

Mémoire

Auteur : Santos Teixeira, Ricardo

Promoteur(s) : 2770; Abrahams, Pauline

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18386>

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.



Uni.Lu – Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Médecine

ULiège – Faculté des Sciences – Département des Sciences et Gestion de l’Environnement

LA FAISABILITE DE L’ATTEINTE DE LA NEUTRALITE CARBONE POUR DES MAISONS UNIFAMILIALES

RICARDO SANTOS TEIXEIRA

MEMOIRE EN VUE DE L’OBTENTION DES DIPLOMES DE

MASTER EN DÉVELOPPEMENT DURABLE – FINALITÉ ENERGIE-ET ENVIRONNEMENT (UNI.LU)

**MASTER EN SCIENCES ET GESTION DE L’ENVIRONNEMENT – FINALITÉ ÉNERGIES RENOUVELABLES ET
BÂTIMENTS DURABLES (ULIEGE)**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE FRANK SCHOLZEN (UNI.LU) ET PAULINE ABRAHAMS (ULIEGE)

COMITÉ DE LECTURE :

STEFAN FRIES

GEORGES JACQUOT

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège et de l'Université du Luxembourg.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document: [SANTOS TEIXEIRA Ricardo
ricardosantos.97@outlook.com].

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux qui ont contribué de manière significative à la réalisation de ma thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont participé à mon stage, car c'est là-bas et avec elles que nous avons développé mon sujet de mémoire. J'adresse donc mes plus sincères remerciements à mon tuteur de stage, M. Fries. Grâce à ses conseils avisés, à son expertise inestimable et à sa disponibilité constante, j'ai pu développer mes compétences professionnelles et acquérir une expérience pratique essentielle pour ma formation académique et la réalisation de ce rapport.

De plus, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers Monsieur Jacquot, mon autre tuteur. Sa guidance experte et ses précieux enseignements m'ont permis de me familiariser avec les aspects complexes du domaine de ma recherche. Sa confiance en mes capacités m'a encouragé à donner le meilleur de moi-même et à atteindre des résultats significatifs.

Mes remerciements s'étendent également à toute l'équipe de l'entreprise qui m'a accueilli chaleureusement. J'ai eu la chance de travailler avec des professionnels talentueux et dévoués. Leur disponibilité et leurs échanges fructueux ont grandement contribué à mon développement personnel et professionnel.

J'adresse également ma profonde reconnaissance à mon superviseur académique, Monsieur Scholzen. Ses précieux conseils et son expertise pointue ont été d'une valeur inestimable. Ses remarques constructives et ses discussions stimulantes ont contribué à façonner ma réflexion et à affiner ma méthodologie de recherche.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude infinie envers ma famille. Leur confiance en mes capacités et leur présence tout au long de ce parcours académique ont été des piliers solides sur lesquels je me suis appuyé.

Abstract

The construction sector in Luxembourg has a negative impact on the environment. Numerous instruments have been developed to encourage this sector to turn towards more sustainable solutions. A recent concept often employed by various organizations and states is that of "carbon neutrality". Luxembourg, France and Germany created new standards and laws to achieve carbon neutrality by 2050.

The aim of this report is to analyze the feasibility of achieving carbon neutrality for single-family homes in Luxembourg. First, a life-cycle analysis was carried out for two house variants, one built with conventional materials and the other with bio-based materials. Then, a series of simulations over a 50-year life cycle were carried out with these houses, playing with a number of parameters: the quantity of photovoltaic panels, the geometry of the house and energy requirements. These tests confirmed that, by complying with certain criteria, the various houses can achieve carbon neutrality after 50 years.

Résumé

Le secteur de la construction au Luxembourg a un impact néfaste sur l'environnement. De nombreux instruments sont développés pour encourager ce secteur à se tourner vers des solutions plus durables. Un concept récent souvent employé par diverses organisations et États est celui de la "neutralité carbone". Le Luxembourg, la France et l'Allemagne ont créé de nouvelles normes et lois pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

L'objectif de ce rapport est d'analyser la faisabilité d'atteindre la neutralité carbone pour les maisons unifamiliales au Luxembourg. Tout d'abord, une analyse du cycle de vie a été réalisée pour deux variantes de maisons, l'une construite avec des matériaux conventionnels et l'autre avec des matériaux biosourcés. Ensuite, une série de simulations sur un cycle de vie de 50 ans a été réalisée avec ces maisons, en jouant sur un certain nombre de paramètres : la quantité de panneaux photovoltaïques, la géométrie de la maison et les besoins énergétiques. Ces tests ont confirmé qu'en respectant certains critères, les différentes maisons peuvent atteindre la neutralité carbone au bout de 50 ans.

Table des matières

1	Introduction	11
1.1	L'objectif de ce travail	12
1.2	Questions	12
2	Etat de l'art	13
2.1	Revue littéraire.....	13
2.2	Neutralité Carbone.....	16
2.3	Aspects juridiques et initiatives prises dans les pays voisins.....	17
2.3.1	Luxembourg	17
2.3.2	France.....	22
2.3.3	Allemagne	28
2.3.4	Conclusion	31
2.4	Analyse de cycle de vie	32
2.4.1	Analyse cycle de vie statique.....	32
2.4.2	Phases du cycle de vie.....	33
2.4.3	Analyse de cycle de vie dynamique	35
2.5	Indicateurs d'impact environnementaux	35
2.5.1	Global Warming Potential	36
2.5.2	PENRT	36
2.5.3	Autres indicateurs.....	36
3	Méthodologie.....	38
3.1	La thématique de recherche.....	38
3.2	Plan de recherche.....	38
3.3	Base de données	39
3.4	Limites de la méthodologie	40
4	Analyses.....	41
4.1	Matériaux et potentiels de réchauffements.....	41
4.1.1	Variante en béton.....	42
4.1.2	Variante en bois	49
4.2	Coefficient de transmission thermique U	54
4.1	Surfaces des bâtiments.....	55

4.2	Performance énergétique et environnementale du cas d'étude	58
4.2.1	Exploitation énergétique et environnementale du bâtiment.....	58
4.2.2	Panneaux photovoltaïques	60
5	Résultats.....	61
5.1	Scénario idéal.....	61
5.2	Scénario réaliste sur les maisons avec un toit plat	63
5.2.1	Classe énergétique A+	64
5.2.2	Classe énergétique A.....	65
5.2.3	Classe énergétique B.....	67
5.3	Atteinte de la neutralité avec une toiture plate	68
5.3.1	Construction massive.....	68
5.3.2	Construction en bois	69
5.4	Scénario réaliste avec les maisons avec un toit en pente.....	71
5.4.1	Classe énergétique A+	71
5.4.2	Classe énergétique A.....	73
5.4.3	Classe énergétique B.....	74
5.5	Atteinte de la neutralité carbone avec toiture inclinée	75
5.5.1	Construction massive.....	76
5.5.2	Construction en bois	77
5.6	Analyse de différentes variantes en considérant le module D	78
5.7	Comparaison entre 4 cas d'étude	79
5.7.1	Analyse de cycle de vie statique	79
5.7.2	Analyse de cycle de vie dynamique	81
5.8	Est-ce que les matériaux biosourcés dans la variante de construction en bois permettent une phase A1-A3 neutre ?	83
5.9	Composition des matériaux	85
5.9.1	Grande maison en construction massive.....	85
5.9.2	Grande maison en bois	86
6	Discussion	87
7	Conclusion.....	91
8	Bibliographie.....	92

Table des Figures

Figure 1: Neutralité carbone dans le secteur de la construction	17
Figure 2: Logo du PNEC luxembourgeois	18
Figure 3: : Evolution des émissions et des puits de GES en France	22
Figure 4: Secteurs d'émissions de GES en France.....	23
Figure 5: Etapes du plan climatique de l'Allemagne	29
Figure 6: Cycle de vie d'un produit du bâtiment	33
Figure 7: Phases du cycle de vie.....	34
Figure 8 : Analyse cycle de vie dynamique (Cerema, 2022)	35
Figure 9: Composition du toit en béton plat	42
Figure 10: Composition du toit incliné en béton	42
Figure 11: Composition du mur en béton extérieur	43
Figure 12: Composition du mur intérieur	44
Figure 13: Composition de la dalle entre le rez-de-chaussée et l'étage supérieur.....	45
Figure 14: Composition du revêtement de sol en carrelage et en parquet.....	45
Figure 15: Composition du plancher	46
Figure 16: Composition du toit plat en bois.....	49
Figure 17: Composition du toit incliné en bois.....	49
Figure 18: Composition mur extérieur variante bois	51
Figure 19: Composition du mur intérieur version bois.....	52
Figure 20: Composition plancher de l'étage version bois.....	52
Figure 21: Classes de performance énergétiques.....	58
Figure 22: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes sous un scénario idéal	63
Figure 23: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec A+	64
Figure 24: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec A	66
Figure 25: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec B	67
Figure 26: Emissions cumulées de CO ₂ pour la grande maison en béton avec A+	69
Figure 27: Emissions cumulées de CO ₂ pour la grande maison en bois avec A+	70
Figure 28: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec A+	72
Figure 29: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec A	73
Figure 30: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec B	75
Figure 31: Emissions cumulées de CO ₂ pour la grande maison en béton avec A+	76
Figure 32: Emissions cumulées de CO ₂ pour la grande maison en bois avec A+	78
Figure 33: Emissions cumulées de CO ₂ pour les deux variantes avec module D	79
Figure 34: Emissions cumulées de CO ₂ pour les quatre cas d'étude ; ACV statique	80
Figure 35: Coefficient de pondération général	81
Figure 36: Emissions cumulées de CO ₂ pour les quatre cas d'étude ; ACV dynamique	81
Figure 37: Emissions cumulées de CO ₂ au cours de la phase A1 - A3.....	83
Figure 38: Impact environnemental des modules composant les éléments de la maison en béton .85	
Figure 39: Impact environnemental des modules composant les éléments de la maison en bois ...86	

Liste des Tableaux

Tableau 1: GWP du toit plat	42
Tableau 2: GWP du toit incliné	43
Tableau 3: GWP du mur extérieur	44
Tableau 4: GWP du mur intérieur	44
Tableau 5: GWP de la dalle du premier étage	45
Tableau 6: GWP du revêtement carrelage	45
Tableau 7: GWP du revêtement parquet	46
Tableau 8: GWP du sol du rez-de-chaussée	46
Tableau 9: GWP de l'escalier	47
Tableau 10: GWP de la fenêtre	47
Tableau 11: GWP de la porte du garage	47
Tableau 12: GWP de la porte intérieure	48
Tableau 13: GWP de la porte de la maison	48
Tableau 14: GWP de la pompe à chaleur	48
Tableau 15: GWP du système photovoltaïque	49
Tableau 16: GWP du toit plat	50
Tableau 17: GWP du toit incliné	50
Tableau 18: GWP du mur extérieur	51
Tableau 19: GWP du mur intérieur	52
Tableau 20: GWP du plancher de l'étage	53
Tableau 21: GWP de l'escalier en bois	53
Tableau 22: GWP de la fenêtre	53
Tableau 23: Valeurs U des composantes et du bâtiment de référence ; Journal officiel du GDL p.28	54
Tableau 24: Surfaces horizontales	55
Tableau 25: Murs et épaisseurs	56
Tableau 26: Surface des éléments	57
Tableau 27: Besoin en énergie finale	58
Tableau 28: Exploitation par l'utilisateur en [kWh/a]	59
Tableau 29: Classes de performance environnementale	59
Tableau 30: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le scénario idéal	62
Tableau 31: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] sous un scénario idéal	63
Tableau 32: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A+	64
Tableau 33: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A+	65
Tableau 34: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A	66
Tableau 35: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A	66
Tableau 36: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et B	67
Tableau 37: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec B	68
Tableau 38: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A+	68
Tableau 39: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A+	69

Tableau 40: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A+	70
Tableau 41: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A+	71
Tableau 42: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A+	71
Tableau 43: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A+	72
Tableau 44: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A	73
Tableau 45: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A	74
Tableau 46: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et B	74
Tableau 47: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec B	75
Tableau 48: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A+	76
Tableau 49: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A+	77
Tableau 50: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A+	77
Tableau 51: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec A+	77
Tableau 52: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et B.....	78
Tableau 53: Emissions CO ₂ cumulées en fonction des années [kgCO ₂] avec D	79
Tableau 54: ACV statique contre ACV dynamique	82
Tableau 55: GWP de la phase A1-A3 pour chaque élément de construction	84
Tableau 56: Taux d'occupation du système photovoltaïque.....	88
Tableau 57: Impact du module D sur la classe énergétique	89

Liste des abréviations

ACV : Analyse cycle de vie

IEA : Agence internationale de l'énergie

NZEB : Nearly euro-émission building

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

GES : gaz à effet de serre

UE : Union Européenne

PNEC : Plan national énergie climat

PEB : performance énergétique des bâtiments

LENOZ : Lëtzebuerger Nohaltegkeets Zertifizéierung

SNBC : Stratégie nationale bas carbone

RE2020 : Règlementation environnementale des bâtiments en France

DH : degré heure

Bbio : Besoin énergétique du bâtiment

PRG : potentiel de réchauffement

GWP : Global Warming potential

PENRT : total d'énergie primaire non renouvelable

EP : Potentiel d'eutrophisation

AP : Potentiel d'acidification

ODP : Potentiel d'appauvrissement de l'ozone

POCP : Potentiel de création d'ozone photochimique

VOC : composés organiques volatils

PERE : utilisation d'énergie primaire renouvelable

PERM : utilisation de ressources énergétiques primaires renouvelables

PENRE : utilisation d'énergie primaire non renouvelable

PENRM : utilisation de ressource énergétiques primaires non renouvelables

FDES : fiches de déclarations environnementales et sanitaires

1 Introduction

La rapidité du changement climatique mondial est l'un des principaux problèmes auxquels notre planète est actuellement confrontée. La contribution de l'activité anthropique au réchauffement de la planète a été clairement démontrée comme étant plus importante que les émissions naturelles. Afin de freiner ce processus qui met en danger l'existence de l'humanité et de tous les écosystèmes sur terre, des accords internationaux ont été développés. L'un des principaux objectifs de ces accords est de diminuer la diffusion de gaz à effet de serre, notamment le plus connu d'entre eux, le dioxyde de carbone.

La construction et l'utilisation des bâtiments sont des sources importantes d'émissions présentant un fort potentiel de diminution des émissions. D'après la Commission européenne, les bâtiments sont responsables de 36 % des émissions de GES et de 40% de la consommation énergétique finale au sein de l'UE (Performance Énergétique Des Bâtiments : Neutralité Climatique D'ici 2050 | Actualité | Parlement Européen, 2023).

Au cours des dernières années, nombreux sont les pays qui ont déployé des efforts considérables et obtenu des résultats significatifs en matière de réduction de la demande énergétique dans les bâtiments. En 2002, l'Union européenne a publié la première directive sur la performance énergétique des bâtiments, ce qui a conduit en 2012 à l'établissement de bâtiments à consommation énergétique quasi nulle (NZEB) (Nearly Zero Energy Buildings, n.d.).

Cependant, il reste encore un budget carbone limité qui exige des niveaux nets d'émissions nuls d'ici 2050, ce qui nécessite des réductions encore plus ambitieuses dans le secteur du bâtiment. Les demandes des consommateurs et la disponibilité de technologies plus abordables ont également évolué de manière significative.

En plus des mesures d'efficacité énergétique, de nouvelles techniques de production décentralisée d'énergie ont émergé. Alors que la demande d'énergie opérationnelle pour la phase d'exploitation diminue, la quantité d'énergie nécessaire à la production des matériaux associés à la fabrication des bâtiments a augmenté proportionnellement. Cette évolution a suscité la mise en place de nouveaux concepts et mesures visant directement à réduire les émissions de CO₂. À ce jour, il n'existe pas de norme universelle pour les bâtiments à faible émission de carbone, mais plusieurs concepts existent en fonction des limitations et objectifs du système mis en place.

En parallèle, la communauté internationale s'est donc donnée pour mission, lors de la COP21 à Paris, de contenir le réchauffement climatique à +1,5°C sans dépasser les +2°C d'ici 2100 par rapport à la période préindustrielle. Pour y arriver, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) souligne l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de tendre vers une neutralité carbone globale, où les émissions d'origine humaine sont contrebalancées par des mesures d'atténuation ou de compensation.

1.1 L'objectif de ce travail

Le présent rapport vise à analyser le concept de neutralité carbone au sujet de la construction de maisons individuelles au Luxembourg. La particularité de cette étude réside dans l'évaluation de divers facteurs environnementaux et physiques. Ces facteurs varient de l'efficacité énergétique du bâtiment, aux matériaux construits, à la géométrie du bâtiment, jusqu'à la méthodologie utilisée pour déterminer la neutralité carbone. L'objectif final est de déterminer et de visualiser l'impact des différentes phases de vie des constructions en bois et en béton ainsi que de déterminer s'il est possible de compenser les émissions intrinsèques par la production d'énergie photovoltaïque sur une durée de 50 ans.

1.2 Questions

Ce travail a pour but de répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la surface d'installation photovoltaïque nécessaire pour atteindre la neutralité carbone au bout de 50 ans ?
- Quelle variante de construction a un bilan carbone plus important au bout de 50 ans ?
- Est-ce que les matériaux biosourcés dans la variante de construction en bois permettent une phase A1-A3 neutre ?
- Quel effet a l'ajout du module D dans l'analyse de cycle de vie ?
- Est-ce qu'une maison avec un toit plat atteint la neutralité carbone avant une maison avec un toit en pente ?
- Est-ce que la superficie des maisons joue un rôle important ?
- Quelle est la différence entre l'analyse de cycle de vie dynamique et l'analyse de cycle de vie statique ?

2 Etat de l'art

Le présent chapitre expose, sur la base d'une revue de la littérature, diverses études de recherche traitant du concept de faible émission de carbone et des analyses du cycle de vie dans le secteur du bâtiment. Il présente ensuite le concept de neutralité carbone et les diverses réglementations, normes et initiatives relatives à l'impact environnemental local de différents secteurs, en mettant particulièrement l'accent sur le secteur du bâtiment. Il aborde également la manière dont les différents pays gèrent la question de la neutralité carbone. Les trois pays concernés sont la France, l'Allemagne et le grand-duché du Luxembourg.

Pour conclure les recherches, un aperçu du concept d'analyse du cycle de vie et des indicateurs d'impact environnementaux sera donné.

2.1 Revue littéraire

Sur base d'une revue de la littérature, ce chapitre expose le concept de neutralité carbone et aborde également l'analyse du cycle de vie, qui est une partie essentielle de ce travail.

Il existe plusieurs études sur la neutralité carbone dans les bâtiments, mais on remarque que souvent la plupart des sujets se basent sur le secteur du bâtiment en général. De plus ces analyses comparent rarement différents types de bâtiments résidentiels.

En outre, l'interprétation de la neutralité carbone varie d'une étude à l'autre, d'où l'utilisation de terminologies et de mesures différentes. Les auteurs emploient des termes qui visent à réduire les besoins énergétiques des bâtiments et les émissions de carbone, tels que zéro carbone (Zhao et al., 2016), zéro énergie (Marszal et al., 2011) et zéro émission pour définir la neutralité carbone.

Ces définitions sont souvent associées à des mesures spécifiques (Satola et al., 2021). Si ces concepts ont des liens entre eux de manière générale et sont utilisés comme synonymes, ils ont toutefois des significations distinctes.

Par exemple, Jain et al. (2017) proposent une définition de la neutralité carbone basée sur l'équilibre entre les quantités de carbone mesurées et les quantités séquestrées équivalentes. Selon leur approche, atteindre la neutralité carbone signifie compenser les émissions de carbone en capturant une quantité équivalente de carbone, conduisant ainsi à une empreinte carbone nulle.

De même, Becker et al. (2020) adoptent les émissions comme mesure et conceptualisent la neutralité carbone comme un processus de production qui produit "zéro émission de carbone", où toutes les émissions de CO₂ produites lors de la production sont contrebalancées.

Ensuite, depuis le début des années 2000, la recherche sur la neutralité carbone des bâtiments est à la fois intensive et très diversifiée. Reconnaisant l'importance de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie, les études se sont penchées sur des phases spécifiques de l'ACV, telles que la production, la construction et l'utilisation ou sur la perspective holistique. Cependant, ces recherches sur l'analyse du cycle de vie dans le secteur de la construction sont nombreuses et couvrent un spectre très large de sujets. Même lorsqu'elles traitent du même problème, leur orientation est souvent diverse. Certaines études se concentrent sur la comparaison de différents matériaux de construction, de la comparaison de la rénovation ou de la déconstruction de bâtiments. Alors que d'autres analysent le cycle de vie de plusieurs bâtiments ayant des utilisations différentes ou consacrent leurs travaux aux limites méthodologiques de l'analyse de cycle de vie.

Tous ces efforts de recherche ont contribué de manière significative à la compréhension et à l'amélioration de l'impact environnemental des bâtiments.

Par exemple, Fang et al. (2011) ont réalisé une analyse complète des émissions de dioxyde de carbone tout au long du cycle de vie des bâtiments résidentiels. Leur étude a fourni des informations précieuses sur l'empreinte carbone globale de ces bâtiments, en tenant compte des différentes phases qu'ils traversent.

Dans une autre étude, les tendances de la consommation d'énergie et des émissions de carbone dans le secteur du bâtiment en Chine entre 2000 et 2016 ont été étudiées en utilisant le modèle de construction de bâtiments en Chine avec la méthode d'analyse du cycle de vie (Zhang et al., 2019). Ainsi ils ont identifié les domaines à améliorer et ont donné des suggestions sur l'optimisation de la consommation d'énergie et des émissions de carbone dans le secteur de construction en Chine.

Danatzko et al. (2013) se sont concentrés sur la conception durable en analysant la consommation d'énergie des composants structurels fabriqués à partir de différents matériaux tout au long de leur cycle de vie.

En outre, Tian et al. (2015) ont étudié la faisabilité d'un bâtiment résidentiel à atteindre l'objectif zéro énergie à Pékin.

D'autres recherches traitent des méthodes transversales des analyses de cycle de vie classiques comme la Life Cycle Carbon Emission Assesment (LCCO₂A). Celle-ci se concentre sur l'évaluation de toutes les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment en tenant compte des émissions totales d'équivalent de CO₂ au cours des différentes phases de sa vie. Ici, Liying Li (2021) discute de la possibilité des erreurs lors des évaluations des émissions de carbones du cycle de vie et identifie quelques solutions.

2.2 Neutralité Carbone

Dès le début de l'industrialisation, les émissions de gaz à effet de serre ont connu une croissance exponentielle. Ces fortes teneurs en gaz à effet de serre dans l'atmosphère bouleversent le climat mondial. Cette modification du climat a déjà et continuera d'avoir un effet néfaste sur les écosystèmes et activités humaines. La fréquence des épisodes climatiques extrêmes tels que les sécheresses, les glissements de terrain, les vagues de chaleur, les précipitations torrentielles et les crues sont devenues beaucoup plus courantes. D'autres effets du réchauffement climatique, tels que l'acidification des océans, la hausse du niveau de la mer et la perte de biodiversité, sont également devenus plus fréquents et plus intenses.

Le traité de Paris sur le climat, signé par 195 pays et l'Union européenne, stipule dans ses engagements que pour limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C, il est primordial d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050.

En outre, la Commission européenne a présenté en décembre 2019 le Green Deal for Europe, un plan ambitieux visant à rendre l'Europe neutre en carbone d'ici 2050. Cet objectif devra être réalisé par la mise en œuvre de la loi sur le climat de l'UE, qui inscrit la neutralité climatique dans la législation européenne.

L'union européenne définit la neutralité carbone comme « un équilibre entre les émissions de carbone et l'absorption du carbone de l'atmosphère par les puits de carbone. Toutes les émissions de gaz à effet de serre dans le monde devront être compensées par la séquestration de carbone afin d'atteindre l'objectif de zéro émission » (*Qu'est-ce Que La Neutralité Carbone Et Comment L'atteindre D'ici 2050 ? | Actualité | Parlement Européen, 2019*).

Un réservoir capable de stocker du CO₂ est un système qui capture plus de carbone que ce qu'il en dégage. Les écosystèmes majeurs sur terre capables d'absorber une grande quantité de CO₂ sont les forêts, les océans et le sol. Sur la base de données chiffrées, ces puits sont capables d'éliminer annuellement entre 9,5 et 11 gigatonnes de CO₂. Parallèlement, on estime qu'en 2021 les émissions annuelles de carbone dans le monde ont atteint 37,8 gigatonnes en 2021.

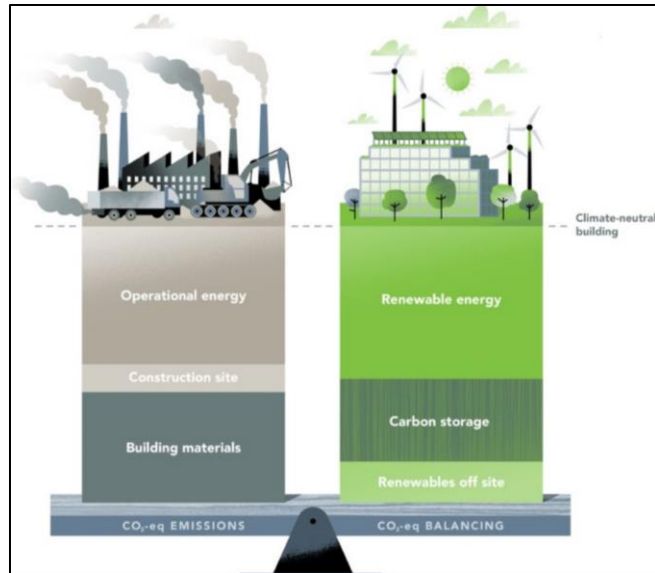


Figure 1: Neutralité carbone dans le secteur de la construction (Carbon Neutrality | White Arkitekter, 2023)

L'union européenne s'est posé un objectif climatique très ambitieux en voulant être le premier continent à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. Après le vote de la loi sur le climat en 2021 par le Parlement européen et le Conseil, cet engagement est devenu obligatoire. Entre-temps, les valeurs cibles pour l'année 2030 en matière de diminution des émissions sont passées de 40% à 55%.

