

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Analyse sur le cycle de vie d'une barre de logements en France : une approche centrée sur l'empreinte carbone

Auteur : Lion, Bastien

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/14596>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Analyse sur le cycle de vie d'une barre de logements en France : une approche centrée sur l'empreinte carbone

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de
master Ingénieur Civil Architecte par
Bastien Lion

Promoteur: Prof. ATTIA Shady - SBD Lab

Jury: Prof. PREGARDIEN Michel
RUELLAN Guirec

Abstract	4
Résumé	5
Remerciements	6
Abréviations	8
Table des figures	9
Table des tableaux	10
1. Introduction	11
2. Etat de l'art	14
2.1 L'expérimentation E+C-	14
2.2 Cadre réglementaire de la RE2020	18
2.2.1 Contexte.....	18
2.2.2 Performances énergétiques.....	18
2.2.3 Emissions de gaz à effet de serre.....	19
2.2.4 Constructions Bas-Carbone.....	20
2.2.5 Confort thermique en été.....	23
3. Méthodologie	24
3.1 Sujet et questions de recherche	24
3.2 Description de la méthode de recherche	24
3.3 Study Conceptual Framework	25
3.4 Sélection de variables et indicateurs.....	27
3.4.1 Démarche de cause à effets.....	27
3.4.2 Indicateurs et variables utilisés.....	28
3.5 Analyse du cycle de vie.....	29
3.5.1 Standards et normes appliqués	29
3.5.1.1 ISO 14040.....	29
3.5.1.2 EN 15978.....	31
3.5.2 Identification du but	32
3.5.3 Spécification de l'objet d'évaluation	32
3.5.4 Caractéristiques physiques du projet	33
3.5.5 Mix énergétique.....	33
3.5.6 Elaboration du scénario de cycle de vie.....	34
3.5.6.1 Modules A1-A3 : from cradle to gate	34
3.5.6.2 Modules A4-A5	36
3.5.6.3 Modules B1-B7.....	38
3.5.6.4 Modules C1-C4.....	42
3.5.6.5 Module D	43
3.5.7 Sélection des données environnementales.....	44

3.5.8	Calcul des indicateurs	45
3.5.8.1	Choix des indicateurs de l'ACV	45
3.5.8.2	Calcul de l'indicateur P_{CO_2}	46
3.5.8.3	Calcul de l'indicateur GWP	46
3.6	Logiciels utilisés pour le travail	49
3.6.1	Modélisation de la géométrie	49
3.6.2	Analyse du cycle de vie	49
3.7	Calibration et validation du modèle	50
3.8	Analyse de la sensibilité	53
3.9	Limites de l'étude	53
4.	Présentation du cas d'étude	55
4.1	Représentativité de l'archétype	55
4.2	Localisation	56
4.3	Description générale	56
4.4	Description du cas d'étude	58
4.5	Description de la structure	59
4.6	Techniques spéciales	62
5.	Résultats	63
5.1	Inventaire sur le cycle de vie	63
5.2	Résultats de l'analyse du cycle de vie	65
5.3	Identification des Hotspots	70
5.4	Résultats de l'analyse de la sensibilité	72
6.	Discussion	76
6.1	Découvertes et recommandations	76
6.1.1	Matériaux et postes influents sur GWP	76
6.1.2	Variations des quantités	78
6.2	Forces et limitations de l'étude	79
6.3	Possibilité de poursuites du travail	80
7.	Conclusions	81
8.	Références	83

Abstract

To comply with the Paris agreements and begin its ecological transition, the French government implemented environmental regulations for new constructions in January 2022. Beyond energy requirements, the RE2020 introduces an environmental perspective and the obligation to carry out a life cycle analysis on newly constructed buildings. This type of regulation is a pioneer in Europe. Consequently, many construction professionals express their fears regarding the thresholds to be respected and the construction techniques to be used. This master thesis is carried out to provide answers to those concerns. The study consists in the evaluation of the environmental impacts of a 23 collective housing building unit in France. The objectives are to identify the main materials contributing to global warming, and those maximizing the storage of biogenic carbon in the case study. The objective is to propose relevant design levers to limit CO₂ emissions while maximizing carbon storage in the design phase. The evaluation of those indicators is performed by carrying out a life cycle analysis of the case study according to the European standard EN15978. The results of this analysis are then subjected to a sensitivity analysis. The results mainly focus on the 2 indicators of the carbon footprint of the case study. The results show that the concrete used in the slabs and walls is the biggest contributor to CO₂ emissions, and that more than 30% of the bio-based carbon storage is performed through the use of a timber frame facade. The sensitivity analysis shows that the glazed surfaces has a significant influence on these indicators. Construction professionals and architects should focus on the realization of timber framed structural systems, taking into account other decision criteria such as thermal, aesthetic or structural constraints.

Résumé

Afin de respecter les accords de Paris et d'entamer sa transition écologique, le gouvernement français a mis en vigueur en janvier 2022 la réglementation environnementale des constructions neuves. Au-delà d'exigences énergétiques, la RE2020 introduit un volet environnemental et avec l'obligation de réaliser une analyse du cycle de vie. Ce type de réglementation est pionnier en Europe. Par conséquent de nombreux professionnels de la construction expriment leur craintes vis-à-vis des seuils à respecter, et des techniques à employer. C'est pour donner des éléments de réponse à ces inquiétudes que ce travail est réalisé. L'étude consiste à évaluer les impacts environnementaux d'une barre de 23 logements collectifs construite en France. Les objectifs sont formulés de manière à identifier les principaux matériaux contributeurs du réchauffement climatique, et ceux maximisant le stockage de carbone biogénique dans le cas d'étude. L'objectif est de proposer des leviers de conceptions pertinents pour limiter les émissions de CO₂ tout en maximisant le stockage de carbone en phase de conception. L'évaluation de ces indicateurs est réalisée en faisant une analyse du cycle de vie du bâtiment suivant le standard européen EN15978. Les résultats de cette analyse font ensuite l'objet d'une analyse de la sensibilité. L'analyse des résultats se concentre essentiellement sur les 2 indicateurs de l'empreinte carbone du bâtiment. Les résultats montrent que le béton utilisé dans les dalles et les murs est le plus contributeurs d'émissions de CO₂, et que le stockage de carbone biosourcé se fait à plus de 30% par l'intermédiaire de la façade à ossature bois. L'analyse de la sensibilité montre que la surface des parois vitrées a une influence non négligeable sur ces indicateurs. Les professionnels de la construction et les architectes devraient se concentrer sur la réalisation de systèmes structurels en bois, en prenant en compte d'autre critères de décision tels que des contraintes thermiques, esthétiques ou structurelles.

Remerciements

Mes remerciements les plus sincères vont tout d'abord à Monsieur Shady Attia, promoteur de mon TFE, pour son accompagnement le long de ce processus de travail, pour ses réflexions d'une très grande richesse, et pour son soutien apporté dans le développement de mon travail.

Je souhaite aussi remercier les membres du SBD Lab, pour l'organisation de colloquiums qui ont permis de réaliser de précieux feedbacks sur mon travail.

Je souhaite également remercier Monsieur Michel Prégardien et Monsieur Guirec Ruellan, membres de mon jury, pour le temps qu'ils consacreront à la lecture de ce travail.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis, particulièrement Audrey, pour leur aide et leur soutien continu durant la réalisation de ce travail.

Note à moi-même :

Qu'importe la force de l'adversaire à qui se fonde sur sa propre invincibilité. C'est une grave erreur que de s'interroger sur ce que peut faire l'ennemi faute d'être sûr de soi-même.

*Han Fei ZI, Dynastie des Han, Philosophe et stratège
Sun Tzu, L'art de la guerre*

Abréviations

ACV : Analyse du cycle de vie

DCE : Document de consultation des entreprises

DEP : Déclaration Environnementales des Produits

DOE : Documents d'ouvrages exécutés

FDES : Fiche de Déclarations Environnementales et Sanitaires

GES : Gaz à effet de serre

GWP : Global Warning Potential, potentiel de réchauffement climatique

PCE : Produits de construction et équipements

PCO₂ : Indicateur de stockage de carbone biogénique

RE2020 : Réglementation environnementale 2020

RSET : Récapitulatif standardisé d'étude thermique

RT2012 : Réglementation Thermique 2012

UF : Unité fonctionnelle

Table des figures

Figure 2.1-1 : Historique des exigences de consommation dans le bâtiment depuis 1974	14
Figure 2.1-2 : Récapitulatif des niveaux de performance « Energie » de l'expérimentation E+C (Ministère De La Transition Ecologique, 2019a)	16
Figure 2.1-3 : Récapitulatif des niveaux de performance « Carbone » de l'expérimentation E+C-	17
Figure 2.2-1 : Impact sur le réchauffement climatique de 2 émissions de GES (Ministère de la transition écologique, 2021b)	20
Figure 2.2-2 : coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV (Ministère de la transition écologique et al., 2022).....	22
Figure 3.3-1 : Carte mentale cadrant le travail de recherche.....	25
Figure 3.5-1 : Cadre méthodologique de l'ACV (ISO 14040 :2006 ; Allacker, 2010).....	30
Figure 3.5-2 : Cadre méthodologique pour réaliser une ACV (EN 15978, 2011)	31
Figure 3.5-3 : Mix énergétique de la France pour la production d'électricité	33
Figure 3.5-4 : Etapes et modules du cycle de vie considérés (EN 15978, 2011)	34
Figure 3.5-5 : Potentiel de réchauffement de plaques de plâtre pour l'assignation à 1m ² de surface d'une FDES générique, d'une FDES de produit Knauf et pour une FDES de produit Placoplatre.....	35
Figure 3.5-6 : Description de l'unité fonctionnelle pour le système de doublage Optima proposé par Saint Gobain – Isover (Saint-Gobain Isover, 2019).....	44
Figure 3.5-7 : Approche statique 0/0, les pointillés représentent des systèmes en dehors de la frontière par l'ACV du bâtiment (Hoxha et al., 2020).....	47
Figure 3.5-8 : Approche statique -1/+1, les pointillés représentent des systèmes en dehors de la frontière par l'ACV du bâtiment (Hoxha et al., 2020).....	47
Figure 3.5-9 : Approche dynamique ou le bois est récolté avant d'être utilisé, les pointillés représentent des systèmes en dehors de la frontière par l'ACV du bâtiment (Hoxha et al., 2020)	48
Figure 3.7-1 : Note globale de la modélisation (issue de One Click LCA)	51
Figure 3.7-2 : Processus itératif pour la calibration	51
Figure 3.7-3 : contribution aux indicateurs relatifs des différents imports pour la calibration	52
Figure 4.1-1 : Cas d'études envisagés : De gauche à droite : a. Les Balconnières (Leroy, 2021), b. HBVS Fareins (Petitdemange, 2021), c. La Madeleine (Coste, 2021).....	55
Figure 4.2-1 : Carte du nombre de degrés jour en Europe (Eurostat, 2020)	56
Figure 4.3-1 : Plan masse du projet les Balconnières à Nantes (44) (Leroy, 2021).	57
Figure 4.4-1 : Plan de rez-de-chaussée du cas d'étude (Leroy, 2021).....	58
Figure 4.5-1 : Coupe de détail sur la façade Nord : la coursive et toiture du cas d'étude (Leroy, 2021)	59
Figure 4.5-2 : Coupe de détail de la façade sud : Structure des balcons (document communiqué par Leroy, 2019).....	60
Figure 5.1-1 : Inventaire sur le cycle de vie - données d'entrée en surface (m ²).....	63
Figure 5.2-1 : Contribution des indicateurs sur les étapes du cycle de vie	65
Figure 5.2-2 : mix énergétique de l'électricité produite en France (IEA, 2019).....	66
Figure 5.2-3 : Potentiel de réchauffement climatique par lot.....	67
Figure 5.2-4 : Résultats par année pour GWP	69
Figure 5.3-1 : Contribution au potentiel de réchauffement (GWP) climatique des différents matériaux.....	70
Figure 5.4-1 : analyse de la sensibilité des données d'entrées les plus représentées ou influentes sur l'indicateur GWP	72
Figure 5.4-2 : Comparaison des contributions des matériaux aux indicateurs PCO ₂ et GWP	73

Table des tableaux

Table 3.4-1 : Liste des variables, sous-variables et indicateurs de cause et leurs effets	27
Table 3.4-2 : Récapitulatif des objectifs et variables considérés	28
Table 3.5-1 : Liste des hypothèses pour le calcul de module A4 pour le système de doublage Optima proposé par Saint Gobain – Isover.....	36
Table 3.5-2 : Durée de service considérées pour les différents systèmes	40
Table 3.5-3 : Extrait du récapitulatif standardisé d'étude énergétique et thermique	40
Table 3.5-4 : Calculs de consommation d'eau par années	41
Table 3.5-5 : Liste des hypothèses pour le calcul de module C1 pour le système de doublage Optima proposé par Saint Gobain – Isover.....	42
Table 3.5-6 : Scénarios considérés pour les modules C3 et C4 en fonction des matériaux (table issue de One Click LCA, 2021).....	43
Table 3.7-1 : Dix premiers critères du vérificateur de plausibilité et avec leurs données d'entrée	50
Table 4.5-1 : Récapitulatif des parois du cas d'étude	61
Table 4.6-1 : Extrait du Récapitulatif Standardisé d'Etude Thermique du cas d'étude (RSET).....	62
Table 5.3-1 : Résumé des variations des données d'entrée pour l'analyse de la sensibilité.....	71
Table 5.4-1 : Résultats de l'analyse de la sensibilité sur l'indicateur GWP	74

1. Introduction

L'époque dans laquelle nous vivons est en évolution rapide. Nous assistons depuis ces dernières années à un réchauffement climatique accéléré. Les émissions de gaz à effets de serre dues aux activités humaines ont élevé les températures de 1.1°C depuis la période préindustrielle. (GIEC, 2021).

Depuis décembre 2016, les accords de Paris ont fixé les objectifs de réchauffement climatique à un niveau de 1.5°C par rapport à 1850. Ces accords, signés par plus de 196 parties, décrivent les actions à mettre en place pour respecter ce seuil. Le GIEC (2021) décrit dans le premier volet de leur rapport que le réchauffement climatique pourraient avoir des conséquences « irréversibles pour des siècles ou des millénaires ».

Or malgré toutes ces recommandations, le second volet du rapport du GIEC publié en février 2022 indique que le réchauffement climatique continue de s'accélérer. (ONU, 2022). Le seuil des 1.5°C pourrait être atteint en 2030, soit une décennie plus tôt que prévu lors des accords de Paris.

Il appartient donc aux pays du monde de changer leurs politiques, afin de remplacer l'utilisation des énergies fossiles, de renforcer le captage du CO₂, de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'encourager la sobriété énergétique.

En Europe, la France a entamé sa transition énergétique et écologique. Le ministère de la transition écologique a investi d'ici 2030 plus de 54 milliards d'euros pour faciliter le basculement vers une électricité à 100% d'origine renouvelable d'ici 2050, ainsi que d'autres objectifs de développement durable (Ministère de la transition écologique, 2022).

Le ministère de la transition écologique indique que le secteur du bâtiment en France représente 44% de l'énergie consommée, loin devant le secteur des transports, représentant 31%. Cela représente chaque année plus de 123 millions de tonnes de CO₂ émises dans l'atmosphère. Le ministère de la transition écologique indique (2021a) que cela représente l'équivalent de 1.1 tonne de pétrole par an et par habitant, faisant du secteur du bâtiment un levier clé de la transition écologique et énergétique.

Réduire la consommation énergétique et les impacts sur l'environnements des bâtiments est un des leviers de transition écologique de la France. Le ministère de la transition écologique décrit qu'une stratégie de « ville durable » doit être développée. Cette stratégie s'inscrit dans la « démarche "habiter la France de demain" » et a comme objectif de relancer la construction durable de logements sur le territoire.

Dans cette optique, la mise en place d'une nouvelle réglementation sur les constructions neuves a été mise en place en France depuis janvier 2022. Il s'agit de la réglementation environnementale des bâtiments 2020 (RE2020). Attia et al. (2017) décrivent dans leur revue sur les futurs challenges concernant les bâtiments basse consommation que la politique de la France est pionnière en Europe. En effet, la RE2020 implique la réalisation dans les phases de conception d'une évaluation des impacts environnementaux des constructions neuves. Ces objectifs de performances environnementale s'ajoutent aux objectifs de sobriété énergétique, faisant de la RE2020 une des réglementations la plus stricte d'Europe concernant la construction neuve.

Les objectifs de cette réglementation sont de réduire les dépenses énergétiques du secteur du bâtiment, et de lutter contre la construction de passoires énergétiques et de bâtiments avec un fort impact sur l'environnement.

Le développement de ce travail se base sur deux constats.

D'une part, dans un reportage réalisé par LCI (2021), des professionnels de la construction expriment leurs craintes à propos de cette nouvelle réglementation. Ils jugent ne pas être prêt à surmonter de tels changements impliquant l'utilisation d'autres technologies de chauffage que la traditionnelle chaudière à gaz à condensation, l'utilisation de systèmes constructifs en bois couplée à l'utilisation de matériaux biosourcés, etc.

D'autre part, la littérature est fournie de beaucoup d'étude portant sur les bureaux (Al-Obaidy et al., 2022 ; Helmus, 2020), ou sur les maisons unifamiliales (Bodmer, 2020 ; Amer et al., 2020). Mais peu d'études proposent la réalisation d'une analyse du cycle de vie d'un bâtiment de logements collectifs dans le contexte français.

Ce travail permet donc de combler la littérature en proposant une étude d'ACV sur un cas d'étude situé en France, et d'exploiter les résultats pour identifier des leviers de conception permettant de réduire l'empreinte carbone des bâtiments de logements collectifs.

Tout d'abord ce travail commence par une revue de littérature concernant la genèse de la RE2020 avec l'expérimentation E+/C-. Les critères de l'expérimentation E+C- sont identifiés et quantifiés. Puis la revue aborde la réglementation RE2020 parue en janvier 2022, en indiquant les seuils réglementaires, leur signification, et la méthode d'ACV à utiliser pour la quantification de la performance environnementale.

Ensuite la méthodologie vient décrire les questions de recherche et les objectifs de l'étude. La norme EN 15978 est utilisée comme cadre pour l'analyse du cycle de vie. Les hypothèses réalisées sont explicitement décrites. L'ACV est réalisée sur l'approche du berceau à la tombe (« cradle to grave »). La méthodologie décrit aussi les logiciels utilisés, et une analyse de la sensibilité est réalisée sur les résultats de l'ACV. Elle comporte 10 scénarios de variations.

Une présentation du cas d'étude est réalisée. Elle permet de décrire les critères de choix qui ont conduit au projet Les Balconnières à Nantes. Ce projet concerne la réalisation d'une barre de 23 logements collectifs en structure mixte bois-béton.

Enfin ce travail se termine par un chapitre de résultats servant de base à une discussion. Celle-ci détaille plusieurs leviers de conception pour réduire l'impact sur le réchauffement climatique de la conception et maximiser le stockage de carbone biogénique dans les matériaux.

2. Etat de l'art

2.1 L'expérimentation E+C-

Depuis les années 70, les évolutions liées à l'industrie et aux découvertes de nouveaux matériaux et procédés de fabrication ont été nombreuses. Elles ont permis d'améliorer considérablement les performances des constructions neuves. Ces innovations technologiques ont permis progressivement d'améliorer les performances thermiques et énergétiques des bâtiments.

La raréfaction des ressources fossiles et les différentes crises pétrolières ont aussi induits les investisseurs de l'immobilier à construire des bâtiments qui consomment moins en respectant la réglementation. Les innovations ont permis de progressivement hausser les seuils de performances attendus par les constructions neuves. Ces seuils sont fixés par le gouvernement français afin que le stock bâti soit en perpétuelle amélioration sur le plan de la consommation énergétique.

Six réglementations thermiques se sont succédées depuis les années 70. Le premier cadre réglementaire a été introduit en 1974 suite au premier choc pétrolier. Le dernier cadre réglementaire légal avant la mise en place de la réglementation RE2020 était la RT2012. La Figure 2.1-1 illustre ce évolutions.

Historique des exigences de consommation dans le bâtiment neuf depuis 1974

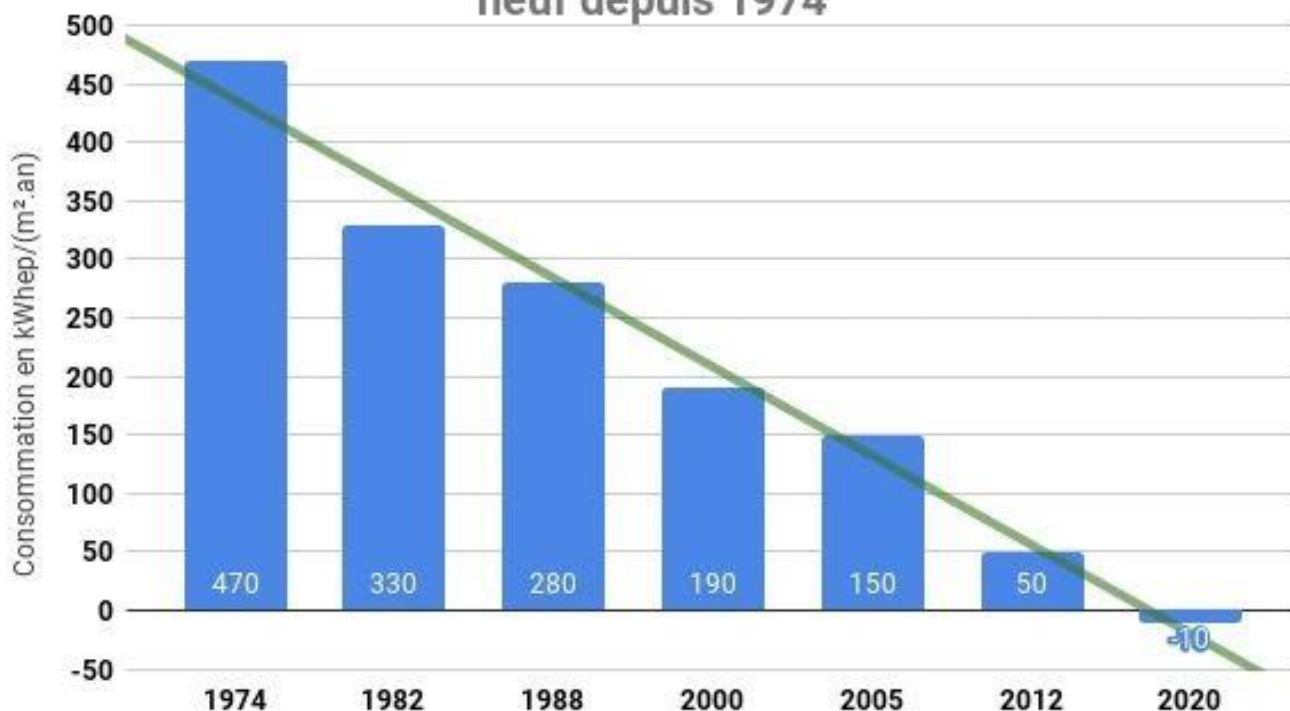


Figure 2.1-1 : Historique des exigences de consommation dans le bâtiment depuis 1974

(issu de Equalis (2019))

Le Ministère de la Transition Ecologique met en vigueur le 1^{er} janvier 2013 la réglementation thermique 2012. Celle-ci comporte des exigences de moyens, concernant l'étanchéité, les surfaces vitrées ou l'affichage des consommations d'énergie. Trois exigences de résultats sont en outre à satisfaire:

- besoins bioclimatiques du bâtiment ($B_{bio\ max}$) ;
- consommation d'énergie primaire ($C_{ep\ max}$) ;
- confort en été ($T_{ic\ réf}$).

