdict agricole (champ) côte à côte. La contrainte dominante est celle dont le ratio est le plus élevé.

Matériau	Verdict industriel	Ratio ind.	Verdict agricole	Ratio agr.	Contrainte dominante
Chaux-chanvre	Insuffisant	18.6	Déficit	4341.1	Ressource au champ
Miscanthus	Insuffisant	9.3	Déficit	10.6	Ressource au champ
Herbe	Insuffisant	1.7	Suffisant	0.0	Capacité industrielle

Le chanvre est bloqué au champ (gisement wallon quasi nul, import massif), l'herbe est bloquée à l'usine (gisement abondant dans les prairies, capacité Gramitherm limitante).

E. CALENDRIER DE RÉNOVATION - RYTHME IMPOSÉ PAR LES ÉCHÉANCES PEB 2050

Le volume total est réparti selon le calendrier wallon (label B minimum en 2050, propriétaires existants), sans changer le total. Rythme confronté à la capacité biosourcée potentielle.

Repère : taux de rénovation actuel ≈ 1 %/an, moyenne lissée = **2,539,963** *m³/an*

Période	Vol/an (m³)	Taux/an du parc	x moyenne	x capacité biosourcée	Verdict
2025-2031	2,987,368	4.3%	1.18	2.44	Production dépassée
2031-2036	2,169,693	3.2%	0.85	1.77	Production dépassée
2036-2041	2,491,726	3.6%	0.98	2.03	Production dépassée
2041-2046	2,526,863	3.7%	0.99	2.06	Production dépassée
2046-2050	2,408,362	3.5%	0.95	1.97	Production dépassée

Le calendrier exige un rythme de 3 à 4 fois le taux actuel, jamais soutenable par la seule production biosourcée. Le point le plus dur est le premier palier 2025-2031, qui doit sortir tous les logements G. L'hypothèse de volume moyen uniforme sous-estime encore cet effort initial.

F. BILAN ENVIRONNEMENTAL - CARBONE INCORPORÉ, ÉNERGIE GRISE, MATIÈRE

Les impact sont ceux des étapes de production (A1-A3) des isolants pour la rénovation complète du parc, selon le scénario et p_bio actifs. Seul le carbone fossile est pris en compte (la part biogénique, temporaire, n'est pas décomptée). L'énergie retenue est la part non-renouvelable, ce qui exclut l'énergie contenue dans la biomasse.

Changement climatique (combustibles fossiles) et rapport au seuil du budget carbone résidentiel	**Carbone fossile incorporé - total parc (t CO2 éq)**	**4,415,547**
	soit par an (t CO2 éq/an)	176,622
	part du budget carbone résidentiel wallon	3.9%
Énergie grise non-renouvelable	**Énergie grise non renouvelable - total parc (GJ)**	47,989,463
	soit en TJ	47,989
Masse d'isolant mise en œuvre et rapport au seuil de consommation intérieure de matière (DMC)	**Masse d'isolant - total parc (t)**	8,570,497
	soit par an (t/an)	342,820
	part de la DMC wallonne (cible 45 Mt/an)	0.8%

Basculer p_bio de 1 à 0 compare le scénario tout biosourcé au tout conventionnel. Les biosourcés légers réduisent fortement l'énergie grise, alors que le chaux-chanvre et le coton font exception.

G. DÉCHETS DE MISE EN ŒUVRE - CHUTES DE POSE

Volume de chutes produites lors de la pose, obtenu en appliquant à chaque volume posé le taux de chute propre au matériau, selon le scénario et p_bio actifs. La dépose des matériaux existants n'entre pas dans ce périmètre.

Code	Matériau	Volume posé (m³)	Taux de chute	Déchet (m³)
M1	Ouate de cellulose	9,990,476	2.0%	199,810
M2	Chaux-chanvre	19,968,554	3.0%	599,057
M3	Laine de mouton	1,998,066	5.0%	99,903
M4	Herbe	8,660,067	2.0%	173,201
M5	Miscanthus	3,487,608	0.5%	17,438
M6	Textile coton recyclé	5,616,283	2.0%	112,326
M7	Fibre de bois	12,222,062	1.0%	122,221
M8	Polyuréthane	1,555,947	5.0%	77,797
M9	Laine de verre	0	2.0%	0
M10	Laine de roche	0	2.0%	0
M11	Polystyrène expansé	0	5.0%	0
M12	Polystyrène extrudé	0	5.0%	0
	TOTAL PARC	**63,499,066**		**1,401,753**
		Taux de chute moyen		2.21%
		soit par an (m³/an)		56,070

Le taux de chute global dépend de la répartition entre les matériaux et varie donc avec p_bio. Les isolants en vrac n'engendrent quasiment aucune chute, les panneaux en produisent le plus.