2.3 Aspects juridiques et initiatives prises dans les pays voisins

2.3.1 Luxembourg

Le Luxembourg est confronté à des défis majeurs en matière de pollution, en particulier dans le secteur du bâtiment. La consommation d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre et la gestion des déchets sont autant des sujets qui requièrent une attention particulière. Pour relever ces défis et atteindre ses objectifs de durabilité, le Luxembourg a adopté des lois et des plans destinés à réduire l'impact environnemental de ses différents secteurs, en insistant particulièrement sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

L'une des principales approches adoptées par le Luxembourg consiste à introduire des réglementations strictes pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Plus récemment, le programme "Lenoz" a été introduit pour promouvoir la construction de bâtiments durables. Outre cette norme, d'autres objectifs, mesures et plans sont inclus dans le plan national énergie-climat, comme le Pacte pour le logement 2.0.

constructions respectent ces normes strictes d'efficacité énergétique d'ici 2021. Cette mesure a permis de réaliser des progrès significatifs dans la réduction des besoins énergétiques des bâtiments résidentiels, malgré l'augmentation de la population et du nombre de nouvelles constructions.

Simultanément, le Luxembourg encourage l'adoption de concepts de logement innovants qui promeuvent une utilisation plus efficace des ressources et une réduction des émissions de carbone. Ces concepts incluent le logement sans voiture, qui encourage l'utilisation des transports publics et des modes de déplacement alternatifs ; le logement intergénérationnel, qui favorise la cohabitation entre les différentes générations ; les communautés de logement, qui encouragent le partage des ressources et des espaces communs ; et le logement modulaire, qui offre flexibilité et adaptabilité en termes de taille et de configuration. *(Plan national intégré en matière d'énergie et de climat du Luxembourg pour la période 2021-2030 (PNEC), 2023)*

Parmi les autres initiatives, on trouve le régime PRIME House et le Pacte pour le logement 2.0, ce dernier vise à soutenir les efforts en faveur d'un secteur de la construction plus durable. Il remplace le précédent pacte pour le logement de 2008. Le Pacte pour le logement 2.0 repose sur une série de mesures destinées à aider les municipalités à atteindre leurs objectifs en matière de logement et à améliorer la qualité de vie des habitants. Ces mesures comprennent l'augmentation de l'offre de logements, la mobilisation de terrains à bâtir, l'amélioration de la qualité des logements existants et l'amélioration de l'efficacité énergétique des nouveaux projets.

Le régime PRIME House propose des subventions pour les investissements destinés à la rénovation durable et énergétique des habitations, de même que des conseils énergétiques qualifiés et adaptés à la construction de bâtiments durables et à l'utilisation d'énergies renouvelables (photovoltaïque, solaire thermique, pompes à chaleur). *(Plan national intégré en matière d'énergie et de climat du Luxembourg pour la période 2021-2030 (PNEC), 2023)*

De plus, le Luxembourg est conscient de la nécessité d'adapter les taxes sur l'énergie et les écotaxes pour tenir compte des aspects sociaux, familiaux, économiques et environnementaux. À l'heure actuelle, les taxes sur l'énergie et les écotaxes sont relativement faibles par rapport à d'autres pays. Toutefois, le gouvernement luxembourgeois envisage de réviser sa politique fiscale afin de relever les défis actuels et futurs. Cette révision comprendra l'introduction d'un prix minimum du carbone et la réduction des avantages fiscaux accordés aux activités non durables et nuisibles au climat.

L'objectif est d'adopter une fiscalité de l'énergie et des ressources socialement équitable, tout en générant des revenus supplémentaires pour financer les efforts nécessaires à une transition écologique réussie.

2.3.1.2 Règlement grand-ducal du 9 juin 2021

Le règlement grand-ducal du 9 juin 2021 sur la performance énergétique des bâtiments (règlement PEB) est un élément essentiel de la législation luxembourgeoise visant à améliorer l'efficacité énergétique du secteur du bâtiment. Ce règlement fixe des normes et des exigences pour les bâtiments neufs et existants afin de réduire la consommation d'énergie et les émissions de gaz à effet de serre. Le règlement PEB vise à aligner le Luxembourg sur les objectifs ambitieux fixés par l'Union européenne en matière de performance énergétique des bâtiments. Il s'applique à tous les types de bâtiments, qu'ils soient résidentiels, commerciaux ou publics. Le but est de promouvoir la construction de bâtiments à faible consommation d'énergie, de réduire les émissions de CO₂ et d'encourager l'utilisation de sources d'énergies renouvelables. ("RGD Du 9 Juin 2021 Concernant La Performance Énergétique Des Bâtiments.," 2021)

Pour les nouveaux bâtiments, le règlement PEB exige le respect de normes élevées en matière d'efficacité énergétique. Les bâtiments doivent être conçus et construits de manière à minimiser leur consommation d'énergie et à optimiser leur performance énergétique. Cela inclut l'isolation thermique, des systèmes de chauffage, de refroidissement et de ventilation efficaces, ainsi que l'utilisation d'équipements et de matériaux à haut rendement énergétique. ("RGD Du 9 Juin 2021 Concernant La Performance Énergétique Des Bâtiments.," 2021)

Le règlement fixe également des exigences spécifiques pour les bâtiments existants lors de travaux de rénovation ou de conversion. Les propriétaires sont tenus de réaliser des travaux visant à réduire la consommation d'énergie, tels que l'isolation des murs et l'amélioration des systèmes de chauffage. Le règlement PEB prévoit également des mesures de contrôle et de certification pour garantir le respect des exigences en matière d'efficacité énergétique. Les bâtiments neufs et rénovés doivent obtenir un certificat de performance énergétique attestant de leur efficacité énergétique. En cas de non-conformité, des sanctions peuvent être imposées aux propriétaires ou aux promoteurs. Celles-ci peuvent aller de simples exigences formelles à des sanctions financières, voire à une interdiction

d'utiliser le bâtiment jusqu'à ce qu'il respecte les exigences. ("RGD Du 9 Juin 2021 Concernant La Performance Énergétique Des Bâtiments.," 2021)

2.3.1.3 Lenz

Dès 2017, le Luxembourg dispose de sa propre certification environnementale pour les bâtiments résidentiels, le LENOZ Lëtzebuenger Nohaltegkeets Zertifizéierung qui désigne la certification luxembourgeoise en matière de développement durable. Cette méthode d'évaluation environnementale permet d'obtenir un certificat LENOZ.

Le certificat obtenu par Lenz représente le bilan final et reflète la durabilité du bâtiment, il se base en partie sur des données extraites du passeport énergétique de celui-ci. Le Lenz a une validité de 10 ans, mais celle-ci dépend de l'échéance du renouvellement du passeport énergétique.

L'évaluation LENOZ est applicable à tout nouveau logement et à toute rénovation énergétique complète ou partielle et se fait sur base d'un catalogue de critères. La certification est basée sur 6 catégories (K), subdivisées en 37 thèmes (T) et 143 critères (S). Les catégories sont Implantation, Société, Economie, Ecologie, Bâtiment & installations techniques, Fonctionnalité. (*Certification Lenz | 1Nergie S.A., s. d.*)

L'évaluation de la durabilité se fait en quatre classes possibles. La classification dans une classe de durabilité dépend d'une part du nombre total de points obtenus et d'autre part du nombre de points obtenus dans une des catégories. Si 85 % des points de durabilité sont obtenus, la plus haute classe de durabilité, indiquée par 4 feuilles, est attribuée. Toute l'évaluation est effectuée sur le logiciel Lenz Tool.

La mise en œuvre du Lenz nécessite une coopération étroite entre les acteurs du secteur de la construction, les autorités publiques, les architectes, les ingénieurs et les entreprises spécialisées. Des réglementations et des normes spécifiques ont été élaborées pour guider les auteurs de projets et les constructeurs dans la construction de bâtiments conformes à la norme Lenz. En outre, des incitations financières, telles que des subventions, sont disponibles pour encourager l'investissement dans des projets de logements conformes à la norme Lenz. Une aide financière est donnée à toutes les personnes pour l'élaboration du certificat Lenz. Les aides sont de 1500 euros par maison unifamiliale et de 750 euros par logement dans un immeuble. (*Certification Lenz | 1Nergie S.A., s. d.*)

Les logements conformes à la norme Lenox offrent un certain nombre d'avantages. Tout d'abord, ces bâtiments sont plus efficaces sur le plan énergétique, ce qui signifie que les factures d'énergie sont moins importantes pour les résidents. De plus, une meilleure isolation et une meilleure ventilation contribuent à améliorer le confort intérieur et la qualité de l'air, créant ainsi un espace de vie plus agréable. En outre, les bâtiments conformes aux normes Lenox durent plus longtemps, ce qui réduit les coûts à long terme. (*Certification Lenox | 1Nergie S.A., s. d.*)

2.3.2 France

Atteindre la neutralité carbone en France est un objectif à long terme qui fait partie intégrante de la stratégie "bas carbone" du pays. Cette démarche ambitieuse représente la trajectoire que la France s'est fixée pour réduire significativement ses émissions de gaz à effet de serre.

Selon la stratégie nationale bas-carbone, la "neutralité carbone" est atteinte lorsqu'il existe « un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre ».

Afin de réaliser cet engagement, les émissions de gaz à effet de serre devraient être divisées par 6 d'ici 2050 en comparaison avec 1990.

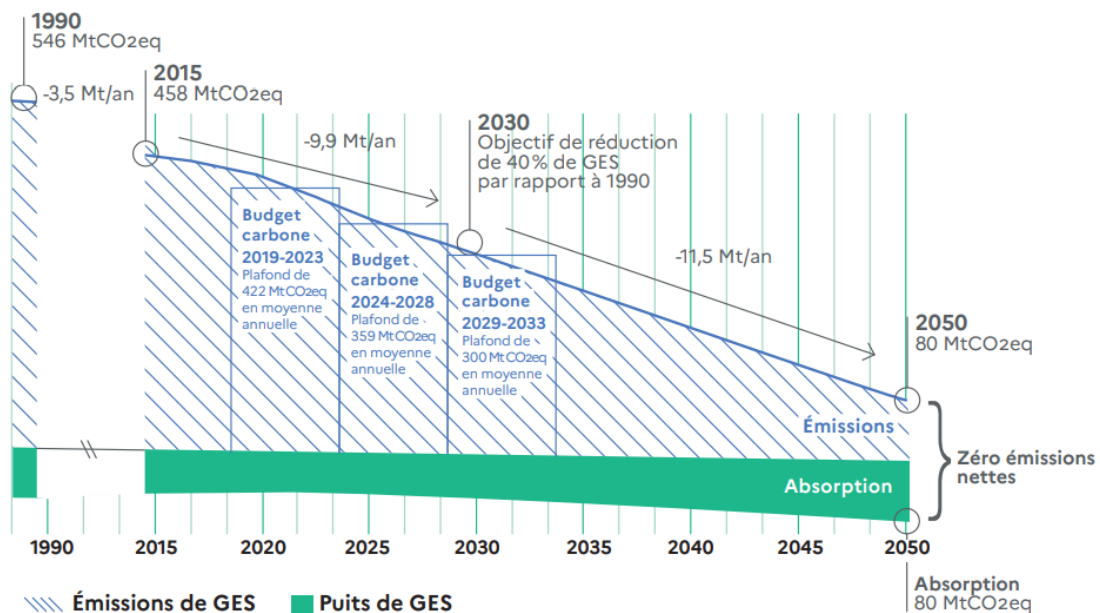


Figure 3 : Evolution des émissions et des puits de GES en France

Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 est d'une importance capitale, car cela permettra à la France de respecter ses engagements dans le cadre de l'Accord de Paris sur le climat. Elle garantira

également un avenir sain et durable aux générations actuelles et futures. Le pays a pris cet engagement au sérieux en l'incluant dans sa loi sur l'énergie et le climat.

2.3.2.1 Loi énergie-climat

La présente loi a été adoptée le 8 novembre 2019 afin de faire face aux défis du changement climatique et de la transition énergétique en France. Elle a pour but de permettre à la France de respecter les engagements pris dans le cadre des Accords de Paris.

La loi a fixé comme objectif général la réduction des émissions de CO₂ de 40% jusqu'à 2030 par rapport au niveau de 1990. Concernant le secteur du bâtiment, une réduction de 50% d'ici 2050 est attendue. Tous les bâtiments construits à partir de 2020 doivent se conformer à une exigence de performance énergétique, la réglementation environnementale RE2020, qui remplace la RT2012. Au niveau des bâtiments existants, elle prévoit la rénovation énergétique de tous les bâtiments tertiaires d'ici à 2050. (Laurène, 2020)

Un autre point crucial est la fermeture de la totalité des centrales à charbon en France jusqu'à 2022, chose qui n'a pas encore été réalisée car la centrale au charbon à Cordemais est encore active. Ces mesures ont pour but de faire du secteur du bâtiment un domaine à faible émission de carbone et de favoriser la transition vers des bâtiments plus efficaces sur le plan énergétique, plus durables et plus confortables.

2.3.2.2 Stratégie nationale bas carbone

La stratégie nationale bas carbone (SNBC) suggère des parcours sectoriels qui sont compatibles avec la neutralité. Elle couvre sept secteurs économiques, chacun ayant des objectifs de réduction précis. Parmi ces secteurs, seuls deux visent une décarbonisation complète : logement et la production d'énergie. (*Stratégie nationale bas-carbone*, 2020)

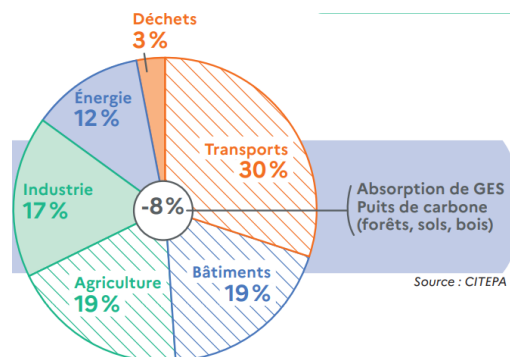


Figure 4: Secteurs d'émissions de GES en France

En ce qui concerne le secteur du bâtiment, la SNBC fixe quatre objectifs majeurs pour parvenir à une décarbonisation complète (*Stratégie nationale bas-carbone, 2020*) :

- Utilisation des énergies à faible teneur en carbone les plus appropriées pour chaque type de bâtiment. Cela comprend l'utilisation de sources d'énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique, ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage, de refroidissement et d'éclairage.
- Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments existants et des nouvelles constructions. Il est nécessaire d'investir dans des technologies et des pratiques destinées à diminuer la consommation d'énergie, comme l'isolation thermique, les matériaux de construction à faible intensité carbonique et la conception de systèmes intelligents de gestion de l'énergie.
- Promouvoir les changements de pratiques en faveur de l'utilisation durable des bâtiments. Ceci englobe des initiatives telles que la sensibilisation et l'éducation des usagers des bâtiments aux comportements éco-responsables, la promotion de l'économie circulaire et la mise en place de certifications environnementales des bâtiments.
- Promotion de produits de construction, de rénovation et d'équipement à faible teneur en CO₂ pendant tout leur cycle de vie. Il faudra ainsi privilégier les matériaux de construction biosourcés, réutilisés ou recyclables, ainsi que le recours à des méthodes de construction durables et efficaces d'un point de vue énergétique.

Ces objectifs, combinés à une réglementation plus rigoureuse et à des aides financières, visent à faire du secteur du bâtiment un des principaux moteurs de la transition de la France vers une société à faibles émissions de CO₂. (*Stratégie nationale bas-carbone, 2020*)

Outre le secteur du bâtiment, la stratégie SNBC fixe également des objectifs spécifiques pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans d'autres secteurs. Dans le domaine des transports, par exemple, on vise une décarbonisation complète, à l'exception du transport aérien, où il reste des défis technologiques à relever.

Dans le secteur de l'agriculture, l'objectif est de diminuer les émissions de 46 % par rapport aux niveaux de 2015. Des mesures comme la réduction de l'utilisation d'engrais, la valorisation de l'agriculture biologique et la baisse des émissions liées à l'élevage sont appliquées.

Le secteur des forêts et des sols joue également un rôle essentiel dans la stratégie de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. Les stratégies ont pour but de maximiser les puits de carbone naturels grâce à des méthodes de gestion durable des forêts et à la préservation des sols.

La production d'énergie est un autre secteur fondamental qui vise à une décarbonisation totale. Cela passe par le développement intensif des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, ainsi que par l'abandon progressif des énergies fossiles.

Pour le secteur industriel, l'objectif est de réduire les émissions de 81 % par rapport à 2015. Cela implique de favoriser l'efficacité énergétique dans les procédés industriels, d'investir dans des technologies plus propres et d'adopter des pratiques plus durables en matière de traitement des déchets. (*Stratégie nationale bas-carbone, 2020*)

Enfin, le département des déchets vise à réduire les émissions de 66 % par rapport à 2015, en favorisant le recyclage, la valorisation énergétique des déchets et la réduction de la production de déchets.

La stratégie nationale bas carbone de la France est une voie ambitieuse qui exige la mobilisation de tous les acteurs, qu'ils soient industriels, gouvernementaux ou individuels. Atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 exigera des investissements importants dans les technologies propres, des efforts et des changements de comportement à tous les niveaux de la société. Mais c'est aussi l'occasion de stimuler l'innovation, de générer de nouveaux emplois dans les secteurs verts et de garantir un futur plus durable et plus résilient pour la France.

2.3.2.3 RE2020

La RE2020 est la nouvelle réglementation environnementale des bâtiments neufs en France. Les exigences et objectifs fixés par la RE2020 sont compatibles avec ceux de la stratégie nationale bas-carbone. Avec cette nouvelle norme, l'état vise trois objectifs :

Objectif 1 : Des bâtiments qui consomment moins et utilisent des énergies moins carbonées

Le premier objectif de la RE2020 est de réduire la consommation d'énergie et de promouvoir l'utilisation d'énergies à faible teneur en carbone dans les bâtiments. Ce règlement renforce les

exigences en matière d'efficacité énergétique et fixe des limites aux émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie. Une avancée significative est l'élimination progressive des nouvelles maisons chauffées exclusivement au gaz.

Ainsi elle vise à promouvoir une utilisation plus sobre de l'énergie en renforçant l'exigence des besoins bioclimatiques des bâtiments. Cette exigence prend en compte à la fois les besoins de chauffage et de refroidissement, et les seuils maximaux des besoins bioclimatiques des logements seront réduits en moyenne de 30 % par rapport à la précédente réglementation thermique. Les logements de demain seront mieux isolés et mieux conçus, ce qui se traduira par une réduction de la facture énergétique des occupants.

La RE2020 prévoit également la suppression des énergies fossiles dans les bâtiments neufs à partir de 2025. Les émissions de gaz à effet de serre liées à la consommation d'énergie seront limitées, excluant ainsi les systèmes de chauffage fonctionnant exclusivement au gaz. Les maisons individuelles auront un seuil maximal de 4 kgCO₂/m² par an, tandis que pour les logements collectifs, une transition progressive est prévue jusqu'en 2025, autorisant dans un premier temps l'installation de systèmes de chauffage au gaz à condition qu'ils atteignent une très bonne performance énergétique. À partir de 2025, les systèmes de chauffage fonctionnant uniquement au gaz seront exclus, mais des solutions hybrides utilisant des pompes à chaleur avec un appoint de gaz seront autorisées.

La directive RE2020 encourage également l'utilisation de la chaleur renouvelable en fixant des limites à la consommation d'énergie primaire non renouvelable. Les chauffages électriques seront limités afin d'éviter une forte pression sur le réseau électrique, et les réseaux de chaleur existants devront se conformer progressivement aux exigences de décarbonisation. Ces réseaux de chaleur existants devront respecter des seuils de réduction des émissions de gaz à effet de serre entre 2025 et 2028. (Cegibat, s. d.)

Objectif 2 – Ménager une transition progressive vers des constructions bas-carbone

La transition vers des constructions à bas-carbone nécessite une approche graduelle, basée sur une variété de méthodes et de matériaux de construction. La phase de construction d'un bâtiment est responsable d'une part considérable des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de sa durée de vie. Afin d'en tenir compte dans la réglementation, il est suggéré d'introduire une méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) qui évalue l'impact carbone des matériaux et équipements utilisés

dans un bâtiment. Les émissions de gaz à effet de serre connectés au chantier seront aussi prises en compte.

L'ACV mettra en évidence le stockage temporaire du carbone par certains matériaux comme le bois et les isolants biosourcés, qui ont la capacité de stocker le carbone et de le restituer en fin de vie. Cette méthode d'ACV dite dynamique donnera plus d'importance aux gaz à effet de serre relâchés maintenant dans l'atmosphère qu'aux émissions futures.

La RE2020 incitera en outre la diversification des techniques et matériaux de construction, comme les constructions hybrides associant le bois et le béton, ainsi que les matériaux d'origine biologiques. Un indicateur de stockage du carbone sera également calculé à des fins d'information, pour montrer le taux d'utilisation des matériaux biosourcés dans les bâtiments.

Les normes définies par la RE2020 seront modulées selon le type de bâtiment. Au cours de la première phase (2022-2025), le principal défi consistera à s'assurer que l'ensemble de la construction est conforme aux exigences de l'UE. Les exigences augmenteront par étapes à partir de 2025, 2028 et 2031, dans le but de réduire les émissions de carbone de plus de 30 % par rapport aux niveaux de référence actuels. (Cegibat, s. d.)

Objectif 3 – Des bâtiments plus agréables en cas de forte chaleur

Finalement le gouvernement a pour objectif d'améliorer significativement la prise en compte du confort d'été dans les bâtiments en fixant une exigence précise dans la RE2020. Faisant ainsi face aux problèmes d'inconfort lors de fortes chaleurs rencontrées dans de nombreux bâtiments construits selon la réglementation thermique RT2012. Avec le réchauffement climatique, le nombre et l'intensité des vagues de chaleur sont amenés à augmenter. Celle-ci aidera les futurs bâtiments à s'adapter au changement climatique.

Ainsi, un indicateur de confort d'été sera calculé dès la conception du bâtiment, sur la base d'un scénario similaire à la canicule de 2003. En outre le calcul de la consommation énergétique du bâtiment (Bbio) prendra en compte les besoins en climatisation.

La RE2020 fixera un seuil maximal de 1250 degré heure (DH), correspondant à 25 jours avec une température intérieure constante de 30°C le jour et de 28°C la nuit. Ce seuil sera appliqué sur l'ensemble du territoire français, avec des adaptations pour les régions les plus chaudes. En même temps des pénalités seront appliquées en cas de dépassement du seuil minimal de 350 DH, ce qui encouragera les bâtiments à réduire le nombre d'heures dépassant ce seuil et à améliorer leur efficacité énergétique.

La réglementation encouragera aussi l'utilisation de solutions de climatisation passive, telles que la forme du bâtiment, l'orientation, la protection solaire, les ventilateurs ou les puits de chaleur, afin d'améliorer le confort d'été de manière rentable et durable.

Outre cela, la RE2020 accordera une attention particulière à la qualité de l'air intérieur et à la ventilation, qui sont souvent des problèmes dans les nouveaux bâtiments. Conformément aux recommandations de 2018, la ventilation sera systématiquement vérifiée au moment de la remise des clés. (Cegibat, s. d.)

2.3.3 Allemagne

En Allemagne l'objectif de la neutralité carbone, dit "Klimaneutralität" en allemand est inscrit dans la loi allemande "Bundesschutzgesetz". Initialement prévu pour 2050, le pays s'est engagé à accélérer ses efforts et vise désormais à atteindre la neutralité climatique d'ici 2045. Cette décision est le résultat d'une nouvelle étude qui souligne l'urgence d'agir face à la crise climatique.

2.3.3.1 Problématique des termes employés

La législation et les objectifs allemands mentionnent souvent les termes "neutralité climatique" et "neutralité carbone", le premier se référant à la neutralité en ce qui concerne tous les impacts anthropiques négatifs vers l'environnement et le second se référant spécifiquement au CO₂.

D'autres termes sont également largement utilisés, tels que "neutre en CO₂" ou "neutralité en matière de gaz à effet de serre".

Différentes organisations et l'État utilisent ces différents termes, ce qui crée une confusion dans ce domaine, bien qu'ils se rapportent à la même chose, à la compensation des émissions de CO₂.

2.3.3.2 Plan Klimaneutralität

Atteindre la neutralité climatique en Allemagne d'ici 2045 présente plusieurs avantages significatifs pour le pays et le reste du monde.

Tout d'abord, cela permettrait de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre. En effet, l'Allemagne est actuellement l'un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre en Europe, et la réduction de ses émissions contribuerait de manière significative à l'objectif mondial de limiter le réchauffement de la planète à 1,5 °C.

En atteignant cet objectif plus tôt, l'Allemagne réduirait ses émissions d'équivalent CO₂ de 900 millions de tonnes d'ici 2050, elle libérerait une part importante du budget mondial d'émissions de CO₂ et contribuerait ainsi à la préservation de l'environnement. De plus, en tant que première économie européenne et plus grand émetteur de GES en Europe, l'Allemagne désire atteindre plus tôt la neutralité carbone, ainsi le pays pourrait servir de modèle à d'autres nations et les inciter à prendre des mesures similaires afin de réaliser la transition vers une économie durable.

L'Allemagne pourrait également devenir un marché pilote pour les technologies de protection du climat, en promouvant l'innovation et la recherche de solutions durables dans les domaines des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. En tant qu'exportateur de technologies de protection du climat, l'Allemagne pourrait stimuler son économie tout en contribuant à la lutte contre le réchauffement climatique.

Afin d'atteindre cet objectif ambitieux plus tôt, l'Allemagne devra mettre en place des mesures ambitieuses dans divers secteurs de son économie. Cela impliquera une transition accélérée vers les énergies renouvelables, la promotion de l'efficacité énergétique, la décarbonisation du secteur des transports, la réduction des émissions de l'industrie et de l'agriculture, ainsi que des initiatives visant à renforcer la résilience aux impacts du changement climatique.