Ce renouvellement constant et cette mise à niveau des objectifs nécessitent que les acteurs de la construction soient constamment à jour concernant ces exigences. La précédente RT2005 est restée en application seulement 7 ans avant d'être abrogée et remplacée par une réglementation plus exigeante. Une mise à niveau des connaissances, des matériaux et techniques à employer est nécessaire pour les architectes, maîtres d'œuvres et bureaux d'études afin de pouvoir répondre à ces nouveaux objectifs. La conscientisation des maîtres d'ouvrages vis-à-vis de ces nouveaux objectifs et de leur bienfait sur la gestion du patrimoine immobilier est d'autre part un processus nécessitant du temps lors d'un changement de réglementation.

C'est dans cette dynamique que le gouvernement français a mis en place en 2016 un cadre d'expérimentation pour les constructions neuves. Il s'agit de l'expérimentation pour les « Bâtiments à Energie Positive et Réduction de Carbone », autrement appelé « Expérimentation E+C- ». Le contexte de cette expérimentation est de proposer un cadre d'exigences énergétiques et environnementales à respecter pour les constructions neuves. Ces exigences sont fixées au regard de la réglementation environnementale 2020. Pour rentrer dans le cadre de l'expérimentation, le respect de ces critères est obligatoire. Il conduit à une labélisation du bâtiment, le label E+C-.

Les objectifs à atteindre pour le Ministère de la transition énergétique sont doubles :

- préparer les acteurs du bâtiment à la généralisation des bâtiments à énergie positives ;
- affiner les exigences et le cadre réglementaire de la future RE2020 en fonction des difficultés ou des problématiques rencontrées dans le cadre de l'expérimentation E+C- (Ministère De La Transition Ecologique, 2019b).

Dans le cadre de l'expérimentation, les niveaux de performances des projets soumis à la labélisation sont de nature énergétique et environnementale.

Premièrement, un projet est caractérisé par un niveau « Energie », dont l'évaluation est basée sur l'indicateur Bilan $BEPOS$. Cet indicateur est comparé avec un niveau de bilan énergétique maximal intitulé Bilan $BEPOS\ MAX$. La comparaison conduit à une classification de la performance énergétique suivant 4 niveaux (Figure 2.1-2).

Les niveaux « Energie 1 » et « Energie 2 », ou E1 et E2, correspondent à un dépassement des exigences de la réglementation thermique 2012, grâce à un recours aux énergies renouvelables ou grâce la mise en œuvre de techniques performantes à coûts maîtrisés. Pour le secteur résidentiel, les niveaux E1 et E2 correspondent respectivement à un dépassement de -5% et de -10% des consommations en énergies non renouvelables par rapport à la RT2012.

Le niveau « Energie 3 », ou E3, est plus exigeant que les précédents, notamment car le dépassement des consommations en énergies non renouvelables doit être 20% plus bas que le seuil fixé par la RT2012 pour le secteur résidentiel, mais aussi car le projet doit avoir recours aux énergies renouvelables à hauteur de 20 kWh/m².an. Le niveau « Energie 4 », ou E4 correspond à un bâtiment autonome en énergie ou avec une production positive. Le projet a exclusivement recours aux énergies renouvelables et contribue à la production énergétique à l'échelle du quartier.

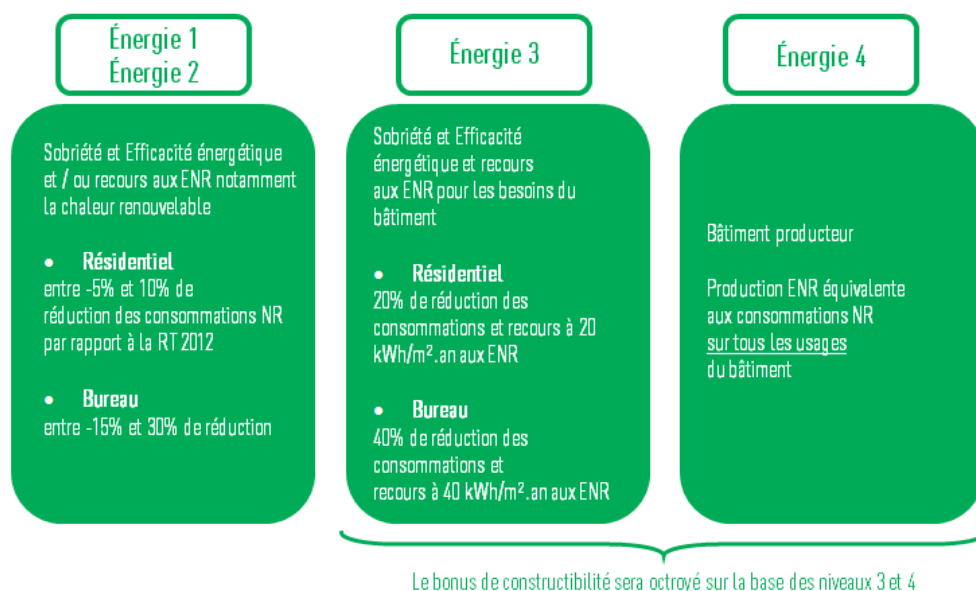


Figure 2.1-2 : Récapitulatif des niveaux de performance « Energie » de l'expérimentation E+C- (Ministère De La Transition Ecologique, 2019a)

L'innovation de l'expérimentation E+C- résulte du fait qu'un autre niveau de performance est requis pour obtenir la labélisation. Le niveau « Carbone » se concentre sur des problématiques liées à l'environnement, au travers du bilan carbone du bâtiment et de ces émissions de gaz à effet de serre. Les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment sont comparées à un niveau maximal « E_{GES max} », et à un niveau d'émissions relatif aux produits de construction et équipements maximal « E_{GES PCE} » (Figure 2.1-3).

Le niveau « Carbone 1 » ou « C1 » vise à englober tout projet souhaitant prendre part à l'expérimentation E+C-. Il n'y a pas de seuil à ne pas dépasser. Le projet doit avoir fait l'objet d'une démarche d'évaluation des impacts de son cycle de vie sur l'environnement. Le projet doit cependant justifier d'une démarche de réduction de ces impacts par le choix de matériaux et par sa consommation énergétique.

Le niveau « Carbone 2 » ou « C2 » valorise les projets les plus performants sur les plans des émissions de CO₂. L'obtention de ce niveau pour la labélisation nécessite un travail plus approfondi sur le choix des matériaux et des vecteurs énergétiques utilisés. Pour atteindre ce niveau, l'attribution du niveau de performance E1 est au minimum requis.

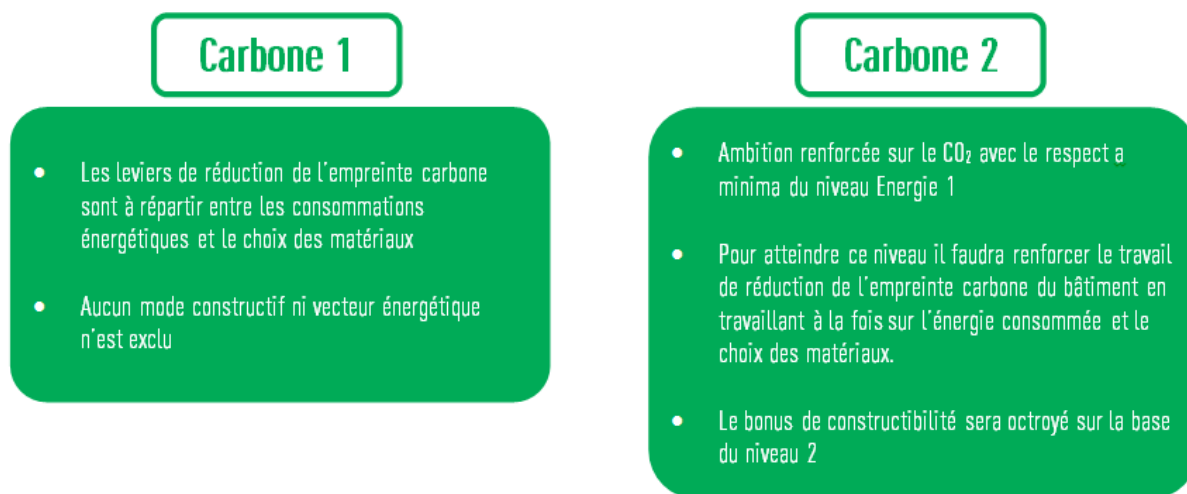


Figure 2.1-3 : Récapitulatif des niveaux de performance « Carbone » de l'expérimentation E+C-

(Ministère De La Transition Ecologique, 2019a)

Si le projet répond aux critères précédents, il peut être labélisé E+C- en fonction des niveaux de performance énergétique et environnementale qu'il atteint. Ainsi un projet peut recevoir le label E3C1, par exemple, si le projet répond aux exigences du niveau de performance « Energie 3 » et « Carbone 1 ».

La participation à cette expérimentation depuis le 1^{er} janvier 2017 se fait sur base du volontariat du maître d'ouvrage. Tout bâtiment ou projet ayant été récemment construit, étant situé en métropole et respectant la réglementation thermique 2012 peut faire l'objet de l'évaluation de ses performances énergétiques et environnementales dans le cadre de l'expérimentation E+C-. Les projets faisant l'objet d'une labélisation sont ensuite inscrits dans une base de données disponible pour tous. Cette base de données constitue « l'observatoire des bâtiments à énergie positive et réduction de carbone », et comporte plus de 1200 bâtiments (dont plus de 330 logements collectifs) et leur niveau de labélisation énergie et Carbone (Ministère De La Transition Ecologique, 2021c).

2.2 Cadre réglementaire de la RE2020

2.2.1 Contexte

En France, de nouvelles exigences environnementales et thermiques ont été définies en adéquation avec les objectifs visés à 2050. La lutte contre le réchauffement climatique a pris un tournant lors de la signature de la France aux accords de Paris en 2015. Cet engagement vise à diminuer les émissions de gaz à effet de différents secteurs. Parallèlement, la France a mis en place un cadre législatif, notamment au travers de la loi énergie-climat, ayant pour objectif d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. C'est dans ce cadre que s'inscrit la réglementation environnementale 2020 (RE2020). Elle est entrée en vigueur en France le 1^{er} janvier 2022. Elle succède et remplace la précédente réglementation thermique 2012 (RT2012). La RE2020 exprime cette nouvelle volonté de se diriger vers une économie de la construction moins énergivore et plus respectueuse de l'environnement. Elle promeut l'utilisation d'énergies moins carbonées, en bannissant progressivement le recours au chauffage au gaz (Ministère de la Transition Ecologique, 2021b)

2.2.2 Performances énergétiques

Dans la réglementation thermique française, l'indicateur mesurant les performances énergétiques est le besoin bioclimatique B_{bio} . Il traduit les besoins énergétiques d'un bâtiment pour rester à une température de confort intérieure fixée. Il tient compte de la conception générale du bâtiment (orientation, exposition solaire et aux vents, géométrie, etc.). Il caractérise « la capacité de la conception du bâtiment à réduire passivement les besoins de chauffage en hiver et de refroidissement en été », expliquent le Ministère de la Transition Ecologique et CEREMA (2021). La précédente RT2012 ne tenait compte que du besoin bioclimatique en chaud. La nouvelle RE2020 utilise de même ce besoin bioclimatique en chaud, et introduit un nouvel indicateur qui est le besoin bioclimatique en froid.

Pour être réglementaire, le besoin bioclimatique B_{bio} du bâtiment ne doit pas dépasser une valeur maximale $B_{bio\ max}$. Cette valeur maximale est calculée en fonction de la zone géographique, de la présence de combles, de la surface moyenne des logements et de la zone de bruit. Par rapport à la RT2012, la valeur de cet indicateur est baissée de 30% et fixe le seuil pour la RE2020.

Enfin, la consommation en énergie primaire renouvelable C_{EP} et en énergie primaire non renouvelables $C_{ep, nr}$ des constructions neuves fait aussi l'objet d'une réévaluation des seuils par rapport à la RT2012. Les seuils sont les suivants :

- Pour les maisons individuelles : $C_{EP} < 55 \text{ kWhep/m}^2.\text{an}$ et $C_{ep, nr} < 75 \text{ kWhep/m}^2.\text{an}$
- Pour les logements collectifs : $C_{EP} < 70 \text{ kWhep/m}^2.\text{an}$ et $C_{ep, nr} < 80 \text{ kWhep/m}^2.\text{an}$

2.2.4 Constructions Bas-Carbone

L'analyse du cycle de vie à réaliser dans le cadre de la RE2020 sur les bâtiments en France vise à maximiser et valoriser le stockage du carbone dans les matériaux de la construction. Le carbone stocké correspond à un équivalent en CO₂ du stockage de GES (CO₂, CO ou CH₄). Le stockage de CO₂ est réalisé grâce aux mécanismes de la photosynthèse. Les émissions des gaz CO₂, CO ou CH₄ ne sont produites qu'en fin du cycle de vie des matériaux, à la suite d'un éventuel processus de recyclage, de valorisation énergétique, ou par des mécanismes naturels de dégradation des matériaux végétaux (digestion, compostage, etc.).

La situation d'urgence climatique actuelle a orienté le choix de la méthode d'ACV de la RE2020. Pour tenter de maintenir le seuil de réchauffement à 2°C par rapport à l'ère préindustrielle, une mise en application immédiate des mesures endiguant les émissions de gaz à effet de serre est nécessaire. C'est pourquoi la méthode d'analyse de cycle de vie retenue pour la RE2020 est dite dynamique. Une temporalisation des émissions de carbone au cours du cycle de vie des matériaux est réalisée. Elle permet de prendre en compte le fait que le forçage radiatif de 2 émissions au bout de 100 ans est différent si ces émissions sont différées de 25 ans. La Figure 2.2-1 montre qu'au bout de 25 ans, la première émission réalisée à l'année 0 (en orange) exercera son forçage radiatif et aura un impact sur le réchauffement climatique pendant encore 75 ans. La deuxième émission réalisée à l'année 25 (en vert) exercera son forçage radiatif pendant 100 ans, soit 125 ans après la date de construction.

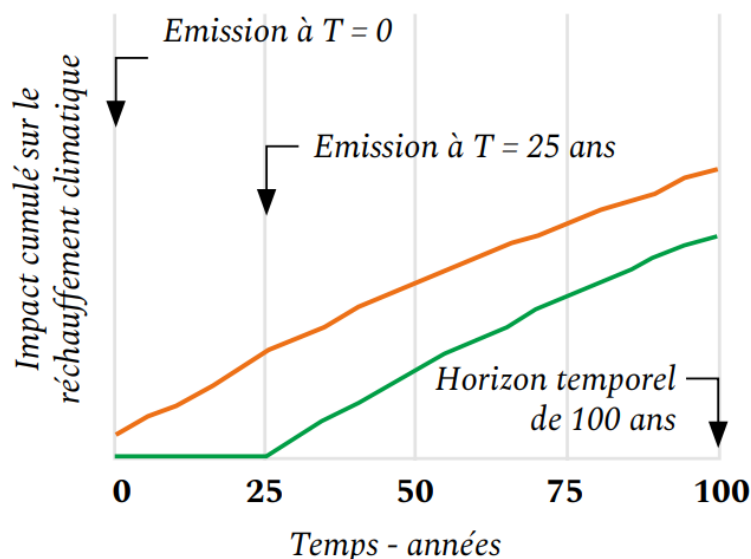


Figure 2.2-1 : Impact sur le réchauffement climatique de 2 émissions de GES (Ministère de la transition écologique, 2021b)

Dans le calcul des indicateurs de l'ACV (en particulier le potentiel de réchauffement climatique), l'impact des émissions de GES émises au début du cycle de vie du matériau est plus important que celles émises en fin de vie du matériau. Ces différences sont introduites par une pondération réalisée sur l'indicateur GWP, en fonction de la date des émissions (voir Figure 2.2-2). Cette différenciation dans la temporalité des émissions est « cohérente avec la politique de lutte contre le changement climatique, car une molécule de CO₂ émise aujourd'hui commence à réchauffer l'atmosphère dès aujourd'hui » décrit le Ministère de la Transition écologique dans son dossier de presse de février 2021.

L'approche la plus critique concernant les ACV dites statiques est que la temporalité dans les émissions de carbone et que les périodes de rotation des forêts ou de l'augmentation de la biomasse ne sont pas prises en compte. Cette négligence crée des problèmes lors de la réalisation d'ACV de produits biosourcés, car tous les matériaux biosourcés ne peuvent être considérés comme neutres sur le plan carbone. (Hoxha et al., 2020). En effet, particulièrement pour le bois de construction, la période de rotation des forêts est longue. Le bois d'arbre pousse lentement. De plus, une forêt atteint son potentiel de captation maximum en milieu de vie, alors qu'en début et fin de vie la captation est respectivement plus lente ou nulle (les vieilles forêts ont un impact nul sur l'émission de GES, étant donné qu'autant de végétaux poussent que ne se désintègrent en créant des émissions) (Hoxha et al., 2020).

Ainsi pour mieux prendre en compte cette temporalité dans le bilan des émissions de GES des matériaux biosourcés, il est préférable d'utiliser des méthodes d'ACV dites dynamiques. D'après le travail de Ventura & Feraille (2021), le modèle utilisé pour le calcul de l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique dans la RE2020 est développé sur l'agrégation d'une méthode statique et dynamique. Il se base sur le modèle développé par Levasseur et al. (2010), et sur son adaptation faite le CIRAI¹. Le principe général est le suivant :

- Fixer le temps 0 à la date de construction du bâtiment :
- Réaliser l'évaluation des émissions de GES se produisant avant le temps 0 grâce une méthode d'ACV statique
- Réaliser une évaluation dynamique sur une période de 100 ans pour les émissions se produisant au-delà du temps 0.

Concrètement, l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique est calculé entre 0 et 100 ans, et correspond au forçage radiatif cumulé sur 100 ans des gaz à effets de serre émis au temps 0. Les émissions ultérieures sont pondérées par un coefficient prenant en compte la date des émissions et la nature du gaz. (Figure 2.2-2).

¹ <https://ciraig.org/index.php/fr/project/dynco2-calculateur-dempreinte-carbone-dynamique/>

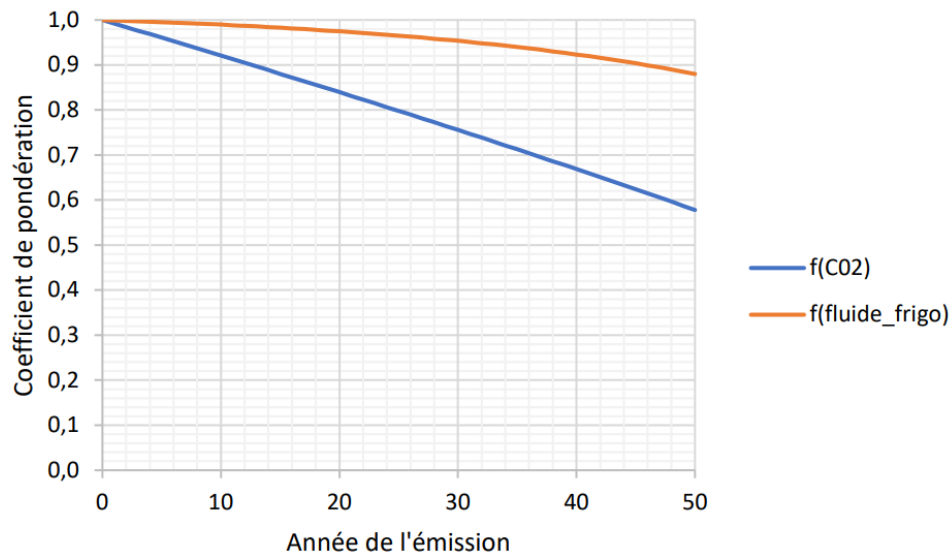


Figure 2.2-2 : coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV (Ministère de la transition écologique et al., 2022)

Des seuils sont définis en fonction de ce potentiel de réchauffement climatique. La RE2020 impose le recours à 2 indicateurs pour caractériser le niveau de décarbonation de la construction neuve.

Tout d'abord, l'indicateur de carbone en cycle de vie $I_{\text{construction}}$, mesuré en $\text{kg CO}_2 \text{ eq. /m}^2$, indique la quantité de CO_2 émise par mètre carré de surface de logement construit sur le cycle de vie du bâtiment. En précisions, l'impact carbone des fondations n'est pas pris en compte dans ce calcul, afin de ne pas désavantager les bâtiments ayant recours à des systèmes de fondations profondes (liés à des contraintes urbanistiques ou géotechniques). Afin de permettre la transition progressive des maîtres d'ouvrages et professionnels du bâtiment vers l'utilisation de cette méthode d'ACV, les seuils seront successivement réévalués en 2025, 2028 puis 2031.

Ce seuil est fixé pour :

- la construction de maisons unifamiliales :
 - à $640 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. /m}^2$ à partir de 2022
 - puis à $415 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. /m}^2$ à partir de 2031 ;
- la construction de logements collectifs :
 - à $740 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. / m}^2$ à partir de 2022
 - puis à $490 \text{ kg CO}_2 \text{ eq. /m}^2$ d'ici 2031.

Ensuite un deuxième indicateur est basé sur le potentiel de réchauffement climatique dû au recours aux énergies pendant la phase d'utilisation du bâtiment. L'indicateur $I_{\text{énergie}}$, mesuré en $\text{kg CO}_2 \text{ eq. /m}^2$ permet de quantifier l'impact des énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment.

De la même manière que l'indicateur précédent, la mise en place est progressive et les seuils évolueront jusqu'en 2028. Ce seuil est fixé pour :

- la construction de maisons unifamiliales :
 - à 160 kg CO₂ eq. /m² à partir de 2022
- la construction de logements collectifs :
 - à 560 kg CO₂ eq. à partir de 2022
 - puis à 260 kg CO₂ eq. /m² d'ici 2028.