Annexe 3 – Feuille de résultats du modèle, trajectoire de déplacement de la matière

Résultats complets du modèle pour la trajectoire affectant chaque matériau à la paroi où il est le moins substituable, selon la répartition révisée reproduite à l'annexe 1. Réglages retenus : cibles thermiques Optimum SRLT, part biosourcée de 61,1 %, horizon de 25 ans. Cette trajectoire est établie à la section 8.5 et porte les résultats commentés aux sections 8.6 à 8.8.

RÉSULTATS - SYNTHÈSE DU MODÈLE

Réponse à la demande en isolants biosourcés et recyclés en Wallonie

Feuille de synthèse des résultats. Les paramètres modifiables se trouvent dans la feuille Paramètres. La feuille Analyse de sensibilité mesure l'influence de chaque paramètre sur le volume total d'isolant.

CONTEXTE ACTIF

Scénario de cibles thermiques	2 - SRLT (COZEB Optimum SRLT)	
Part biosourcée (p_bio)	0.61	*1 = tout biosourcé (contrainte maximale) / 0,07 = scénario actuel*
Horizon de rénovation (années)	25	

A. VOLUME TOTAL D'ISOLANT ET RÉPARTITION PAR MATÉRIAU

Volume total (parc entier, m³) 48,124,823 — **Volume annuel (m³/an)** 1,924,993

Code	Matériau	Toit (m³)	Murs (m³)	Sols (m³)	Total (m³)	% total
M1	Ouate de cellulose	11,115,167	7,667,885	1,081,508	**19,864,560**	41.3%
M2	Chaux-chanvre	0	1,075,126	0	**1,075,126**	2.2%
M3	Laine de mouton	0	217,627	182,044	**399,671**	0.8%
M4	Herbe	0	4,999,476	0	**4,999,476**	10.4%
M5	Miscanthus	0	374,412	0	**374,412**	0.8%
M6	Textile coton recyclé	0	875,160	0	**875,160**	1.8%
M7	Fibre de bois	0	596,179	1,404,150	**2,000,329**	4.2%
M8	Polyuréthane	1,119,359	482,775	947,038	**2,549,172**	5.3%
M9	Laine de verre	3,261,114	3,564,083	99,780	**6,924,977**	14.4%
M10	Laine de roche	2,291,593	3,047,728	105,174	**5,444,495**	11.3%
M11	Polystyrène expansé	342,760	1,645,381	377,548	**2,365,688**	4.9%
M12	Polystyrène extrudé	313,380	334,300	604,076	**1,251,756**	2.6%
	TOTAL PARC	**18,443,373**	**24,880,132**	**4,801,318**	**48,124,823**	**100.0%**

B. CONFRONTATION INDUSTRIELLE - PLAFOND DES PRODUCTEURS WALLONS

Besoin annuel (m³/an) confronté aux capacités des producteurs d'isolants biosourcés. Ratio > 100 % = production insuffisante.

Code	Matériau	Producteur(s)	Besoin (m³/an)	Cap. act. (m³/an)	Cap. pot. (m³/an)	Ratio act.	Ratio pot.	Verdict
M1	Ouate de cellulose	ISOCELL + ISOPROC	794,582	472,727	836,363	168%	95.00%	Tendu
M2	Chaux-chanvre	IsoHemp	43,005	17,188	43,000	250%	100.01%	Insuffisant
M3	Laine de mouton	Woolconcept	15,987	1,600	16,000	999%	99.92%	Tendu
M4	Herbe	Gramitherm	199,979	40,000	200,000	500%	99.99%	Tendu
M5	Miscanthus	PROMisc	14,976	250	15,000	5991%	99.84%	Tendu
M6	Textile coton recyclé	IsoFabric	35,006	10,000	35,000	350%	100.02%	Insuffisant
M7	Fibre de bois	Lenoo	80,013	20,000	80,000	400%	100.02%	Insuffisant

C. CONFRONTATION AGRICOLE - PLAFOND DU GISEMENT WALLON

Trois matériaux issus d'une culture wallonne. Besoin en matière première (tonnes/an) confronté au gisement disponible.