Pour atteindre l'objectif de neutralité climatique, le plan "Klimaneutralität" est divisé en trois étapes.

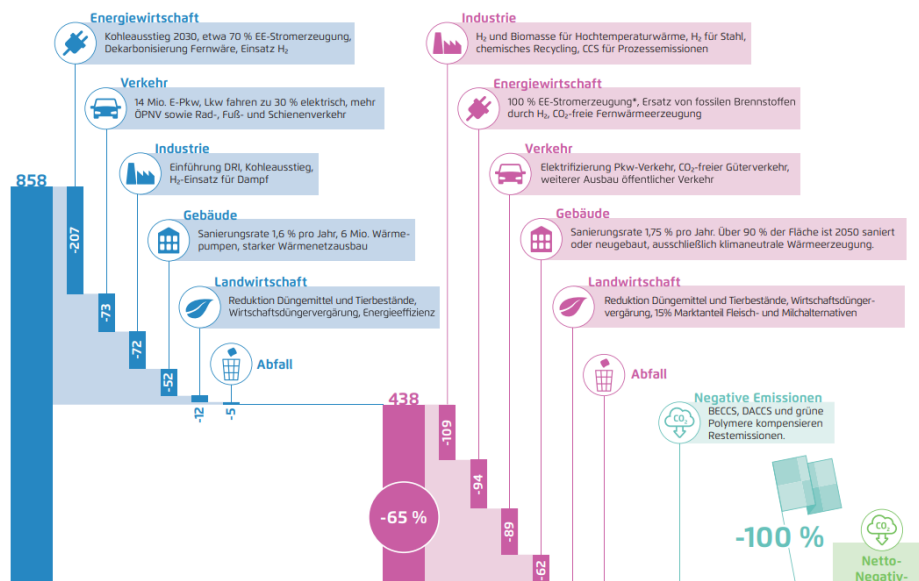


Figure 5: Etapes du plan climatique de l'Allemagne (Publication - Klimaneutrales Deutschland 2045, 2023b)

La première phase vise à réduire dans les six secteurs couverts par la législation les émissions de gaz à effet de serre (GES) de 65 % d'ici à 2030, par rapport aux niveaux de 1990. Cette réduction sera obtenue en accélérant la décarbonisation du secteur de la production d'électricité, en fermant complètement les centrales au charbon et en optimisant l'utilisation des énergies renouvelables. Cette transition vers des sources d'énergie plus propres jouera un rôle crucial dans la réduction des émissions.

Ensuite le plan prévoit une transition complète vers l'utilisation exclusive de technologies neutres pour le climat dans les secteurs du bâtiment, des transports et de l'industrie. En adoptant des pratiques et des technologies neutres pour le climat, les émissions dans ces secteurs peuvent être réduites de 95 %. Cela implique des mesures telles que l'utilisation généralisée de véhicules électriques, l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et l'adoption de processus industriels plus durables.

La troisième et dernière phase du plan consiste à compenser les émissions anthropiques restantes en les capturant grâce à des puits de gaz à effet de serre ou en utilisant diverses technologies de capture et de stockage. L'objectif est de parvenir à un équilibre entre les émissions produites et absorbées. Il est important de noter que la plupart des émissions restantes proviennent du secteur agricole, en particulier de l'élevage. (*Publikation - Klimaneutrales Deutschland 2045, 2023b*)

Concernant le secteur du bâtiment l'Allemagne s'est fixé plusieurs objectifs pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030. Ces actions ont pour but de favoriser la transition vers des solutions plus durables et plus efficaces. Voici les 5 actions mises en place :

- L'extension des réseaux de chaleur. Ces réseaux distribuent de la chaleur produite de manière centralisée à partir de sources renouvelables ou de récupération. L'objectif est d'étendre ces réseaux pour promouvoir l'utilisation de sources de chaleur plus propres et réduire la dépendance aux combustibles fossiles.
- Augmentation du taux de rénovation énergétique de 50 % par rapport à 2015. Il s'agit d'encourager les propriétaires à améliorer l'efficacité énergétique de leurs bâtiments en utilisant des matériaux isolants, des systèmes de chauffage plus efficaces et en adoptant des pratiques de construction durables.
- Le déploiement rapide des pompes à chaleur sur le marché allemand. L'objectif est d'installer 6 millions de pompes à chaleur dans le pays d'ici à 2030.

- Développement du chauffage urbain "vert". Dans les zones urbaines, le chauffage urbain "vert" gagnera en importance. Ces systèmes de chauffage centralisés utilisent des sources d'énergies renouvelables, telles que la biomasse, l'énergie géothermique ou la récupération de chaleur, pour fournir de la chaleur à plusieurs bâtiments. Cela permet de réduire les émissions et d'optimiser l'efficacité énergétique à l'échelle urbaine.
- Interdiction de nouveaux systèmes de chauffage au mazout ou au gaz : À partir de 2025, l'installation de nouveaux systèmes de chauffage au mazout ou au gaz sera interdite, à quelques exceptions près. Cette mesure vise à encourager l'adoption de technologies de chauffage plus propres, telles que les pompes à chaleur ou autres systèmes de chauffage alimentés par des énergies renouvelables. (*Publikation - Klimaneutrales Deutschland 2045, 2023b*)

Ces différentes actions démontrent l'engagement de l'Allemagne à réduire les émissions de GES dans le secteur du bâtiment en promouvant l'utilisation de solutions durables et en fournissant des incitations pour encourager les propriétaires et les communautés à adopter des pratiques énergétiques plus respectueuses de l'environnement.

2.3.4 Conclusion

Le Luxembourg reconnaît l'importance du secteur du bâtiment dans les émissions de gaz à effet de serre et met en œuvre des mesures et une législation ambitieuse pour atténuer cet impact. Grâce à des normes énergétiques strictes, des concepts de logement innovants et des aides fiscales appropriées, le pays cherche à promouvoir la construction durable et à contribuer à la lutte contre le changement climatique. Ces efforts visent à assurer au Luxembourg et à ses habitants un avenir plus résilient, plus économe en énergie et plus respectueux de l'environnement.

Toutefois, en se concentrant exclusivement sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, le Luxembourg n'a commencé que tardivement à lancer des initiatives et des normes relatives à la durabilité environnementale et à l'impact des émissions des bâtiments à long terme sur l'atmosphère. Cela se traduit par l'absence totale du principe de "neutralité carbone" dans les bâtiments résidentiels.

De plus, on constate que le programme Lenoz n'a pas eu d'impact majeur jusqu'à présent, et qu'il peine même à démarrer.

Enfin, en ce qui concerne le mix énergétique du Luxembourg, la majeure partie de l'énergie du pays provient d'Allemagne, de sorte que la réalisation de la neutralité carbone du Luxembourg dépend également de ses voisins.

En contrepartie la France et l'Allemagne partent déjà sur des plans concrets pour atteindre la neutralité carbone et donne un rôle important à la l'impact environnement des bâtiments.

La première a des objectifs ambitieux, mais réalisables, en particulier avec l'inclusion de RE 2020, qui devrait accélérer les progrès vers la neutralité carbone dans le secteur du bâtiment. Il s'agit de la première réglementation à prendre en compte les émissions de carbone sur l'ensemble du cycle de vie, l'ensemble de l'ACV du bâtiment et le confort d'été. De plus, dans ses différentes stratégies et réglementations, la France semble déjà avoir solidement ancré le terme de neutralité carbone.

L'Allemagne, quant à elle, s'est fixé des objectifs très ambitieux et difficiles à atteindre, visant déjà à réduire les émissions de CO₂ de 65 % d'ici 2035, sans oublier qu'une grande partie de l'énergie produite sur le sol allemand provient encore de centrales à charbon. Sachant que la fermeture de toutes les centrales n'est pas prévue avant 2038. De plus, l'utilisation ambiguë du terme neutralité rend très difficile la formulation d'objectifs concrets.

2.4 Analyse de cycle de vie

2.4.1 Analyse cycle de vie statique

La méthode utilisée pour étudier les émissions de gaz à effet de serre relâchés par chaque construction est ACV qui est une analyse des impacts environnementaux tout au long du cycle de vie d'un bâtiment. L' ACV est employé comme un outil pour évaluer et comparer différents matériaux de construction. Ainsi cela permet de prendre des décisions judicieuses et d'adopter une approche générale lors du choix des matériaux de construction. Souvent la préférence est donnée aux matériaux durables ayant un faible impact sur l'environnement, tels que les matériaux recyclés, les matériaux provenant de sources biologiques comme le bois et les matériaux à haute efficacité énergétique.

Elle tient compte de l'énergie nécessaire à l'extraction des matières premières, à la fabrication des matériaux utilisés, au fonctionnement du bâtiment, au remplacement de certains matériaux et au

démantèlement du bâtiment. En outre, l'énergie autoproduite sur le site (installation photovoltaïque, ...) est également prise en compte.

2.4.2 Phases du cycle de vie

Les quatre phases d'un cycle de vie d'un produit sont considérées : la production, la construction, l'utilisation et la fin de vie.

De plus pour ce travail, une 5ième phase a aussi été prise en compte, la phase des bénéfices et charges au-delà du système. Cette phase n'appartient pas directement au cycle de vie d'un matériel, mais elle prend en compte les émissions au-delà du cycle de vie.

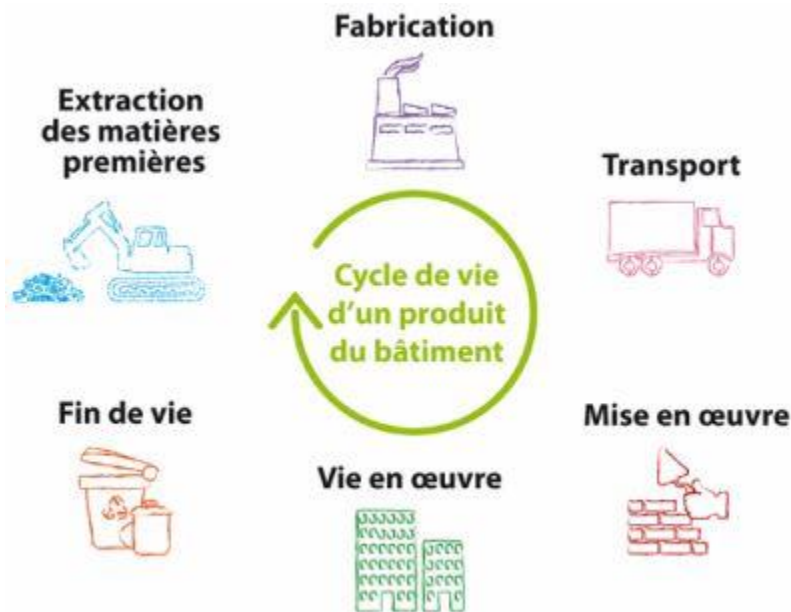


Figure 6: Cycle de vie d'un produit du bâtiment

Chaque phase de cycle de vie regroupe plusieurs modules :

La phase de production prend en compte les modules A1-A3, ces 3 modules sont souvent pris ensemble et correspondent à l'appropriation des matières premières (A1), leur transport (A2) et leur fabrication (A3)

L'étape de construction inclut les modules A4-A5, c'est-à-dire le transport vers le site de construction (A4) et l'installation du matériel (A5)

La phase d'utilisation comprend les modules B1-B7, à savoir l'utilisation (B1), la maintenance (B2), la réparation (B3), le remplacement (B4), la réhabilitation (B5), l'énergie (B6) et l'eau (B7).

La phase de fin de vie prend en compte les modules C1-C4 et englobe le démantèlement/la démolition (C1), le transport des déchets (C2), le traitement de déchets (C3) et pour finir l'élimination (C4).

Pendant la phase (C4), plusieurs scénarios de fin de vie sont possibles, à savoir l'incinération, l'enfouissement et le recyclage des matériaux. Les charges liées à l'élimination des déchets dans le module (C4) sont incluses dans le système du matériel analysé. Toutefois, dans le cas où ce procédé produit de l'énergie, comme la chaleur et l'énergie générée par l'incinération ou la mise en décharge des déchets, on attribue au module (D) les éventuels bénéfices de cette énergie pour le cycle du produit en question.

Le module D décrit les avantages ou les charges environnementales générés par les matériaux réutilisables, les produits recyclables et/ou les vecteurs énergétiques qui quittent un système de produits, par exemple sous la forme de combustibles ou de matériaux secondaires.

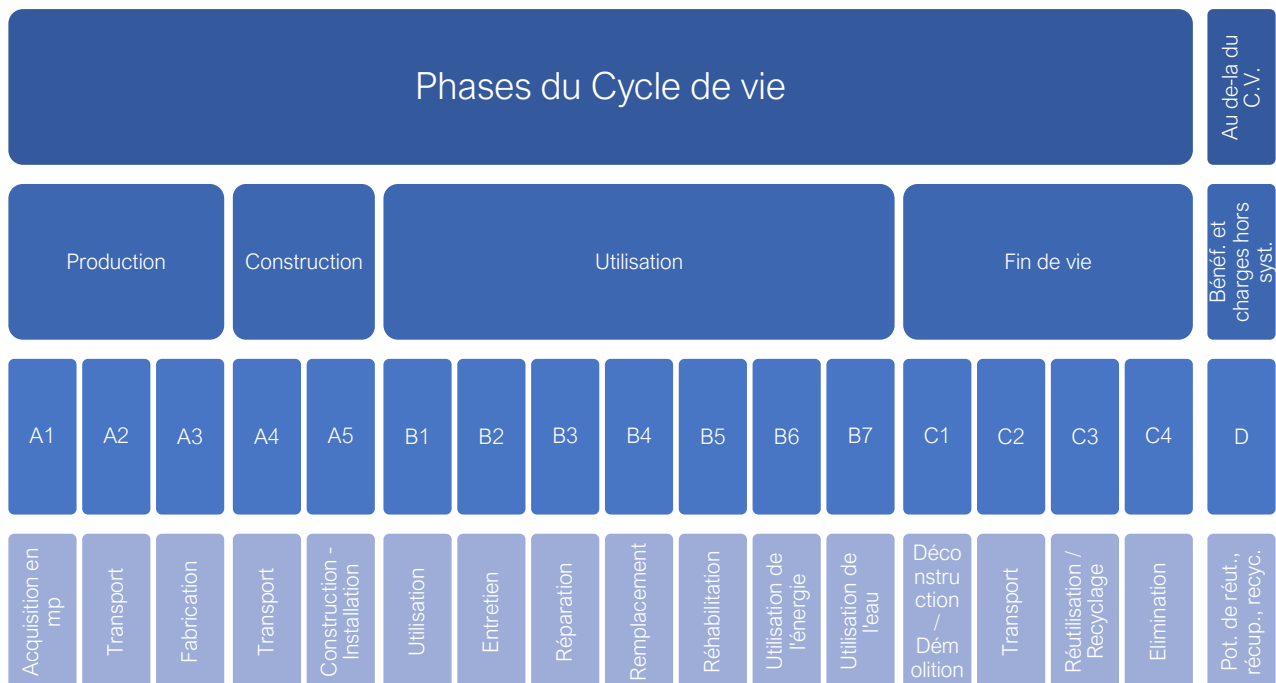


Figure 7: Phases du cycle de vie

2.4.3 Analyse de cycle de vie dynamique

L'ACV présentée dans le sous-chapitre précédent est qualifiée d'ACV statique, mais dans ce travail, un autre type d'ACV plus innovante sera pris en compte, l'ACV dynamique. Le processus de cette version de l'ACV dynamique est identique à celui de l'ACV statique, avec la différence que, contrairement à l'ACV statique, le stockage temporaire est ici pris en compte, ce qui réduit l'impact carbone.

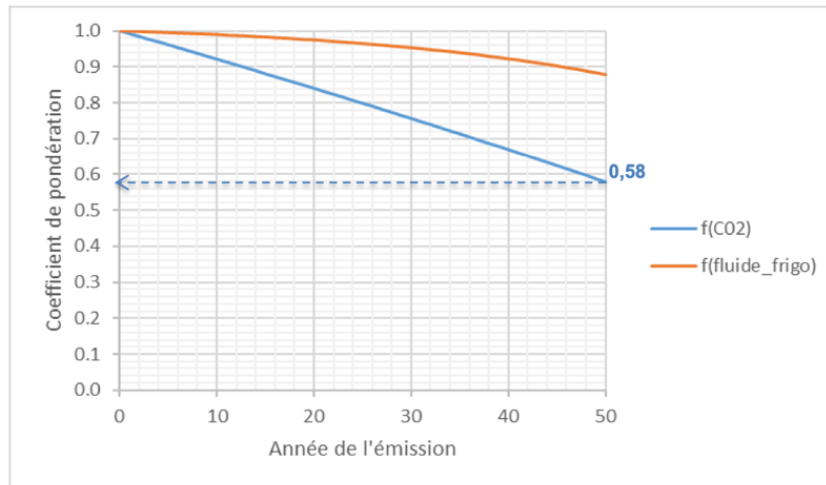


Figure 8 : Analyse cycle de vie dynamique (Cerema, 2022)

La temporalité des émissions de gaz à effet de serre (GES) est prise en considération. En appliquant un coefficient de pondération basé sur l'année d'émission, les émissions précoces ont un impact plus important sur le potentiel de réchauffement global, tandis que les émissions tardives ont un impact plus faible.

La figure 5 révèle que les émissions de CO₂ générées après 50 ans seront corrigées par un coefficient de 0,58. Tandis que les émissions libérées pendant la phase de construction sont entièrement comptées.

Cette approche favorise ainsi les constructions à base de matériaux biosourcés, sachant qu'ils émettent une large quantité d'émission de CO₂ lors de la phase de fin de vie.

Concernant les fluides frigorigènes, on utilise un coefficient de pondération différent.

2.5 Indicateurs d'impact environnementaux

Ces derniers sont les facteurs déterminants sur lesquelles nous nous sommes basés pour faire une analyse de cycle de vie (ACV) de chaque élément des deux bâtiments analysés, en commençant par

les murs et terminant avec les systèmes énergétiques. Cependant dû à la grande variété d'indicateurs présents dans la base de données de Ökobaudat, on a décidé de se focaliser le potentiel de réchauffement global et d'utiliser celui-ci pour étudier la neutralité carbone des différents scénarios.

2.5.1 Global Warming Potential

En premier lieu, celui qui est le plus répandu et utilisé pour comparer des matériaux et réaliser des ACV, le Potentiel de réchauffement global (PRG) plus connu sous le nom de Global Warming Potential (GWP). Celui-ci mesure en gros les émissions de gaz à effet de serre, tels que le méthane et le dioxyde de carbone, émis par un matériel spécifique. L'unité utilisée est le kg équivalent de CO₂.

1kg CH₄ = 25 kg éqCO₂

1kg N₂O = 300 kg éqCO₂

2.5.2 PENRT

Le contenu en énergie primaire non renouvelable (total) est la demande d'énergie nécessaire à la production du produit à partir de ressources matériellement et énergétiquement utilisées (charbon, pétrole, ...).

L'unité est le [MJ].

2.5.3 Autres indicateurs

Il existe beaucoup d'autres indicateurs qui sont très importants, mais qui n'ont pas été considérés dans le présent travail, comme :

- Potentiel d'eutrophisation (EP) qui mesure les niveaux de nitrates et phosphates
- Potentiel d'acidification (AP) qui mesure les gaz acides
- Potentiel d'appauvrissement de l'ozone (ODP), concerne les gaz détériorant la couche d'ozone
- Potentiel de création d'ozone photochimique (POCP), se réfère aux composés organiques volatils (VOC) et aux oxydes d'azote
- PERE, utilisation d'énergie primaire renouvelable, décrit l'évaluation de la quantité d'énergie renouvelable qui fait fonctionner les systèmes et processus requis au cours du cycle de vie d'un matériel ; [MJ]

- PERM, utilisation de ressources énergétiques primaires renouvelables utilisées comme matière première, évalue la quantité de ressources renouvelables disponibles sous forme de matière première. ; [MJ]
- PENRE, utilisation d'énergie primaire non renouvelable, évalue la quantité d'énergie non renouvelable qui fait fonctionner les systèmes et processus requis au cours du cycle de vie d'un matériel ; [MJ]
- PENRM, utilisation de ressources énergétiques primaires non renouvelables utilisées comme matière première, évalue la quantité de ressources renouvelables disponibles sous forme de matière première. ; [MJ]

3 Méthodologie

Ce chapitre traite la méthodologie qui sera employée dans la suite de ce travail. Dans un premier temps, la question de recherche et quelques concepts sont évoqués, puis le plan de recherche suivie de la collecte des données et les limites de celles-ci seront expliqués.

3.1 La thématique de recherche

L'objectif du travail est d'analyser la faisabilité de l'atteinte de la neutralité carbone pour des bâtiments unifamiliaux. Ceci sera réalisé en comparant deux variantes de construction différentes, une construction conventionnelle en béton qui représente le type de maison unifamiliale typique au Luxembourg avec des matériaux de construction standard. L'autre approche est une approche un peu plus innovante en bois ou les matériaux utilisés pour sa construction sont pour la plupart biosourcés et recyclables.

Lors de l'analyse de faisabilité, on s'intéressera aussi à l'impact que pourra avoir l'ajout du module D et si son application s'avère utile et judicieuse.

En outre, une analyse dynamique du cycle de vie sera effectuée et les résultats seront comparés à une analyse statique du cycle de vie. Cela nous permettra de mieux comprendre et de voir comment les deux méthodes se distinguent.

3.2 Plan de recherche

Afin de répondre à la question de recherche, nous avons réalisé et développé une approche de recherche pour comparer deux types de constructions comme mentionné dans le paragraphe précédent sous forme de simulation sur Excel.

D'abord une ACV a été établie sur tous les éléments composant les différents logements. Les matériaux choisis ont été repris de la base de données OkoBaudat (Bbsr, s. d.) avec tous leurs caractéristiques et indicateurs environnementaux. Pour chaque élément du bâtiment, les émissions de GES ont été calculées sous forme d'un tableau.

Pour élargir le champ de recherche et pouvoir comparer différents scénarios, différents paramètres modulaires ont été rajoutés à la recherche. Nous analyserons également des maisons de différentes surfaces pour voir le rôle de la quantité de matériaux utilisés et de la surface photovoltaïque dans l'impact environnemental total des bâtiments. Il s'agit d'une maison d'une surface nette de 150 m² et

d'une autre de 200 m², chacune ayant deux étages. Ensuite chaque construction sera simulée avec un toit plat et avec un toit incliné. De plus, les paramètres comme le nombre de panneaux photovoltaïques, l'inclinaison et l'orientation de ceux-ci sera aussi utilisé comme variable.

Concernant les systèmes énergétiques, ce seront des bâtiments alimentés avec des pompes à chaleur. En ce qui concerne les capacités et puissances, celles-ci seront décrites plus loin dans le travail.

La performance énergétique ainsi que la performance environnementale des bâtiments sont basées sur les valeurs définies par le RGD du 9 juin 2021 et seront aussi utilisées comme variable afin d'analyser plusieurs scénarios. Ainsi différents scénarios en respectant différentes classes énergétiques seront étudiés.

Une analyse dynamique du cycle de vie sera également réalisée et comparée à une analyse statique du cycle de vie.

Pour toutes les simulations, les impacts des émissions générées par chaque maison sur une période de 50 ans sont ensuite représentés sous forme de graphiques afin de fournir une visualisation détaillée des valeurs GWP sur l'ensemble de la période de 50 ans, à travers toutes les phases jusqu'à la fin de la vie de la maison.

3.3 Base de données

Pour choisir les matériaux qui composent les deux types de maisons, leur épaisseur et leur poids, nous nous sommes basés sur des valeurs standard utilisées au Luxembourg.

Concernant ensuite les paramètres environnementaux des produits choisis, on a utilisé comme indiqué dans le chapitre précédent, la plateforme allemande Ökobaudat comme base de données, qui est l'équivalent de la plateforme Inies en France.

ÖKOBAUDAT est une base de données en ligne qui contient les fiches de déclarations environnementales et sanitaires (FDES) qui fournissent des informations et des liens permettant de créer des analyses de cycle de vie des bâtiments. Elle contient des séries de données sur l'analyse du cycle de vie des matériaux de construction, les processus de construction, leur transport, l'énergie et la gestion des déchets.

On a décidé de baser nos ACV sur Okobaudat pour diverses raisons. D'abord elle propose une large sélection de FDES de nombreux produits, ce qui a facilité la recherche des produits qui étaient recherchés.

De plus, Okobaudat garantit la fiabilité des données sélectionnées en ne mettant à disposition sur sa plateforme que des données conformes aux normes européennes et dont cette conformité a été vérifiée.

Enfin, du fait qu'au Luxembourg beaucoup d'institutions travaillent avec la base de données Okobaudat, il est réaliste d'utiliser celle-ci.

3.4 Limites de la méthodologie

La méthodologie utilisée dans cette étude présente quelques limites et difficultés. La première concerne la quantification des matériaux utilisés lors de la conception des bâtiments. Pour certains éléments, des hypothèses ont dû être faites quant aux quantités de matériaux. Certaines mesures et dimensions ont été reprises de concepts similaires, mais non identiques, il est donc tout à fait possible que certaines incertitudes soient présentes.

En outre, les fiches de données environnementales ne correspondent pas toujours aux matériaux utilisés et les dimensions indiquées dans les fiches sont parfois erronées ou exprimées en unités, ce qui augmente la complexité de la quantification.

De plus les impacts environnementaux du mobilier, des petits éléments de construction ainsi que des réfrigérants n'ont pas été pris en compte dans l'analyse de cycle de vie des variantes de constructions.

4 Analyses

Dans ce chapitre, nous présentons les deux études de cas et décrivons les composants qui constituent la structure des bâtiments considérés, ainsi que les hypothèses qui ont été faites pour quantifier les matériaux. Vient ensuite la présentation de la configuration géométrique des deux dimensions de surface utilisées lors des simulations.