Ces seuils permettent de « conserver une logique d'obligation de résultats » comme le précise le Ministère de la Transition écologique (2021). Ainsi la mise en œuvre de tout système constructif, simple ou mixte, de système de chauffage et de ventilation, ainsi que de matériaux d'enveloppe est possible. Cela laisse le libre choix aux concepteurs et industriels de développer et mettre en œuvre des techniques et matériaux innovants pour respecter ces exigences.

2.2.5 Confort thermique en été

Le troisième objectif de la RE2020 est de garantir un confort thermique optimal en été. Par le biais de l'intégration du calcul du besoin en froid du bâtiment pendant la période caniculaire, la RE2020 fixe un seuil pour l'indicateur de confort en été, qui s'exprime en degré-heure (DH).

Cet indicateur se calcule suivant l'équation (2.2-2, sur base de la température mesurée à l'intérieur du logement. En journée la température seuil est de 28°C et la température nocturne est de 26°C. Le calcul consiste à multiplier le nombre d'heures annuelles où la température intérieure dépasse ces deux seuils à la différence de température mesurée.

$$\text{Confort été} = (T_{\text{int jour}} - T_{\text{seuil jour}})_{\text{jour}} * N_{\text{heures}} + (T_{\text{int nuit}} - T_{\text{seuil nuit}})_{\text{nuit}} * N_{\text{heures}} \quad (2.2-2)$$

La RE2020 fixe deux seuils concernant cet indicateur :

- Un seuil maximal à ne pas dépasser de 1250 DH, qui correspond à une période d'une durée de 25 où la température intérieure du logement est stationnaire à 30°C.
- Un seuil bas à 350 DH. Ce seuil correspond à période de 5 jours où la température intérieure du logement est stationnaire à 30°C.

Le dépassement du seuil bas implique des pénalités dans le calcul de la performance énergétique du bâtiment, notamment à travers d'une pénalisation forfaitaire. En outre, un dépassement du seuil haut impliquera une non délivrance des permis de construire ou d'aménager.

3. Méthodologie

3.1 Sujet et questions de recherche

Comme abordé au point 2.1, les constructions neuves en France font l'objet d'obligation de performances énergétiques de plus en plus exigeantes depuis 1972. La RE2020 constitue la dernière réglementation en vigueur en France. Elle introduit un volet d'objectifs sur les performances environnementales inédit. Une question principale de recherche est accompagnée d'une question secondaire. Elles peuvent être formulées de la manière suivante :

En France, quels sont les impacts de la mise en œuvre d'un système constructif mixte bois et béton sur le cycle de vie d'un bâtiment de logements collectifs ?

Quels leviers de conception sont pertinents pour réduire l'impact sur le réchauffement climatique d'un bâtiment de logements collectifs construit en France ?

L'objectif du travail est donc de constater la possibilité de mise en œuvre de méthodes et matériaux respectant ces exigences environnementales. Ce travail pourra donc s'adresser aux professionnels du bâtiment, tels que les architectes et ingénieurs de la construction. Ce travail pourra aussi être utiles aux maîtres d'ouvrage souhaitant découvrir les avantages et inconvénients de ces leviers sur la conception de bâtiment à basse empreinte carbone.

3.2 Description de la méthode de recherche

La méthode générale de recherche consiste en une analyse du cycle de vie d'un cas d'étude à identifier deux composantes :

- identifier les principales composantes responsables du réchauffement climatique (indicateur GWP) ;
- identifier les principales composantes permettant de stocker du carbone biogénique ;
- évaluer la sensibilité de la modélisation à ces différents critères.

Le choix de ces deux principaux est justifié par les critères établis par la réglementation RE2020. Cette dernière établit des seuils maximaux à ne pas dépasser qui sont les suivants :

- le respect de $GWP \leq 14 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2/\text{an}$
- le respect de $I_{\text{construction}} < 640 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$

La démarche globale du travail consiste en une modélisation et une analyse du cycle de vie réalisée par itération.

Le travail s'organise selon la Figure 3.3-1. Le processus de recherche commence par une revue de littérature permettant d'évaluer l'état général de la connaissance concernant la réglementation de la RE2020. Ce travail préliminaire a permis de définir plus précisément le sujet de ce travail ainsi que les problématiques principales. En parallèle, étant donné la nature nouvelle de la réglementation, cet état de l'art a permis de cadrer l'étude, et parallèlement de réduire le champs de l'étude. Le chapitre précédent permet de parcourir les principaux éléments qui ont permis le cadrage de ce travail.

La suite du travail consiste en la recherche d'un cas d'étude adéquat permettant la réalisation de l'étude sur le cycle de vie. Parmi les recherches réalisées, un cas d'étude a été retenu pour sa représentativité et pour la documentation disponible à propos du projet.

La collecte des données concernant ce projet s'est faite par prises de contact avec les architectes en charge du projet et du suivi de la construction. Une prise de contact a permis d'avoir accès aux documents d'ouvrages exécutés (Leroy, 2021). Ce sont les plans et carnets de détail définitifs conduisant à la construction du projet. Cette collecte de données porte aussi sur la nature des normes internationales et européennes. Le processus d'analyse du cycle de vie étant long et complexe, ces standards européens permettent à tous les acteurs de suivre un cadre général commun. Ils définissent une méthodologie générale pour aborder les sujets de recherche autour de l'analyse du cycle de vie. La consultation de ces standards et normes est complétée par l'accès à des bases de données regroupant les informations nécessaires à la réalisation d'analyses du cycle de vie. Ces bases de données en accès libre ont permis l'utilisation de données qualitatives, dont les informations sont aussi établies suivant des normes et standards européens.

Le travail se poursuit par la phase d'implémentation et de modélisation de ces données pour effectivement réaliser l'analyse du cycle de vie. Ce travail s'est effectué en parallèle de la collecte de données, pour agrémenter le modèle des données réelles. Le travail de modélisation est lui-même cadré par un ensemble de bonnes pratiques issue de la méthode BIM.

Le calcul de l'analyse du cycle de vie constitue l'étape suivant la modélisation. Ce processus suit en outre des itérations successives, incluant la calibration, l'affinage et la validation des résultats. L'analyse du cycle de vie commence par l'assignation de matériaux et produits de construction aux éléments modélisés. Cette assignation se fait via la base de donnée INIES. INIES répertorie plus de 2400 Fiches de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES) pour les matériaux et produits de construction français et européens. Ces fiches de données permettent d'avoir accès à plus de 630 000 références commerciales (Oury, 2022). INIES est l'équivalent français de l'outil TOTEM. Les FDES sont l'équivalent des Déclarations Environnementales des Produits (DEP) de TOTEM. La calibration consiste en une vérification / validation des

résultats. Celle-ci est évaluée par l'évaluation de la robustesse des importations et l'évaluation des changements sur les indicateurs suivis. La validation est aussi réalisée lors de l'importation des quantités de matériaux.

Pour terminer le travail, les résultats de l'étude sont présentés en fin du manuscrit. Outre les résultats, l'identification des Hotspots de la conception ainsi qu'une analyse de la sensibilité sont présentées en dernier partie de ce travail.

3.4 Sélection de variables et indicateurs

3.4.1 Démarche de cause à effets

Ce travail de recherche commence par une sélection de paramètres sur lesquels agir. Les variables représentées dans la Table 3.4-1 sont réparties entre cause et effets :

- Les variables de causes sont des paramètres sur lesquels des actions de modélisation sont possibles ;
- Les variables d'effets répertorie les paramètres influencés par la modification des variables de cause
- Les variables sont déclinées en sous-variables et en indicateurs pour cibler précisément les éléments sur lesquels les modifications vont être effectuées, et leurs effets relatifs sur les indicateurs indiqués.

Table 3.4-1 : Liste des variables, sous-variables et indicateurs de cause et leurs effets

	Variables de Cause		Variables d'effet
Variables	Système constructif	Consommation énergétique	Impacts sur l'environnement
Sous-Variables	Composition paroi Système structurel Inertie thermique Fabrication	Consommation d'énergie annuelle	Potentiel de réchauffement climatique (ACV) EN 15978 / 15643-2 ISO 14040 Bilan carbone EN 15978 / 15804 / 16449
Indicateurs	Indicateur parois Coefficient de transmission thermique U (W/m2.K)	Consommation en énergie primaire totale Cep : kWhep/m ² .an	Impact sur le changement climatique lié à la consommation d'énergies primaires I _{Cénergie} : kg eq.CO2/m ²
	Indicateur matériaux Carbone stocké (kg CO2 /UF)	Consommation en énergie primaire non renouvelable Cep,nr : kWhep/m ² .an	Impact sur le changement climatique lié aux composants + chantier I _{Cconstruction} : kg eq.CO2/m ²
	Capacité thermique Inertie (J/kg)	Confort d'été Surchauffe (DH)	Stockage de carbone biogénique de la conception kg CO ₂ / UF

L'identification préalable des indicateurs sur lesquels agir permet de concentrer le travail sur les éléments susceptibles d'engendrer des résultats. Les indicateurs de cause identifiés concernent en grande partie des propriétés physiques des matériaux, telles que :

- Le coefficient de transmission thermique d'une paroi (en $w/m^2.K$) ;
- La quantité de carbone stocké biogénique stocké par le matériau (en kg de CO_2 par unité fonctionnelle (UF)) ;
- La capacité thermique (en J/kg).

Les variables d'effets identifiées sont divisées en 2 catégories :

- Les effets sur la consommation d'énergie de la conception ;
- Les effets sur l'impact de la conception sur l'environnement.

3.4.2 Indicateurs et variables utilisés

Les indicateurs listés dans la Table 3.4-1 concernent la consommation énergétique de la conception (Consommation en énergie primaire non renouvelable), les aspect de confort (surchauffe en été), mais aussi les potentiel de réchauffement climatique et le stockage de carbone biogénique (P_{CO_2}). Les indicateurs identifiés sont relatifs aux objectif de ce travail. Cette liste se veut non exhaustive et peut être complétée d'autres indicateurs de cause et d'effet en fonction du champs de recherche et des objectifs visés.

Conscient des relations existant entre ces différents paramètres, le travail de recherche se développe autour des objectifs et des indicateurs résumés dans la Table 3.4-2 ci-dessous.

Table 3.4-2 : Récapitulatif des objectifs et variables considérés

Objectifs	Variables de cause	Variables d'effets	Normes et standards	Unité
Identifier les principales composantes responsables du réchauffement climatique	Coefficient de transmission thermique	Potentiel de réchauffement climatique	EN 15978 ISO 14040	Indicateur GWP (kg CO_2 eq)
Identifier les principales composantes stockant du carbone biogénique	Carbone stocké dans les matériaux	Stockage du carbone biogénique	EN 15978 EN 15804 EN 16449	Indicateur P_{CO_2} (kg CO_2)

3.5 Analyse du cycle de vie

3.5.1 Standards et normes appliqués

3.5.1.1 ISO 14040

L'évaluation des impacts environnementaux d'un produit ou d'un système est un processus long et complexe. Plusieurs outils pour évaluer ces impacts existent, chacun reposant sur une méthodologie spécifique. Plus d'une vingtaine de méthodes sont étudiées par Finnveden & Moberg (2005) afin de pourvoir une meilleure compréhension des différents outils, leurs cas d'application préférentiels, la nature et le type d'impacts environnementaux étudiés, etc. La méthode d'analyse du cycle de vie (ACV) est décrite comme « un outil pour évaluer les impacts sur les ressources et l'environnement d'un produit ou d'un système, sur toute la durée de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'élimination en fin de vie » (Finnveden & Moberg, 2005).

L'ACV est un outil analytique (contrairement aux outils procéduraux). La méthodologie pour utiliser cet outil est cadrée par la norme internationale ISO 14040, développée en 2006. L'ACV est définie comme la « compilation et [l'] évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produit au cours de son cycle de vie » (ISO 14040, 2006). Le cycle de vie est défini « from cradle to grave », du berceau à la tombe. Le processus d'analyse du cycle de vie est itératif (Reiter, 2010 ; Allacker, 2010). La Figure 3.5-1 permet d'identifier 4 phases :

- **Contexte et objectif de l'analyse** : La première phase du travail permet de définir et formuler les objectifs et le champ d'application de l'étude. Cette phase sert aussi à définir l'unité fonctionnelle ainsi que les limites de l'étude. L'unité fonctionnelle est la grandeur qui permettra d'analyser les résultats par rapport à une grandeur de référence.
- **Inventaire sur le cycle de vie** : Cette phase concerne la collecte des données et la modélisation des produits, composants et systèmes qui seront l'objet de l'analyse. Cette phase comprend aussi la description et la validation des données collectées. Ces données peuvent être modélisées. Des bases de données peuvent aussi être utilisées comme sources pour la collecte.
- **Evaluation des impacts sur le cycle de vie** : La troisième phase du travail consiste en l'évaluation, la quantification et la conversion des émissions en impacts sur l'environnement ou sur la santé. Cette phase implique que les données d'émission de gaz dans l'environnement sont agrégées en plusieurs indicateurs. Une catégorie très connue est la contribution au réchauffement climatique (ou potentiel de réchauffement climatique, GWP). Elle regroupe les

émissions de gaz à effets de serre tels que CO₂, CH₄, HFC, O₃, N₂O. L'indicateur utilisé est mesuré en kg équivalent de CO₂ (kg eq. CO₂). Le standard ISO 14040 ne donne pas de catégorie d'impacts à proprement parler, mais donne des recommandations générales pour la sélection des catégories d'impacts (Reiter, 2010).

- **Interprétation des résultats et identification de futurs travaux potentiels :**
La dernière phase des analyses sur le cycle de vie concerne la conclusion. L'ISO 14043 indique que cette dernière phase peut se décomposer en 3 étapes (Reiter, 2010) :

- L'identification des hypothèses importantes et des problèmes notables ;
- L'évaluation des résultats, par une analyse de la sensibilité ou de l'incertitude ;
- La rédaction des conclusions, recommandations et les propositions d'améliorations.

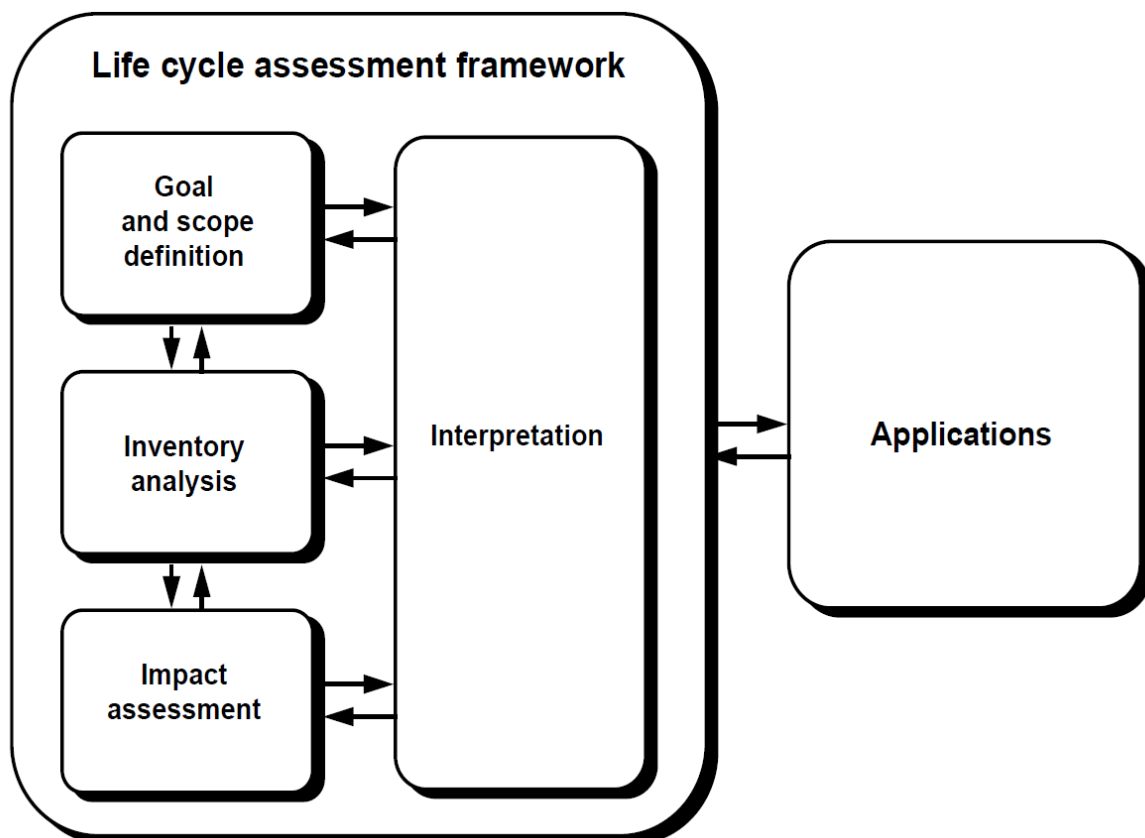


Figure 3.5-1 : Cadre méthodologique de l'ACV (ISO 14040 :2006 ; Allacker, 2010)

3.5.1.2 EN 15978

Au sens de l'ISO 14040, un bâtiment peut être considéré comme un système, et donc faire l'objet d'une analyse du cycle de vie.

La norme ISO 14040 sert de cadre au standard européen EN 15978 qui traite spécifiquement de l'analyse du cycle de vie pour les bâtiments dans le domaine de la construction (Soust-Verdaguer et al., 2016).

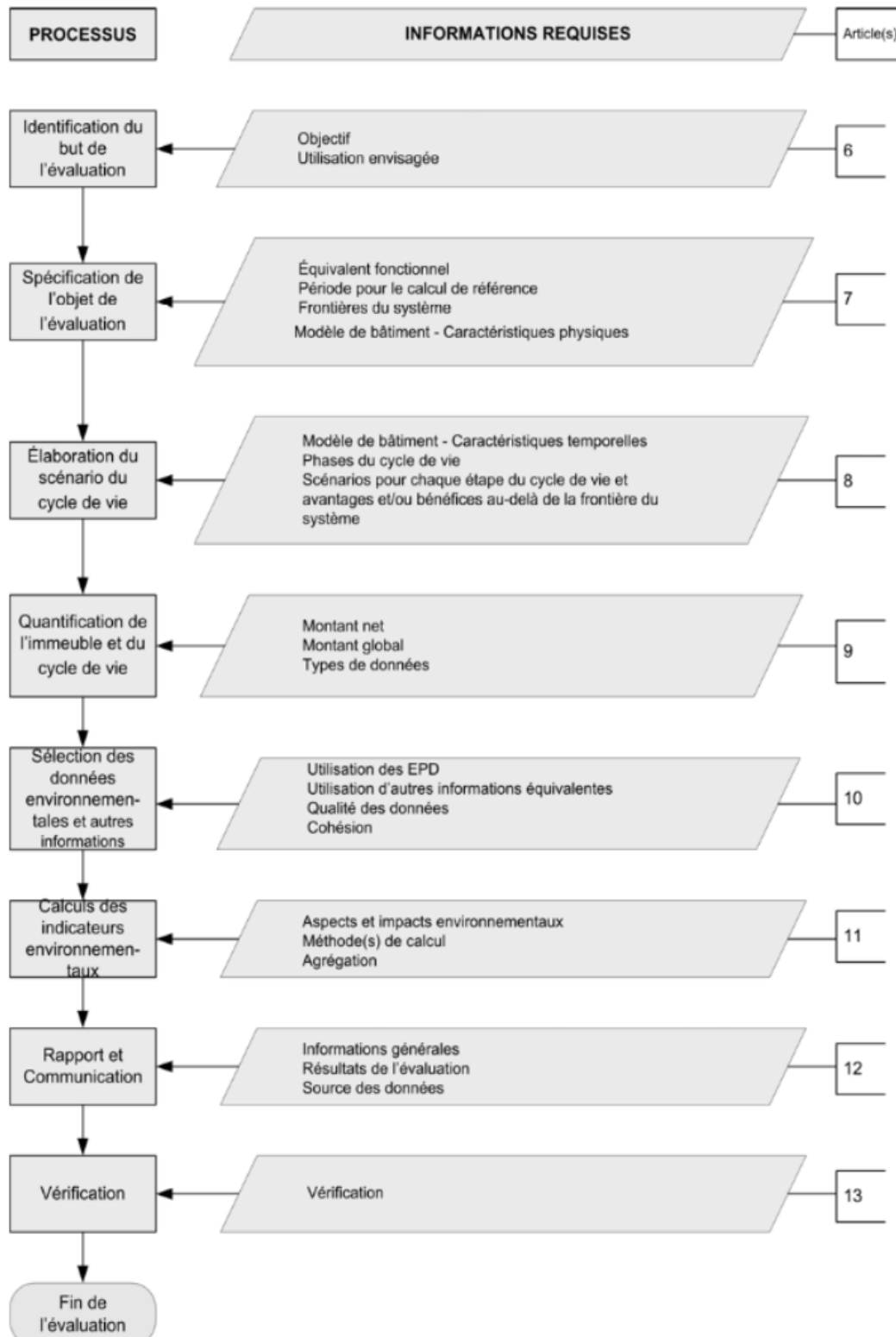


Figure 3.5-2 : Cadre méthodologique pour réaliser une ACV (EN 15978, 2011)

La méthodologie suivie pour la réalisation de ce travail est le cadre proposé par la norme européenne EN 15978 (2011), dont la Figure 3.5-2 expose les différentes étapes. La suite du présent travail consiste donc à expliciter chaque étape de cette méthodologie et à exposer clairement les hypothèses et les choix entrepris.

3.5.2 Identification du but

Il s'agit dans la première phase du travail d'identifier les buts et objectifs de l'étude.

Les objectifs définis par ce travail sont les suivants :

- identifier les principales composantes responsables du réchauffement climatique (indicateur GWP) ;
- identifier les principales composantes permettant de stocker du carbone biogénique (indicateur P_{CO_2})
- évaluer la sensibilité de la modélisation à ces différents critères.

Ces objectifs seront atteints en réalisant une analyse du cycle de vie conforme à la norme EN 15978.

3.5.3 Spécification de l'objet d'évaluation

Le périmètre de l'étude comprend le bâtiment et ses fondations. Le terrain et les alentours ne sont pas compris dans l'étude.

Les valeurs des U parois seront respectées et mesurées afin d'avoir un équivalent fonctionnel au bâtiment construit. Les matériaux utilisés ainsi que leurs épaisseurs seront respectés.

La surface et la nature des panneaux solaires ne fera pas l'objet de modification. Le système de chauffage est assuré par des convecteurs électriques.

L'unité fonctionnelle est le mètre carré (m^2). Le bâtiment ne fera pas l'objet de modification et sera modélisé tel que décrit dans les plans d'ouvrages exécutés, qui constituent les plans d'exécution des travaux.

Le bâtiment comporte 23 logements.