Culture	Matériau	Gisement dispo (t/an)	Besoin (t/an)	Ratio	Import (t/an)	Verdict
Chanvre	Chaux-chanvre	56.5	13,211.1	233.7	13,154.6	Déficit
Miscanthus	Miscanthus	1,852.5	2,102.7	1.1	250.2	Déficit
Herbe	Herbe	1,151,761.9	6,719.3	0.0	0.0	Suffisant

D. SYNTHÈSE À DOUBLE PLAFOND - QUELLE CONTRAINTE DOMINE ?

Pour les trois matériaux agricoles, le verdict industriel (usine) et le verdict agricole (champ) côte à côte. La contrainte dominante est celle dont le ratio est le plus élevé.

Matériau	Verdict industriel	Ratio ind.	Verdict agricole	Ratio agr.	Contrainte dominante
Chaux-chanvre	Insuffisant	1.0	Déficit	233.7	Ressource au champ
Miscanthus	Tendu	1.0	Déficit	1.1	Ressource au champ
Herbe	Tendu	1.0	Suffisant	0.0	Capacité industrielle

Le chanvre est bloqué au champ (gisement wallon quasi nul, import massif), l'herbe est bloquée à l'usine (gisement abondant dans les prairies, capacité Gramitherm limitante).

E. CALENDRIER DE RÉNOVATION - RYTHME IMPOSÉ PAR LES ÉCHÉANCES PEB 2050

Le volume total est réparti selon le calendrier wallon (label B minimum en 2050, propriétaires existants), sans changer le total. Rythme confronté à la capacité biosourcée potentielle.

Repère : taux de rénovation actuel ≈ 1 %/an, moyenne lissée = **1,924,993** *m³/an*

Période	Vol/an (m³)	Taux/an du parc	x moyenne	x capacité biosourcée	Verdict
2025-2031	2,264,073	4.3%	1.18	1.13	Production dépassée
2031-2036	1,644,372	3.2%	0.85	0.82	Tendu
2036-2041	1,888,435	3.6%	0.98	0.94	Tendu
2041-2046	1,915,065	3.7%	0.99	0.96	Tendu
2046-2050	1,825,255	3.5%	0.95	0.91	Tendu

Le calendrier exige un rythme de 3 à 4 fois le taux actuel, jamais soutenable par la seule production biosourcée. Le point le plus dur est le premier palier 2025-2031, qui doit sortir tous les logements G. L'hypothèse de volume moyen uniforme sous-estime encore cet effort initial.

F. BILAN ENVIRONNEMENTAL - CARBONE INCORPORÉ, ÉNERGIE GRISE, MATIÈRE

Les impact sont ceux des étapes de production (A1-A3) des isolants pour la rénovation complète du parc, selon le scénario et p_bio actifs. Seul le carbone fossile est pris en compte (la part biogénique, temporaire, n'est pas décomptée). L'énergie retenue est la part non-renouvelable, ce qui exclut l'énergie contenue dans la biomasse.

Changement climatique (combustibles fossiles) et rapport au seuil du budget carbone résidentiel	**Carbone fossile incorporé - total parc (t CO2 éq)**	**2,458,803**
	soit par an (t CO2 éq/an)	98,352
	part du budget carbone résidentiel wallon	2.2%
Énergie grise non-renouvelable	**Énergie grise non renouvelable - total parc (GJ)**	50,128,824
	soit en TJ	50,129
Masse d'isolant mise en œuvre et rapport au seuil de consommation intérieure de matière (DMC)	**Masse d'isolant - total parc (t)**	2,320,780
	soit par an (t/an)	92,831
	part de la DMC wallonne (cible 45 Mt/an)	0.2%

Basculer p_bio de 1 à 0 compare le scénario tout biosourcé au tout conventionnel. Les biosourcés légers réduisent fortement l'énergie grise, alors que le chaux-chanvre et le coton font exception.