4.1 Matériaux et potentiels de réchauffements

Le présent chapitre décrit les matériaux utilisés pour chaque composant des deux types de maisons avec leur épaisseur respective, ainsi que leur potentiel de réchauffement global respectif. Les valeurs GWP de chaque élément est également présenté dans des tableaux importés de la feuille de calcul Excel créée pour cette étude. Ces tableaux reprennent l'ensemble des matériaux répertoriés sur la plateforme Okobaudat, c'est pourquoi les noms des matériaux sont écrits en allemand. La somme des valeurs GWP présentés se rapporte toujours sur 1 m² de l'élément. Quant au bilan carbone de chaque matériau composant les éléments, il est basé sur la quantité de matériau utilisée par m². Selon le matériau, cette quantité est définie en kg, m, m² ou m³. La quantité exacte de chaque matériau ne sera pas présentée dans ce document, mais se trouve dans le fichier Excel.

L'outil Ubakus a été utilisé pour afficher une coupe transversale des différents éléments de la maison, ainsi que pour calculer les coefficients U de transmission thermique pour les parties en contact avec l'extérieur ou le sol.

Les matériaux, les quantités et les épaisseurs choisis pour chaque variante de construction sont pour la plupart issus de projets existants au Luxembourg auxquels E3consult a participé ou résultent de suppositions afin de simplifier l'analyse.

4.1.1 Variante en béton

4.1.1.1 Toit plat et inclinée

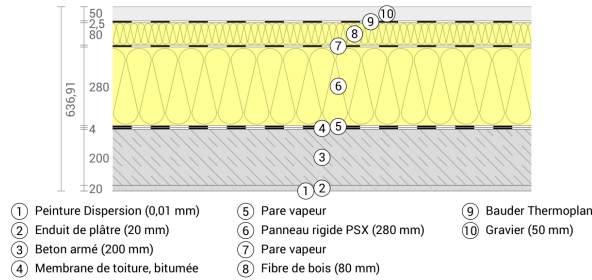


Figure 9: Composition du toit en béton plat

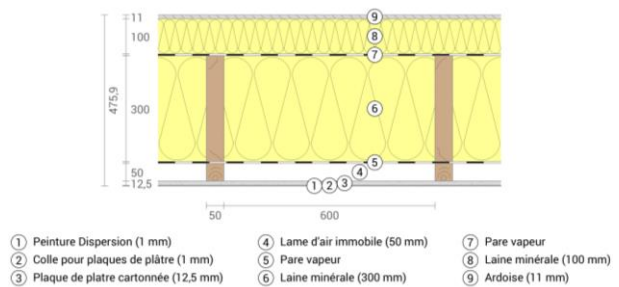


Figure 10: Composition du toit incliné en béton

Les figures 9 et 10 décrivent la composition des différentes toitures de la construction en bois. Les éléments sont numérotés de l'intérieur vers l'extérieur. Le toit plat a pour structure de base une dalle de béton avec une armature en acier, tandis que le toit incliné est composé de dalles en bois. Les deux toits ont comme revêtement intérieur une peinture à dispersion, suivie d'un enduit de plâtre pour le toit plat et de plaques de plâtre pour le toit en pente. Les matériaux d'isolation utilisés ne sont pas les mêmes, puisque le toit en pente utilise de la laine minérale entre les poutres en bois, tandis que le toit plat commence par une couche de polystyrène extrudé, suivie d'une couche plus fine d'isolant en fibre de bois. Entre les différentes couches se trouvent des pare-vapeur. Le toit plat est recouvert d'une couche de gravier, tandis que le toit en pente est recouvert d'ardoise.

Tableau 1: GWP du toit plat

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Gipsputz	4,1
3.a	Mineralische_Baustoffe	Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30	42,6
3.b	Metalle	Bewehrungsstahl	19,2
4	Kunststoffe	Bitumenbahnen G 200 S4	5,8
5	Kunststoffe	Dampfbremse PE	1,9
6	Dämmstoffe	XPS-Dämmstoff	60,1
7	Kunststoffe	Dampfbremse PE	1,9
8	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	7,6
9	Kunststoffe	BauderTHERMOPLAN	6,7
10	Mineralische_Baustoffe	Kies 2/32 getrocknet	0,1
Total			151,6

Tableau 2: GWP du toit incliné

	Catégorie	Élément	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Kleber für Gipsplatten	0,2
3	Mineralische_Baustoffe	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	1,7
4.a	/	Luft	/
4.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,7
5	Kunststoffe	Dampfbremse PE	1,0
6.a	Dämmstoffe	Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung)	12,2
6.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	4,2
7	Kunststoffe	Dampfbremse PE	1,0
8	Dämmstoffe	Mineralwolle (Schrägdach-Dämmung)	4,8
9	Mineralische_Baustoffe	Schiefer	15,3
Total			42,7

Une comparaison des tableaux 1 et 2 montre que le potentiel de réchauffement environnemental des toits plats est beaucoup plus important que celui des toits en pente. Cela est principalement dû à l'utilisation de béton armé et de polystyrène extrudé.

4.1.1.2 Mur extérieur

La figure 11 ci-dessous expose la composition du mur extérieur. La structure du mur extérieur est composée de béton cellulaire et de mortier. Comme isolants on a pris des panneaux isolants Neopor qui comparé à d'autres polystyrènes expansés (EPS) possèdent un pouvoir thermique plus élevé.

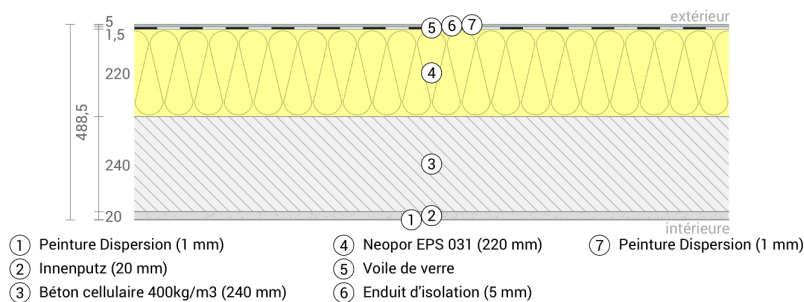


Figure 11: Composition du mur en béton extérieur

Sur le tableau 3 on remarque que comme pour le toit plat, le potentiel de réchauffement du béton compose la plus grande partie de la valeur GWP total. Le béton et l'isolant composent 80% du bilan carbone total du mur extérieur.

Tableau 3: GWP du mur extérieur

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Kalk-Gips-Innenputz	3,2
3	Mineralische_Baustoffe	Beton-Mauersteine	62,9
4	Dämmstoffe	Dämmplatte mit Neopor® Plus	22,1
5	Kunststoffe	Glasvlies	0,6
6	Mineralische_Baustoffe	Putzmörtel-Wärmedämmputz	16,1
7	Beschichtungen	Fassadenfarbe Silikat-Dispersionsfarbe	1,5
Total			108,0

4.1.1.3 Mur intérieur

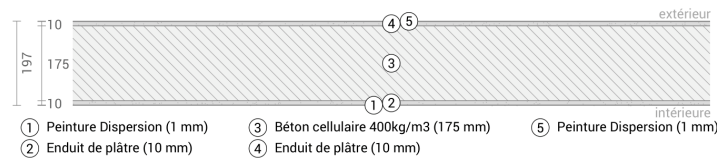


Figure 12: Composition du mur intérieur

La base du mur intérieur est aussi composée de briques de béton qui a lui seul possède une valeur GWP de 45,9 kg éqCO₂/m² sur un total de 53,2 kg éqCO₂/m². En comparaison, les autres éléments tels que la peinture et le plâtre ont un impact négligeable. De plus, la paroi intérieure n'est pas isolée.

Tableau 4: GWP du mur intérieur

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Gipsputz (Gips)	1,4
3	Mineralische_Baustoffe	Beton-Mauersteine	45,9
4	Mineralische_Baustoffe	Gipsputz (Gips)	2,7
5	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
Total			53,2

4.1.1.4 Dalle entre rez-de-chaussée et étage

La peinture intérieure et le plâtre forment le plafond du rez-de-chaussée. Le noyau du premier étage est constitué de béton armé et de deux matériaux isolants : des panneaux isolants en mousse rigide de polyuréthane (PU) et des panneaux en polystyrène extrudé. (XPS).

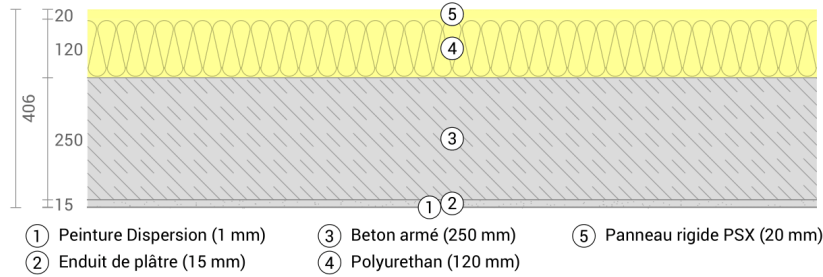


Figure 13: Composition de la dalle entre le rez-de-chaussée et l'étage supérieur

Le tableau 5 démontre que les isolants PU et XPS ayant des couches pas très épaisses n'ont pas une empreinte carbone par m² très significatif.

Tableau 5: GWP de la dalle du premier étage

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Gipsputz (Gips)	2,0
3.a	Mineralische_Baustoffe	Béton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30	53,3
3.b	Metalle	Bewehrungsstahl	19,2
4	Dämmstoffe	PU-Dämmplatten aus Blockschaumstoff	1,5
5	Dämmstoffe	XPS-Dämmstoff	4,3
Total			81,9

4.1.1.5 Revêtements de sol

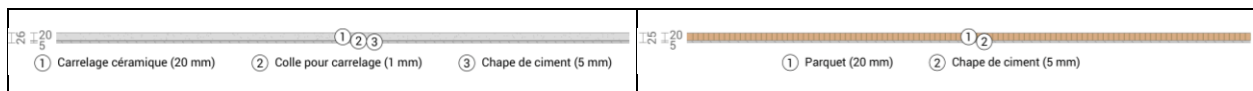


Figure 14: Composition du revêtement de sol en carrelage et en parquet

Les deux revêtements de sol choisis, le carrelage et le parquet, sont appliqués sur la dalle de l'étage et sur le sol du rez-de-chaussée. Tous deux sont composés d'une chape de ciment. Le carrelage est posé sur cette couche après application d'une colle. Le parquet est directement posé sur la chape. Ces deux revêtements de sol sont les mêmes que ceux utilisés pour la variante de la construction en bois, c'est pourquoi ils ne sont présentés qu'une seule fois ici.

Tableau 6: GWP du revêtement carrelage

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Mineralische_Baustoffe	Zementestrich	29,1
2	Mineralische_Baustoffe	Fliesenkleber	1,9
3	Mineralische_Baustoffe	Keramische Fliesen und Platten	13,4
Total			44,3

Tableau 7: GWP du revêtement parquet

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Mineralische_Baustoffe	Zementestrich	29,1
2	Holz	Mehrschichtparkett (Durchschnitt DE)	9,0
Total			38,1

Les tableaux 6 et 7 révèlent que le carrelage a un PRG légèrement supérieur à celui du parquet.

4.1.1.6 Sol du rez-de-chaussée

Nous avons décidé d'utiliser la même fondation pour les deux types de bâtiments étudiés.

Contrairement aux schémas des autres matériaux, la numérotation est ici inversée.

La figure 15 ci-dessous montre que la première couche du sol est constituée de gravier, sur lequel sont coulées deux couches de béton armé de différentes classes de résistance. Entre ces deux couches, sont posés des panneaux XPS. La dernière couche de la fondation est constituée de plaques en néopor.

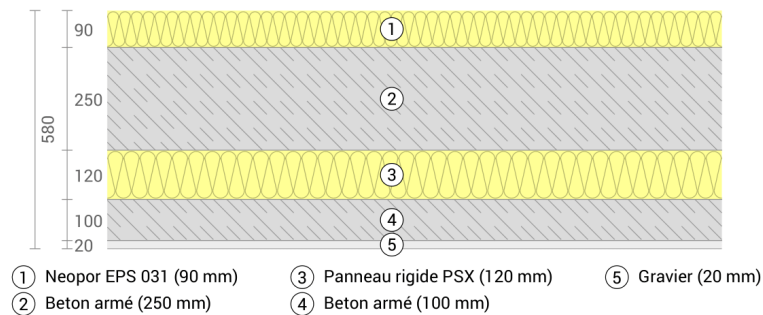


Figure 15: Composition du plancher

La figure 15 et le tableau 8 illustrent le fait que les épaisseurs des deux isolants, 9 cm pour le néopor (1) et 12 cm pour le polystyrène (3), sont similaires, mais ce dernier a un potentiel de réchauffement nettement supérieur à celui du néopor.

Tableau 8: GWP du sol du rez-de-chaussée

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
5	Mineralische_Baustoffe	Schotter 16/32	1,2
4.b	Metalle	Bewehrungsstahl	8,2
4.a	Mineralische_Baustoffe	Béton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30	21,3
3	Dämmstoffe	XPS-Dämmstoff	25,8
2.b	Metalle	Bewehrungsstahl	20,6
2.a	Mineralische_Baustoffe	Béton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37	58,9
1	Dämmstoffe	Dämmplatte mit Neopor® Plus	9,0
Total			145,1

4.1.1.7 Escalier

L'escalier est composé de béton armé et de carrelage. Ce dernier a un potentiel de réchauffement négligeable par rapport à l'impact global qu'a l'escalier.

Tableau 9: GWP de l'escalier

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Mineralische_Baustoffe	Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37	51,85
2	Mineralische_Baustoffe	Bewehrungsstahl	41,52
3	Mineralische_Baustoffe	Keramische Fliesen und Platten	13,38
Total			106,8

4.1.1.8 Fenêtre

Les fenêtres de la maison sont toutes en PVC et possèdent un triple vitrage. Ce dernier a une valeur GWP très élevée par rapport au reste des matériaux utilisés.

Tableau 10: GWP de la fenêtre

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Fenstern_Fassade	Fugendichtungsbänder Butyl	17,44
2	Fenstern_Fassade	Blendrahmen PVC-U	24,35
3	Fenstern_Fassade	Flügelrahmen PVC-U	28,14
4	Fenstern_Fassade	Dreifachverglasung (Dicke: 0,036 m)	122,81
Total			192,7

4.1.1.9 Porte du garage

La porte de garage est la même pour les deux concepts de construction et il s'agit d'une porte en aluminium avec un PRG de 70,4 kgéqCO₂.

Tableau 11: GWP de la porte du garage

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Fenstern_Fassade	Tor - Condoor BV - Industrie- und Garagentor Alu 40 mm (PG 2)	70,4
Total			70,4

4.1.1.10 Porte intérieure

Au niveau des portes intérieures, nous avons opté pour les mêmes portes en bois dans les deux maisons, car c'est le type de porte le plus courant dans la région. On remarque clairement qu'avec 10 kgéqCO₂, cet élément a un impact très faible sur le réchauffement climatique.

Tableau 12: GWP de la porte intérieure

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Fenstern_Fassade	Lacksysteme Holzfenster Decklack weiß	0,79
2	Fenstern_Fassade	Lacksysteme Holzfenster Grundierung weiß	0,79
3	Holz	Spanplatte, roh (Durchschnitt DE)	0,89
4	Holz	Röhrenspanplatte (Durchschnitt DE)	5,01
5	Holz	Spanplatte, roh (Durchschnitt DE)	0,89
6	Fenstern_Fassade	Lacksysteme Holzfenster Grundierung weiß	0,79
7	Fenstern_Fassade	Lacksysteme Holzfenster Decklack weiß	0,79
Total			9,9

4.1.1.11 Porte Maison

La porte de la maison est une porte classique de la société Hörmann, qui présente un potentiel de réchauffement global élevé pour un seul élément, avec une valeur de 236,7 kgéqCO₂. Cette porte est également choisie comme porte de la maison en bois.

Tableau 13: GWP de la porte de la maison

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Fenstern_Fassade	Tür - Hörmann KG Eckelhausen - Haustür	236,7
Total			236,7

4.1.1.12 Pompe à chaleur

Tableau 14: GWP de la pompe à chaleur

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂]
1	Gebäudetechnik	Strom Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW	989,3
Total.			989,3

Dans le cas de cette étude, on a décidé d'utiliser une pompe à chaleur air – eau de 10 kW pour les deux variantes de construction. Le bilan carbone de la pompe à chaleur qui est présenté sur le tableau représente deux pièces ayant ainsi une valeur GWP de 494,7 kgéqCO₂ par pièce. En effet, le module de remplacement B4 est pris en compte dans le bilan total et, dans notre étude de cas, la pompe à chaleur est remplacée après 25 ans.

4.1.1.13 Système photovoltaïque

Tableau 15: GWP du système photovoltaïque

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂]
1	Sonstige	Photovoltaiksystem 1000 kWh/m ² *a	617,6
Total.			617,6

Dans le cas du système photovoltaïque, l'empreinte carbone se réfère également à deux panneaux, puisqu'après 25 ans, le premier est remplacé par un second. La valeur initiale du PRG par panneau est donc de 308,8 kgeqCO₂.

4.1.2 Variante en bois

4.1.2.1 Toit plat et incliné

Dans le concept de maison en bois, la structure du toit est constituée de poutres en bois de construction massives pour les deux types de toit. Pour le toit plat, de la laine minérale et des fibres de bois ont été choisies comme matériau d'isolation et un substrat végétal a été utilisé à la place du gravier pour couvrir le toit.

L'isolation du toit en pente est exclusivement composée de fibres de bois. Dans ce cas, le toit a été recouvert d'ardoises.

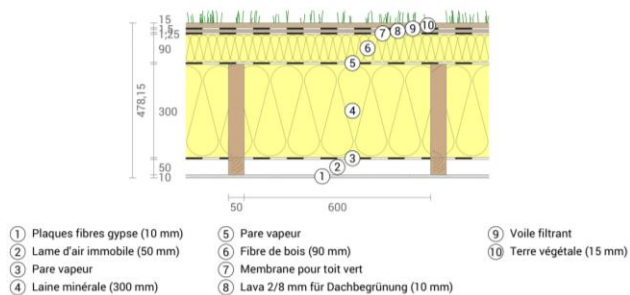


Figure 16: Composition du toit plat en bois

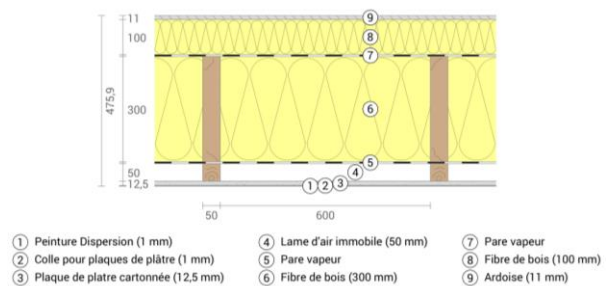


Figure 17: Composition du toit incliné en bois

Les figures 16 et 17 montrent que l'épaisseur de l'isolation des deux toits est similaire. Toutefois, une analyse des valeurs du potentiel de réchauffement global dans les tableaux 16 et 17 montre que la laine minérale a une valeur de GWP plus élevée que la fibre de bois. Cela explique principalement pourquoi le toit plat présente un potentiel de réchauffement global quelque peu supérieur à celui du toit en pente.

Tableau 16: GWP du toit plat

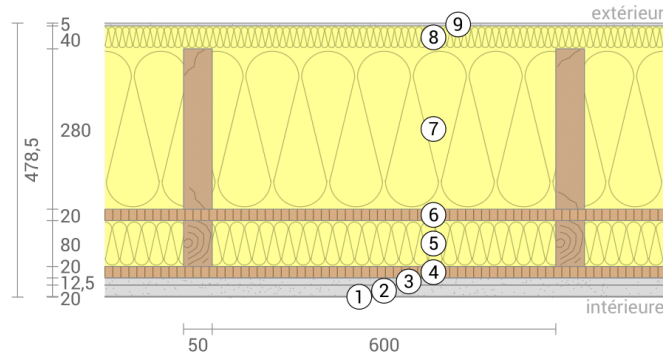
	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Mineralische_Baustoffe	Gipsfaserplatte	3,4
2.a	/	Luft	/
2.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	2,8
3	Kunststoffe	Dampfbremse PE	1,9
4.a	Dämmstoffe	Mineralwolle (Flachdach-Dämmung)	55,1
4.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,2
5	Kunststoffe	Dampfbremse PE	1,9
6	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	8,5
7	Kunststoffe	Folie für Gründach	17,0
8	Mineralische_Baustoffe	Lava Körnung	0,2
9	Kunststoffe	PE/PP Vlies	6,3
10	Mineralische_Baustoffe	Vegetationssubtrat	-3,6
Total			93,8

Tableau 17: GWP du toit incliné

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Kleber für Gipsplatten	0,2
3	Mineralische_Baustoffe	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	1,7
4.a	/	Luft	/
4.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,2
5	Kunststoffe	Dampfbremse PE (Dicke 0,0002 m)	1,9
6.a	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	24,2
6.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	4,2
7	Kunststoffe	Dampfbremse PE (Dicke 0,0002 m)	1,9
8	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	9,5
9	Mineralische_Baustoffe	Schiefer	15,3
Total			60,8

4.1.2.2 Mur extérieur

Le mur extérieur est composé de différents bois et de plusieurs couches de produits isolants différents. Pour le bois, on utilise d'abord des panneaux OSB, qui sont des couches de lamelles de bois traitées thermiquement et du bois de construction. Ensuite, des fibres de bois sont appliquées comme isolant et les deux couches précédentes sont répétées. Entre les sections de bois, on insuffle de la fibre de cellulose, qui a une résistance thermique élevée. Des panneaux de fibres de bois et une couche de mortier d'enduit sont ensuite appliqués sur cette dernière.



- | | | |
|--|-------------------------|-----------------------------|
| ① Peinture Dispersion (1 mm) | ④ Panneau OSB (20 mm) | ⑦ Cellulose (280 mm) |
| ② Colle pour plaques de plâtre (20 mm) | ⑤ Fibre de bois (80 mm) | ⑧ Fibre de bois (40 mm) |
| ③ Plaque de platre cartonnée (12,5 mm) | ⑥ Panneau OSB (20 mm) | ⑨ Enduit d'isolation (5 mm) |

Figure 18: Composition mur extérieur variante bois

Le tableau 18 montre le que le bilan carbone total du mur extérieur de 52,9 kg éq.CO₂ par m². Ce mur a un potentiel de réchauffement global très inférieur à celui du mur extérieur de la variante de construction massive. Cela s'explique principalement par le fait que ce projet de maison n'utilise pas de béton.

Tableau 18: GWP du mur extérieur

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Kleber für Gipsplatten	0,2
3	Mineralische_Baustoffe	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	1,7
4	Holz	Oriented Strand Board (Durchschnitt DE)	5,6
5.a	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	6.8
5.b	Holz	Schnittholz Fichte	1,5
6	Holz	Oriented Strand Board (Durchschnitt DE)	5,6
7.a	Dämmstoffe	Zellulosefaser Einblas-Dämmstoff	6.1
7.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	3,9
8	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	3.8
9	Mineralische_Baustoffe	Putzmörtel-Wärmedämmputz	16,1
Total			52,9

4.1.2.3 Mur intérieur

Les murs intérieurs sont constitués de bois de construction et d'une isolation en fibres de bois. Des plaques de plâtre recouvrent la structure des murs. Une colle spéciale et une peinture à dispersion sont appliquées sur ces plaques.

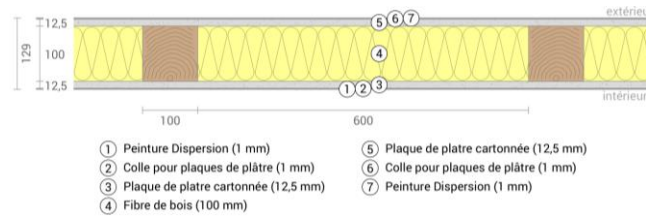


Figure 19: Composition du mur intérieur version bois

Avec 16,5 kg eq.CO₂-eq par m², le mur intérieur a un impact global nettement plus faible que le mur extérieur.

Tableau 19: GWP du mur intérieur

	Catégorie	Element	GWP [kg eqCO ₂ /m ²]
1	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
2	Mineralische_Baustoffe	Kleber für Gipsplatten	0,2
3	Mineralische_Baustoffe	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	1,7
4.a	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff Trockenverfahren (Durchschnitt DE)	8,5
4.b	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	0,9
6	Mineralische_Baustoffe	Gipskartonplatte (Feuerschutz)	1,7
7	Mineralische_Baustoffe	Kleber für Gipsplatten	0,2
8	Beschichtungen	Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest	1,6
Total			16,5

4.1.2.4 Sol de l'étage

L'étage supérieur est construit à partir de panneaux de bois lamellé-collé et d'une petite quantité de granulés de béton cellulaire afin d'assurer une plus grande robustesse de la structure. Dans ce scénario, les panneaux de fibres de bois font office d'isolant.

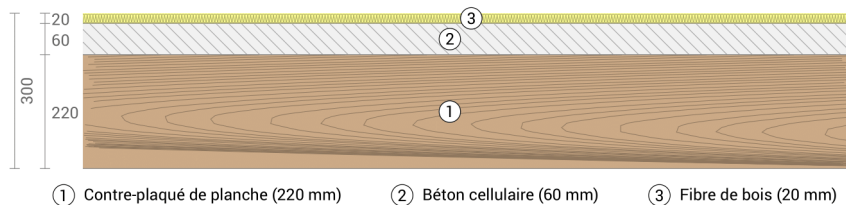


Figure 20: Composition plancher de l'étage version bois

Le tableau 20 ci-dessous montre que le bois représente la quasi-totalité du potentiel de réchauffement de l'ensemble de l'élément

Tableau 20: GWP du plancher de l'étage

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Holz	Brettsperrholz (Durchschnitt DE)	30,4
2	Mineralische_Baustoffe	Porenbeton Granulat	0,6
3	Dämmstoffe	Holzfaserdämmstoff (Durchschnitt DE)	1,9
Total			32,8

4.1.2.5 Escalier

L'escalier est entièrement fabriqué en bois de construction.