La consommation énergétique du bâtiment est déterminée par les informations disponibles dans la base de données de l'expérimentation E+/C-. Ces données constituent le récapitulatif standardisé d'étude thermique (RSET). Ces résultats sont disponibles sur l'observatoire de la performance énergétique (OPE, Ministère de la cohésion des territoires).

Le cas d'étude est plus précisément décrit dans le chapitre 4 suivant.

3.5.4 Caractéristiques physiques du projet

La norme EN 15978 : 2012 définit les principes méthodologiques à appliquer pour réaliser l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment.

Les caractéristiques physiques du bâtiment doivent être renseignées. Elles sont décrites par la maquette numérique, réalisée à partir des plans d'ouvrages exécutés issus de la phase EXE. Ces plans et carnets de détails ont été fournis par Ad'Hoc Architecture. (Voir 4. Présentation du cas d'étude)

3.5.5 Mix énergétique

La nature du mix énergétique considéré dans une analyse du cycle de vie constitue un facteur important dans l'évaluation des impacts environnementaux d'un bâtiment. Il est observé que même dans les bâtiments à basse consommation énergétique, la consommation d'énergie pendant l'utilisation du bâtiment représente une part importante des impacts sur l'environnement. Ainsi, le choix du mix énergétique influence les résultats (Roux et al., 2016), il convient donc de renseigner le choix du mix énergétique considéré dans ce travail.

L'étude portant sur un bâtiment résidentiel situé en France, le mix énergétique considéré pour l'étude est le mix énergétique de la France pour la production d'électricité. La Figure 3.5-3 montre que la proportion d'électricité produite par le nucléaire en France est de 70% avec une production de 399 012 GWh (IAE, 2019).

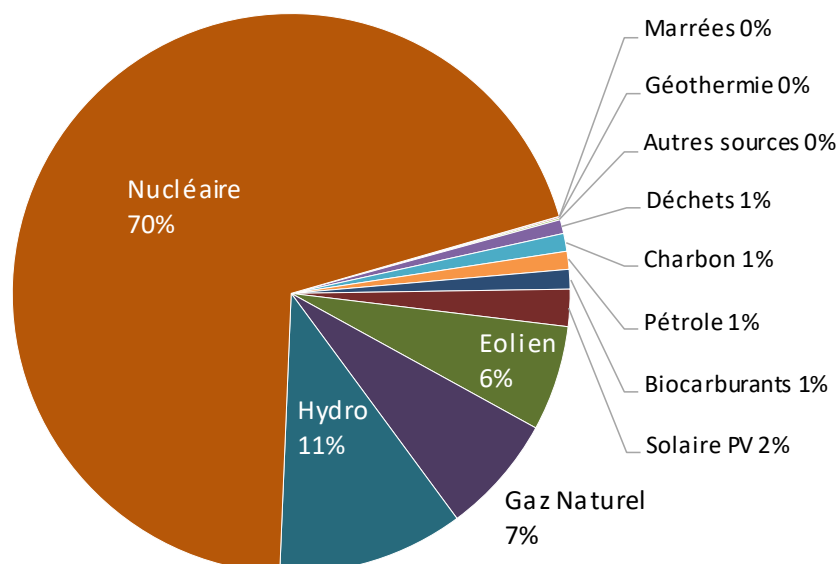


Figure 3.5-3 : Mix énergétique de la France pour la production d'électricité

3.5.6 Elaboration du scénario de cycle de vie

La Figure 3.5-4 présente les différentes phases du cycle de vie d'un bâtiment. En vert sont encadrés les modules intégrés à l'étude. En pointillés orange sont encadrés les modules ne faisant pas partie du cadre de l'étude.

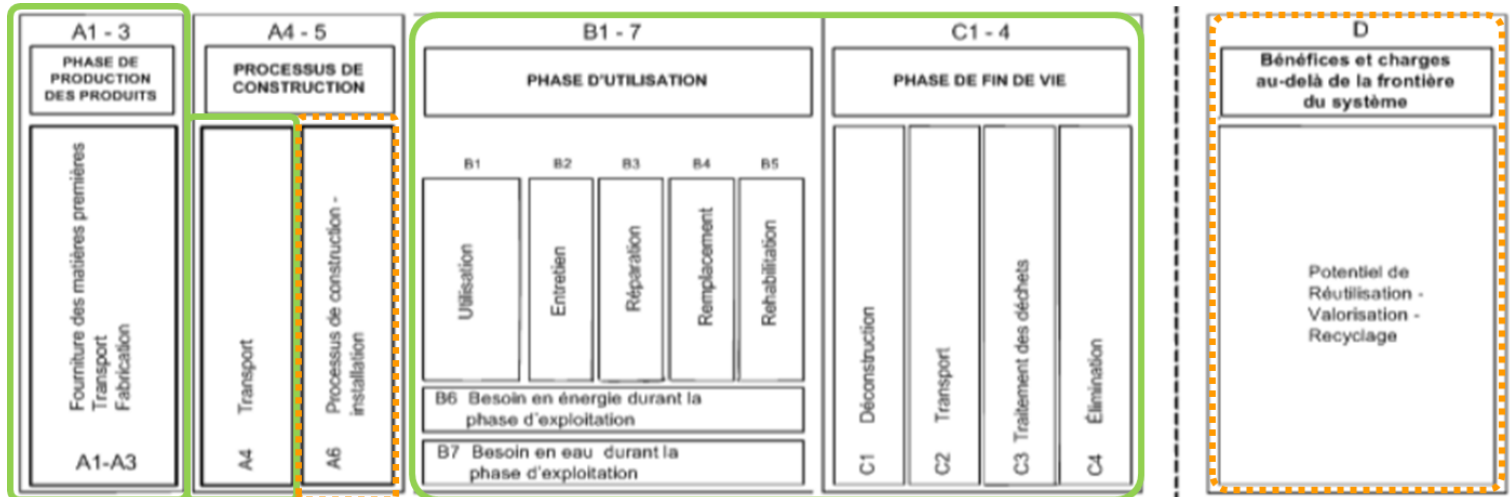


Figure 3.5-4 : Etapes et modules du cycle de vie considérés (EN 15978, 2011)

La norme EN 15978 définit le cycle de vie d'un bâtiment « from cradle to cradle ». Le cycle de vie est divisé en 5 phases distinctes.

3.5.6.1 Modules A1-A3 : from cradle to gate

Les modules A1 à A3 permettent d'évaluer les émissions générées par la conception « du berceau à la sortie de l'usine » (from cradle to gate). Ces 3 modules décrivent l'intégralité des impacts sur l'environnement sur les étapes suivantes :

- l'extraction et traitement des matières premières, et le traitement des intrants,
- leur acheminement jusqu'au fabricant,
- la transformation en usine pour la fabrication de produits finis,

y compris la mise à disposition d'autres matériaux, produits ou énergie pour la fabrication, et le traitement des déchets de production jusqu'à leur statut de fin de déchet ou d'élimination des déchets.

Chaque produit ou matériau de construction doit faire l'objet d'une évaluation environnementale de son processus de fabrication. Ces données sont répertoriées dans une fiche de déclarations environnementales des produits (DEP), aussi appelée dans la réglementation française Fiche de Déclarations Environnementales et Sanitaires (FDES). Ces fiches sont réalisées dans le cadre de la norme EN 15804+A2, qui « fournit une structure permettant de s'assurer que toutes les déclarations [...] sont obtenues, vérifiées et présentées de la même façon. » (EN 15804 :2012 + A2 :2019). Ces fiches renseignent notamment la quantité de carbone biogénique stocké dans le matériau ou produit de construction. Les scénarios de fin de vie envisagés dans les

modules C et D sont renseignés pour permettre une potentielle valorisation du carbone biogénique sur le cycle de vie.

Dans ce travail, les produits et matériaux de construction sont dans la mesure du possible choisis chez des fabricants français ou européens (Saint Gobain Isover, Placoplatre, URSA, etc.). Certains matériaux ou produits de fabricants ne sont pas indiqués par les concepteurs. Dans ce cas des fiches génériques de produits sont assignées. Les FDES génériques établissent un profil environnemental moyen pour un matériau avec des performances données. Dans ce travail, un unique matériau est concerné par l'assignation à une FDES générique. Il s'agit des plaques de plâtres. En effet, les concepteurs ne renseignent pas le fabricant, et une grande diversité de matériaux existent. Les plaques de plâtres peuvent subir un traitement hydrofuge pour la réalisation des pièces humides, ou un traitement acoustique particulier pour les pièces de vie. Outre la nature des locaux qui pourrait être déterminée, le niveau de détail de la conception ne renseigne pas le fabricant.

La Figure 3.5-5 montre que selon ces conditions, le fait de choisir un produit ou un fabricant plutôt qu'un autre peut faire varier la contribution des plaques de plâtres au réchauffement climatique de façon significative. L'assignation de la FDES 2 à pour 1 m² de surface de plaque de plâtre est 33% inférieure à l'assignation pour la même surface d'un produit d'un autre fabricant (FDES 3), bien que les épaisseurs de matériaux et les conditions d'application des produits soient identiques (épaisseurs de 12,5mm, application pour les parois intérieures). La fiche générique FDES 1 propose un potentiel de réchauffement climatique intermédiaire, de 3.35 kg CO₂ eq. / m².

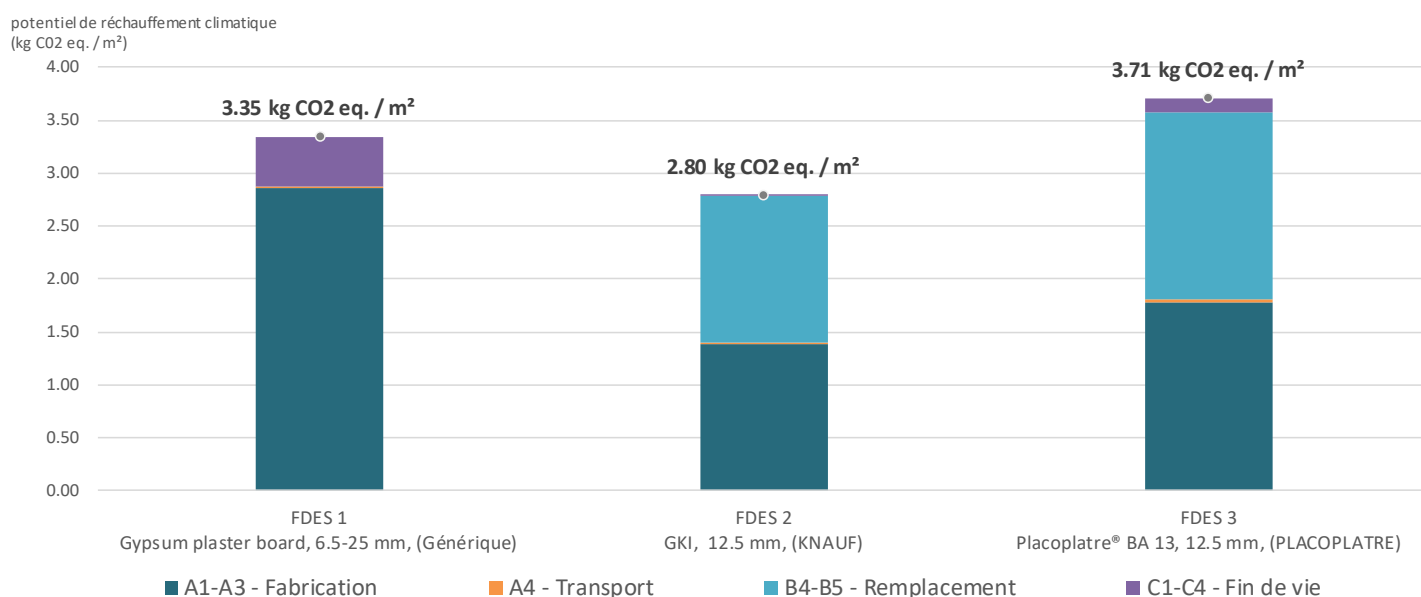


Figure 3.5-5 : Potentiel de réchauffement de plaques de plâtre pour l'assignation à 1m² de surface d'une FDES générique, d'une FDES de produit Knauf et pour une FDES de produit Placoplatre

Il convient de préciser le lieu de fabrication des matériaux ou produits génériques. Par nature, ces FDES génériques n'indiquent pas de pays de fabrication particulier. Le mix énergétique utilisé pour la fabrication du produit n'est pas renseigné. La méthode de localisation de la fabrication des matériaux est utilisée. (One Click LCA, 2022). Elle permet d'utiliser le mix énergétique du pays de production du matériau pour la consommation d'énergie utilisée lors de la fabrication du matériau. Pour l'unique matériau générique, le mix énergétique spécifié pour la fabrication est le mix énergétique français.

3.5.6.2 Modules A4-A5

Le module A4 explicite les émissions liées au transport des matériaux sur le site de construction. Le référencement explicite dans la FDES n'est pas obligatoire ((EN 15804 :2012 + A2 :2019). La Table 3.5-1 propose un aperçu des valeurs indiquées dans la FDES d'un système de doublage de murs.

Table 3.5-1 : Liste des hypothèses pour le calcul de module A4 pour le système de doublage Optima proposé par Saint Gobain – Isover

Paramètre	Valeur
Type de combustible et consommation du véhicule ou type de véhicule utilisé pour le transport, par exemple camion sur longue distance, bateau, etc.	Camion avec une charge utile de 24 t, consommation de diesel de 38 litres pour 100 km
Distance moyenne jusqu'au chantier	Variable selon les différents composants : - 768 km pour les éléments métalliques - 720 km pour les appuis - 460 km pour la laine minérale - 213 km pour les plaques de plâtres
Utilisation de la capacité (incluant les retours à vide)	100 % de la capacité en volume 30 % de retours à vide
Densité du produit transporté	Variable selon le composant
Coefficient d'utilisation de la capacité volumique	Coefficient = 1, sauf pour laine minérale >1

Plusieurs hypothèses sont disponibles en cas de non référencement du module A4 dans la FDES. Le transport jusqu'au site de construction est possible via :

- Livraison par bateau porte-conteneur
- Livraison du béton par camion mélangeuse à béton de capacité de 8m³ rempli à 50% ou 100%
- Livraison par camionnette de livraison de 1.2T remplie à 50% ou 100%
- Livraison par camion et remorque de capacité de 40 tonnes rempli à 50% ou 100%
- Livraison par vols internationaux
- Etc.

Dans ce travail, toutes les FDES renseignent les informations relatives au mode d'acheminement sur le site de construction. Le béton est acheminé par camion mélangeuse de 8m³ rempli à 100%. Les autres matériaux et produits de construction sont livrés par camion à combinaison de remorques de 40T (comme le permet la législation française sur la circulation des poids lourds). Leur taux de remplissage est de 100%.

Enfin, le module A5 concerne des impacts pendant la phase de chantier. Il s'agit de quantifier les émissions produites par la consommation et le processus d'assemblage et de construction du bâtiment. Les énergies consommées ainsi que la quantité de déchets produits pendant les travaux de construction doivent être quantifiés pour bénéficier de l'évaluation. Pour évaluer ce module, différents éléments de la conception doivent être pris en compte selon la norme EN 15978 (2011), tels que :

- Le scénario de construction,
- Le scénario de déconstruction / démolitions des ouvrages existants,
- La mise en place et le démantèlement d'ouvrages temporaires pour les installations de chantier ;
- La consommation d'énergie pendant la construction (électricité pour le chantier, la production de chaleur pendant le chantier, la consommation de carburant pour le chantier et pour les machines, etc.)
- La consommation d'eau pendant la phase de chantier ;
- Le processus de gestion des déchets générés ;
- La production, le transport et la gestion des produits et matériaux perdus pendant le processus de construction.

Les documents récupérés lors de la collecte des données ainsi que les documents communiqués par les concepteurs ne disposent pas de ces informations. Les plans d'ouvrages exécutés n'exposent pas les hypothèses de scénarios de chantier, les quantités d'énergie consommées ni les méthodes de traitement des déchets. Ce module ne sera donc pas évalué dans ce travail.

3.5.6.3 Modules B1-B7

Les modules B1 à B7 correspondent à la phase d'utilisation et d'entretien du bâtiment, de la livraison et la mise à disposition des usagers jusqu'à la démolition du bâtiment. Il s'agit de la phase du cycle de vie la plus longue, puisqu'elle s'étend sur toute la durée de vie du bâtiment. Les différents modules permettent de tenir compte des émissions produites par l'utilisation et l'entretien du bâtiment. Ces émissions peuvent être regroupées en 3 grandes catégories (Schyns, 2021) :

- Les émissions « passives » de substances provoquées par l'usure ou la dégradation à cause de l'environnement des matériaux mis en œuvre telles que l'évaporation de solvants dans l'air ou l'émission de substances par la façade ou le toit du bâtiment (couvertes par le module B1) ;
- Les émissions liées aux opérations de maintenance du bâtiment ou de matériaux et produits du bâtiment, telles que son entretien et nettoyage grâce à des agents chimiques, le remplacement de produits ou matériaux arrivant à la fin de leur cycle de vie et les impacts sur l'environnement de ces remplacements (couvertes par les modules B2 à B5) ;
- Les émissions dues aux consommations d'eau et d'énergie du bâtiment pour le confort des usagers, couvertes par les modules B6 et B7. Il s'agit de l'énergie consommée par les systèmes techniques du bâtiment assurant le chauffage, l'alimentation en eau chaude sanitaire, la climatisation, la ventilation, l'éclairage ainsi que l'énergie auxiliaire consommée par les pompes, par la régulation et l'automatisation. La norme EN 15978 impose aussi par le module B7 de considérer la consommation en eau du bâtiment, en ce compris l'eau potable, l'eau d'assainissement, l'eau chaude sanitaire, l'irrigation, l'eau pour les systèmes HVAC et toute autre eau consommée par de systèmes intégrés au bâtiment tels que des fontaines piscines et sauna.

Les modules B1 à B7 sont intégrés et pris en compte dans le travail. Pour le module de remplacement B4, la démarche suivante a été menée. Les FDES renseignées dans l'étape de sélection des données environnementales de produits ou matériaux et leur assignation aux éléments de modélisation sont réalisées suivant la norme EN15084+A2 (2019). Le standard européen indique que l'unité fonctionnelle d'un produit doit être spécifiée dans sa FDES. Ainsi chaque produit ou matériaux assigné dispose des informations suivantes :

- La liste des produits ou groupes de produits couverts par l'unité fonctionnelle
- Les propriétés clés du produits (type d'utilisation, caractéristiques techniques)

- Les caractéristiques de performances minimales à respecter sur la période couverte par l'unité fonctionnelle ;
- La période de l'unité fonctionnelle, et spécifiquement « si l'unité fonctionnelle utilise une période de référence différente de la durée de vie de référence du bâtiment, elle doit être indiquée en tant qu'information technique » (EN 15804+A2, 2019).

La FDES permet d'établir, pour un produit donné, son ACV et quantifier les impacts sur l'environnement. Les modules couverts par les FDES sont répartis suivant les modules A1-A3, A4-A5, B1-B7, C1-C4 et le module D. Ces modules sont identiques et couvrent les mêmes frontières que la norme EN 15978. Les FDES renseignent par ailleurs la Durée de Vie de Référence (DVR) du produit concerné. Il s'agit de la période pendant laquelle le matériau ou produit assure les caractéristiques techniques définies par l'unité fonctionnelle dans le cadre d'une utilisation normale. Elle correspond à la durée de service du produit.

L'importance de durée de service est conséquente, puisqu'elle va conditionner la fréquence de remplacement et de maintenance des matériaux, et ainsi impacter les résultats de l'analyse du cycle de vie.

Certains indicateurs de l'ACV peuvent directement être impacté par le choix de cette fréquence de remplacement. Une étude de Grant et al. (2014) montre que pour l'indicateur d'impact sur le réchauffement climatique (GWP), les résultats en termes d'émissions de CO₂ équivalent (en kg CO₂ eq.) peuvent varier de 50% entre une période de remplacement fixe de 50 ans et le modèle proposé par Athena Sustainable Materials Institute (Athena). Cette variation conséquente portant sur les murs avec du bardage bois peut être expliquée par les différentes opérations incluses dans les 2 différents modèles, à savoir des réparations mineurs ou majeures, ou des remplacements majeurs pour le modèle proposé par Athena, ou seulement la prise en compte d'opération de remplacement majeur proposé par le modèle de période de service fixe de 50 ans. (Grant et al., 2014)

La durée de service d'un produit dans l'analyse du cycle de vie à l'échelle du bâtiment correspond à la DVR du produit renseigné dans la FDES. Dans ce travail, cette donnée est donc introduite automatiquement lors de l'assignation d'une FDES à un élément modélisé. Elle permet de quantifier les produits ou matériaux qui devront faire l'objet d'un remplacement au cours de la vie du bâtiment. La Table 3.5-2 synthétise les différentes durées de service considérées dans ce travail.

Table 3.5-2 : Durée de service considérées pour les différents systèmes

Type de matériau/produit	Durée de service
Matériaux d'isolation	50 ans
Système de murs intérieurs	50 ans
Revêtements bois extérieurs	50 ans
Revêtements métalliques extérieurs	100 ans
Revêtement de toiture métallique	50 ans
Système d'ossatures bois	50 ans
Béton	100 ans
Portes intérieures et Fenêtres	30 ans
Portes extérieures	35 ans
Panneaux solaires	30 ans

Pour permettre à ce travail d'évaluer au plus proches les modules B6 et B7, une recherche documentaire a été menée pour chiffrer les besoins en eau et en énergie pendant l'utilisation du bâtiment.

Les données énergétiques émanent de l'observatoire des performances énergétiques (OPE, Ministère de la cohésion des territoires). L'arrêté du 9 Décembre 2021 indique que tout bâtiment neuf construit en France fait l'objet d'une simulation de ses besoins en énergie. Ces informations sont compilées dans un récapitulatif standardisé d'étude énergétique et thermique (fichier RSET). La Table 3.5-3 récapitule les données d'entrée pour les consommations énergétiques.

Table 3.5-3 : Extrait du récapitulatif standardisé d'étude énergétique et thermique

Type de travaux	Bâtiments neufs
Nombre de logements	23
Nombre d'occupants	43
Surface RT [m ²]	1655
Générateur principal de chauffage	Convecteurs électriques, Panneaux rayonnants électriques
Générateur principal d'ECS	Chauffe-eau thermodynamique électrique sur air extrait
Générateur principal de refroidissement	Sans
Énergie chauffage	Electricité
Énergie ECS	Electricité
Type d'émetteurs principaux de chauffage	Convecteur électrique
Cep [kWhEP/[m ² .an]]	9.4
Production d'électricité d'origine photovoltaïque [kWhEP/[m ² .an]]	43.6
Production d'électricité par cogénération [kWhEP/[m ² .an]]	0

L'observatoire des performances énergétiques ne donne cependant pas d'informations quant à la quantité d'eau consommée. La réglementation française n'exige pas de calculer les consommations en eau sur le cycle de vie du bâtiment. Une hypothèse doit donc être formulée pour calculer ces quantités sur le cycle de vie (Ministère de la transition écologique et al., 2022).