G. DÉCHETS DE MISE EN ŒUVRE - CHUTES DE POSE

Volume de chutes produites lors de la pose, obtenu en appliquant à chaque volume posé le taux de chute propre au matériau, selon le scénario et p_bio actifs. La dépose des matériaux existants n'entre pas dans ce périmètre.

Code	Matériau	Volume posé (m³)	Taux de chute	Déchet (m³)
M1	Ouate de cellulose	19,864,560	2.0%	397,291
M2	Chaux-chanvre	1,075,126	3.0%	32,254
M3	Laine de mouton	399,671	5.0%	19,984
M4	Herbe	4,999,476	2.0%	99,990
M5	Miscanthus	374,412	0.5%	1,872
M6	Textile coton recyclé	875,160	2.0%	17,503
M7	Fibre de bois	2,000,329	1.0%	20,003
M8	Polyuréthane	2,549,172	5.0%	127,459
M9	Laine de verre	6,924,977	2.0%	138,500
M10	Laine de roche	5,444,495	2.0%	108,890
M11	Polystyrène expansé	2,365,688	5.0%	118,284
M12	Polystyrène extrudé	1,251,756	5.0%	62,588
	TOTAL PARC	**48,124,823**		**1,144,617**
		Taux de chute moyen		2.38%
		soit par an (m³/an)		45,785

Le taux de chute global dépend de la répartition entre les matériaux et varie donc avec p_bio. Les isolants en vrac n'engendrent quasiment aucune chute, les panneaux en produisent le plus.

Annexe 4 – Analyse de sensibilité du modèle

Les deux tableaux mesurent séparément la réponse du modèle et l'incertitude réelle de ses données. Le premier fait varier chaque variable de 10 et 20 % autour du cas de référence. Le second croise cet impact avec une incertitude plausible de chaque donnée, ce qui permet de désigner les points faibles. Un troisième bloc écarte la part biosourcée du classement et en mesure l'amplitude propre. Le cas de référence est celui de l'annexe 2, dont le volume de 63 499 066 m³ sert de base à tous les écarts. La lecture de ces résultats relève de la section 8.1.

ANALYSE DE SENSIBILITÉ

Analyse faite sur le scénario suivant : volume de base 63 499 066 m³, scénario SRLT, p_bio = 1

TABLEAU 1 - Sensibilité : variation uniforme ±10/±20 % sur chaque variable (pour p_bio = 1)

Pour chaque variable, perturbation uniforme (±10 %, ±20 %) et mesure du volume résultant. Objectif : identifier la sensibilité du modèle, indépendamment de l'incertitude réelle des variables.