Tableau 21: GWP de l'escalier en bois

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Holz	Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE)	94
Total			94

4.1.2.6 Fenêtre

Le type de vitrage utilisé dans cette construction est le même que celui de la maison en béton.

Toutefois, les cadres des fenêtres ne seront plus en PVC, mais en bois avec des joints en aluminium.

Tableau 22: GWP de la fenêtre

	Catégorie	Element	GWP [kg éqCO ₂ /m ²]
1	Fenstern_Fassade	EPDM-Dichtungen für Aluminiumprofil	3,42
2	Fenstern_Fassade	Rahmenprofile für Fenster - HUECK System GmbH & Co. KG - Volato	28,95
3	Fenstern_Fassade	Holz-Flügelrahmen	3,90
4	Fenstern_Fassade	Dreifachverglasung (Dicke: 0,036 m)	122,81
Total			159,1

4.2 Coefficient de transmission thermique U

Le coefficient de transmission thermique définit la performance thermique d'un composant.

Les coefficients thermiques des composants des maisons en contact avec le climat extérieur et le sol doivent respecter la valeur U minimale du bâtiment de référence, fixée dans le RGD 9 juin 2021, pour être intégrés dans les nouvelles classes de performance énergétique.

Tableau 23: Valeurs U des composantes et du bâtiment de référence ; Journal officiel du GDL p.28

	U [W/m ² K] des composants	U [W/m ² K] Bâtiment de référence
Toit plat en béton	0,107	0,11
Toit inclinée en béton	0,106	0,11
Toit plat en bois	0,109	0,11
Toit inclinée en bois	0,106	0,11
Mur extérieure Béton	0,103	0,13
Mur extérieure Bois.	0,107	0,13
Sol du rez-de-chaussée	0,156	0,17

4.1 Surfaces des bâtiments

Afin de disposer de plus de scénarios de comparaison dans le cadre de cette étude, nous avons décidé d'analyser les maisons individuelles non pas avec une seule taille, mais avec deux. Une première maison (A) d'une superficie nette de 200 m² et la seconde (B) d'une superficie nette de 150 m². Ces surfaces ont été choisies puisqu'il s'agit des tailles typiques d'une maison unifamiliale au Luxembourg. Ces deux tailles seront appliquées aux deux études de cas, la maison en béton et la maison en bois.

La taille de la maison jouera un rôle important, car elle a une influence sur l'impact environnemental des éléments de la maison tels que le sol, le plafond et le toit. Pour les deux variantes, une maison à deux étages a été créée, car il est typique au Luxembourg d'avoir au moins deux étages. En revanche, n'avoir qu'un seul étage est plutôt inhabituel.

Pour avoir le nombre de surfaces vitrées de la maison, on a utilisé un rapport de surface vitrée qui est de 35 % pour les deux cas.

Pour les superficies des bâtiments A et B, seuls les surface nettes (200 et 150 m²), leur largeur brute (8 m) et le nombre d'étages (2) ont été prédéfinis. Pour les dimensions des éléments restants, on s'est basé sur les surfaces de bases et on a automatisé le reste avec des calculs. La surface nette moins la surface qu'occupe les murs intérieurs et les escaliers, est la surface qui est recouverte par les deux types de revêtements choisis, du carrelage (revêtement 1) et du parquet (revêtement 2). On a pris comme rapport carrelage/parquet 60% et 40%. Par hypothèses les murs intérieurs occupent 10% de la surface et les escaliers une surface de 10 m² totales au sol.

On est alors parti sur des calculs hypothétiques afin d'obtenir les surfaces brutes de la maison. Celles-ci étaient nécessaires pour les données de la dalle et du sol.

Tableau 24: Surfaces horizontales

	Snet [m ²]	Sbrut [m ²]	Snet/ Sbrut (%)	Longueur [m]	Dalle sol nette [m ²]	Dalle étage nette [m ²]	Revêtement 1 [m ²]	Revêtement 2 [m ²]
A	200	245	81.6	15,3	122.5	122.5	90	65
B	150	183,7	81.6	11,5	91.9	91.9	50	35

Le toit plat a la même surface que la dalle de sol, 122,5 et 91,9 m².

Avant de calculer la surface de la toiture en pente, il faut définir le degré d'inclinaison de la toiture. Cette inclinaison est de 45%, et les deux parties du toit sont orientées à l'est et à l'ouest. Les murs

extérieurs des côtés est et ouest mesurent 15,3 m de long. En définissant un bord de 0,3 m de chaque côté du toit, nous calculons que la longueur du toit est de 15,9 m. En utilisant la trigonométrie, nous avons calculé la largeur du toit à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Largeur du toit} = ((\text{largeur brute du mur}) / 2) / \text{Cosinus (inclinaison du toit)} = (8 / 2) / \text{Cos} (45) = 5,66 \text{ m}$$

A cette largeur on ajoute encore les (0,3 m) du rebord du toit, on multiplie avec la longueur (15,9 m) et on multiplie par deux pour avoir les deux parties de la toiture.

Surface totale de la toiture inclinée de la maison A : $((5,66 + 0,3) * 15,9) * 2 = 189,5 \text{ m}^2$

On obtient ainsi une superficie totale pour le toit de 189,5 m².

On effectue alors les mêmes calculs pour la maison B en prenant comme longueur 11,5.

Surface totale de la toiture inclinée de la maison B : $((5,66 + 0,3) * 11,5) * 2 = 137,1 \text{ m}^2$

On obtient ainsi une superficie totale pour le toit de 137,1 m².

L'épaisseur de la dalle et du toit ainsi que la hauteur du plafond ont été choisies en fonction des dimensions standard d'une maison à deux étages. Ces mêmes éléments constituent la hauteur des murs extérieurs. Pour faciliter la modélisation de la maison avec une toiture inclinée, la partie du mur qui se trouve entre les deux parties de la toiture n'est pas prise en compte. Les surfaces nettes des murs extérieurs ont été calculées en déduisant les surfaces vitrées, les portes extérieures et la porte de garage des surfaces brutes des murs, qui étaient respectivement de 280 m² et 234 m².

Tableau 25: Murs et épaisseurs

	Epaisseur dalle [m]	Epaisseur toit [m]	Hauteur sous plafond [m]	Hauteur mur ext. Brut [m]	Murs ext. net [m ²]	Murs intérieurs [m ²]
A	0,5	0,5	2,5	6	175	220
B	0,5	0,5	2,5	6	145	165

Les dimensions des portes extérieures et de la porte de garage sont des dimensions normalisées. Le rapport de 35% des surfaces vitrées nous livre la surface cumulée des fenêtres, qui est de 98 et 82 m² pour la maison et A et B respectivement.

Tableau 26: Surface des éléments

	Surfaces vitrées [m ²]	Porte extérieure [m ²]	Porte garage [m ²]
A	98	2	4,8
B	82	2	4,8

4.2 Performance énergétique et environnementale du cas d'étude

4.2.1 Exploitation énergétique et environnementale du bâtiment

Afin de simplifier les calculs relatifs au fonctionnement énergétique du bâtiment, il a été décidé que les deux variantes de construction auraient les mêmes besoins énergétiques et seraient basées sur les classes d'efficacité énergétique définies dans le règlement grand-ducal du 9 juin 2021. Au Luxembourg, une maison individuelle neuve répondant aux nouvelles exigences se verra attribuer les classes A+, A ou B. Les valeurs de ces trois classes sont ensuite utilisées pour analyser différents scénarios ou pour comparer des maisons ayant des performances énergétiques différentes.

Catégories de bâtiment		Classe A+	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classe E	Classe F	Classe G	Classe H	Classe I
1	MFH	≤ 16	≤ 41	≤ 71	≤ 84	≤ 98	≤ 154	≤ 225	≤ 280	≤ 355	> 355
2	EFH	≤ 22	≤ 41	≤ 90	≤ 123	≤ 142	≤ 208	≤ 295	≤ 395	≤ 530	> 530

Figure 21: Classes de performance énergétiques

Les chiffres indiqués pour chaque classe se rapportent à la valeur spécifique de la demande totale d'énergie primaire du bâtiment. Indépendamment de cela, nous avons besoin de l'énergie finale du bâtiment pour nos analyses. Pour passer de l'énergie primaire à l'énergie finale, nous avons utilisé le facteur d'énergie primaire pour le mix électrique luxembourgeois. Celui-ci indique le rapport entre l'énergie primaire et l'énergie finale et s'élève à 1,50 kWh_p/kWh_e. ("RGD Du 9 Juin 2021 Concernant La Performance Énergétique Des Bâtiments.," 2021)

Les valeurs spécifiques pour un m² et pour les deux superficies de maisons ont ensuite été calculées en divisant la demande d'énergie primaire par le facteur en question. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 27: Besoin en énergie finale

Surface	Unités	Classe A+	Classe A	Classe B
Valeur spécifique par unité de surface	[kWh/m ² a]	14,67	27,33	60
150 m ²	[kWh/a]	2200,5	4099,5	9000
200 m ²	[kWh/a]	2934	5466	12000

A cette consommation d'énergie du bâtiment est également ajouté le fonctionnement par l'utilisateur, qui prend en compte l'éclairage et d'autres postes comme la télévision, la cuisine... Les valeurs ont

été sélectionnées sur la base de chiffres standard pour les maisons au Luxembourg. Elles sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 28: Exploitation par l'utilisateur en [kWh/a]

	Par unité de surface [kWh/m ² a]	Maison de 150 m ² [kWh/a]	Maison de 200 m ² [kWh/a]
Eclairage	3	450	600
Autres postes	5	750	1000
Total	8	1200	1600

Finalement en additionnant les besoins énergétiques du bâtiment et l'exploitation par l'utilisateur, on obtient exploitation totale pour chaque bâtiment.

Performance environnementale

Dans le but de notre analyse, il est primordial de calculer et intégrer la phase de vie B6 dans l'analyse de cycle de vie. Ceci est réalisé en prenant les valeurs des performances environnementales qui correspondent aux mêmes classes A+, A, B que les précédentes.

Tableau 29: Classes de performance environnementale

	Unités	Classe A+	Classe A	Classe B
Valeur spécifique par unité de surface	[kgCO ₂ /m ² a]	6,5	10	20
150 m ²	[kgCO ₂ /a]	975	1500	3000
200 m ²	[kgCO ₂ /a]	1300	2000	4000

A cette quantité spécifique sont ensuite ajoutés les 8 kWh/m²a de l'exploitation par l'utilisateur, multipliés par le facteur environnemental $f_{CO_2, x}$ qui est de 0,367 kgCO₂/kW_e au Luxembourg, ce qui donne une émission de 2,9 kgCO₂/m²a. ("RGD Du 9 Juin 2021 Concernant La Performance Énergétique Des Bâtiments.," 2021)

Ces deux valeurs spécifiques multipliées par la surface habitable donnent la phase de vie B6 de l'analyse du cycle de vie du bâtiment. Cette phase est essentielle pour notre étude, car elle décrit la consommation d'énergie pendant l'utilisation du bâtiment. Elle représente l'impact environnemental par an généré par l'utilisation du bâtiment. Le tableau ci-dessus illustre le fait que le bâtiment ayant la plus grande surface a alors le plus grand impact.

4.2.2 Panneaux photovoltaïques

Le modèle de panneaux photovoltaïques choisi pour cette étude est constitué de modules monocristallins standard à 60 cellules. Ces panneaux présentent un coefficient de puissance crête de 0,2 kW_{peak}/m². Le rayonnement solaire pris en compte pour l'analyse est de 1000 kWh/m²a. Différentes caractéristiques telles que la surface d'installation, l'inclinaison et l'orientation des panneaux sont utilisées comme variables dans la simulation de différents scénarios.

Un tableau a été créé à l'aide d'Excel pour estimer les émissions annuelles évitées grâce à l'installation photovoltaïque. La valeur obtenue est négative et est déduite chaque année de la phase d'utilisation du bâtiment. Dans ce tableau, on choisit d'abord le taux d'utilisation des panneaux solaires sur le toit. Ensuite, selon que l'on souhaite simuler un toit plat ou un toit en pente, on choisit une seule ou deux inclinaisons différentes.

En ce qui concerne le premier cas, celui d'un toit plat, on peut choisir entre six orientations (sud, sud-est, sud-ouest, est, ouest) et des inclinaisons de 0 à 90 %. Ces deux paramètres déterminent le rendement des panneaux. Ce rendement est ensuite multiplié par l'ensoleillement, la surface photovoltaïque et le coefficient de puissance de pointe pour obtenir la production annuelle d'électricité en kWh/a.

Pour le deuxième cas, celui d'un toit incliné, on fixe les deux pentes à 45 %, ce qui est une pente standard pour un toit au Luxembourg, et l'orientation des deux parties du toit vers l'ouest et l'est. On obtient alors deux rendements que l'on multiplie chacun par 50 %. Les calculs sont similaires à ceux d'un toit plat, et les rendements des deux côtés du toit sont ensuite additionnés.

La production finale d'électricité permet alors, en utilisant le facteur environnemental $f_{CO_2, x}$ qui est de 0,367 kgCO₂/kW_e, de convertir l'énergie en émissions totales évitées grâce à l'installation photovoltaïque. Cette valeur est ensuite déduite chaque année de la phase de vie B6 du bâtiment, affectant ainsi la valeur d'utilisation de l'énergie par la maison.

Cette déduction est d'une importance cruciale pour cette étude, car elle permet aux maisons étudiées d'atteindre la neutralité carbone en réduisant leurs émissions de manière significative grâce à l'installation des panneaux photovoltaïques. Cette déduction est toutefois discutable, car si, en théorie, la production de cette énergie verte permet d'économiser des combustibles fossiles pour la production d'électricité, elle ne retire pas le dioxyde de carbone de l'air issu d'autres facteurs (par exemple, les matériaux), comme le prétend la simple soustraction mathématique.

5 Résultats

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les différentes études de cas dans diverses circonstances sous forme de graphique. Pour la plupart des cas analysés, ces graphiques seront accompagnés de deux tableaux. Le premier reprend les paramètres du système photovoltaïque et la classe énergétique de la maison en question. Le second tableau indique les émissions de dioxyde de carbone à des moments clés du cycle de vie du bâtiment.

Sous un premier temps, les analyses sont conduites sur des maisons à toiture plate.

Tout d'abord, nous présentons les deux variantes de maisons dans un scénario idéal. Ensuite, nous les présentons dans un scénario réaliste, en testant les maisons avec différentes exigences énergétiques. Pour simplifier l'analyse, les maisons qui respectent une classe énergétique spécifique respectent également la même classe environnementale et toutes les analyses ont été conduites sur la maison à 200 m².

Nous démontrons ensuite quelle surface photovoltaïque est nécessaire afin d'atteindre la neutralité carbone.

Par la suite, les analyses précédentes sont répétées, mais sur des maisons avec des toitures inclinées.

Nous examinerons ensuite les impacts environnementaux des différents modules sur les variantes de maisons.

Enfin, nous comparerons les deux variantes de maisons avec les deux surfaces différentes, une fois par une analyse statique du cycle de vie et une fois par une analyse dynamique.

5.1 Scénario idéal

Dans ce scénario l'empreinte de carbone des deux variantes de construction avec un toit plat sont comparés sous des conditions idéales ou le toit est occupé à 100% par des panneaux photovoltaïques orientés vers le sud et avec un angle d'inclinaison de 35%.

Le tableau ci-dessous présente la classe énergétique de la maison en question et les paramètres de l'installation photovoltaïque.

Tableau 30: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le scénario idéal

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	100
Surface d'installation	[m ²]	122,5
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison PV	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	24496
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	8990

Le graphique ci-dessous montre, comme pour tous les exemples analysés dans cette étude, que pendant la phase de construction, la variante de construction massive a un impact environnemental beaucoup plus important que la variante de construction en bois.

Lors de la simulation de l'impact environnemental sur 50 ans, la hausse des courbes entre les années 24 et 25, correspond à la phase de vie B4 et prend en compte tous les remplacements de matériaux ayant une durée de vie de 25 ans.

Après cette hausse à l'année 25, l'empreinte carbone des deux variantes continue d'être atténuée par l'énergie produite par le système photovoltaïque.

À l'année 50, la phase de fin de vie intervient, et nous pouvons constater que l'impact de cette phase est bien plus élevé dans la variante de la maison en bois. Ceci est dû au fait que durant cette phase, les matériaux biosourcés libèrent le carbone qu'ils ont absorbé.

En conclusion, on constate que dans un contexte idéal de production photovoltaïque pour les deux variantes étudiées, la maison en bois a un impact légèrement inférieur à celui de la version en construction massive, mais avec une différence beaucoup plus faible qu'au moment de la construction des maisons.

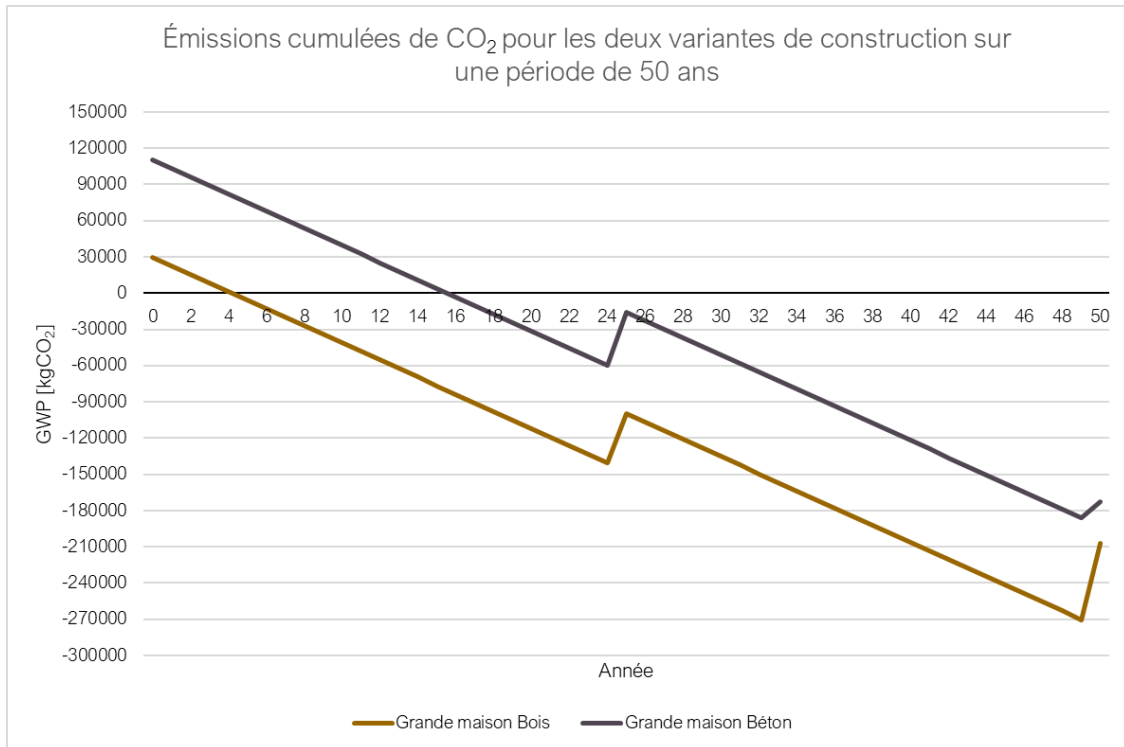


Figure 22: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes sous un scénario idéal

Le tableau ci-dessous présente les valeurs du PRG des deux variantes de construction à cinq étapes importantes de leur cycle de vie.

Tableau 31: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] sous un scénario idéal

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	29897	-140571	-99837	-270305	-207565
Béton	[kgCO ₂]	110501	-59967	-15484	-185952	-172817

5.2 Scénario réaliste sur les maisons avec un toit plat

La différence avec le scénario idéal est le taux d'occupation du toit avec des panneaux photovoltaïques. Dans ce scénario, 80 % du toit est occupé par des panneaux photovoltaïques. Les paramètres suivants sont les mêmes que pour le scénario précédent.

Dans le contexte de l'analyse d'un scénario réaliste, nous comparerons les deux types de maisons avec 3 classes énergétiques différentes, A+, A et B.

5.2.1 Classe énergétique A+

Les habitations appartenant à la classe énergétique A+ ont des besoins en énergie de 14,7 kWh/m²a. Après avoir ajouté la consommation de l'utilisateur, évaluée à 8 kWh/m²a, puis multiplié le résultat par les 200 m² de la maison, on trouve un besoin en énergie totale de 4540 kWh/a.

Tableau 32: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A+

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	98
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison panneaux	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	19597
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	7192

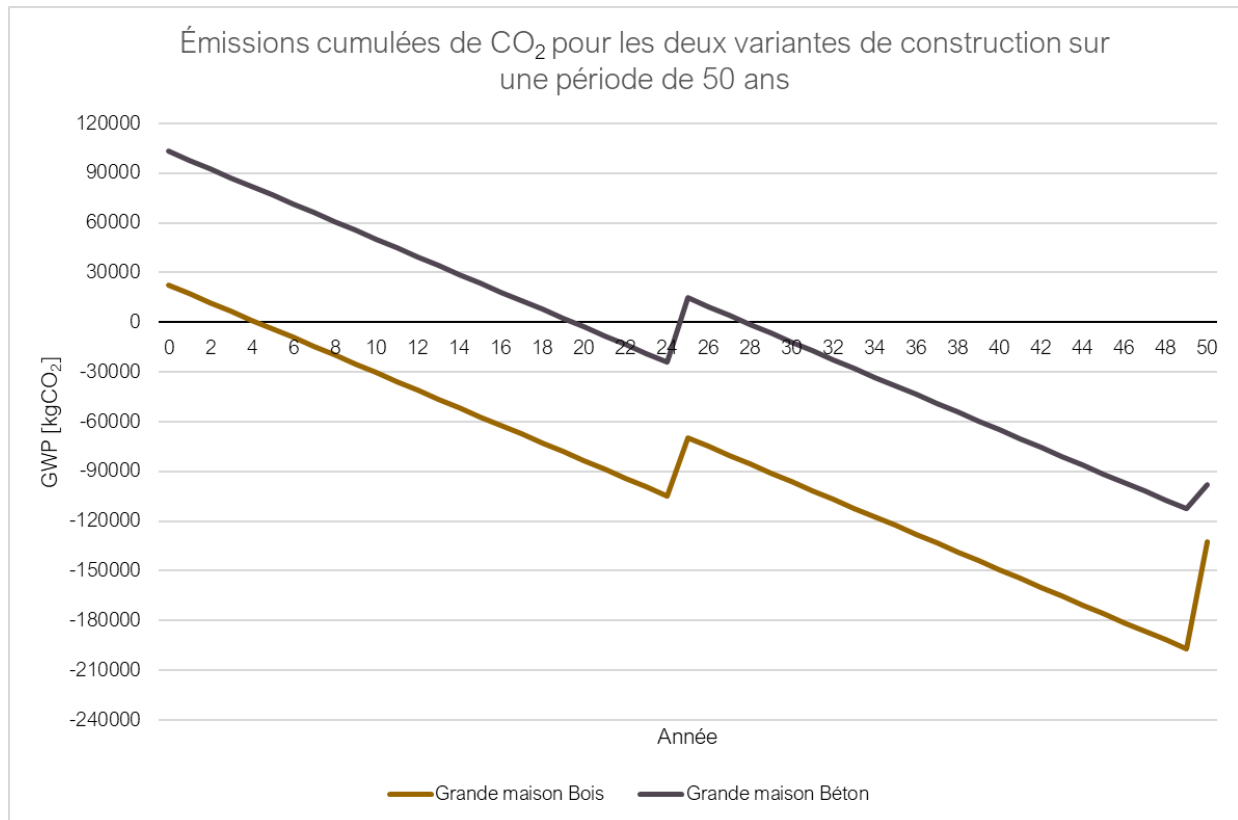


Figure 23: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec A+

En analysant le tableau 33, on s'aperçoit que l'impact de la phase de construction des deux variantes est légèrement inférieur à celui du scénario précédent, étant donné que l'on utilise ici 20 % de surface occupé par les panneaux photovoltaïques en moins.

Les courbes et les valeurs du potentiel de réchauffement sont très similaires à celles du cas où le toit est occupé à 100 % par des panneaux photovoltaïques. Les deux constructions auront une valeur d'émissions de CO₂ cumulées légèrement plus haute, car leur phase de construction a également joué un rôle moins important.

La maison en bois atteint la neutralité carbone à l'année 4, comme dans le cas précédent. Cependant, dans le cas de la maison en béton, la courbe dépasse le seuil de zéro émission à l'année 19, tandis que dans le cas de l'installation photovoltaïque maximale sur le toit, la neutralité carbone est atteinte à l'année 15.

Un autre repère intéressant sur le graphique se situe après le remplacement des matériaux, à l'année 25, lorsque l'on constate que la courbe de couleur gris foncé dépasse l'axe des abscisses, mais avec un impact minime puis fini une valeur de PRG négative.

Tableau 33: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A+

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22630	-104686	-69720	-197036	-132794
Béton	[kgCO ₂]	103233	-24082	14634	-112682	-98047

5.2.2 Classe énergétique A

Les maisons conformes à la classe énergétique A ont un besoin énergétique de 27 kWh/m²a. En y ajoutant la consommation des utilisateurs, définie à 8 kWh/m²a, et en multipliant le résultat par les 200 m² de la maison, on obtient un besoin énergétique total de 7 060 kWh/a. Ayant ainsi un besoin énergétique plus grand qu'une maison de classe A+, la quantité d'émissions de CO₂ atténué chaque année est moindre. Par conséquent, la neutralité carbone est atteinte plus tard, et l'empreinte carbone finale des variantes de construction est plus importante que celle des variantes de classe A+.