Différentes études montrent que la consommation en eau d'un foyer est grandement influencée par des facteurs socio-économiques et géographiques (Montginoul et al., 2013 ; Peuportier et al., 2013). La consommation d'eau d'un adulte peut varier de 35 m³/an à plus de 65 m³/an, et la consommation d'un enfant se situe aux alentours de 20 m³/an. Les hypothèses de calcul pour la consommation en eau d'un foyer sont donc volontairement choisies dans la moyenne haute de ces résultats, afin de ne pas sous-estimer les impacts sur l'environnements. La Table 3.5-4 constitue les données d'entrée pour la consommation d'eau du bâtiment, avec une consommation de 55 m³/an pour les adultes et 20 m³/an pour les enfants.

Table 3.5-4 : Calculs de consommation d'eau par années

Typologie de logement	Nombre de logement	Nombre d'adulte	Nombre d'enfants	Consommation eau
T2	13	2	0	1430 m ³ /an
T3	10	2	1	1300 m ³ /an
Total	23	46	10	2730 m ³ /an

Selon ce calcul, les données d'entrée pour la consommation en eau sur le module B7 sont de 2730 m³/an.

3.5.6.4 Modules C1-C4

Ces modules décrivent le scénario de fin de vie pour le bâtiment. Selon EN15978 (2012), la phase de fin de vie commence quand le bâtiment « est mis hors service et ne doit plus être utilisé ». Ce sont les scénarios de fin de vie des matériaux qui déterminent comment le bâtiment sera déconstruit ou démolit. Ces scénarios sont définis dans les FDES suivant la norme EN 15804+A2 (2019). Les modules C1, C2 et C4 cadrent les frontières des processus de démolition ou déconstruction, de transport vers le site de traitement ou de stockage, et de la gestion de l'élimination hors site, calculant toutes les charges sur l'environnement produites lors de l'élimination finale des déchets (incinération, neutralisation, enfouissement, etc.).

Le module C3 traite du traitement des déchets en vue de leur réutilisation, de la récupération ou du recyclage. Il liste 4 conditions pour que les matériaux déconstruits ne soient pas considérés comme des déchets et peuvent être réutilisés :

- Le matériau est récupéré et réutilisé
- L'existence d'une demande est identifiée par une valeur économique pour ce matériau (rachats de matières, etc.)
- Le matériau répond à des caractéristiques techniques et respecte les normes applicables aux produits
- L'utilisation du matériau n'entraîne pas des impacts globaux négatifs sur l'environnement ou la santé humaine.

Les scénarios considérés sont indiqués par les fabricants de produit dans la FDES relative au produit. La Table 3.5-5 donne un aperçu des hypothèses de calcul du module C1 pour la FDES d'un système de doublage de murs.

Table 3.5-5 : Liste des hypothèses pour le calcul de module C1 pour le système de doublage Optima proposé par Saint Gobain – Isover

Paramètre	Valeur
Processus de collecte spécifié par type	Collecte avec les déchets de construction mélangés en vue d'un enfouissement, et pour certains composants, d'un recyclage : - 5% pour les plaques de plâtre - 95% pour les déchets métalliques
Hypothèses pour l'élaboration de scénarios (par exemple transport)	Pour la déconstruction, les consommations d'énergie suivantes ont été prises en compte : - 0,011 kWh d'électricité (selon le mix français) pour la déconstruction du système - 0,018 litre de diesel pour le chargement des déchets

D'une manière générale, les scénarios de fin de vie suivent les recommandations de DGNB International (2014) (p.21) (One click LCA, 2021). Les différents scénarios sont disponibles dans la Table 3.5-6.

Table 3.5-6 : Scénarios considérés pour les modules C3 et C4 en fonction des matériaux (table issue de *One Click LCA, 2021*)

Material group	Material group	Materials included	C3 – C4, waste processing and landfilling	D, recycling benefits
Mineral building materials	Recycling for groundworks	Concrete, Cement, Bricks, Porcelain, Plaster, Clay products, Stone, Ceramics, Asphalt	C3: Construction waste preparation for recycling	Recycling benefit from replacing the primary gravel
Metals	Metal preparation and recycling	Aluminium, Steel, Stainless steel, Galvanized steel, Copper coated, Copper uncoated, Brass, Zinc, Lead	C3: Metal waste preparation	Recycling benefits for replacing virgin metal
Biobased materials with a heating value	Incineration and energy recovery	Wood, Wood products	C3: Construction waste incineration for energy recovery	Recovered energy (replacing average energy production)
Other materials with a heating value	Incineration and energy recovery	Plastics	C3: Construction waste incineration for energy recovery	Recovered energy (replacing average energy production)
Other materials that can be landfilled in construction waste site	Disposal / landfilling of inert material	Coatings, Synthetic materials, Panels and boards, Insulating materials, Glass, Window and façade components	Disposal of inert construction waste	-

3.5.6.5 Module D

Le dernier module de l'analyse du cycle de vie concerne le module D, qui prend en compte les avantages et les charges hors de la frontière du système considéré. Il permet de quantifier les bénéfices résultants de la réutilisation, du recyclage ou de la récupération d'énergie des flux de déchets ou de matériaux sortant du système, à la fin du cycle de vie et après le module C. Il prend aussi en compte les bénéfices issus de la production d'énergie générée par le bâtiment. L'intégration de ce module à une étude permet de réaliser une étude du berceau au berceau « from cradle to cradle ».

L'étendue de ce travail ne concerne pas ce module puisque l'étude est réalisée du berceau à la tombe.

3.5.7 Sélection des données environnementales

La sélection des données environnementales est la phase critique du travail. Elle correspond à l'assignation aux éléments modélisés des produits et matériaux correspondants, au travers des FDES. Une attention particulière doit être portée à l'unité fonctionnelle identifiée dans la FDES. Le point 3.5.6 montre que les résultats de la plupart des modules du cycle de vie sont basés sur cette assignation.

Les FDES sont réalisées suivant la norme EN15084+A2 (2019). Le standard européen spécifie que l'unité fonctionnelle d'un produit doit être spécifié dans sa FDES. Ainsi chaque produit ou matériaux assigné dispose des informations suivantes :

- La liste des produits ou groupes de produits couverts par l'unité fonctionnelle
- Les propriétés clés du produits (type d'utilisation, caractéristiques techniques)
- Les caractéristiques de performances minimales à respecter sur la période couverte par l'unité fonctionnelle ;

• Description de l'unité fonctionnelle et du système

Description de l'unité fonctionnelle :

En considérant les fonctions de ce système, l'unité fonctionnelle peut être décrite ainsi :

Réaliser l'isolation d'au moins 3,15 K.m²/W et le parement des murs par l'intérieur sur 1 m² de paroi.

Figure 3.5-6 : Description de l'unité fonctionnelle pour le système de doublage Optima proposé par Saint Gobain – Isover (Saint-Gobain Isover, 2019)

La sélection des données environnementales s'est donc faite suivant plusieurs critères. Tout d'abord concernant la nature des composants modélisés. Tous les matériaux assignés (isolants, revêtements extérieurs, matériaux structurels, etc.) ont d'abord une fonction à respecter et des caractéristiques précises. Les fonctions considérées sont si l'élément modélisé est un mur, une dalle, un pan de toiture, ou une fenêtre. Les FDES sélectionnées représentent donc des matériaux ou produits assurant ces fonctions.

Ensuite, le critère de choix secondaire pour la sélection des données environnementales concerne les caractéristiques techniques des matériaux. Les FDES assignées aux éléments modélisés ont des matériaux et épaisseurs identiques. Ainsi une épaisseur d'isolation en laine de verre de 170 mm d'épaisseur modélisée est assignée à un produit laine de verre de 170 mm d'épaisseur. Ce critère de choix est important à signaler dans la mesure où l'assignation pourrait se faire au regard de la surface et au regard non de la surface ET de l'épaisseur. Pour les structures verticales et horizontales en béton, l'assignation d'une FDES prenant en compte une paroi de béton et ses armatures est réalisée. De même pour les systèmes de cloisons intérieures, la modélisation ne détaille pas les montants métalliques de structure de cloison ou de doublage, la FDES assignée à ce type de mur a donc été choisie pour que ces éléments soient inclus dans l'ACV.

3.5.8 Calcul des indicateurs

3.5.8.1 Choix des indicateurs de l'ACV

L'analyse du cycle de vie est un processus visant à évaluer les impacts sur l'environnement et les ressources d'une construction. Ainsi, cette analyse conduit à la production de plusieurs indicateurs regroupés en catégories d'impacts. C'est la norme EN 15978 qui définit les catégories d'impacts. Il existe 3 catégories regroupant :

- Les impacts environnementaux ;
- Les indicateurs suivants l'utilisation des ressources ;
- Les indicateurs dérivants environnementales complémentaires ;

Ce travail s'inscrivant dans le cadre de la réglementation environnementale 2020, la seule la catégorie d'impacts sur l'environnement sera étudiée dans ce travail. Cette catégorie regroupe plusieurs indicateurs :

- Le potentiel de réchauffement climatique (GWP), mesuré en kg eq. CO₂ ;
- Le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP, mesuré en kg eq. CFC 11 ;
- Le potentiel d'acidification des sols et de l'eau (AP), mesuré en kg eq. SO₂⁻ ;
- Le potentiel d'eutrophisation (EP), mesuré en kg eq. (PO₄)³⁻ ;
- Le potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique (POCP), mesuré en kg eq. Éthylène ;
- Le potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments (ADP_éléments), mesuré en kg eq. Sb ;
- Le potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles (ADP_combustibles fossiles), mesuré en MJ - valeur calorifique nette.

Un indicateur en particulier sera étudié, il s'agit du potentiel de réchauffement climatique. En effet, c'est le seul indicateur de l'ACV suivant la norme EN 15978 qui fait l'objet de seuils à ne pas dépasser dans la RE2020.

Il est donc particulièrement pertinent de suivre cet indicateur pour l'inscription de ce travail dans un cadre réglementaire français. Cependant, les impacts des autres indicateurs ne sont pas à négliger, ils ne seront seulement pas l'objet d'analyses poussées.

D'autre part, ce travail suit aussi l'indicateur caractérisant la quantité de carbone biogénique stocké dans la conception. En effet, pour s'intéresser à un bâtiment faisant l'objet d'une conception bas carbone, il est intéressant de considérer cet indicateur pour pouvoir comparer différentes études entre elles. Cet indicateur est renseigné dans les FDES conformes à l'EN 15804+A2. La norme EN 16449 définit le mode de calcul de l'indicateur P_{CO2}.

3.5.8.2 Calcul de l'indicateur P_{CO_2}

Comme l'indique la norme EN 15804 relative aux déclarations environnementales des produits de la construction, le stockage de carbone biogénique dans les FDES est réalisé suivant la norme EN 16449. Il s'agit d'une méthode permettant de quantifier la masse de dioxyde de carbone atmosphérique en se basant sur le carbone biogénique du bois.

La méthode de calcul pour le bois brut est décrite suivant l'équation (3.5-1)

$$P_{CO_2} = \frac{44}{12} \times cf \times \frac{\rho_\omega \times V_\omega}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (3.5-1)$$

Où

P_{CO_2} est le carbone biogénique oxydé sous forme de dioxyde de carbone émis par le système de produits dans l'atmosphère (par exemple, utilisation comme source d'énergie en fin de vie) (en kg)

cf est la fraction carbonée de la biomasse ligneuse (masse anhydre), valeur par défaut de 0.5

ω est la teneur en humidité du produit (par exemple, 12%)

ρ_ω est la masse volumique de la biomasse ligneuse du produit, à cette teneur en humidité (en kg/m^3)

V_ω est le volume du produit en bois massif, à cette teneur en humidité (en kg/m^3)

Pour les produits dérivés du bois, la teneur volumique en bois

$$V_\omega = VP \times \text{pourcentage de bois}$$

VP est le volume brut du produit dérivé du bois

3.5.8.3 Calcul de l'indicateur GWP

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation du potentiel de réchauffement climatique. Hoxha et al. (2020) décrivent 3 principales méthodes :

- L'approche statique 0/0, ou « approche neutre en carbone » repose sur l'hypothèse que les émissions de CO_2 des matériaux biosourcés à la fin de leur cycle de vie est à l'équilibre avec la captation de CO_2 de la biomasse concernée pendant leur cycle de croissance. Cette méthode ne permet donc pas de prendre en compte le stockage du carbone biogénique dans les matériaux. La Figure 3.5-7 illustre cette méthode.

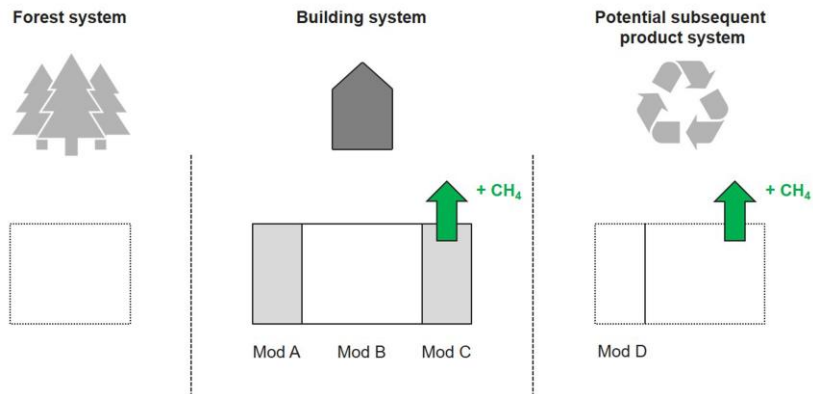


Figure 3.5-7 : Approche statique 0/0, les pointillés représentent des systèmes en dehors de la frontière par l'ACV du bâtiment (Hoxha et al., 2020)

- L'approche statique -1/+1 consiste à identifier tous les flux de carbone biogénique pendant le cycle de vie du bâtiment. Selon cette méthode, la captation (-1) et l'émission de carbone biogénique (+1), ainsi que tous les transferts de carbone biogénique entre différents systèmes sont considérés. A la fin du cycle de vie du bâtiment, le carbone biogénique est soit relâché dans l'atmosphère (en cas d'incinération, de compostage ou d'enfouissement), ou transféré à un autre système si le matériau est recyclé. Dans les deux cas l'émission de GES est constatée dans le module C. L'avantage de cette méthode par rapport à la précédente est qu'elle permet de constater des différents flux de carbone biogénique entre les systèmes, et donc de quantifier le carbone biogénique stocké par le bâtiment. La Figure 3.5-8 permet d'illustrer cette méthode.

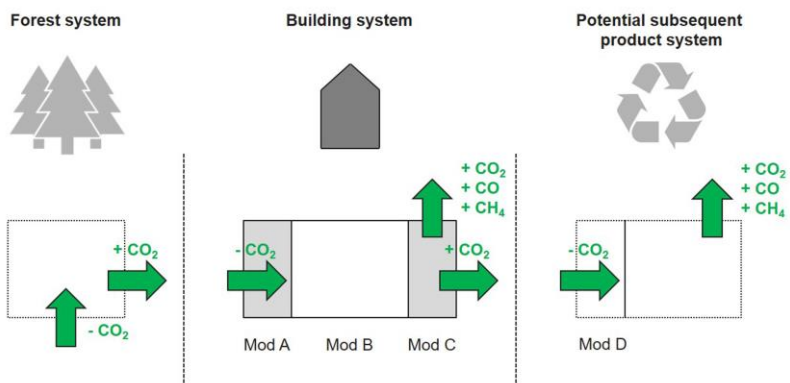


Figure 3.5-8 : Approche statique -1/+1, les pointillés représentent des systèmes en dehors de la frontière par l'ACV du bâtiment (Hoxha et al., 2020)

- La troisième méthode concerne l'évaluation dynamique de l'indicateur du potentiel de réchauffement climatique. Ce modèle développé par Levasseur et al. (2010) est en partie utilisée pour réaliser l'ACV dans le cadre de la RE2020. La Figure 3.5-9 décrit cette méthode, en considérant que le bois pousse avant d'être récolté pour être utilisé.

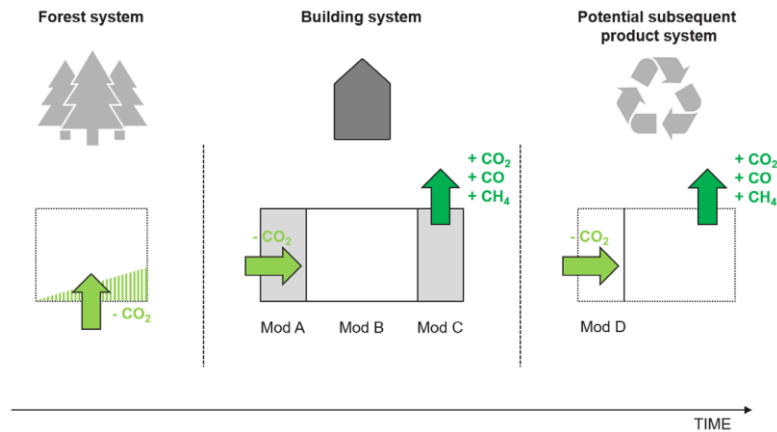


Figure 3.5-9: Approche dynamique où le bois est récolté avant d'être utilisé, les pointillés représentent des systèmes en dehors de la frontière par l'ACV du bâtiment (Hoxha et al., 2020)

Dans la norme EN 15804+A2, l'approche recommandée pour le calcul du carbone biogénique est l'approche -1/+1. La norme EN 16485 traite quant à elle de l'ACV des produits dérivés du bois, et comment intégrer au cycle de vie des éléments dérivés de bois le carbone biogénique. Ce travail se base donc sur l'approche -1/+1.

L'impact sur le potentiel de réchauffement climatique est alors calculé, selon cette méthode, selon l'équation (3.5-2) suivante :

$$\begin{aligned}
 GW_{-1/+1} = & \sum_t (g_{CO_2, fossil}(t) + g_{CO_2, biogenic}(t)) * GWP_{CO_2} + \sum_t (g_{CH_4, fossil}(t) + g_{CH_4, biogenic}(t)) * GWP_{CH_4} \\
 & + \sum_t (g_{CO, fossil}(t) + g_{CO, biogenic}(t)) * GWP_{CO} + \sum_t (g_{N_2O, fossil}(t) + g_{N_2O, biogenic}(t)) * GWP_{N_2O} \quad (3.5-2)
 \end{aligned}$$

Où

t année de l'émission du GES

$g_{GES, fossil}(t)$ émission du GES fossile à l'année t

$g_{CO_2, biogenic}(t)$ différence entre l'émission et la captation de CO_2 biogénique à l'année t

$g_{GES, biogenic}(t)$ émission du GES biogénique à l'année t

GWP_{GES} facteur de conversion du GES

3.6 Logiciels utilisés pour le travail

3.6.1 Modélisation de la géométrie

Dans ce travail, la modélisation 3D a été réalisée grâce aux outils du Building Information Modeling (BIM). Le logiciel utilisé pour la modélisation est le logiciel Autodesk Revit 2021. La modélisation a été réalisée sur base des informations fournies par les concepteurs du projet, en consultant les plans d'ouvrages exécutés dans leur version finale, ainsi que les carnets de détails.

3.6.2 Analyse du cycle de vie

Comme énoncé précédemment, le logiciel utilisé pour l'évaluation des impacts environnementaux est le logiciel One Click LCA développé par la société Bionova Ltd. Ce logiciel est compatible avec la réalisation d'une ACV selon la norme EN 15978. Outre l'évaluation des impacts environnementaux via l'ACV, One Click LCA permet aussi la réalisation d'analyse des coûts sur le cycle de vie. Ce module n'est cependant pas utilisé dans cette étude. Le logiciel One Click LCA permet l'accès aux bases de données environnementales de différents pays d'Europe, notamment l'accès à la base de données INIES utilisée pour la sélection des données environnementales dans ce travail. Les FDES contenues dans la base de données INIES sont directement consultables via One Click LCA, ce qui garantit la validité des données au regard de la norme EN15804+A2. La force du logiciel One Click LCA résulte dans son respect des normes européennes pour la réalisation d'ACV, dans la possibilité d'accès aux nombreuses bases de données pour la sélection des FDES, dans la grande efficacité concernant l'implémentation de données et la rapidité de calcul. De plus il est possible de directement comparer des matériaux d'une même catégorie, afin de sélectionner une FDES aux données environnementales les plus pertinentes pour l'ACV (voir Figure 3.5-5), ou de chercher à réduire les impacts environnementaux au regard des performances environnementales pour la réduction du potentiel de réchauffement climatique (Petrovic et al., 2019).

Dernièrement, la comparaison et la mise en forme des résultats est réalisée avec le logiciel de bureautique Microsoft Excel.

3.7 Calibration et validation du modèle

La calibration et la validation du modèle est une étape à ne pas négliger dans tout processus d'évaluation ou de simulation. Les étapes pour réaliser la calibration et la validation des résultats ont été les suivantes :

- Vérifier la complétude et la qualité des données fournies par le modèle
- Evaluer la robustesse des données d'entrée par l'évaluation répétée du modèle
- Utiliser les outils mis à disposition par One Click LCA pour évaluer les 2 précédents points.

One Click LCA met à disposition 2 outils pour évaluer la qualité des données fournies par le modèle. Le premier outil est le vérificateur de plausibilité. Cet outil permet de vérifier la plausibilité des données d'entrée de tous les matériaux de construction utilisés pour l'analyse du cycle de vie du bâtiment. Le second outil est le vérificateur de complétude, qui détermine si tous les éléments pour le calcul des impacts environnementaux sont renseignés pour réaliser l'ACV selon la norme EN 15978 (Al-Obaidy et al., 2022). En pratique, le logiciel d'ACV One Click LCA compare les données récoltées à un ensemble de données disponibles pour les conceptions de même type. La conception renseignée dans ce travail dispose de 3 principales caractéristiques :

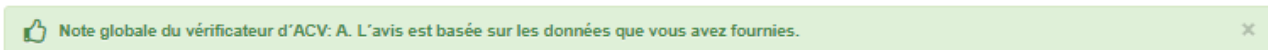
- La surface de plancher du projet
- Le type de construction : nouvelle construction d'un bâtiment entier
- Le type de techniques de construction : trame de structure en béton

Le vérificateur de plausibilité compare ensuite les données d'entrées à des intervalles selon 23 critères, tels que la masse des éléments de structure renseignée (en kg/m²), la masse de finitions renseignée (en kg/m²), la masse totale du projet (en kg/m²), etc. La Table 3.7-1 montre les 10 premiers critères de vérification, et leur validation.