#	Variable	Catégorie	V(-20 %) (m³)	V(-10 %) (m³)	V_base (m³)	V(+10 %) (m³)	V(+20 %) (m³)	Amplitude (m³)	Amplitude (%)	Impact d'1 % (%)
1	Total parc unifamilial (1 327 396)	A. Statbel	50,799,252	57,149,159	63,499,066	69,848,972	76,198,879	25,399,626	40.00	1.00
2	U_murs SRLT (toutes typologies)	E. U cibles SRLT	74,826,367	68,533,422	63,499,066	59,519,022	56,202,320	18,624,047	29.33	0.71
3	Surface S_murs (toutes typologies)	C. Surfaces	56,070,705	59,784,885	63,499,066	67,213,246	70,927,426	14,856,721	23.40	0.58
4	λ murs (tous matériaux)	F. Conductivités	56,070,705	59,784,885	63,499,066	67,213,246	70,927,426	14,856,721	23.40	0.58
5	U_toit SRLT (toutes typologies)	E. U cibles SRLT	70,104,917	66,435,000	63,499,066	61,116,678	59,131,356	10,973,562	17.28	0.42
6	Surface S_toit (toutes typologies)	C. Surfaces	59,257,389	61,378,227	63,499,066	65,619,904	67,740,742	8,483,353	13.36	0.33
7	λ toit (tous matériaux)	F. Conductivités	59,257,389	61,378,227	63,499,066	65,619,904	67,740,742	8,483,353	13.36	0.33
8	% parc HE5	B. Pondération typo	61,126,811	62,312,938	63,499,066	64,685,193	65,871,320	4,744,509	7.47	0.19
9	% parc HE9	B. Pondération typo	61,574,577	62,536,821	63,499,066	64,461,310	65,423,554	3,848,977	6.06	0.15
10	U_sol SRLT (toutes typologies)	E. U cibles SRLT	66,193,251	64,696,481	63,499,066	62,900,987	62,402,588	3,790,663	5.97	0.14
11	% parc HE6	B. Pondération typo	61,636,712	62,567,889	63,499,066	64,430,242	65,361,419	3,724,708	5.87	0.15
12	U_murs existant (toutes typologies)	D. U existants	61,839,397	62,761,435	63,499,066	64,241,557	64,860,299	3,020,902	4.76	0.12
13	% parc HE7	B. Pondération typo	62,287,936	62,893,501	63,499,066	64,104,630	64,710,195	2,422,260	3.81	0.10
14	% parc HE1	B. Pondération typo	62,438,182	62,968,624	63,499,066	64,029,507	64,559,949	2,121,767	3.34	0.08
15	U_toit existant (toutes typologies)	D. U existants	62,249,596	62,943,746	63,499,066	63,973,159	64,368,236	2,118,640	3.34	0.08
16	Surface S_sol (toutes typologies)	C. Surfaces	62,469,289	62,984,177	63,499,066	64,013,954	64,528,842	2,059,552	3.24	0.08
17	λ sols (tous matériaux)	F. Conductivités	62,469,289	62,984,177	63,499,066	64,013,954	64,528,842	2,059,552	3.24	0.08
18	% parc HE4	B. Pondération typo	62,489,013	62,994,039	63,499,066	64,004,092	64,509,118	2,020,104	3.18	0.08
19	% parc HE3	B. Pondération typo	62,552,147	63,025,606	63,499,066	63,972,525	64,445,984	1,893,838	2.98	0.07
20	% parc HE11	B. Pondération typo	62,638,683	63,068,874	63,499,066	63,929,257	64,359,448	1,720,765	2.71	0.07
21	U_sol existant (toutes typologies)	D. U existants	63,141,569	63,340,178	63,499,066	64,010,689	64,437,042	1,295,474	2.04	0.05
22	% parc HE2	B. Pondération typo	62,931,169	63,215,117	63,499,066	63,783,014	64,066,963	1,135,794	1.79	0.04
23	% parc HE8	B. Pondération typo	63,107,874	63,303,470	63,499,066	63,694,661	63,890,257	782,383	1.23	0.03
24	% parc HE10	B. Pondération typo	63,260,796	63,379,931	63,499,066	63,618,200	63,737,335	476,539	0.75	0.02
25	% parc HE12	B. Pondération typo	63,341,120	63,420,093	63,499,066	63,578,038	63,657,011	315,890	0.50	0.01
26	% parc HE14	B. Pondération typo	63,403,019	63,451,042	63,499,066	63,547,089	63,595,112	192,092	0.30	0.01
27	% parc HE13	B. Pondération typo	63,499,066	63,499,066	63,499,066	63,499,066	63,499,066	0	0.00	0.00

ANALYSE DE SCÉNARIO - PART BIOSOURCÉE p_bio

p_bio n'est pas une incertitude mais un choix de scénario. Effet quasi linéaire : total = p_bio x voie biosourcée + (1 - p_bio) x voie conventionnelle.

p_bio	Volume total (m³)	dont voie biosourcée (m³)	dont voie conventionnelle (m³)
0.00	45,229,152	0	45,229,152
0.07	46,508,046	4,444,935	42,063,112
0.25	49,796,631	15,874,766	33,921,864
0.50	54,364,109	31,749,533	22,614,576
0.75	58,931,587	47,624,299	11,307,288
1.00	63,499,066	63,499,066	0

En allant de 0 à 1, le total varie de 45 229 152 à 63 499 066 m³. p_bio est le facteur le plus structurant, mais c'est un choix, non une incertitude.

TABLEAU 2 - Classement : impact d'1 % x plage d'incertitude réaliste (pour p_bio = 1)

Chaque variable est associée à une plage d'incertitude plausible. Impact total = incertitude équivalente x impact d'1 %. Tri décroissant : identifie les variables à la fois sensibles ET réellement incertaines.