Tableau 34: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A

Classe énergétique	[-]	A
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	98
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison panneaux	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	19597
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	7192

Tableau 35: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22630	-87886	-52220	-162736	-97794
Béton	[kgCO ₂]	103233	-7282	32134	-78382	-63047

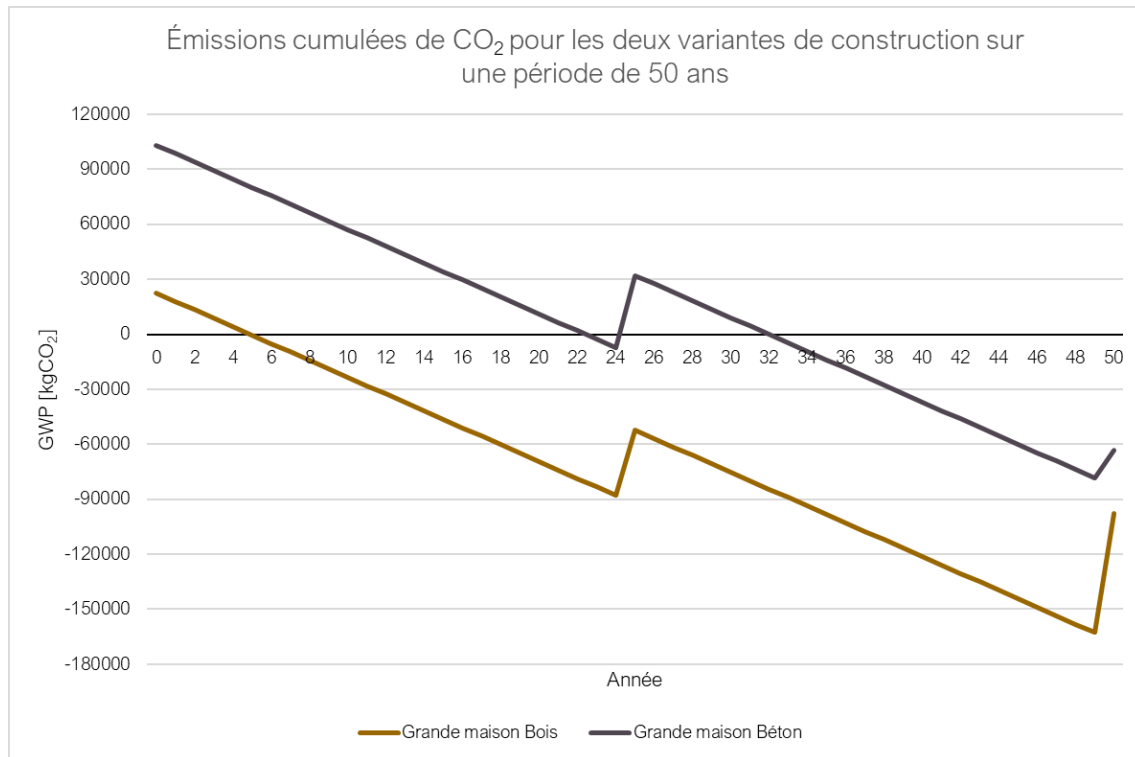


Figure 24: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec A

5.2.3 Classe énergétique B

Les maisons de classe énergétiques B ont un besoin énergétique de plus de deux fois plus grand que la classe énergétique A avec 60 kWh/m²a. La consommation par utilisateur continue à 8 kWh/m²a. Ceci équivaut à un total de 13600 kWh/a.

Tableau 36: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et B

Classe énergétique	[-]	B
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	98
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison panneaux	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	19597
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	7192

La variante en construction massive n'atteint pas la neutralité carbone après 50 ans, avec un impact final de 36953 kgCO₂/a après l'ajout des modules C1-C4. Il en va de même pour la maison en bois, dont les émissions cumulées de CO₂ s'élèvent à 2206 kgCO₂/a, ce qui dépasse légèrement le seuil de 0 émissions.

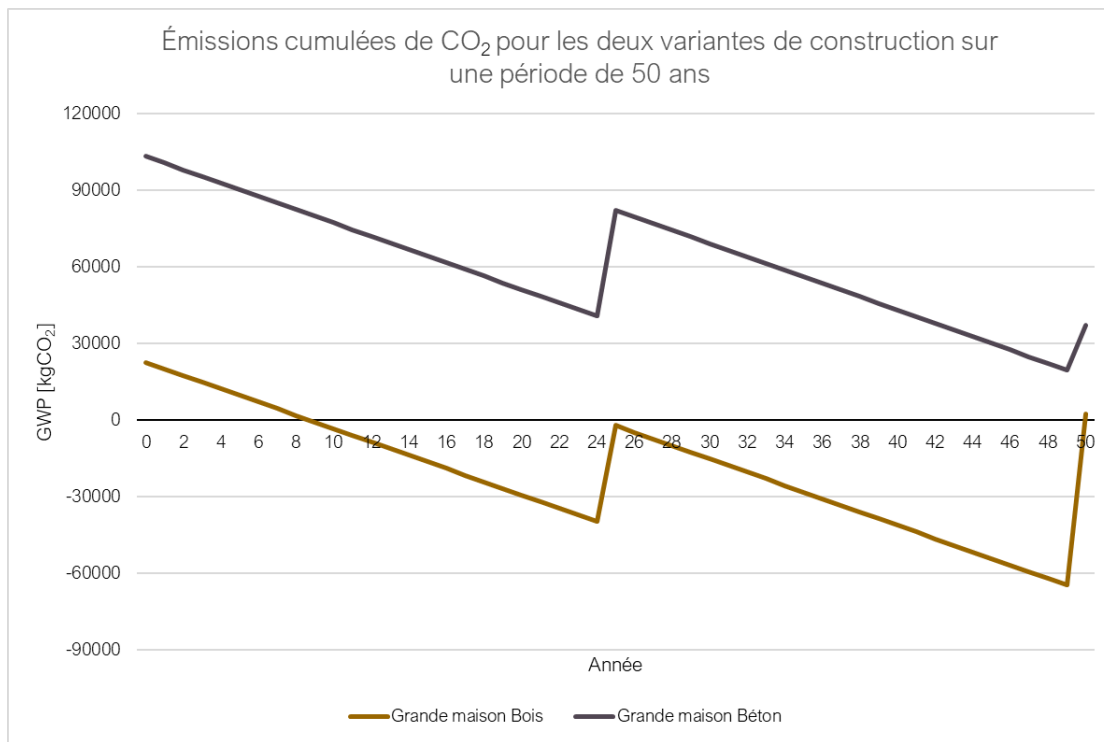


Figure 25: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec B

Tableau 37: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec B

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22630	-39886	-2220	-64736	2206
Béton	[kgCO ₂]	103233	40718	82134	19618	36953

5.3 Atteinte de la neutralité avec une toiture plate

Les analyses suivantes décrivent les paramètres nécessaires pour atteindre la neutralité carbone au bout de 50 ans pour les deux variantes de construction comportant 200 m², un toit plat, des panneaux photovoltaïques orientés vers le sud avec une inclinaison de 35 % et en respectant une classe énergétique A+.

5.3.1 Construction massive

Le tableau ci-dessous montre que, pour atteindre la neutralité carbone, la variante de maison de construction massive présentant une classe énergétique A+ devrait produire un minimum de 13473 kWh/a avec une surface totale d'installation de panneaux de 67,4 m², ce qui équivaut à un taux d'occupation du toit de 55 %.

Dans ces conditions, on éviterait 4945 kgCO₂ par an.

Tableau 38: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A+

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	55
Surface d'installation	[m ²]	67,4
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison panneaux	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	13473
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	4945

Le graphique suivant montre que la neutralité carbone serait donc atteinte au bout de 42 ans, et la maison aurait une valeur d'émissions de CO₂ cumulés de - 4584 kgCO₂ au bout de 50 ans.

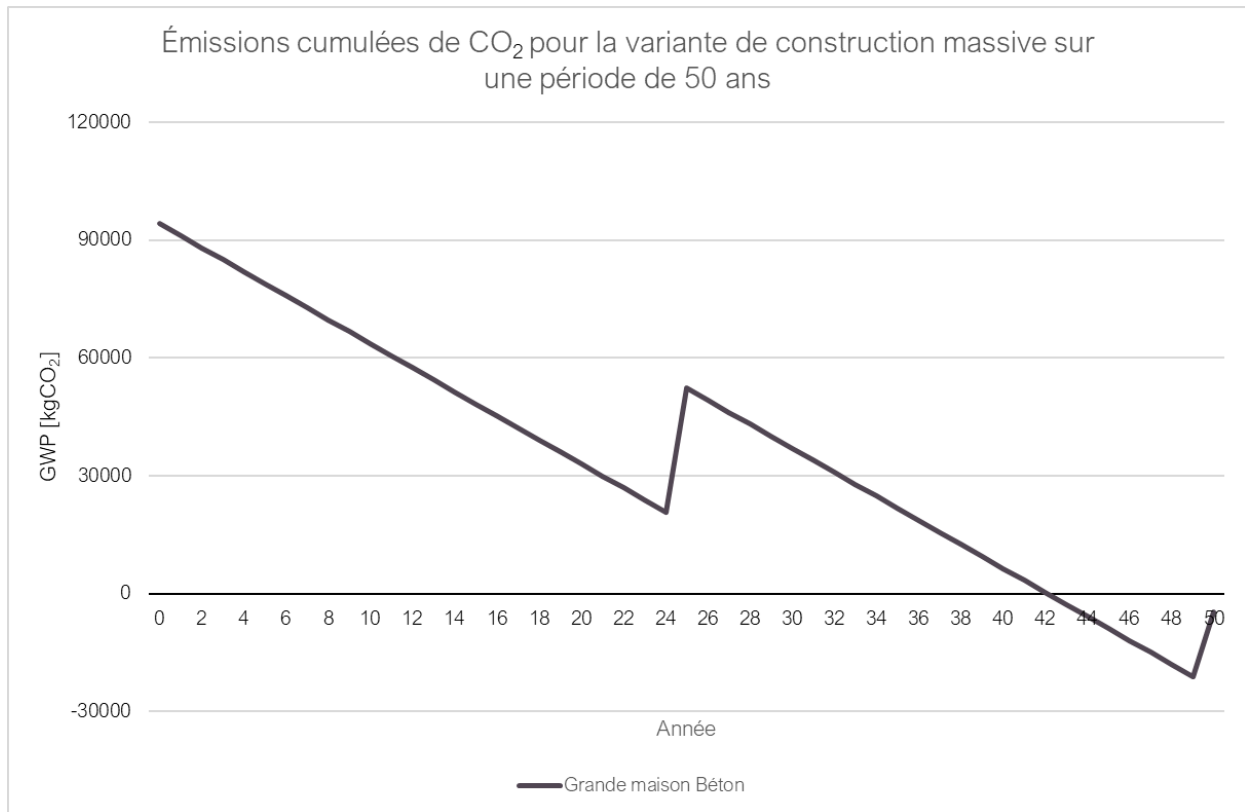


Figure 26: Emissions cumulées de CO₂ pour la grande maison en béton avec A+

Tableau 39: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A+

Année	[a]	0	24	25	49	50
Béton	[kgCO ₂]	94149	20773	52281	-21095	-4584

5.3.2 Construction en bois

Le tableau suivant montre que la construction en bois nécessite un taux d'occupation du toit de 45 %, ce qui représente 55,1 m² de panneaux photovoltaïques.

La surface de panneaux photovoltaïques étant liée à la quantité d'énergie produite par la maison, il ressort du tableau qu'une production d'électricité plus faible sera également nécessaire, avec un chiffre de 11023 kWh/a.

Tableau 40: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et A+

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	45
Surface d'installation	[m ²]	55,1
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison panneaux	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	11023
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	4046

Étant donné que cette variante commence avec un impact de construction plus faible que la maison en construction massive, elle atteint la neutralité carbone très tôt, au cours de la quatrième année. Mais pendant sa phase de fin de vie, elle libère une très grande quantité de CO₂, ce qui lui permet d'atteindre des valeurs proches de zéro avec -1946 kgCO₂.

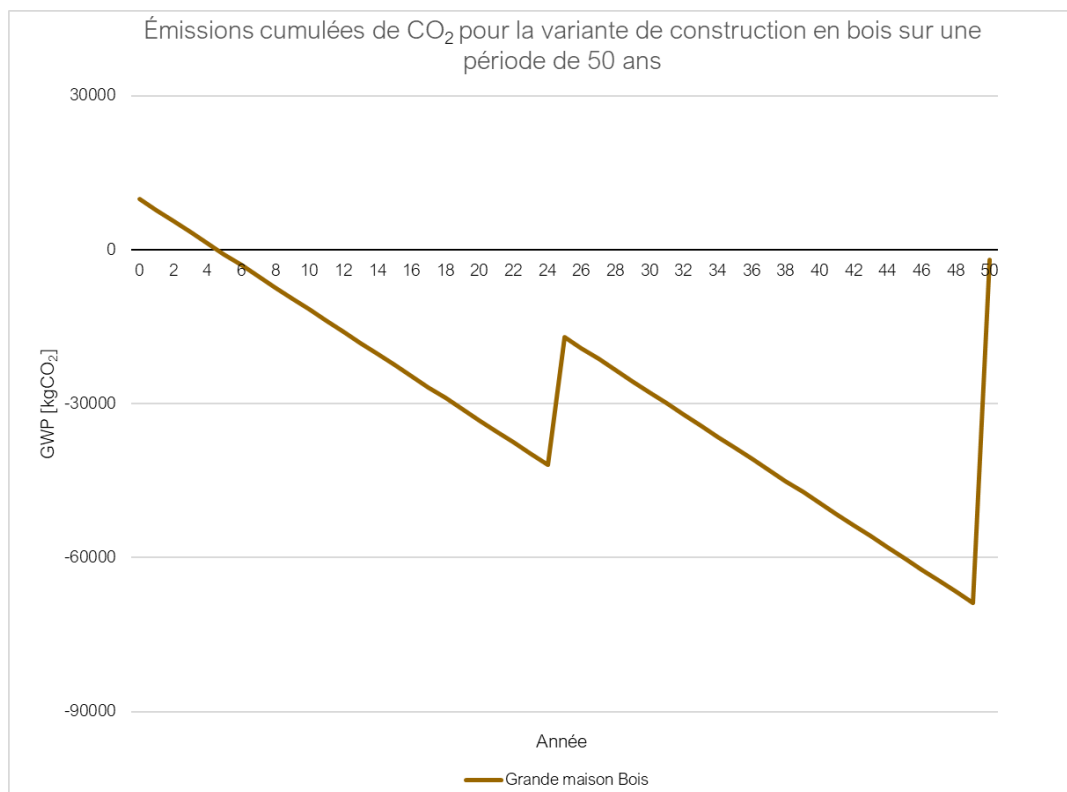


Figure 27: Emissions cumulées de CO₂ pour la grande maison en bois avec A+

Tableau 41: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A+

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	9911	-41888	-17014	-68814	-1946

5.4 Scénario réaliste avec les maisons avec un toit en pente

Dans ce sous-chapitre, nous simulerons les deux types de maisons de 200 m² avec un toit en pente au lieu d'un toit plat. Cela influence l'impact environnemental des différents modules, car les matériaux utilisés pour le toit en pente ne sont pas les mêmes que ceux utilisés en toiture plate. Cela affecte également la production d'électricité et, par conséquent, les émissions évitées par le système de panneaux photovoltaïques.

Les scénarios prévoient l'orientation des panneaux d'un côté du toit à l'est et de l'autre côté à l'ouest. L'inclinaison est également fixée à 45%, ce qui correspond à l'inclinaison typique d'un toit en pente. Ces deux facteurs permettent d'obtenir un rendement de 77,5 % pour les panneaux. De plus, le taux d'occupation du système photovoltaïque est fixé à 80% qui correspond à une surface d'installation de 151,6 m².

5.4.1 Classe énergétique A+

Les besoins énergétiques et la consommation d'électricité par les utilisateurs sont les mêmes que pour les cas analysés avec un toit plat.

Tableau 42: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A+

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	151,6
Orientation	[-]	Est, Ouest
Inclinaison panneaux	[°]	45
Rendement	[%]	77,5
Production d'électricité	[kWh/a]	23504
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	8626

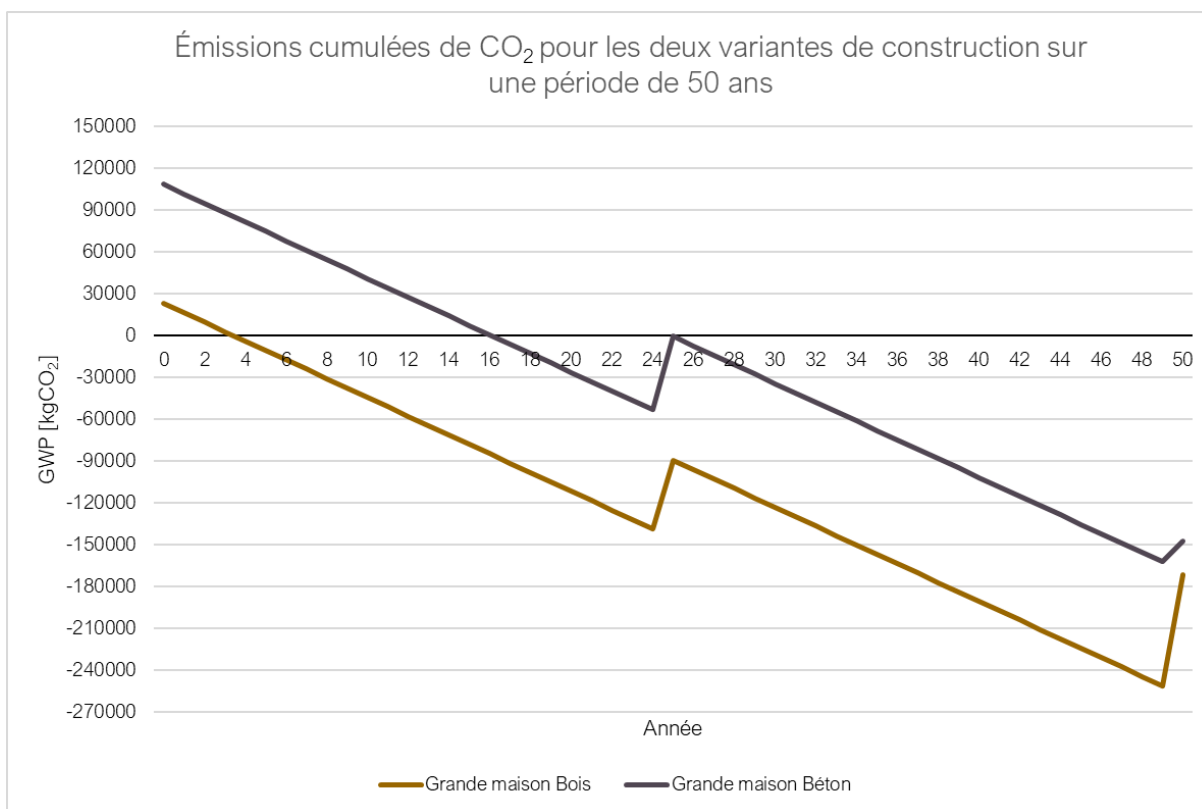


Figure 28: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec A+

La version de construction en bois atteint la neutralité carbone juste avant l'année 4, tandis que la seconde variante l'atteint à l'année 16. Même si cette dernière atteint la neutralité carbone un peu plus tard que la variante en bois, elle conserve une empreinte carbone négative au bout de 50 ans. Après la phase de fin de vie les deux variantes se retrouvent avec un total d'émissions de dioxyde de carbone similaire.

Tableau 43: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A+

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22977	-138752	-89576	-251305	-171313
Béton	[kgCO ₂]	108315	-53414	-762	-162491	-147326

5.4.2 Classe énergétique A

Les mêmes valeurs de consommation s'appliquant aux variantes de constructions à toit plat s'appliquent ici, à savoir un total de 7060 kWh/an.

Tableau 44: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A

Classe énergétique	[-]	A
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	151,6
Orientation	[-]	Est, Ouest
Inclinaison panneaux	[°]	45
Rendement	[%]	77,5
Production d'électricité	[kWh/a]	23504
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	8626

Le graphique suivant montre que comme dans le cas précédent, les deux types de bâtiments atteignent la neutralité carbone, mais avec un léger retard. La grande maison en béton passe le seuil de zéro émission une première fois à l'année 18, mais dû à l'impact du module B4 elle se retrouve avec le bilan carbone positif jusqu'à l'année 28 ou elle atteint la neutralité carbone.

La grande maison en bois au bout de 3 ans.

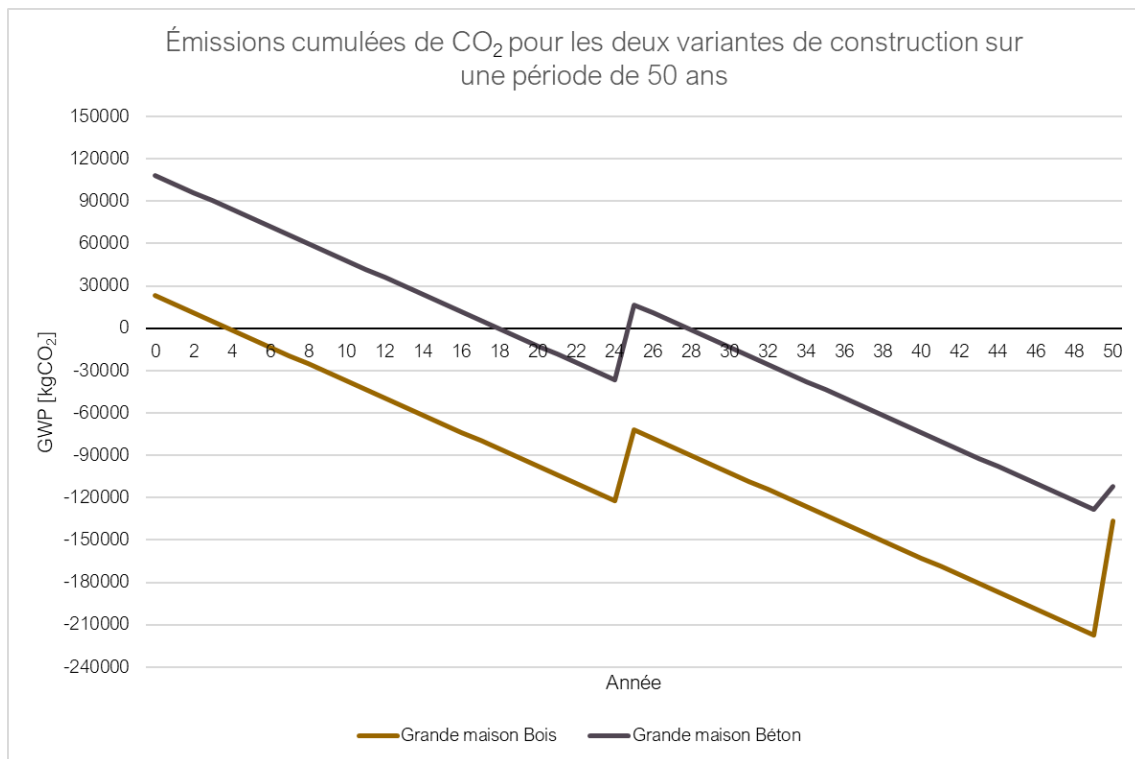


Figure 29: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec A

Tableau 45: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22977	-121952	-72076	-217005	-136313
Béton	[kgCO ₂]	108315	-36614	16738	-128191	-112326

5.4.3 Classe énergétique B

On retrouve ici les mêmes valeurs de consommation que pour les variantes de construction à toit plat conformes à la classe B, c'est-à-dire un total de 13600 kWh/a.

Tableau 46: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et B

Classe énergétique	[-]	B
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	151,6
Orientation	[-]	Est, Ouest
Inclinaison panneaux	[°]	45
Rendement	[%]	77,5
Production d'électricité	[kWh/a]	23504
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	8626

Le graphique ci-dessous montre que même pour une classe énergétique B, les deux variantes de maisons atteignent la neutralité carbone.

La variante en béton dépasse le seuil de zéro émission vers l'année 41 et termine avec un impact environnemental de plus de -12326 kgCO₂.

La grande maison en bois atteint la neutralité carbone dès le départ, juste avant la sixième année, et même après la phase de remplacement, elle continue à avoir un PRG inférieur à zéro. Ainsi, à la fin de ses 50 ans, elle a une valeur totale cumulée d'émissions de CO₂ de -36313 kgCO₂.

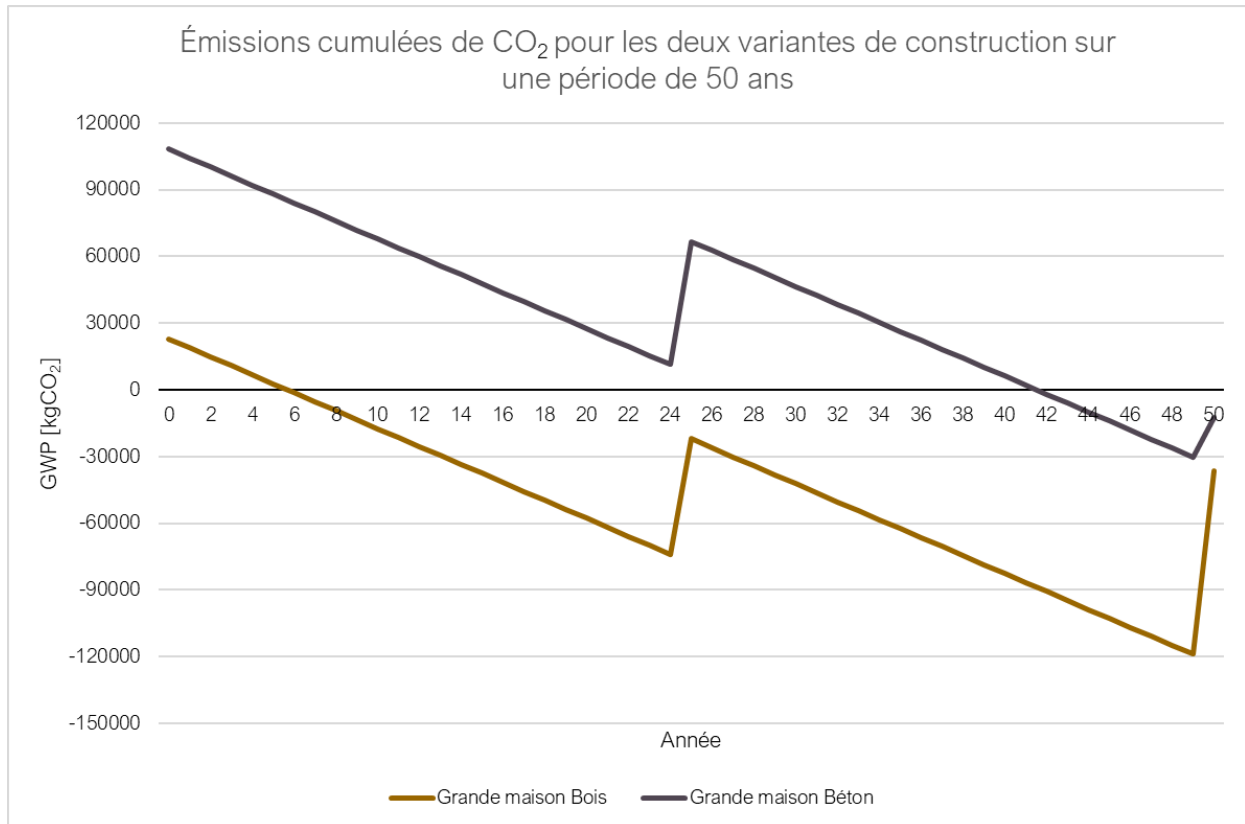


Figure 30: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec B

Tableau 47: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec B

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22977	-73952	-26115	-119005	-36313
Béton	[kgCO ₂]	108315	11386	62700	-30191	-12326

5.5 Atteinte de la neutralité carbone avec toiture inclinée

Des essais ont été effectués pour déterminer le taux d'occupation minimal des panneaux photovoltaïques sur un toit en pente pour les deux cas de maisons conformes à la classe énergétique A+. Les paramètres d'inclinaison et d'orientation des panneaux photovoltaïques sont les mêmes que dans le chapitre précédent.