Table 3.7-1 : Dix premiers critères du vérificateur de plausibilité et avec leurs données d'entrée

No.	Check description	Project value	Threshold value	Unit	Validé
1	Structure mass credible	946.224	greater than 150	kg/m ²	Yes
2	Finishes mass credible	24.039	greater than 10	kg/m ²	Yes
3	Embodied carbon credible	312.545	150 - 1000	kg CO ₂ e/m ²	Yes
4	Project mass credible	1132.015	300 - 3500	kg/m ²	Yes
5	Replacements share credible	56.064	10 - 100	%	Yes
6	Too few materials to be credible	35	greater than 20	nr.	Yes
7	Too dominant single material	23.604	less than 50	%	Yes
8	Project mass credible (concrete frame)	971.812	800 - 1900	kg/m ²	Yes
9	Concrete mass credible (concrete frame)	842.793	700 - 1650	kg/m ²	Yes
10	Insulation mass credible	5.927	1 - 21	kg/m ²	Yes

L'outil de vérificateur de plausibilité donne une évaluation globale sous forme d'une note. Dans ce travail, la note de plausibilité des résultats est A (Figure 3.7-1)



Note globale du vérificateur d'ACV: A

Le vérificateur d'ACV vérifie la plausibilité des impacts intégrés. Ces résultats reflètent la plausibilité du projet 1655.0 m² de type nouvelle construction, bâtiment entier avec le type de trame structure en béton et dont la portée est fondations et sous-structures, structure et enceinte, finitions et autres matériaux, installations et systèmes. Pour éditer ces paramètres, ouvrez la requête Paramètre d'ACV. Le résultat est censé indiquer la probabilité; mais des exceptions peuvent se produire.

Figure 3.7-1 : Note globale de la modélisation (issue de One Click LCA)

D'autre part, pour permettre l'atteinte de ces résultats, des itérations d'importation successives ont été réalisées (Figure 3.7-2).

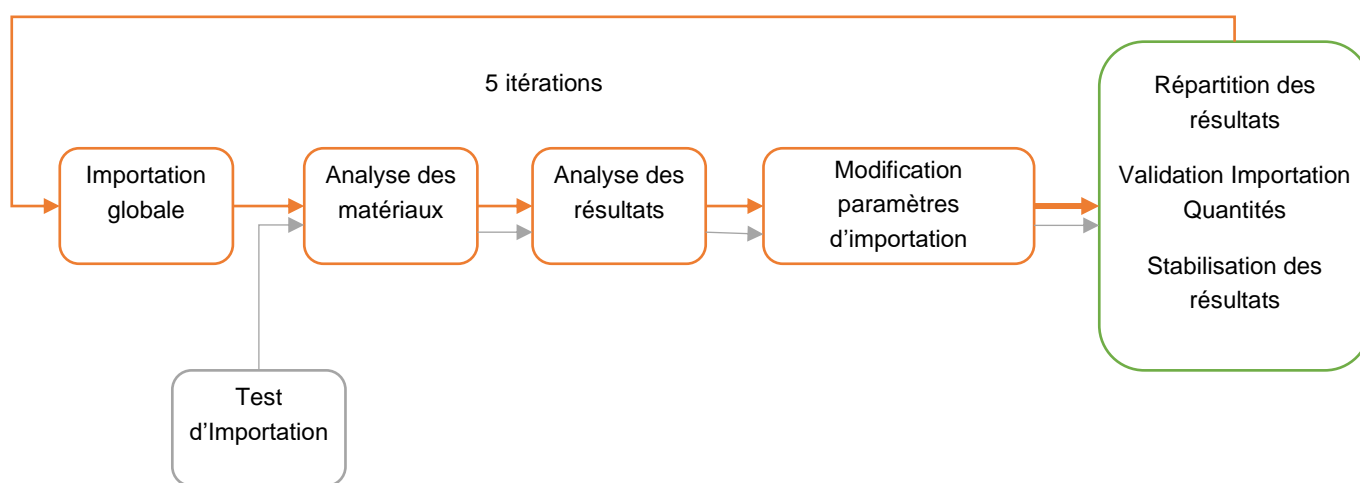


Figure 3.7-2 : Processus itératif pour la calibration

Ce processus itératif a permis de tester la robustesse de l'importation au regard de toutes les hypothèses émises dans les parties précédentes. Elle permet aussi de réaliser quelles données sont filtrées lors des phases d'importation dans One Click LCA. Cette étape du travail permet aussi de réaliser une meilleure classification lot par lot des matériaux de construction, pour obtenir une meilleure répartition des résultats.

Sur la Figure 3.7-2, la première étape consiste à réaliser une première importation. Elle est réalisée avec un modèle de calibration test reprenant toutes les composantes principales de la modélisation (en gris). Cette étape permet de s'assurer de la bonne importation des matériaux, de sélectionner les données environnementales associées à une petite quantité de données d'entrée, de s'assurer de l'utilisation des bonnes unités fonctionnelles des FDES, et de repérer les potentiels doublons à l'importation.

Par la suite, 4 imports successifs sont réalisés (en orange), suivants les règles d'importation et les points de vigilances identifiés à la première étape. A l'issue de chaque importation, les critères listés dans l'encadré vert sont évalués.

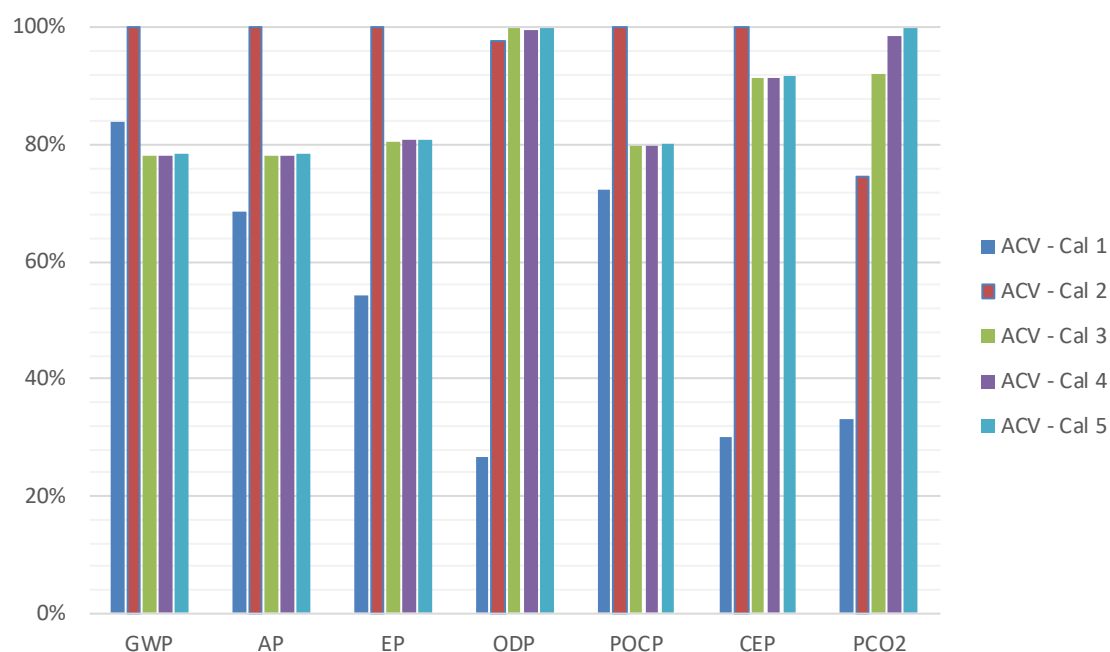


Figure 3.7-3 : contribution aux indicateurs relatifs des différents imports pour la calibration

La Figure 3.7-3 illustre les résultats des 5 itérations successives, nommées respectivement ACV - Cal 1 à ACV - Cal 5, pour les indicateurs suivis. Les résultats des premières itérations par rapport au potentiel de réchauffement climatique GWP sont stationnaires pour les paramètres d'importation des ACV nommées « Cal 3 » à « Cal 5 ». D'autre part, 5 itérations furent nécessaire car c'est entre la 4^{ème} et la 5^{ème} itération que l'autre indicateur clé suivi, le stockage de carbone biogénique P_{CO2} varie de moins de 5%.

La stabilisation des résultats sur les itérations 4 et 5 illustre la robustesse de l'importation des données d'entrée. Tous les indicateurs sur ces 2 dernières importations ont une variation relative inférieure à 5%. Le modèle, ainsi que les paramètres d'importations sont donc répliquables à 5% près, ce qui permet la réalisation d'une analyse de la sensibilité.

3.8 Analyse de la sensibilité

L'analyse de la sensibilité peut être définie comme une méthode permettant de déterminer comment l'incertitude dans le calcul des résultats est influencée par les données d'entrée. Cette méthode permet en d'autres termes d'évaluer la sensibilité des résultats par rapport au modèle. Concernant cette étude, l'analyse de la sensibilité consiste à faire varier les données d'entrées. Le taux de variation est choisi par l'auteur de ce travail, selon son appréciation sur la confiance de la modélisation.

Tout d'abord, l'analyse consiste à traquer les « Hotspots ». Cette étape consiste à traquer les matériaux les plus influents sur les indicateurs suivis, et d'identifier les matériaux les plus représentés dans l'inventaire sur le cycle de vie.

Une fois que les matériaux sont identifiés, la seconde étape consiste à établir une liste des matériaux à faire varier pour évaluer la sensibilité du modèle. Ces options alternatives avec des variations de la quantité de matériaux font l'objet d'une nouvelle ACV. Comme vu à la partie précédente, la robustesse à l'étape d'importation et de sélection des données environnementales permet la réalisation d'une analyse de la sensibilité, sans que les paramètres d'importation n'aient d'influences conséquentes sur la nature des résultats.

3.9 Limites de l'étude

Ce chapitre est destiné à récapituler les différentes limites posées dans ce travail. Tout d'abord, ce travail se concentre sur l'analyse du cycle de vie d'un bâtiment, en utilisant le logiciel de modélisation Autodesk Revit 2021 et logiciel d'analyse du cycle de vie One click LCA. Bien que ce dernier puisse permettre la réalisation d'une analyse des coûts sur le cycle de vie, le présent travail n'intègre pas ce type d'étude.

L'analyse du cycle de vie est réalisée selon la norme EN 15978, et la sélection des données est réalisée via un accès à la base de données INIES permis par One Click LCA. Les FDES renseignées pour la sélection des données environnementales sont établies selon la norme EN 15804+A2. La méthode d'ACV est une méthode statique, et considère le carbone biogénique suivant l'approche -1/+1.

Le présent travail considère les modules A1 à A3, le module A4, les modules B1 à B7 et les modules C1 à C3. Les modules traités dans cette étude permettent une analyse partielle du cycle de vie du bâtiment cas d'étude du berceau à la tombe (« cradle to grave »), car le module A5 n'est pas intégré à l'évaluation des performances environnementales, par manque de données et par une trop grande proportion d'hypothèses à prendre pour le considérer. Le module D n'est pas intégré à l'étude.

Le module B6 traite de la consommation d'énergies au cours du cycle de vie du bâtiment. Les données d'entrée utilisées sont issues de l'observatoire de la performance énergétique (OPE), et sont spécifique au bâtiment cas d'étude. L'OPE répertorie tous les fichiers Récapitulatifs Standardisés des Etudes Thermiques (RSET). L'identifiant unique du bâtiment cas d'étude a permis de trouver ce fichier dans la base de données, et d'utiliser les informations comme données d'entrée du module B6. Ce travail n'inclut donc pas la simulation énergétique du bâtiment, les données énergétiques sont issues de sources externes.

Le module B7 traite de la consommation en eau du bâtiment au cours de son cycle de vie. Les données d'entrées utilisées sont des hypothèses formulées sur base la base d'études similaires trouvées dans la littérature.

Les indicateurs précisément suivi sont le potentiel de réchauffement climatique GWP et le stockage en carbone biogénique de la conception P_{CO_2} .

La calibration du modèle est réalisée sans recours à l'utilisation de données externes. L'évaluation de la robustesse de la modélisation est réalisée en suivant la variation relatives des indicateurs de l'ACV en fonction de 5 itérations d'importations successives.

Les résultats font l'objet d'une analyse de la sensibilité. Elle consiste à faire varier les quantités des données d'entrée pour constater des variations sur les résultats en sortie.

4. Présentation du cas d'étude

4.1 Représentativité de l'archétype

Pour inscrire ce travail dans le cadre de l'analyse du cycle de vie en France, le lieu du cas d'étude a été choisi d'abord sur le territoire français. Ce bâtiment fera donc l'objet d'une analyse de cycle de vie, et se doit donc d'être représentatif d'une certaine typologie. Cependant, la littérature propose peu d'étude sur les logements collectifs.

Schyns (2021) développe une méthodologie et propose une étude d'ACV sur un bâtiment d'infrastructure sportives. Helmus (2020) étudie un bâtiment de bureau sur son cycle de vie, et analyse différents scénarios de rénovation. Soust-Verdaguer et al. (2016) et Reiter (2020) proposent une revue de littérature sur les analyses du cycle de vie concernant les maisons unifamiliales.

Dans ces différentes études, un manque à combler existe concernant les analyses de cycle de vie des logements collectifs. D'autre part, il est intéressant de proposer une méthodologie concernant les bâtiments de logements collectifs pour amorcer la discussion de l'empreinte carbone et du stockage de carbone biogénique de ces bâtiments.

Afin d'évaluer les performances environnementales d'un bâtiment, le cas d'étude doit faire l'objet d'une conception réfléchi sur la performance énergétique et la performance environnementale. Ainsi, les 3 cas d'études envisagés font partie de l'expérimentation E+/C-. Ce choix garantit un niveau de performances énergétiques élevé ainsi qu'une considération des impacts environnementaux à la conception.

Le bâtiment de logement retenu est le projet Les Balconières (Figure 4.1-1 a.). Le projet a été conçu par le cabinet d'architecture Ad'Hoc Architecture (Leroy, 2021). Le projet concerne la réalisation de 2 bâtiments dans une zone résidentielle. L'un des 2 bâtiments est retenu et considéré comme cas d'étude. Le projet HBVS de Fareins fut aussi considéré dans la recherche d'un cas d'étude. Cependant, après prise de contact avec les concepteurs (Petitdemange, 2021), il s'avère que la très bonne compacité du bâtiment est à l'origine des bonnes performances énergétiques. D'autre part, la structure des murs et façades en béton rendaient impossible une analyse du carbone biogénique stocké dans la conception. Enfin le dernier projet considéré était le projet de logements sociaux passif La Madeleine. Cependant la disponibilité limitée des informations n'a pas rendu possible l'utilisation de ce projet (Coste, 2021).



Figure 4.1-1 : Cas d'études envisagés : De gauche à droite : a. Les Balconières (Leroy, 2021), b. HBVS Fareins (Petitdemange, 2021), c. La Madeleine (Coste, 2021)

4.2 Localisation

Le projet Les Balconnières développé par Ad'Hoc Architecture (Leroy, 2021) est situé dans la ville de Nantes en France. Nantes se situe dans l'ouest de la France, à proximité de l'océan Atlantique (voir Figure 4.2-1). La ville est dans le département de la Loire-Atlantique (44). Le climat caractérisant la localisation est un climat à composante de chauffage dominante (Eurostat, 2020). Les données climatiques caractérisant la ville de Nantes (44) sont de :

- 1601 HDD (sur une moyenne de 2016 à 2020) ;
- 51 CDD (sur une moyenne de 2016 à 2020).

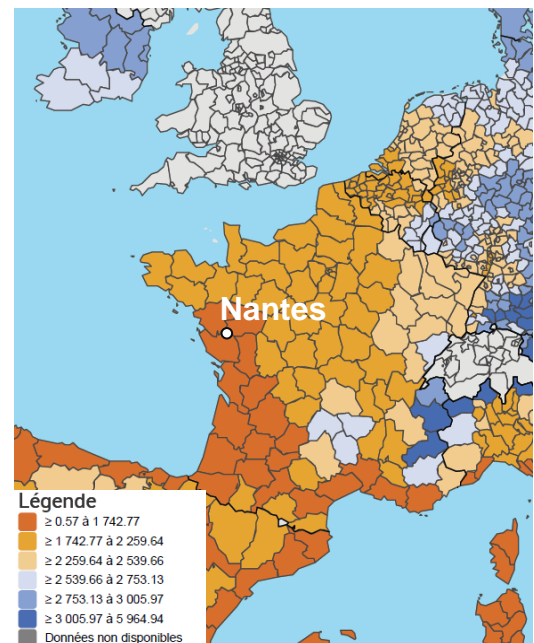


Figure 4.2-1 : Carte du nombre de degrés jour en Europe (Eurostat, 2020)

4.3 Description générale

Le projet Les balconnières concerne la réalisation de 2 bâtiments accolés à une résidence existante. La Figure 4.3-1 montre la situation des lieux. Le projet de réalisation de 35 logements est scindé en un bâtiment Nord et un bâtiment Sud. Le bâtiment Sud est mitoyen au premier ensemble de résidence sur toute sa façade Est. Le bâtiment Nord est mitoyen avec un second ensemble de logements que sur une partie de sa façade Est.

Les 2 bâtiments ont un fonctionnement indépendant. Ils communiquent par l'intermédiaire d'un espace vert extérieur ou des surfaces de potagers sont mises à disposition de l'ensemble des logements de la résidence. Des noues sont conçues pour créer des surfaces d'infiltration des eaux de pluies. Une partie du parking existant sur la parcelle est remplacée par un espace vert, à proximité du bâtiment sud. Le bâtiment Sud est conçu avec un parking sous-terrain en sous-sol.

Tous les plans, coupes et détails techniques fournis par Leroy (2021) sont des documents d'ouvrages exécutés (DOE). Il s'agit du dossier de plans du projet tel que construit fournis en phase de consultation des entreprises (phase DCE).

L'analyse du cycle de vie portera sur le bâtiment Nord, du fait de sa plus faible mitoyenneté et de son fonctionnement indépendant de la résidence existante. Le bâtiment Nord possède aussi plus de logements que le bâtiment Sud. Le bâtiment Sud n'est donc pas compris dans le cadre de l'analyse du cycle de vie.



Figure 4.3-1 : Plan masse du projet les Balconnières à Nantes (44) (Leroy, 2021).

4.4 Description du cas d'étude

Le cas d'étude dans le cadre de ce travail est donc le bâtiment Nord du projet les Balconnières. Le cas d'étude se développe sur 5 niveaux du RDC au R+4. La barre de logements propose 23 appartements répartis sur ces niveaux.

La Figure 4.4-1 est le plan de rez-de-chaussée (RDC) du bâtiment Nord (fourni par Leroy, 2021). Le niveau RDC dispose d'un hall d'accueil, de 2 logements type 3 (T3) avec 2 chambres et de 1 logement type 2 (T2) avec une chambre séparée de la pièce de vie. Ces logements disposent d'une terrasse extérieure privative orientée au Sud. Un accès depuis le hall d'entrée à une coursive extérieure sur la façade Nord permet à chaque appartement. Le RDC dispose aussi d'une zone de locaux techniques, juxtaposée à la circulation verticale en escalier en colimaçon permettant l'accès aux étages.

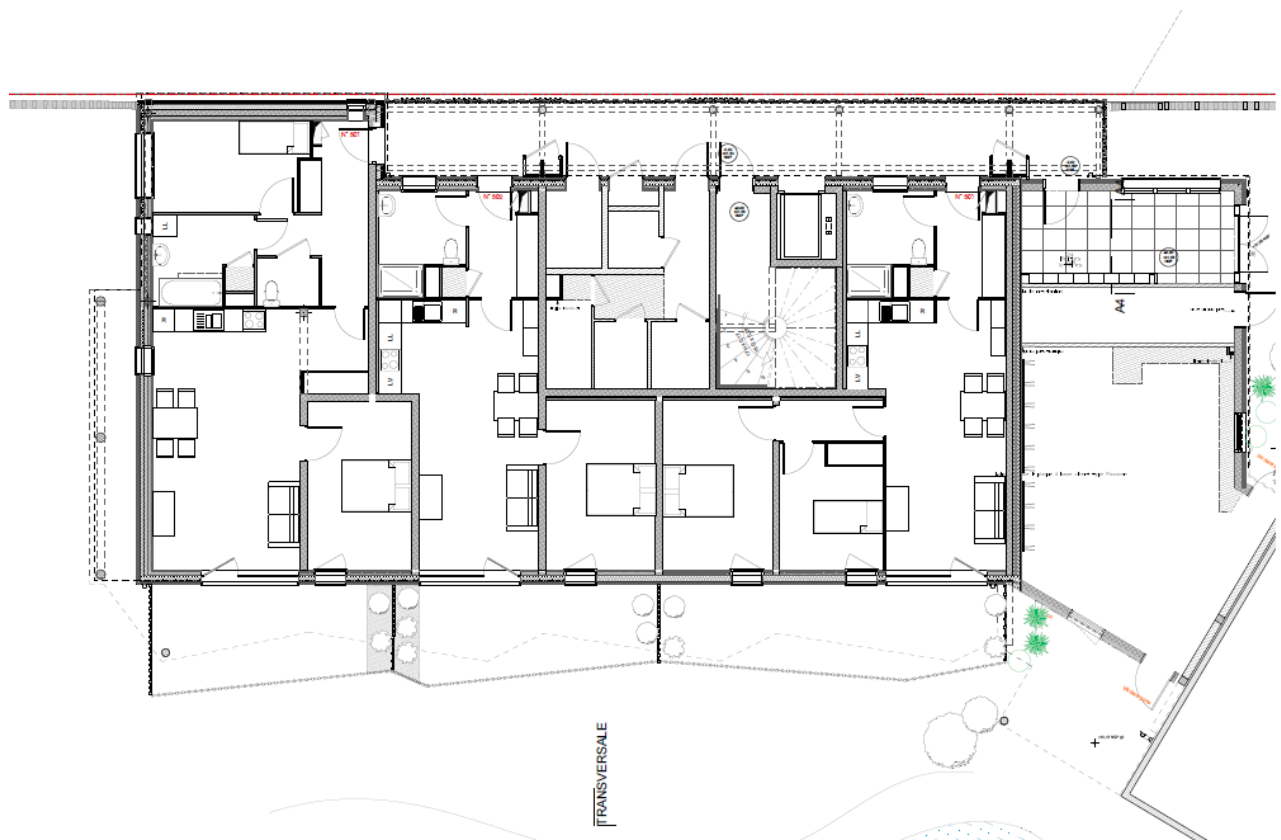


Figure 4.4-1 : Plan de rez-de-chaussée du cas d'étude (Leroy, 2021)

La façade Nord du bâtiment donne directement à rue, par l'intermédiaire de la coursive, ce qui permet d'introduire une zone tampon entre la circulation de l'avenue de Josselin et l'accès aux logements.