Rang	Variable	Catégorie	Impact d'1 % (%)	Plage - (%)	Plage + (%)	Incertitude éq. (%)	Impact total (%)	Justification de la plage
1	Surface S_murs (toutes typologies)	C. Surfaces	0.58	15	15	15	8.77	Annexe A.1 COZEB 3 : forte variabilité réelle au sein de chaque typologie (volumétrie, orientation, mitoyenneté).
2	U_murs SRLT (toutes typologies)	E. U cibles SRLT	0.71	10	10	10	7.10	Cible Optimum SRLT : optimisation économique, dépend des hypothèses de coûts retenues.
3	λ murs (tous matériaux)	F. Conductivités	0.58	10	10	10	5.85	λ par matériau : variation selon densité, conditionnement et mise en œuvre. Poids amplifié par le chaux-chanvre (λ=0,090).
4	Surface S_toit (toutes typologies)	C. Surfaces	0.33	15	15	15	5.01	Annexe A.1 COZEB 3 : forte variabilité réelle au sein de chaque typologie (volumétrie, orientation, mitoyenneté).
5	U_toit SRLT (toutes typologies)	E. U cibles SRLT	0.42	10	10	10	4.19	Cible Optimum SRLT : optimisation économique, dépend des hypothèses de coûts retenues.
6	λ toit (tous matériaux)	F. Conductivités	0.33	10	10	10	3.34	λ par matériau : variation selon densité, conditionnement et mise en œuvre. Poids amplifié par le chaux-chanvre (λ=0,090).
7	Total parc unifamilial (1 327 396)	A. Statbel	1.00	2	2	2	2.00	Donnée Statbel 2025 : faible marge.
8	% parc HE5	B. Pondération typo	0.19	10	10	10	1.87	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
9	% parc HE9	B. Pondération typo	0.15	10	10	10	1.52	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
10	% parc HE6	B. Pondération typo	0.15	10	10	10	1.47	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
11	U_sol SRLT (toutes typologies)	E. U cibles SRLT	0.14	10	10	10	1.41	Cible Optimum SRLT : optimisation économique, dépend des hypothèses de coûts retenues.
12	Surface S_sol (toutes typologies)	C. Surfaces	0.08	15	15	15	1.22	Annexe A.1 COZEB 3 : forte variabilité réelle au sein de chaque typologie (volumétrie, orientation, mitoyenneté).
13	U_murs existant (toutes typologies)	D. U existants	0.12	10	10	10	1.17	Umoy représentatif par typologie : rénovations partielles antérieures mal connues.
14	% parc HE7	B. Pondération typo	0.10	10	10	10	0.95	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
15	% parc HE1	B. Pondération typo	0.08	10	10	10	0.84	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
16	λ sols (tous matériaux)	F. Conductivités	0.08	10	10	10	0.81	λ par matériau : variation selon densité, conditionnement et mise en œuvre. Poids amplifié par le chaux-chanvre (λ=0,090).
17	U_toit existant (toutes typologies)	D. U existants	0.08	10	10	10	0.81	Umoy représentatif par typologie : rénovations partielles antérieures mal connues.
18	% parc HE4	B. Pondération typo	0.08	10	10	10	0.80	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
19	% parc HE3	B. Pondération typo	0.07	10	10	10	0.75	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
20	% parc HE11	B. Pondération typo	0.07	10	10	10	0.68	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
21	U_sol existant (toutes typologies)	D. U existants	0.05	10	10	10	0.53	Umoy représentatif par typologie : rénovations partielles antérieures mal connues.
22	% parc HE2	B. Pondération typo	0.04	10	10	10	0.45	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
23	% parc HE8	B. Pondération typo	0.03	10	10	10	0.31	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
24	% parc HE10	B. Pondération typo	0.02	10	10	10	0.19	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
25	% parc HE12	B. Pondération typo	0.01	10	10	10	0.12	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
26	% parc HE14	B. Pondération typo	0.01	10	10	10	0.08	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.
27	% parc HE13	B. Pondération typo	0.00	10	10	10	0.00	Pondération COZEB 3 : plage ±10 % couvre l'incertitude de répartition typologique du parc.