5.5.1 Construction massive

Le graphique démontre qu'afin d'atteindre la neutralité carbone, la variante maison en construction massive a besoin d'un minimum de taux d'occupation du toit par des panneaux photovoltaïques de 46% ce qui correspond à une surface d'installation de 87,2 m².

En utilisant ces paramètres, l'installation photovoltaïque permettrait d'éviter 4960 kgCO₂/a.

Tableau 48: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A+

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	46
Surface d'installation	[m ²]	87,2
Orientation	[-]	Est, Ouest
Inclinaison panneaux	[°]	45
Rendement	[%]	77,5
Production d'électricité	[kWh/a]	13515
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	4960

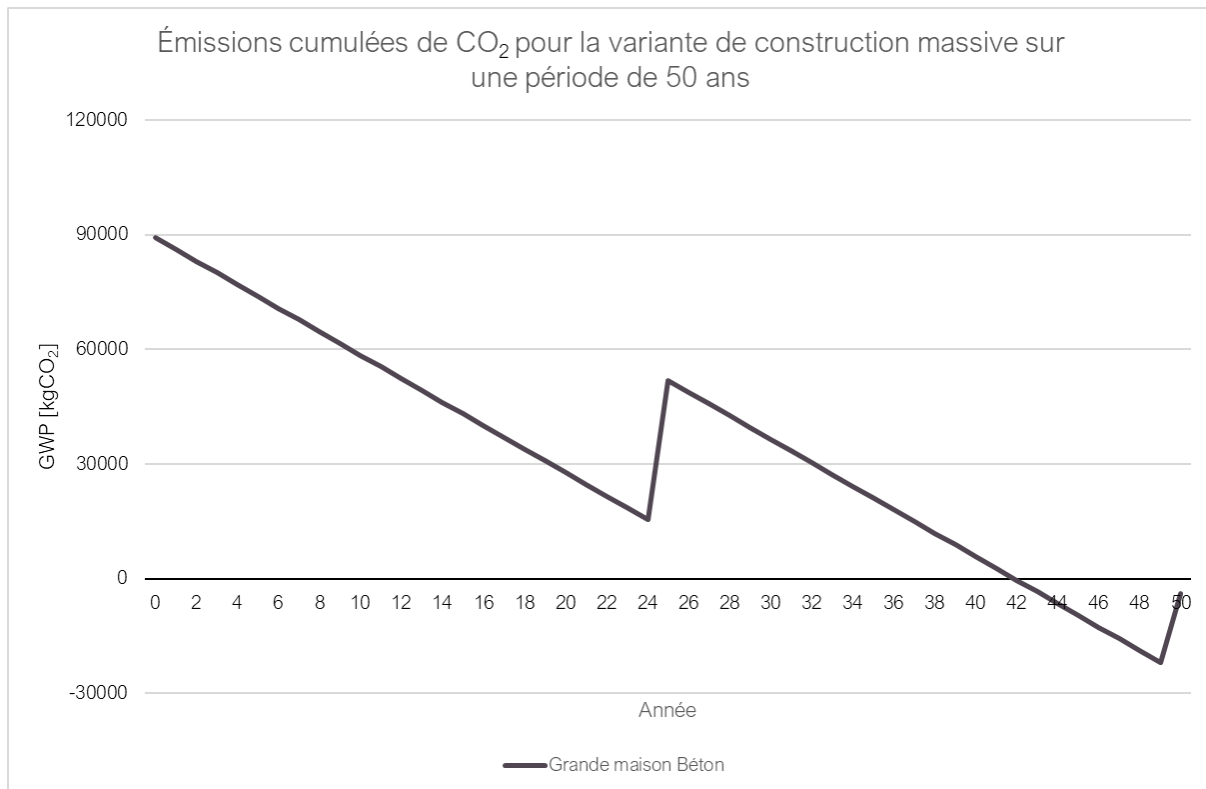


Figure 31: Emissions cumulées de CO₂ pour la grande maison en béton avec A+

Tableau 49: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A+

Année	[a]	0	24	25	49	50
Béton	[kgCO ₂]	89195	15450	51866	-21879	-3830

5.5.2 Construction en bois

De même que dans l'analyse des maisons à toit plat, la grande maison en bois a besoin d'une surface photovoltaïque totale inférieure à celle de la grande maison en béton, avec plus de 5 m² de moins.

Avec 75,8 m² de surface photovoltaïque, le système produirait 11752 kWh/a, évitant ainsi 4313 kgCO₂/a.

De plus, contrairement au cas précédent où la neutralité carbone est atteinte très tardivement, ici la maison aurait un impact environnemental négatif dès la première année. Cela s'explique par le fait que le toit incliné de cette maison contient beaucoup de matériaux biosourcés, ce qui réduit les émissions émises par le reste des matériaux. De plus, la réduction de la surface des panneaux photovoltaïques signifie également que la phase de construction émet beaucoup moins de CO₂, car il y a moins de panneaux que dans les scénarios précédents. Ainsi ce bâtiment commence avec une valeur de PRG de 482 kgCO₂.

Tableau 50: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit en pente et A+

Classe énergétique	[-]	A+
Taux d'occupation du toit	[%]	40
Surface d'installation	[m ²]	75,8
Orientation	[-]	Est, Ouest
Inclinaison panneaux	[°]	45
Rendement	[%]	77,5
Production d'électricité	[kWh/a]	11752
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	4313

Tableau 51: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec A+

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	482	-57736	-30087	-85879	-2495

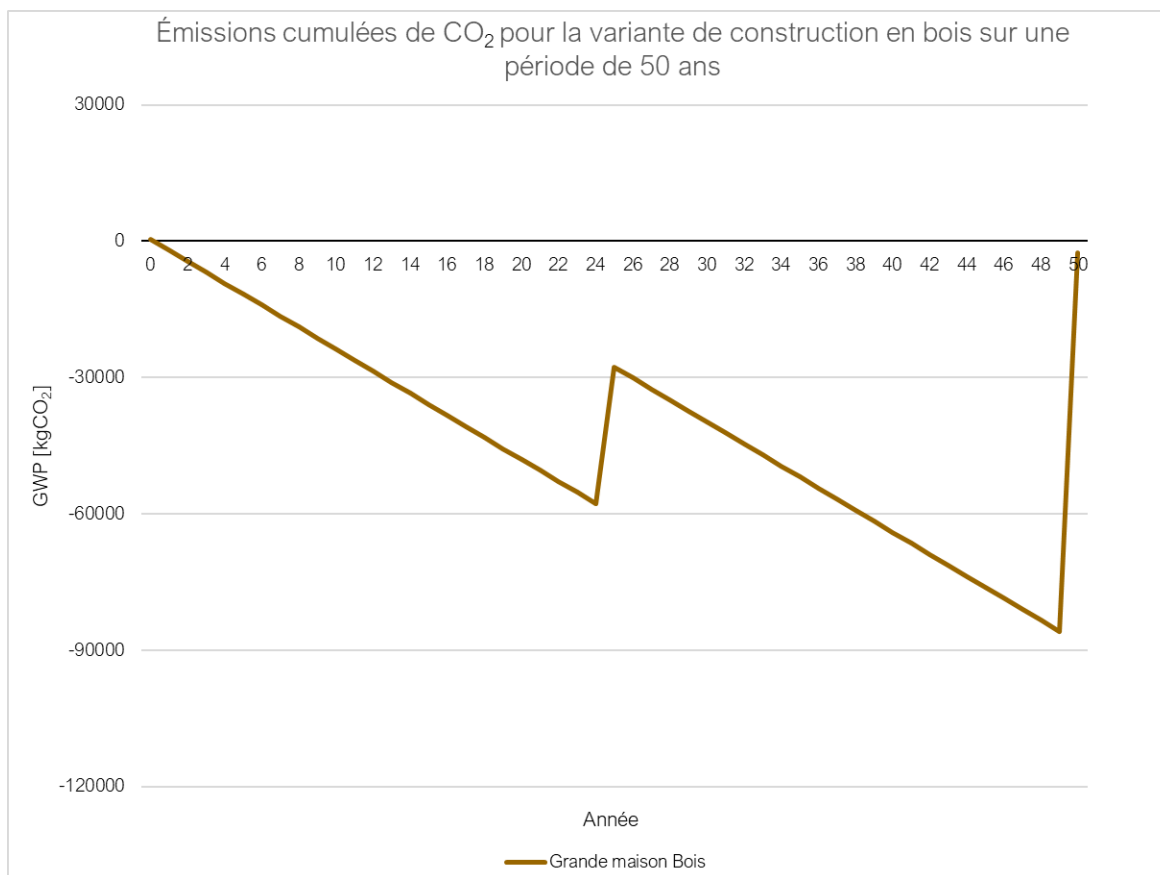


Figure 32: Emissions cumulées de CO₂ pour la grande maison en bois avec A+

5.6 Analyse de différentes variantes en considérant le module D

Dans ce scénario, nous utiliserons les paramètres du *sous-chapitre 5.2.3*, où les deux maisons ne parviennent pas à atteindre la neutralité carbone après 50 ans. Nous ajouterons ensuite le module D (voir chapitre 2.4.2) pour voir quel est l'effet sur les émissions cumulées de CO₂.

Tableau 52: Paramètres de l'installation photovoltaïque pour le toit plat et B

Classe énergétique	[-]	B
Taux d'occupation du toit	[%]	80
Surface d'installation	[m ²]	98
Orientation	[-]	Sud
Inclinaison panneaux	[°]	35
Rendement	[%]	100
Production d'électricité	[kWh/a]	19597
Facteur CO ₂	[kgCO ₂ /kWh]	0,367
Émissions annuelles évitées par la production d'électricité issue de l'installation photovoltaïque	[kgCO ₂ /a]	7192

Le graphique ci-dessous montre qu'après avoir appliqué le module D à la phase de fin de vie des deux bâtiments les émissions cumulées de CO₂ ont baissé considérablement. Les deux variantes atteignent ainsi la neutralité carbone contrairement au cas du scénario de référence.

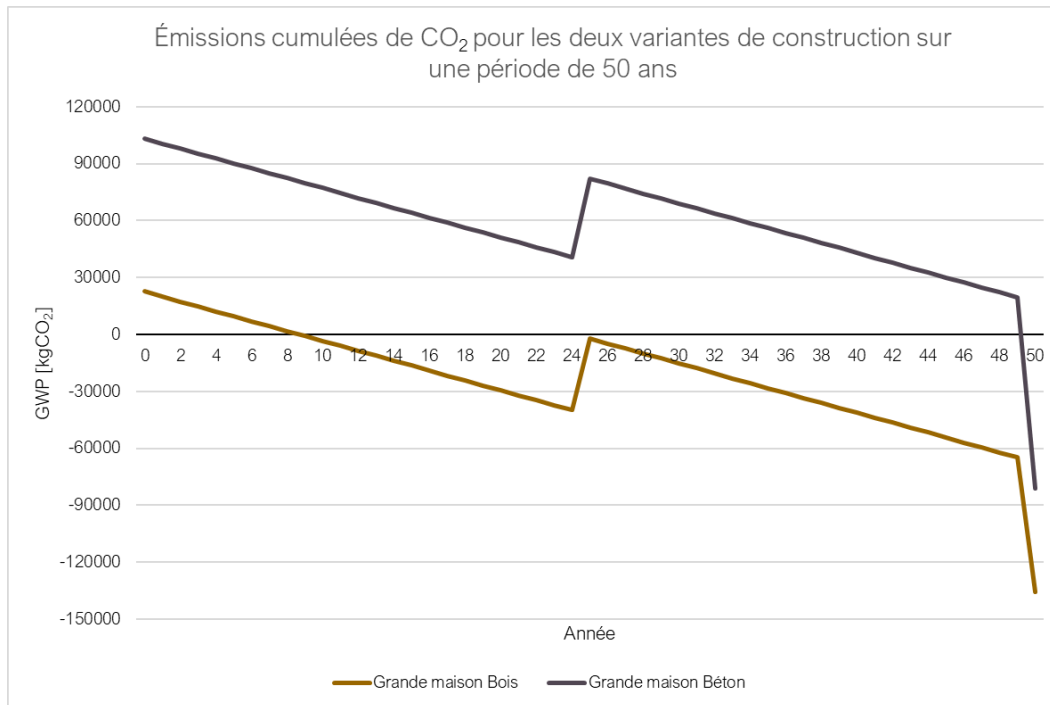


Figure 33: Emissions cumulées de CO₂ pour les deux variantes avec module D

Tableau 53: Emissions CO₂ cumulées en fonction des années [kgCO₂] avec D

Année	[a]	0	24	25	49	50
Bois	[kgCO ₂]	22630	-39886	-2220	-64736	-135756
Béton	[kgCO ₂]	103233	40718	82134	19618	-81251

5.7 Comparaison entre 4 cas d'étude

5.7.1 Analyse de cycle de vie statique

Sur ce graphique, 4 maisons avec les mêmes exigences énergétiques (classe A+) sont comparées. Pour ce cas, on a choisi un taux d'occupation de panneaux photovoltaïques sur les toits de 90 %. Les panneaux sont orientés vers le sud et ont une inclinaison de 35 %. Ces paramètres représentent alors le scénario idéal de l'installation photovoltaïque.

Les grandes maisons produisent ainsi 22046 kWh/a et les maisons moyennes 16535 kWh/a d'électricité avec des surfaces respectives de 110 et 83 m² grâce aux panneaux photovoltaïques. Cela équivaut à des émissions totales de CO₂ évitées par grâce à l'installation photovoltaïque, de 8091 et de 6068 kgCO₂/a.

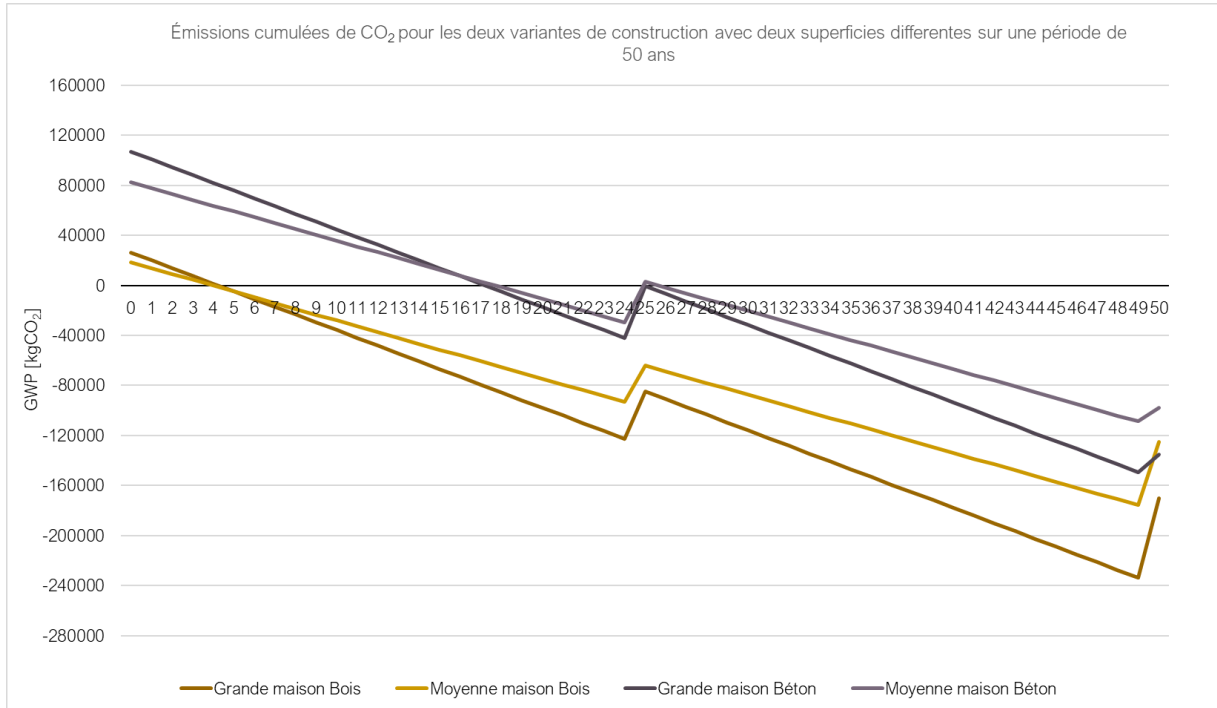


Figure 34: Émissions cumulées de CO₂ pour les quatre cas d'étude ; ACV statique

On observe que les variantes en béton émettent beaucoup d'émissions CO₂ lors de la phase de construction.

Les variantes en bois n'ont pas d'empreinte de carbone considérable au début et atteignent rapidement la neutralité carbone. Ceci dit à la fin de vie, elles relâcheront une quantité importante de CO₂, atteignant des valeurs similaires aux variantes conventionnelles.

Au bout de 25 ans, on observe une augmentation des courbes, car c'est à cette étape que la phase de vie B4 (remplacement) rentre en jeu.

On constate également que les grandes maisons ont un impact environnemental plus important lors de la phase de construction, mais comme leurs toits sont plus grands et peuvent donc accueillir plus de panneaux photovoltaïques, la chute de la courbe est également plus prononcée. De plus, après 50 ans, leur bilan carbone est plus négatif que celui des maisons plus petites.

De plus on observe sur le graphique qu'une grande maison de construction massive possède à la fin des 50 ans un bilan carbone moins important que celui d'une maison en bois de 150 m².

5.7.2 Analyse de cycle de vie dynamique

L'analyse de cycle de vie dynamique permet de pouvoir prendre en considération l'importance du stockage de CO₂ pendant les 50 ans.

Le coefficient de pondération pris en considération est le suivant

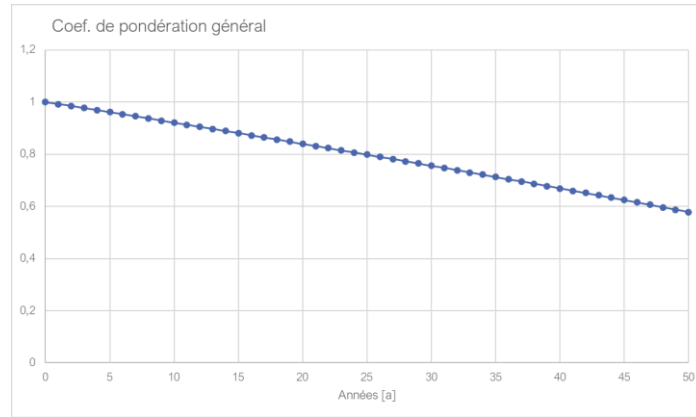


Figure 35: Coefficient de pondération général

D'après le tableau précédent, 1 kg de CO₂ qui sera émis dans 50ans vaut environ 0,6kgCO₂ aujourd'hui.

Dans ce scénario sont comparés les quatre cas d'étude avec une toiture plate.

Les paramètres de l'ACV dynamique des quatre maisons sont identiques à ceux utilisés pour l'ACV statique de la simulation précédente, à la seule différence qu'un coefficient de pondération est multiplié par la valeur du potentiel de réchauffement calculée pour chaque année.

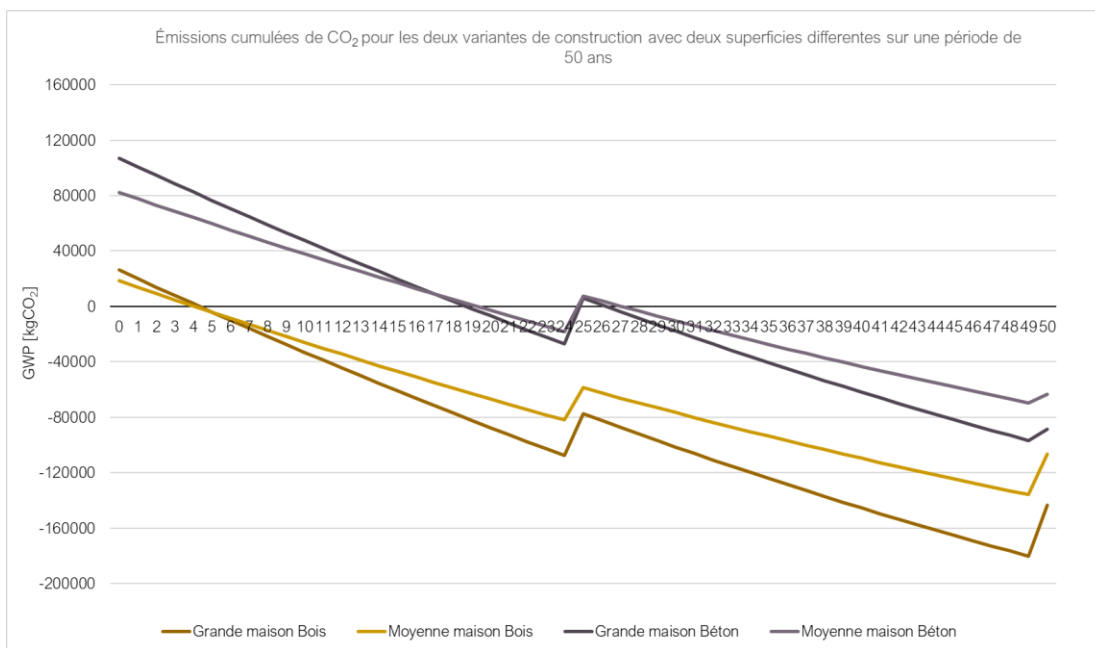


Figure 36: Emissions cumulées de CO₂ pour les quatre cas d'étude ; ACV dynamique

En analysant le graphique on remarque que contrairement à la simulation précédente, les deux variantes de maison en bois ont une empreinte carbone meilleure que les variantes en béton. Ce qui n'était pas le cas dans l'analyse statique où la grande maison en béton compensait plus de CO₂ que la moyenne maison en bois.

De plus en regardant le tableau ci-dessous on, voit qu'en employant une analyse dynamique les maisons ont des valeurs de GWP à la phase de fin de vie plus hautes que lors de l'analyse statique.

Tableau 54: ACV statique contre ACV dynamique

		ACV statique	ACV dynamique
Moyenne maison béton	[kgCO ₂]	-97967	-63261
Grande maison béton		-135432	-88680
Moyenne maison bois		-125098	-106570
Grande maison bois		-170179	-143600

5.8 Est-ce que les matériaux biosourcés dans la variante de construction en bois permettent une phase A1-A3 neutre ?

Le graphique ci-dessous montre les émissions de dioxyde de carbone de la phase de construction A1-A3 des différents éléments qui composent la maison en bois. Les phases A4 et A5 n'ayant pas d'impact significatif, elles n'ont pas été prises en compte.

De plus, les panneaux photovoltaïques ont un impact très important lors de la construction et dépendent de la surface installée sur le toit. Afin de faciliter la lecture du graphique, les panneaux photovoltaïques n'ont pas été pris en compte.