Les étages supérieurs sont en encorbellement sur le RDC à l'ouest. Ils sont accessibles via la coursive extérieure au Nord. Les étages supérieurs disposent de 3 appartements T2 et de 2 appartements T3, chacun avec l'accès à un balcon en façade Sud.

4.5 Description de la structure

Le cas d'étude possède une structure mixte. Le bâtiment est réalisé sur des fondations en semelles filantes. La structure portante des planchers est en béton. Les planchers reposent sur des voiles de refend en béton. Les façades sont portées par les planchers. Elles sont réalisées en caisson à ossature bois avec isolation thermique entre montant. Une isolation thermique par l'intérieur ITI réduit les ponts thermiques. Certains murs de façades sont porteurs et sont en béton isolé par l'extérieur. Le bardage est en bois ou zinc.

La toiture repose sur une charpente en bois. La charpente est fixée sur les murs de refend. (Cruard, 2020).

La Figure 4.5-1 montre que la coursive extérieure en façade nord possède une structure en bois. La coursive est auto portante. L'ossature porteuse en bois est désolidarisée de la structure principale du bâtiment, ce qui limite les ponts thermiques.

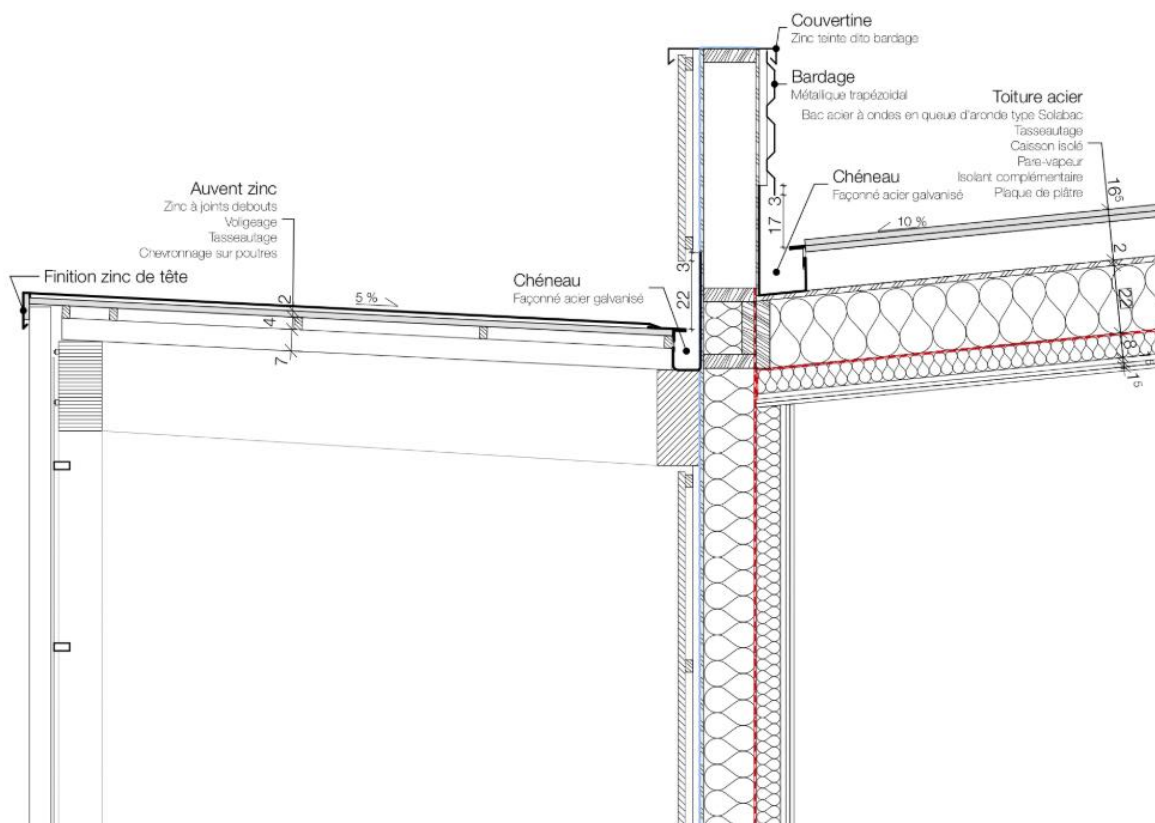


Figure 4.5-1 : Coupe de détail sur la façade Nord : la coursive et toiture du cas d'étude (Leroy, 2021)

Les dalles des balcons reposent sur une structure poteaux-poutres en bois. Des poutres de contreventement en acier portent l'extrémité des balcons. Elles sont connectées à la façade par l'intermédiaire de tirants métallique, induisant des ponts thermiques ponctuels. La Figure 4.5-2 illustre aussi le principe de liaison entre la façade à ossature bois et les planchers en béton.

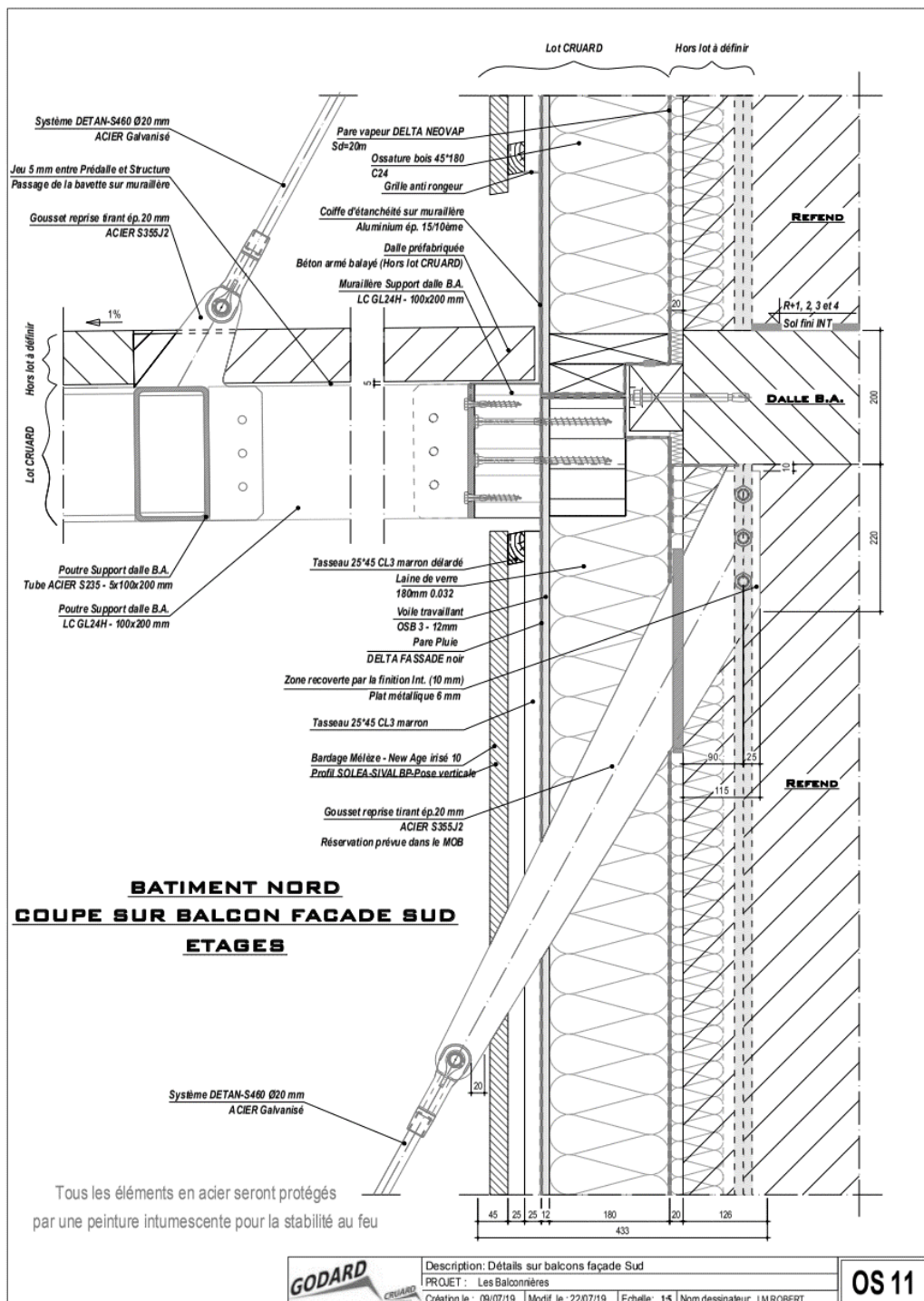


Figure 4.5-2 : Coupe de détail de la façade sud : Structure des balcons (document communiqué par Leroy, 2019)²

² Document disponible à l'adresse suivante : https://www.fibois-paysdelaloire.fr/wp-content/uploads/2019/11/4_adhoc_lesbalconnieres.pdf

Les parois des façades en ossature bois sont isolées en laine de verre. Les caissons d'ossature bois ont des épaisseurs de 150 mm ou 120 mm. Ils sont préfabriqués en usine. Les murs en béton sont aussi isolés avec de la laine de verre. D'une manière générale, tous les murs reçoivent en plus de leur isolation une épaisseur de doublage intérieur de 80 mm, pour réaliser l'isolation par l'intérieur. La Table 4.5-1 récapitule les caractéristiques principales des parois du projet. La couverture de la toiture est réalisée en bac acier, permettant l'installation de panneaux solaires.

Table 4.5-1 : Récapitulatif des parois du cas d'étude

Type de paroi	Composition de paroi	U value (W/m ² K)
Mur extérieur Façade N/S	Ossature bois double couche isolation laine de verre 150+80 mm Bardage bois ou zinc	0.099
Mur extérieur pignon E	Ossature bois triple couche Isolation laine de verre 120+100+80 mm Bardage bois ou zinc	0.087
Mur extérieur pignon N	Mur Béton ITE isolation laine de verre 150+80 mm Bardage bois ou zinc	0.114
Mur extérieur non isolé	Mur BA 180 mm Bardage bois ou zinc	0.597
Refend intérieur isolé	Mur Béton ITE isolation rigide 200 mm	0.166
Refend intérieur doublé	Mur Béton ITI isolation Laine de verre 80mm	0.358
Refend intérieur	Mur BA 180 mm	4.715
Cloison	Placo + Isolation laine de verre	0.792
Dalle RDC et planchers isolés	Dalle BA 200 mm Isolation rigide 130 mm	0.276
Plancher Balcon et Coursive	Dalle BA 80 mm	13.075
Planchers intermédiaires	Dalle BA 200 mm	5.23
Toitures en Bac acier	Toiture Bac Acier Ossature bois Isolation Laine de verre 220 + 80 mm	0.066
Fenêtres	Châssis mixtes bois-aluminium	1.3
Portes extérieures	Portes en bois isolée	1.2

Toutes les parois vitrées sont décrites sur les plans de façade (Leroy, 2021) comme des fenêtres à châssis mixte bois-aluminium. Leur coefficient de transfert thermique U est de 1.3 W/m².K. Les portes extérieures d'accès au logement sont des portes en bois avec un coefficient de transfert thermique U = 1.2 W/m².K. Les portes intérieures sont en bois sur huisseries en bois.

4.6 Techniques spéciales

Le point 3.5.6.3 de la méthodologie explique que l'observatoire de la performance énergétique (OPE) en France permet l'accès aux fichiers récapitulatifs standardisés d'études thermiques et environnementales (RSET). L'identifiant unique de chaque opération en France permet de retrouver dans des bases les données réglementaires à fournir lors d'un dépôt de permis de construire. Ce fichier permet donc de connaître les besoins du futur bâtiment construit, ainsi que certaines caractéristiques concernant les techniques spéciales.

Table 4.6-1 : Extrait du Récapitulatif Standardisé d'Etude Thermique du cas d'étude (RSET)

Type de travaux	Bâtiments neufs
Nombre de logements	23
Nombre d'occupants	43
Surface RT [m ²]	1655
Générateur principal de chauffage	Convecteurs électriques, Panneaux rayonnants électriques
Générateur principal d'ECS	Chauffe-eau thermodynamique électrique sur air extrait
Générateur principal de refroidissement	Sans
Énergie chauffage	Electricité
Énergie ECS	Electricité
Type d'émetteurs principaux de chauffage	Convecteur électrique
Cep [kWhEP/[m ² .an]]	9.4
Production d'électricité d'origine photovoltaïque [kWhEP/[m ² .an]]	43.6
Production d'électricité par cogénération [kWhEP/[m ² .an]]	0

La Table 4.5-1 est un extrait du fichier RSET du cas d'étude identifié dans la base de données de l'OPE.

Le bâtiment assure les fonctions de chauffage par des convecteurs électriques. L'eau chaude sanitaire est produite via un système n'utilisant que de l'électricité. La seule énergie primaire consommée par le bâtiment est l'électricité. Le cas d'étude ne consomme ni gaz naturel, ni fioul. Le bâtiment n'a pas recours à un réseau de chaleur urbain pour se chauffer.

Le cas d'étude ne dispose pas de système de climatisation.

Le fichier RSET renseigne aussi que la ventilation utilisée dans le bâtiment est de type simple flux sans récupération de chaleur.

La toiture du bâtiment est équipée d'une surface de 209 m² de panneaux solaires en toiture. Le bâtiment ne dispose d'aucun système de stockage d'électricité.

Enfin, la nature et le type d'éclairage ne sont pas renseignés.

5. Résultats

5.1 Inventaire sur le cycle de vie

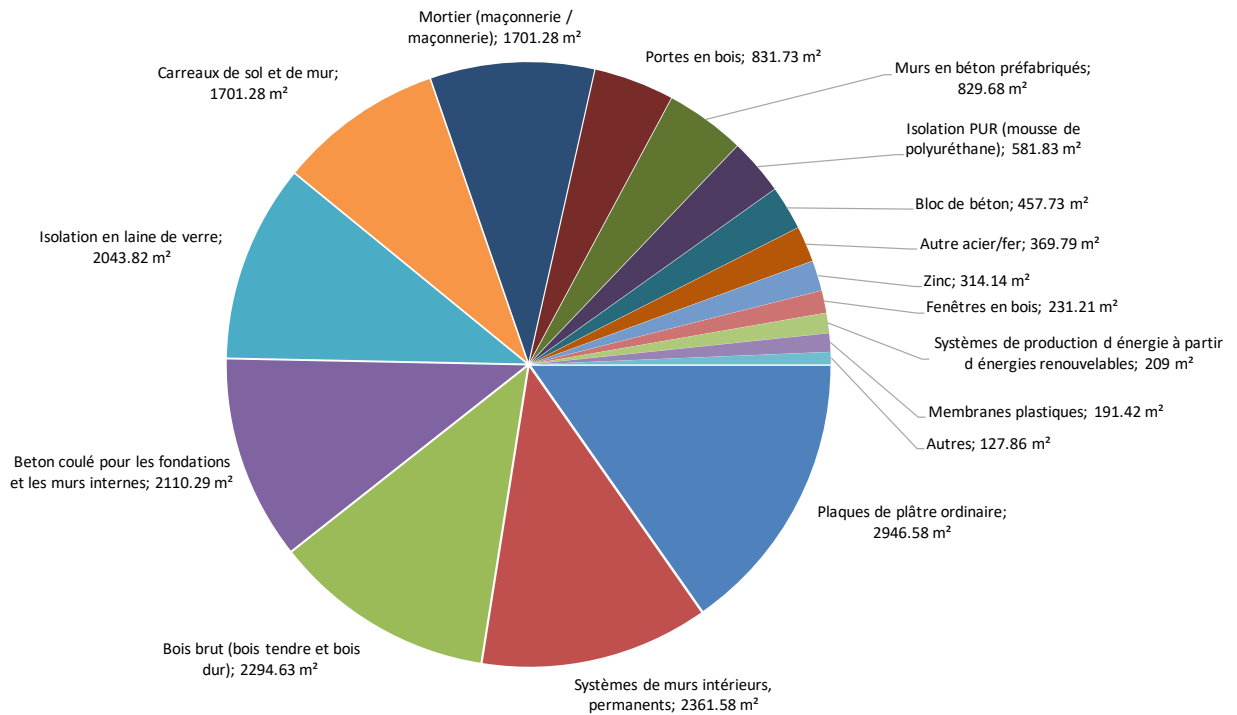


Figure 5.1-1 : Inventaire sur le cycle de vie - données d'entrée en surface (m²)

La Figure 5.1-1 représente la répartition en pourcentage des données d'entrée introduites dans One Click LCA . Chaque quartier définit la proportion de chaque surface de matériaux dans le modèle. Il s'agit de l'inventaire sur le cycle de vie surfacique.

Tout d'abord, la répartition des résultats en différentes proportions des matériaux permet de souligner que les objectifs de la calibration sont bien remplis. En effet, la répartition est décroissante. Aucun matériaux n'est sur-représenté, les données d'entrées sont réparties en différentes surfaces de nature et d'utilisation différente. Le regroupement par lots pourra être exploité par la suite de l'exploitation des résultats.

L'inventaire sur le cycle de vie permet d'identifier les matériaux les plus représentés lors de l'importation des données d'entrée. Les données d'entrée des plaques de plâtres, des systèmes de murs intérieurs permanents et de la surface en bois brut représentent plus de 39% des inputs. Il est important d'identifier ces paramètres, car une faible variation de ces surfaces peut engendrer une grande variation des résultats.

Les plaques de plâtres et les systèmes de murs intérieurs permanents sont des données d'entrées associées respectivement aux produits plaques de plâtre en gypse

(données génériques), et système de cloisons intérieures acoustique développé par Saint-Gobain Isover. Ces FDES représentent des produits utilisant des produits plâtres. Notamment pour les systèmes de murs intérieurs, les cloisons acoustiques utilisent des matériaux très émissifs en CO₂, selon la pyramide des matériaux de construction (CINARK, 2019). En effet, les rails en aluminium utilisés dans ces types de cloison peuvent contribuer de façon significative au réchauffement climatique.

L'analyse de la sensibilité prendra donc en compte par la suite les 3 matériaux les plus représentés en terme de données d'entrée. Pour rappel, cette analyse de la sensibilité consiste à faire varier les données d'entrée, pour constater des variations sur les résultats de l'ACV. Les variations des données d'entrées sont déterminées sur base de la confiance de l'auteur dans la qualité de la modélisation et des éléments mentionnés.

Ainsi, les matériaux suivants et leur variations seront considérés dans l'analyse de la sensibilité :

- **Plaques de plâtre ordinaires : variation de $\pm 30\%$:**

Il s'agit de la première donnée surfacique d'entrée représentée, à la hauteur de plus de 2900 m². La surface correspond à 15% de l'inventaire sur le cycle de vie.

Le taux de variation de la surface de plaques de plâtres est de $\pm 30\%$ pour plusieurs raisons. Ce taux de variation permet de couvrir un risque de redondance des surfaces de plaques de plâtres utilisées pour les murs. En effet, les documents d'ouvrages exécutés du cas d'étude font état d'une épaisseur de 26 mm de plaques de plâtres dans les murs. Les FDES utilisées pour les systèmes de doublages ou de cloisons font état d'une épaisseur de 13 mm. Ces diverses sources de données peuvent conduire à des redondances, qui sont donc couvertes par ce fort taux de variation.

- **Système de murs intérieurs permanents : variation de $\pm 10\%$:**

Il s'agit de la seconde donnée surfacique d'entrée représentée, à hauteur de 2360 m². La surface correspond à 12% de l'inventaire sur le cycle de vie.

Le niveau de confiance de la modélisation est élevé. La modélisation de ces éléments ne peut conduire à des redondances ou de trop fortes variations. Cette variation permet néanmoins de couvrir des modifications mineures du partitionnement intérieur au cours de la conception.

- **Bois brut (bois tendre et bois dur) : variation de $\pm 20\%$:**

Il s'agit de la troisième donnée surfacique d'entrée représentée, à la hauteur de plus de 2300 m². La surface correspond à 12% de l'inventaire sur le cycle de vie.

Le niveau de confiance concernant les données d'entrée est relativement bon. Cependant, comme l'illustre le prochain titre, le bois brut est l'une des seules composantes biosourcées à exercer une action de stockage de carbone biogénique.

5.2 Résultats de l'analyse du cycle de vie

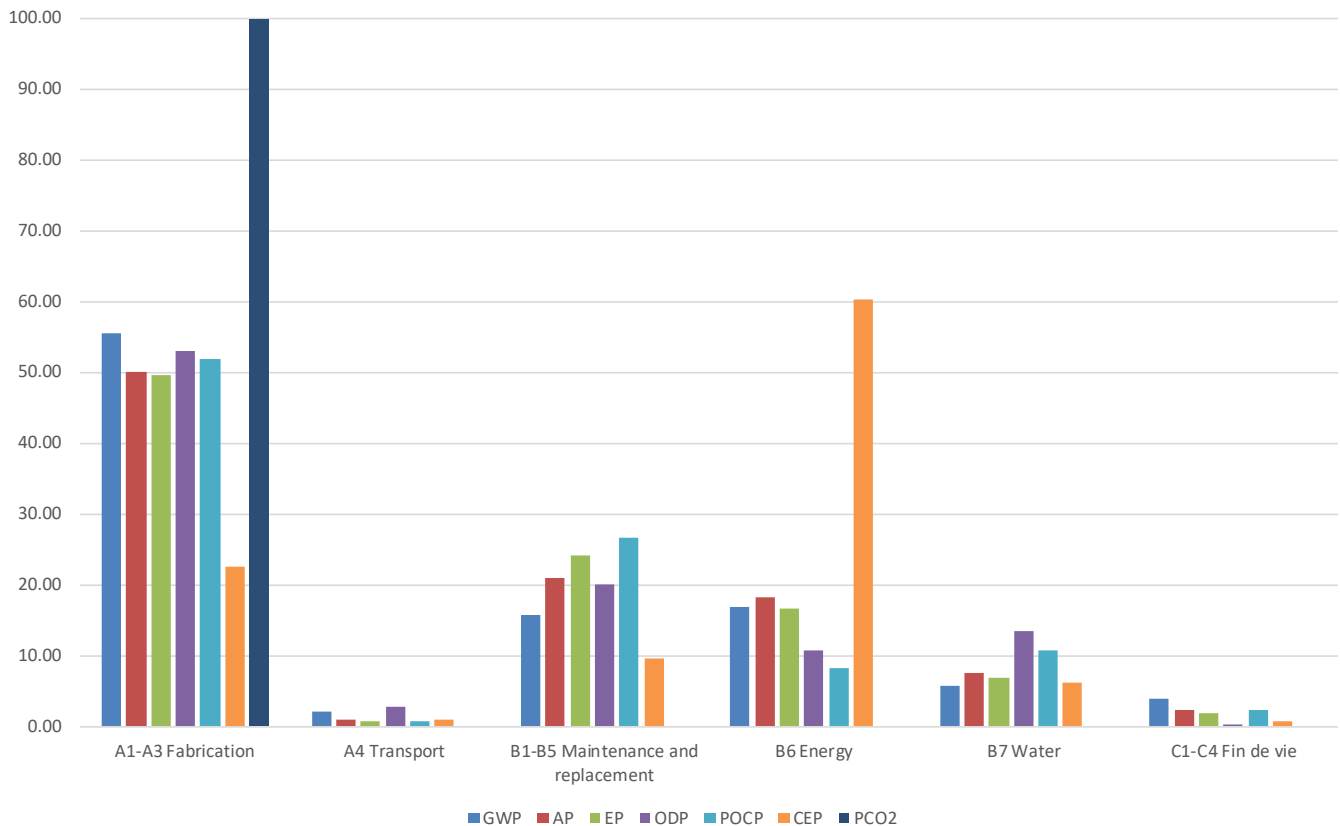


Figure 5.2-1 : Contribution des indicateurs sur les étapes du cycle de vie

La contribution des indicateurs sur l'ensemble des modules du cycle de vie est une manière de représenter la répartition des émissions et de l'impact sur l'environnement du bâtiment tout au long de son cycle de vie. La Figure 5.2-1 illustre cette répartition. L'étape de fabrication, prenant en compte les modules A1 à A3, contribue fortement aux impacts du bâtiment sur l'environnement, pour la plus grande partie des indicateurs. C'est à la construction du bâtiment que 55% potentiel de réchauffement climatique est réalisé. Les indicateurs AP, EP ODP et POCP (voir point 3.5.8.1), sont aussi réalisés à 50% au moment de la construction du bâtiment.