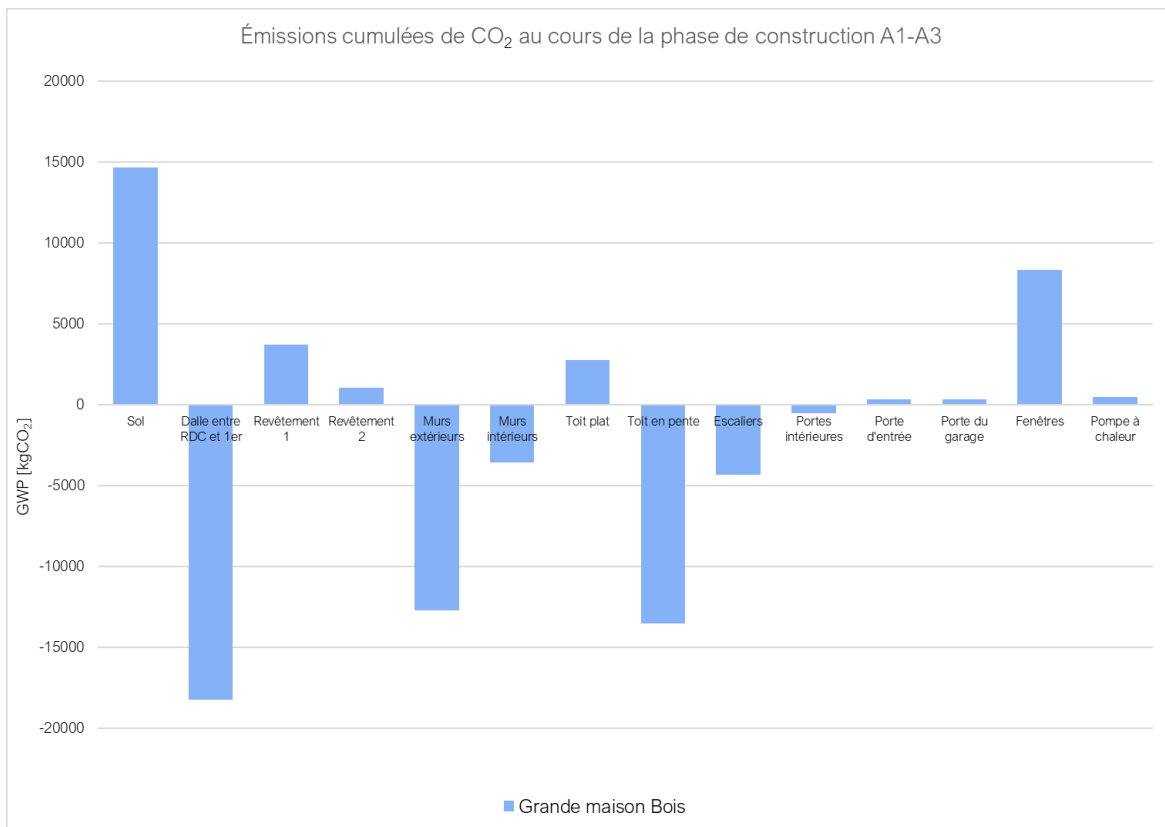


Figure 37: Emissions cumulées de CO₂ au cours de la phase A1 - A3

Le graphique montre que les éléments constitués en grande partie de matériaux biosourcés ont un bilan carbone négatif, contrairement aux éléments tels que le revêtement de sol 1, qui représente le carrelage. Le revêtement de sol 2 représente le parquet, et du fait qu'il est composé de parquet mais aussi d'une chape, il a un impact positif.

La question de la réduction des émissions de CO₂ par les éléments en bois à empreinte carbone négative pour la phase de construction nécessite la prise en compte de l'ensemble des éléments.

Cela est fait une fois en considérant l'élément toit plat et une fois l'élément toit en pente, ce qui donne deux résultats.

La maison en bois à toit plat a une valeur de GWP en phase de construction de -7864 kgCO₂/a, tandis que la maison en bois à toit incliné a un PRG de -24166 kgCO₂ par an. Ces résultats sont principalement attribuables aux murs extérieurs et à la dalle entre le rez-de-chaussée et le premier étage, qui ont des potentiels de réchauffement global très négatifs, ce qui compense en somme d'autres éléments ayant des résultats positifs, tels que le plancher et les fenêtres.

Tableau 55: GWP de la phase A1-A3 pour chaque élément de construction

Élément	GWP	GWP
Sol du rez-de-chaussée	14664	14664
Dalle entre RDC et 1er	-18235	-18235
Revêtement 1	3699	3699
Revêtement 2	1035	1035
Murs extérieurs	-12738	-12738
Murs intérieurs	-3590	-3590
Toit plat	2761	
Toit en pente		-13542
Escaliers	-4330	-4330
Portes intérieures	-549	-549
Porte d'entrée	327	327
Porte du garage	306	306
Fenêtres	8328	8328
Pompe à chaleur	459	459
Somme	-7863	-24166

5.9 Composition des matériaux

Ce chapitre présente les potentiels de réchauffement des différents composants des deux variantes de maison en fonction des différents modules.

5.9.1 Grande maison en construction massive

Le graphique ci-dessous montre que pour la plupart des éléments de la maison, le module A1-A3 représente la proportion la plus conséquente, en vertu de l'utilisation massive de béton dans la construction.

Le module C4 contribue de manière significative au bilan carbone des murs extérieurs, en raison du fait que ceux-ci sont composés d'une couche de Neopor, dont la valeur de GWP est très élevée pour le module C4. Par ailleurs, le module C3 a un impact considérable sur les deux toits. Cela est dû à la valeur élevée du potentiel de réchauffement du bois de construction qu'il contient.

Enfin, le module qui représente le remplacement des matériaux, B4, a un impact majeur sur les fenêtres.

Les autres modules ont très peu d'impact sur les éléments de construction de la maison.

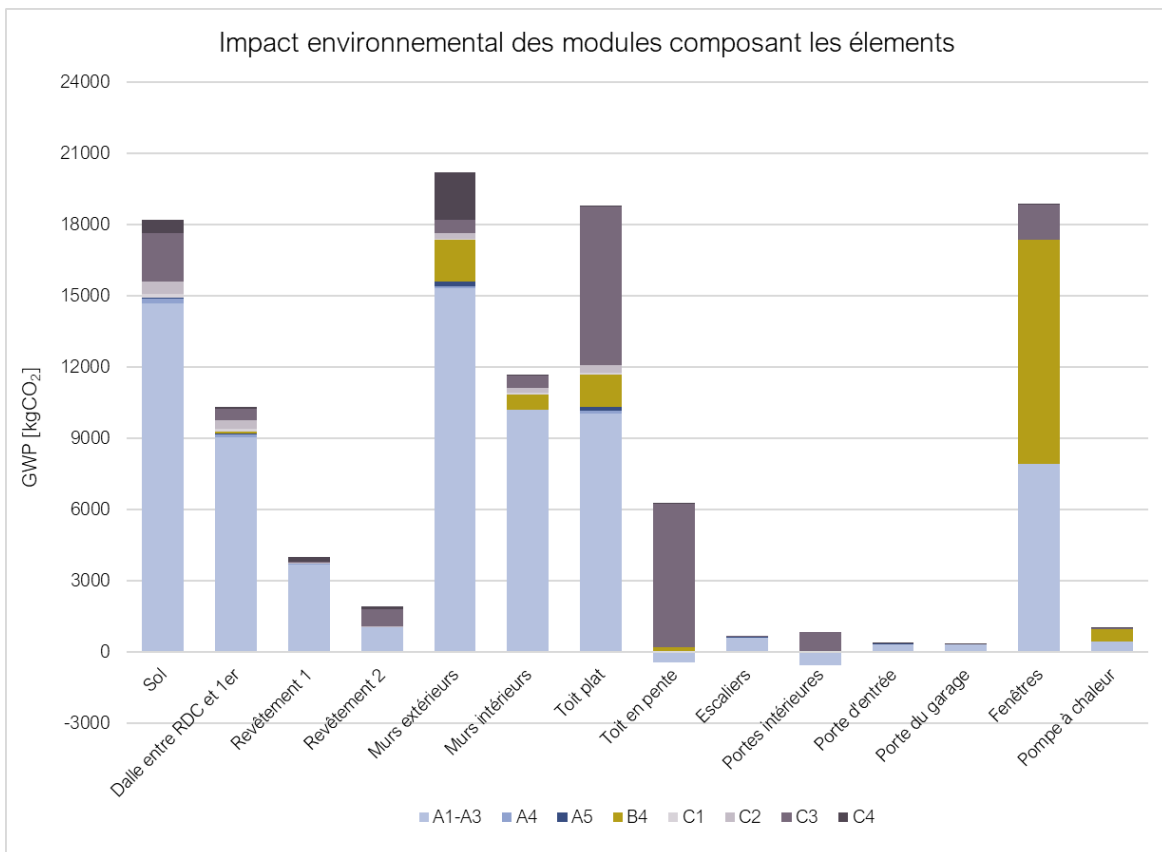


Figure 38: Impact environnemental des modules composant les éléments de la maison en béton

5.9.2 Grande maison en bois

Le graphique suivant est très différent du graphique précédent, ici on peut voir l'effet d'absorption de dioxyde de carbone par les composants biosourcés pendant la phase de construction.

En conséquence, nous observons que le module C3 est le composant principal des mêmes éléments biosourcés, faisant basculer l'avantage négatif au début de la construction vers un bilan carbone total positif à la fin de la vie.

Le module B4 joue un rôle similaire à celui de l'exemple précédent. Les autres modules ont très peu d'impact sur les éléments de construction de la maison.

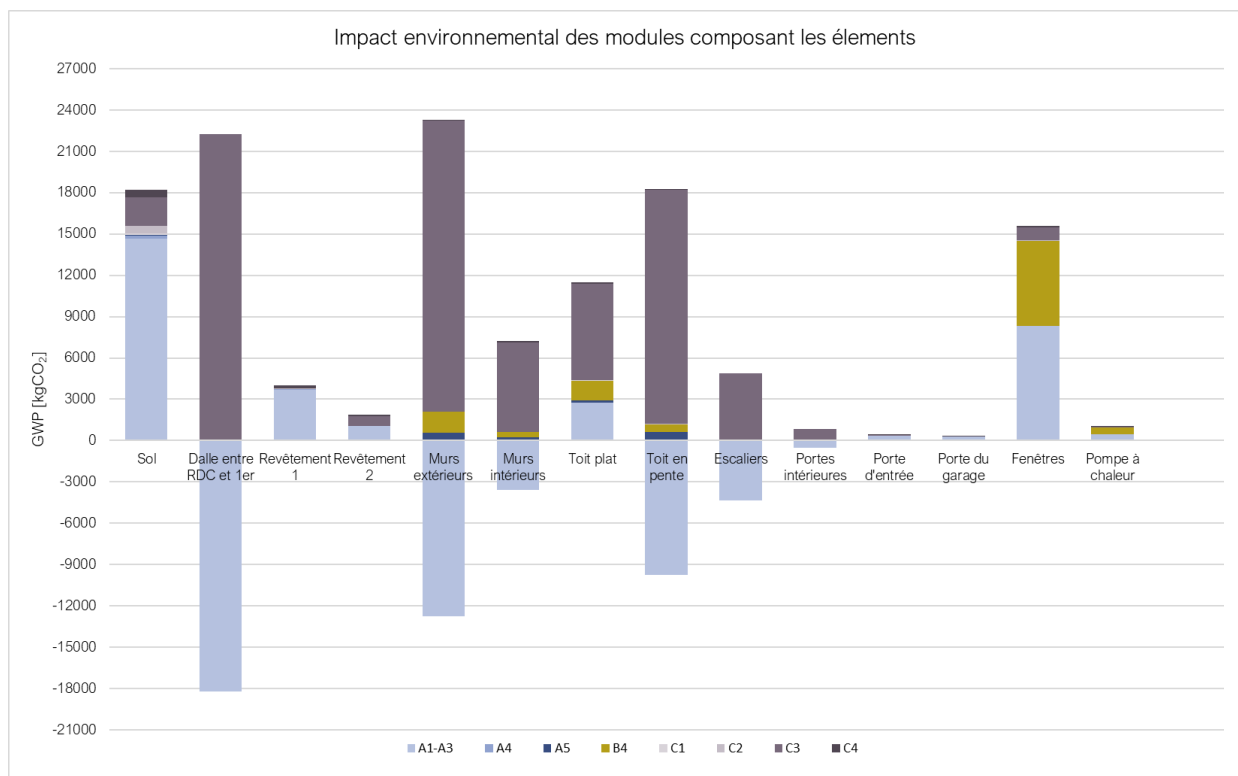


Figure 39: Impact environnemental des modules composant les éléments de la maison en bois

6 Discussion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus seront discutés et interprétés en répondant aux questions du *chapitre 1.2*.

L'objectif de ce travail est de tester la faisabilité des maisons unifamiliales au Luxembourg pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. L'étude compare deux cas de figure, l'un basé sur des matériaux traditionnels et l'autre utilisant des matériaux plus biosourcés. De plus cette étude révèle aussi le fait qu'au Luxembourg la notion de neutralité carbone au sein du secteur de la construction est pratiquement inexistante. Ainsi les résultats de cette étude montrent si ces deux variantes de construction sont capables de compenser les émissions de CO₂ générées par leurs différentes phases de la vie en produisant de l'énergie photovoltaïque sur la base du mix électrique luxembourgeois.

Le scénario analysé au *chapitre 5.1* montre que pendant la phase de construction, la variante en béton émet nettement plus de CO₂ que la variante en bois. Ainsi, tout au long du cycle de vie des maisons, la variante de construction massive a une empreinte carbone plus élevée que la maison en bois. Cependant, en fin de vie, la variante en bois émet beaucoup plus de dioxyde de carbone, et la différence d'empreinte carbone entre les deux variantes est beaucoup plus faible après 50 ans. La raison en est que les matériaux biosourcés stockent une grande quantité de CO₂, qui doit être libérée pendant la phase de fin de vie.

Les simulations des *chapitres 5.2 et 5.4* sont axées sur l'atteinte de la neutralité carbone dans les deux variantes de maisons à toit plat et à toit en pente, en faisant varier les besoins énergétiques.

Les simulations du *chapitre 5.2* ont toutes été réalisées avec le même système photovoltaïque et les résultats montrent que les maisons à toit plat au Luxembourg de classes énergétiques A+ et A atteignent la neutralité carbone. Les maisons avec des exigences énergétiques de classe B, par contre, n'atteignent pas la neutralité carbone après 50 ans.

Les émissions cumulées de CO₂ au cours des années et à la fin du cycle de vie sont plus élevées pour les maisons A+. Cela s'explique par le fait que les systèmes photovoltaïques des maisons ayant des besoins énergétiques plus élevés ne peuvent pas compenser autant d'émissions que les maisons ayant des besoins énergétiques plus faibles. Par conséquent, plus les besoins énergétiques sont importants, plus il faut de temps pour atteindre la neutralité carbone.

Les résultats des simulations du *chapitre 5.4* sur les maisons avec un toit en pente montrent que celles-ci permettent d'éviter plus d'émissions de dioxyde de carbone au bout de 50 ans que les maisons à toiture plate. Sachant qu'à l'année 0 elles avaient un bilan carbone légèrement plus grand que les maisons à toit plat. De plus que contrairement aux maisons avec un toit plat, les deux variantes de maisons atteignent la neutralité carbone avec une classe énergétique B.

Ceci est surtout dû au fait que la superficie de la toiture en pente est plus grande que le toit plat ce qui permet d'installer plus de panneaux photovoltaïques et produire ainsi plus d'électricité. Par conséquent, plus d'émissions de CO₂ seront évitées.

Les *chapitres 5.3 et 5.5* indiquent la surface de panneaux photovoltaïques nécessaire sur le toit pour atteindre la neutralité carbone, et permettent de comparer les résultats de la version à toit plat avec ceux de la version à toit en pente. Les simulations ont été réalisées sur des maisons respectant la classe énergétique A+.

Tableau 56: Taux d'occupation du système photovoltaïque

	Toit plat	Toit en pente
Variante en béton	55 % = 67,4 m ²	46 % = 87,2 m ²
Variante en bois	45 % = 55,1 m ²	40 % = 75,8 m ²

Le tableau ci-dessus montre le taux d'occupation minimum du système photovoltaïque en fonction de la variante de la maison et du toit. Il montre que la variante en bois avec un toit en pente atteint la neutralité carbone avec le plus faible pourcentage de toit occupé (40 %). En revanche, c'est la variante en béton qui nécessite la plus grande partie de la surface du toit occupée par le système photovoltaïque (55%) pour atteindre la neutralité carbone.

De plus indépendamment du type de toit qu'on utilise les maisons en construction massive ont besoin d'une surface plus grande couverte par des panneaux photovoltaïques que les maisons en construction de bois.

Le *chapitre 5.6* permet de répondre à la question de quel impact le module D a sur l'analyse de cycle de vie des deux variantes. Dans ce scénario on a refait la même simulation des maisons ayant un

besoin énergétique de classe B du *chapitre 5.2.3*, mais cette fois en prenant en compte le module D.

Alors que dans la simulation dans le *chapitre 5.2.3* les deux maisons n'atteignaient pas la neutralité carbone, en ajoutant le module D ces maisons terminent leur cycle de vie avec un bilan carbone négatif. En comparant les valeurs de GWP de ces maisons de classe énergétique B avec le module D et les maisons de classe énergétique A+ on remarque que la variante en bois a un potentiel de réchauffement global inférieur que la même variante avec une classe énergétique A+.

Toutefois, ces résultats sont basés sur un scénario qui pourrait se dérouler dans 50 ans, et nous les considérons donc comme très relatifs.

Tableau 57: Impact du module D sur la classe énergétique

	Classe énergétique A+	Classe énergétique B (+ Module D)
Bois	-132794	-135756
Béton	-98047	-81251

La première simulation du *chapitre 5.7* nous permet de comparer les maisons ayant une plus grande surface (200 m²) avec les maisons ayant une plus petite surface (150 m²). Les résultats montrent que, pendant la phase de construction, les grandes maisons ont un potentiel de réchauffement plus élevé que les petites, ce qui est prévisible puisque les grandes maisons utilisent plus de matériaux dans leur construction. Cependant, les maisons plus grandes sont plus performantes que les maisons de taille moyenne et évitent ainsi plus d'émissions de CO₂ que ces dernières. Cela s'explique par le fait que les maisons plus grandes peuvent installer davantage de panneaux solaires sur leur toit, ce qui permet de compenser davantage d'émissions de CO₂ tout au long de leur cycle de vie.

En outre, on constate que la grande maison en béton a une empreinte carbone légèrement meilleure que la maison moyenne en bois.

La deuxième simulation consiste à analyser le même scénario, mais en utilisant une analyse dynamique du cycle de vie. Elle montre que la phase de construction est fortement similaire à l'approche de l'ACV statique. La différence se manifeste après quelques années en réduisant l'impact des quantités de dioxyde de carbone calculées.

Elle montre que les deux maisons en bois ont un bilan carbone final inférieur à celui des maisons en béton. En comparant les graphiques 34 et 36, on constate que les constructions en bois ont été

avantagées par l'introduction de l'ACV dynamique. En outre, le tableau 5a montre que les valeurs du PRG en fin de vie pour l'ACV dynamique sont considérablement inférieures à celles de l'ACV statique. Ceci signifie également, que la fin de vie des matériaux a moins d'importance que dans l'approche statique.

Le *chapitre 5.8* analyse le potentiel de réchauffement des différents composants de la maison en bois pendant la phase de construction. L'objectif est de déterminer si l'utilisation de matériaux biosourcés est en mesure de compenser les émissions de dioxyde de carbone provenant d'autres éléments, tels que la fondation.

En examinant le tableau 55, on constate que la somme totale des valeurs du PRG pour la maison avec le toit plat et le toit en pente est négative, ce qui signifie que les matériaux biosourcés compensent les émissions des autres matériaux. En outre, nous pouvons constater que la variante à toit en pente a une valeur de -24166 kgCO_2 , soit plus de 3 fois celle de la variante à toit plat. Cela s'explique par le fait que le toit en pente est essentiellement constitué de bois et que sa surface est plus grande que celle du toit plat.

Le dernier *chapitre 5.9* met en évidence les modules qui représentent la proportion la plus importante de PRG des éléments de construction dans les deux variantes analysées. Le graphique illustre que dans presque tous les composants de la maison en béton, le module A1-A3 émet le plus de CO_2 . Cependant dans la maison en bois, les matériaux biosourcés affichent des phases de construction négatives, mais leur phase de fin de vie comporte un PRG très élevé. Ainsi dans cette variante c'est le module C4 qui représente la plus grande proportion des valeurs de PRG dans la plupart des éléments.

7 Conclusion

Cette thèse a été initialement développée autour de la question de la faisabilité d'atteindre la neutralité carbone pour les maisons unifamiliales au Luxembourg. Les différentes analyses montrent que la phase initiale de vie d'une maison unifamiliale représente la plus grande part d'émissions de CO₂ pour la construction. Il a été constaté un grand écart dans les résultats des émissions de dioxyde de carbone pour les phases de construction entre les deux variantes. En effet, les calculs ont démontré que pour la variante de construction en bois, le dioxyde de carbone émis par certains matériaux est d'un point de vue mathématique, compensé par le dioxyde de carbone (biogénique), des éléments de construction biosourcés.

En revanche, pour la variante de construction plus classique, la phase de construction des maisons émet une grande quantité de dioxyde de carbone.

En parallèle, il a été recherché la conséquence de la production d'électricité par le biais d'une installation photovoltaïque sur le toit des maisons. En considérant une production annuelle d'électricité, issue de l'installation photovoltaïque plus grande que les besoins d'électricité pour la maison. Il a été étudié combien de temps est nécessaire à fin que le dioxyde de carbone évité par la production d'électricité par l'installation photovoltaïque sur les toits, équilibre ou compense les émissions de dioxyde de carbone issus de la construction et de la fabrication des matériaux pour la maison ainsi que pour l'exploitation.

Pour le Luxembourg, une maison dite de construction classique, avec une classe de performance énergétique A+ peut atteindre cette dite neutralité carbone en l'espace de 16 années par la présence d'une installation photovoltaïque occupant un minimum de 45 % du toit

Avec la même classe de performance énergétique, une maison dite avec une construction plus écologique à savoir avec plus de matériaux biosourcés peut atteindre cette neutralité carbone en l'espace de 3 années avec le même taux d'occupation du toit par une installation photovoltaïque.

Afin de garantir la neutralité carbone en moins de 50 ans, il est nécessaire d'avoir une classe de performance énergétique A+, A ou B (dans le cas où on a un toit en pente) et d'avoir un taux d'occupation du toit par l'installation photovoltaïque d'au moins 40 %.

8 Bibliographie

Carbon Neutrality | White Arkitekter. (2023, August 29). White Arkitekter.

<https://whitearkitekter.com/service/sustainability/carbon-neutrality/>

Performance énergétique des bâtiments : neutralité climatique d'ici 2050 | Actualité | Parlement européen. (2023, September 2). <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/press-room/20230206IPR72112/performance-energetique-des-batiments-neutralite-climatique-d-ici-2050>

Nearly zero energy buildings. (n.d.). <https://www.eceee.org/policy-areas/Buildings/nearly-zero-energy-buildings/>

Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ? | Actualité | Parlement européen. (2019, March 10). <https://www.europarl.europa.eu/news/fr/headlines/society/20190926STO62270/qu-est-ce-que-la-neutralite-carbone-et-comment-l-atteindre-d-ici-2050>

Plan national intégré en matière d'énergie et de climat du Luxembourg pour la période 2021-2030 (PNEC). (2023, 6 février). gouvernement.lu // Le gouvernement luxembourgeois. <https://gouvernement.lu/fr/dossiers/2023/2023-pnec.html>

Certification Lenoz | INergie S.A. (s. d.). <https://www.1nergie.lu/fr/produit/lenoz>

Laurène, L. F. (2020). *Loi Énergie-climat*. *Ministères Écologie Énergie Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>

Stratégie nationale bas-carbone. (2020, mars). ecologie.gouv.fr.

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf

Cegibat, G. (s. d.). *RE2020 : les grands principes*. Cegibat.fr.

<https://cegibat.grdf.fr/reglementation-energetique/re-2020-grands-principes>

Publikation - Klimaneutrales Deutschland 2045. (2023, August 18). Agora Energiewende.

<https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/>

(*Publikation - Klimaneutrales Deutschland 2045*, 2023) pour le texte

Zhao, X., Pan, W., & Lu, W. (2016). Business model innovation for delivering zero carbon buildings. *Sustainable Cities and Society*, 27, 253–262.

<https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.03.013>

Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourrelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies.

Energy and Buildings, 43(4), 971–979. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>

Danatzko, J. M., Sezen, H., & Qian, C. (2013). SUSTAINABLE DESIGN AND ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS FOR STRUCTURAL COMPONENTS. *Journal of Green Building*, 8(1), 120–135. <https://doi.org/10.3992/jgb.8.1.120>

Satola, D., Balouktsi, M., Lützkendorf, T., Wiberg, A. a. M. H., & Gustavsen, A. (2021). How to define (net) zero greenhouse gas emissions buildings: The results of an international

survey as part of IEA EBC annex 72. *Building and Environment*, 192, 107619.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107619>

Jain, S., Agarwal, A., Jani, V., Singhal, S., Sharma, P., & Jalan, R. (2017). Assessment of carbon neutrality and sustainability in educational campuses (CaNSEC): A general framework. *Ecological Indicators*, 76, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.012>

Becker, S., Bouzdine-Chameeva, T., & Jaegler, A. (2020). The carbon neutrality principle: A case study in the French spirits sector. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122739. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122739>

Tian, Z., Zhang, S., Li, H., Jiang, Y., Dong, J., Zhang, B., & Yi, R. (2015). Investigations of Nearly (net) Zero Energy Residential Buildings in Beijing. *Procedia Engineering*, 121, 1051–1057. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.09.102>

Fang, Y. T., Hu, D., Zhang, H., Guo, Z., Zhao, Y., Bennan, W., & Yuan, Y. (2011). Carbon emissions in the life cycle of urban building system in China—A case study of residential buildings. *Ecological Complexity*, 8(2), 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2011.02.003>

Zhang, Y., Yan, D., Hu, S., & Guo, S. (2019). Modelling of energy consumption and carbon emission from the building construction sector in China, a process-based LCA approach. *Energy Policy*, 134, 110949. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110949>

Li, L. (2021). Integrating climate change impact in new building design process: A review of building life cycle carbon emission assessment methodologies. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100286. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100286>

Klima, H. (2023). CO₂-Neutralität, Treibhausgasneutralität und Klimaneutralität – Was ist was? *Helmholtz-Klima-Initiative*. <https://www.helmholtz-klima.de/faq/co2-neutralitaet-treibhausgasneutralitaet-und-klimaneutralitaet-was-ist-was>

Cerema, 2022. L'ACV Dynamique dans la RE 2020. France. https://www.cerema.fr/system/files/documents/2022/02/acv_dynamique_re2020.pdf

Bbsr, Ö. I. (s. d.). *ÖKOBAUDAT*. ÖKOBAU.DAT im BBSR. <https://www.oekobaudat.de/en.html>

Règlement grand-ducal du 9 juin 2021 concernant la performance énergétique des bâtiments. 215-216. (n.d.). *data.legilux.public.lu*. Retrieved June 9, 2021, from <https://data.legilux.public.lu/filestore/eli/etat/leg/rgd/2021/06/09/a439/jo/fr/pdfa/eli-etat-leg-rgd-2021-06-09-a439-jo-fr-pdfa.pdf>