La contribution de la consommation en énergie primaire à la phase de fabrication est plus faible. Elle s'élève à 22.5% pour les modules A1 à A3. Cette différence avec les autres indicateurs vient du fait que la majeure partie des impacts sur l'environnement est réalisée lors de la phase d'utilisation du bâtiment, en relation avec la consommation d'électricité utilisée pour le chauffage et l'alimentation électrique des différents systèmes. Le module B6 représente effectivement 60% des impacts liés à la consommation d'énergie primaire.

Le stockage de carbone biogénique est évalué par l'indicateur PCO₂. Le stockage est réalisé à 100% lors de la phase de fabrication. D'autre part, les émissions liées à la phase de déconstruction pour le carbone biogénique ne sont pas présentes dans

les modules C1 à C4. Ces résultats s'expliquent par la méthode utilisée pour représenter le carbone biogénique dans la norme EN 15978. L'approche -1/+1 est en effet la méthode utilisée dans l'analyse du cycle de vie au regard de EN 15978. Dans cette approche, le carbone biogénique stocké par les matériaux biosourcés entre dans le système en négatif par l'intermédiaire d'économies (bénéfices) d'émissions de CO₂ (en kg eq. CO₂). Cette quantité de carbone est ensuite relâchée dans l'atmosphère sous forme d'émissions de CO₂, dans le module D (voir point 3.5.8.2). Les frontières de l'ACV de ce travail ne prenant pas en compte le module D, il est donc impossible de constater de la contribution des émissions liées au carbone biogénique dans le module D. Cela explique que l'intégralité de la contribution du carbone biogénique est réalisée à la construction.

La Figure 5.2-1 permet aussi de constater que les phases de transport des matériaux et produits de construction au site de construction (module A4) et de fin de vie du bâtiment (modules C1 à C4) contribuent faiblement aux impacts sur l'environnement. Les impacts environnementaux réalisés lors de ces 2 phases sont respectivement inférieurs à 2.7% et 3.8%.

Enfin, le potentiel de réchauffement climatique GWP est réalisé à 55% au moment de la fabrication. La contribution de la phase d'utilisation d'énergie représente effectivement une faible partie des émissions en kg eq. de CO₂ pour l'indicateur GWP. Elle est de seulement 17% sur la période d'utilisation de 50 ans. En effet, le cas d'étude est situé en France, et le mix énergétique utilisé pour l'ACV est celui de la France. Le système de chauffage du cas d'étude reposant à 100% sur l'utilisation de convecteurs électriques, ce travail utilise donc le mix énergétique français de l'électricité dans le module B6. La Figure 5.2-2 montre que 70% de l'électricité produite en France est d'origine nucléaire, et seulement 8% de l'électricité produite est d'origine fossile. La production d'électricité très décarbonée de la France explique la contribution peu élevée du module B6 aux émissions de CO₂.

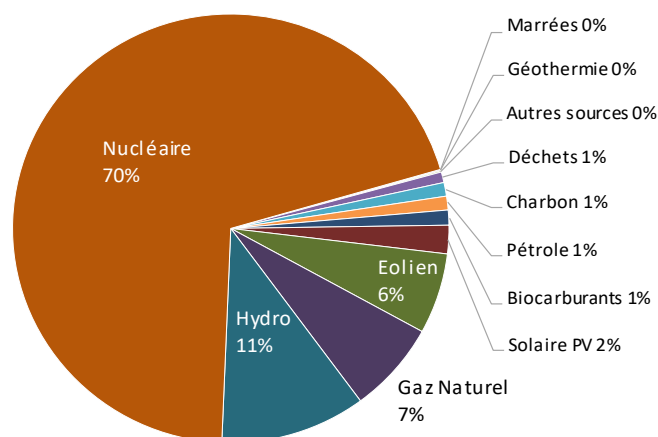


Figure 5.2-2 : mix énergétique de l'électricité produite en France (IEA, 2019)

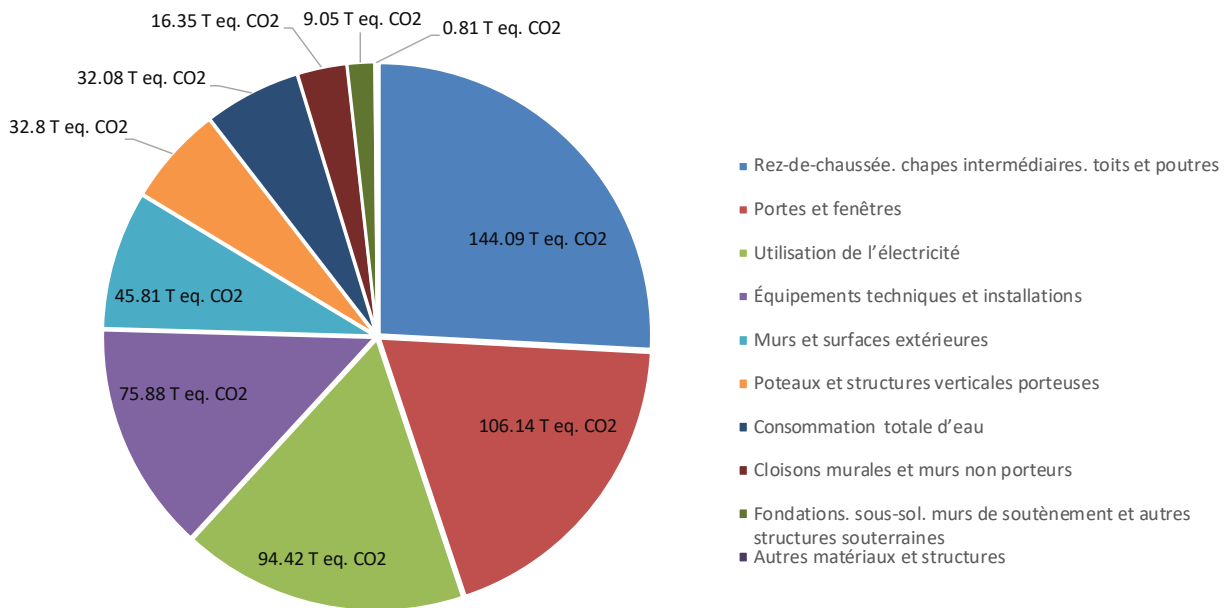


Figure 5.2-3 : Potentiel de réchauffement climatique par lot

La Figure 5.2-3 illustre la répartition par lot des quantités en kilogrammes d'équivalent de CO₂ émises tout au long du cycle de vie du bâtiment, pour l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique. Les résultats montrent que 144 T eq. CO₂ sont émises pour le lot concernant les surfaces horizontales (rez-de-chaussée, chapes et planchers intermédiaires, les toits et poutres). Ce lot contribue de façon significative au réchauffement climatique et représente plus de 26% des sources d'émissions d'équivalent de CO₂. Le second lot contribuant de manière significative au réchauffement climatique est le lot concernant les portes et fenêtres, avec plus de 106 T d'équivalent de CO₂ émises. Cela correspond à plus de 22% des émissions réalisées par le bâtiment sur son cycle de vie.

Ces résultats illustrent l'importance de ces lots lors de la conception. En phase préliminaires de conception, une importance particulière doit être portée par les concepteurs sur la nature des planchers en termes de techniques de construction, mais aussi sur la nature des portes et fenêtres du projet. Les concepteurs doivent garder à l'esprit que ces lots contribuent de façon significative au réchauffement climatique. La connaissance de cette information permet d'orienter les choix des phases préliminaires de conception vers d'autres systèmes de plancher que la classique dalle en béton armé, et considérer des techniques intégrant les structures en bois isolée entre solives.

D'autre part, la dimension des ouvertures et leur nombre doit faire l'objet de considérations dans les phases préliminaires de conception. Bien que la représentation surfacique des portes et fenêtres dans les données d'entrée soit minime (830 m² pour les portes en bois, seulement 230 m² pour les fenêtres selon la Figure 5.1-1), la présence de matériaux hautement émissifs tels que l'aluminium ou le verre implique une contribution significative au réchauffement climatique. La contribution élevée du lot portes et fenêtres peut être expliquée par la nature des châssis. Le cas d'étude fait l'objet de châssis mixte bois-aluminium. Ce choix permet d'un côté de préserver plus longtemps l'état des châssis. L'aluminium à l'extérieur permet de protéger le bois contre les intempéries, ce qui augmente la durée de service des fenêtres mixtes bois-alu de 5 ans par rapport aux châssis uniquement composés de bois. D'un autre point de vue, l'aluminium est catégorisé comme un matériau hautement émetteur de CO₂ dans la pyramide des matériaux (CINARK, 2019). Outre les volontés esthétiques des concepteurs, il faut donc aussi considérer la nature des châssis sur bases de l'entretien et des émissions de CO₂ à la fabrication.

L'utilisation de l'électricité joue aussi une part conséquente dans le potentiel de réchauffement climatique. Les émissions concernées sont à hauteur de 94 T d'équivalent de CO₂, ce qui représente une contribution de 17%. Bien que le mix énergétique de la France montre que la production d'électricité est faiblement d'origine fossile (voir Figure 5.2-2), les émissions de CO₂ associées à l'utilisation de l'électricité du bâtiment sont le 3ème facteur contribuant le plus au réchauffement.

Enfin, la Figure 5.2-3 montre que malgré grande la représentativité des cloisons murales et des murs non porteurs dans les données d'entrée, ce lot représente un faible impact sur le potentiel de réchauffement climatique. Ce lot ne représente que 3% des émissions produites par le bâtiment sur son cycle de vie. Ce résultat s'explique par la nature de ces parois de faibles épaisseurs. Le volume et la masse que représente ce lot dans l'intégralité du bâtiment est négligeable par rapport aux autres matériaux.

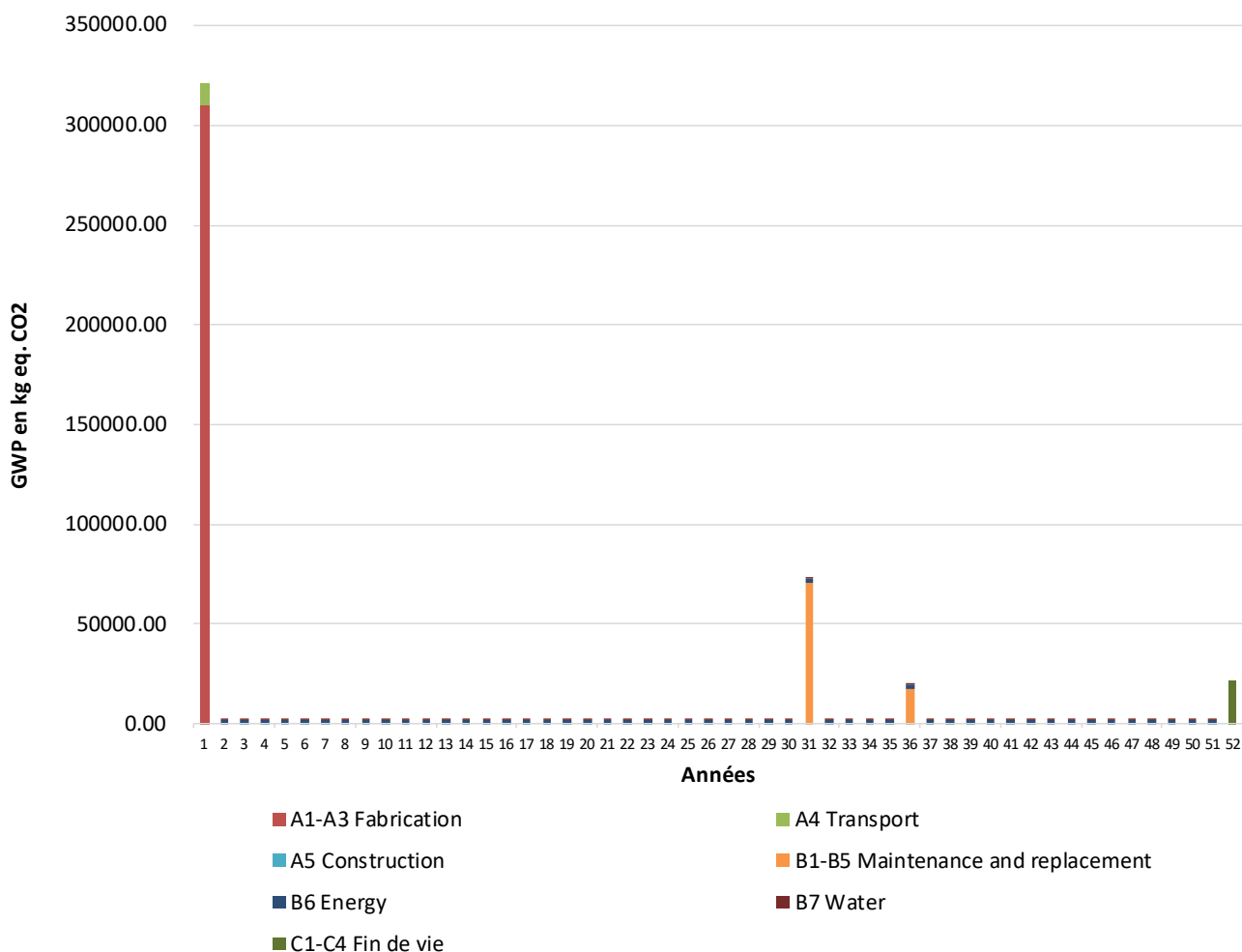


Figure 5.2-4 : Résultats par année pour GWP

La Figure 5.2-4 montre la répartition des émissions de CO₂ en kilogramme d'équivalent de CO₂ sur la durée de vie de 50 ans du bâtiment. Les consommations d'eau et d'électricité des modules B6 et B7 sont réparties sur 50 ans. Les modules B1 et B5 créent des émissions de CO₂ au bout de 30 et 35 ans. Ces résultats s'expliquent par les durées de service respectives des panneaux solaires et des portes et fenêtres.

Un biais principal est mis en évidence dans la Figure 5.2-4. Il concerne le choix de réaliser l'ACV du bâtiment sur 50 ans. Ce choix implique un seul remplacement des panneaux solaires sur la durée de vie du bâtiment. En milieu et fin de cycle de vie (au bout de 30 ans), la production solaire est réduite car les panneaux photovoltaïques arrivent en fin de vie et doivent être remplacés. Si l'ACV avait été réalisée sur 60 ans, la maintenance des panneaux par leur remplacement aurait été comptée 2 fois. Le bâtiment aurait été déconstruit au bout de 60 ans et le remplacement des panneaux solaires usés par des panneaux neufs aurait été vain. C'est une des raisons pour laquelle la plupart des études considèrent une durée de vie de 50 ans et pas 60 ans, car l'impact sur potentiel de réchauffement climatique de mise en place de nouveau système de panneaux solaire est compté dans le bilan de l'indicateur GWP, alors que bâtiment va être démantelé à l'année 61.

5.3 Identification des Hotspots

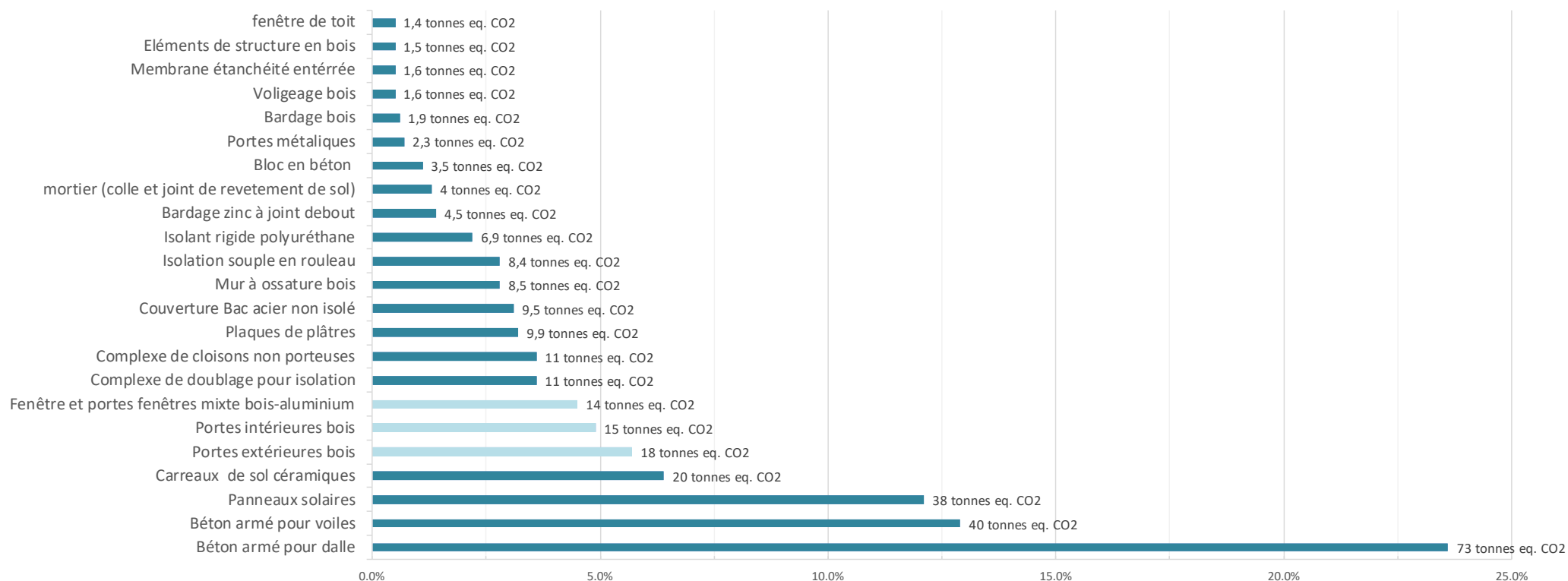


Figure 5.3-1 : Contribution au potentiel de réchauffement (GWP) climatique des différents matériaux

La Figure 5.3-1 illustre que le béton utilisé pour les dalles représente 73 T d'équivalent de CO₂. Cela représente 23% de la contribution. Le second matériau le plus influent sur l'indicateur GWP est le béton pour les murs et voiles, avec une contribution de 13%. Ces résultats illustrent que plus de 1/3 émissions totales de CO₂ sont dues à l'utilisation du béton comme matériaux de structure. D'autre part, un second poste influent est celui des menuiseries intérieures et extérieures, ce qui correspond aux résultats de la

Figure 5.2-3. Ces produits de construction (en bleu clair) émettent en cumulé 47 tonnes d'équivalent de CO₂. Finalement, la combinaison de ces deux postes représente 51% des émissions de CO₂. Ce graphique illustre aussi la grande contribution de l'installation d'une surface de panneaux solaires au réchauffement climatique. Les 38 tonnes d'équivalents de CO₂ produites illustrent la nécessité de prendre en compte les systèmes techniques lors de la réalisation d'une analyse du cycle de vie.

La Figure 5.3-1 permet donc d'identifier les matériaux contribuant le plus au réchauffement climatique. L'analyse de la sensibilité prendra en compte les deux catégories de matériaux les plus influents sur le potentiel de réchauffement climatique. En faisant varier la quantité de ces matériaux, l'analyse de la sensibilité permettra de quantifier leur influence sur les résultats. De la même manière que précédemment, les variations des données d'entrées sont choisies selon l'appréciation de l'auteur.

Les matériaux et produits suivants et leurs variations seront considérées :

- **Le béton pour les murs ou dalles : variation de $\pm 10\%$:**

Comme vu précédemment, le béton pour les murs et les dalles représente le premier contributeur le plus influent sur le potentiel de réchauffement climatique.

Les variations du volume de béton dans les données d'entrée est fixé à 10%. Le niveau de confiance dans la modélisation est élevé car le risque de redondances ou d'oubli de modélisation est faible.

- **Les portes, fenêtres et portes-fenêtres : variation de $\pm 20\%$:**

Il s'agit du deuxième poste le plus contributeur au niveau des émissions de CO₂, avec une contribution cumulée sur 3 produits de construction de plus de 15%.

La variation envisagée concerne la surface des ouvertures accueillant ces ouvertures. Elle est fixée à 20% pour tenir compte de la nature subjective de la sélection des données environnementales. Les FDES assignées à ces matériaux sont liées à des produits similaires disponibles sur le marché (portes en bois produites par Zilten, fenêtres mixtes bois-alu produites par MINCO). Cependant ces produits peuvent ne pas être effectivement ceux choisis en réalité. Une source d'erreur quant aux données environnementales de ces produits doit donc être couverte par l'analyse de la sensibilité.

En résumé des résultats précédents, la Table 3.4-1 représente les variations envisagées dans l'analyse de la sensibilité. Les données d'entrée à faire varier sont au nombre de 5, pour un total de 10 scénarios à réaliser.

Table 5.3-1 : Résumé des variations des données d'entrée pour l'analyse de la sensibilité

Catégorie de matériaux ou produit	Unité des données d'entrée	Variation
Béton pour les murs ou les dalles	m ³	$\pm 10\%$
Portes, fenêtres, et portes fenêtrés	m ²	$\pm 20\%$
Systèmes de murs permanents et cloison	m ²	$\pm 10\%$
Plaques de plâtres ordinaires	m ²	$\pm 30\%$
Bois brut ou tendre	m ³	$\pm 20\%$

5.4 Résultats de l'analyse de la sensibilité

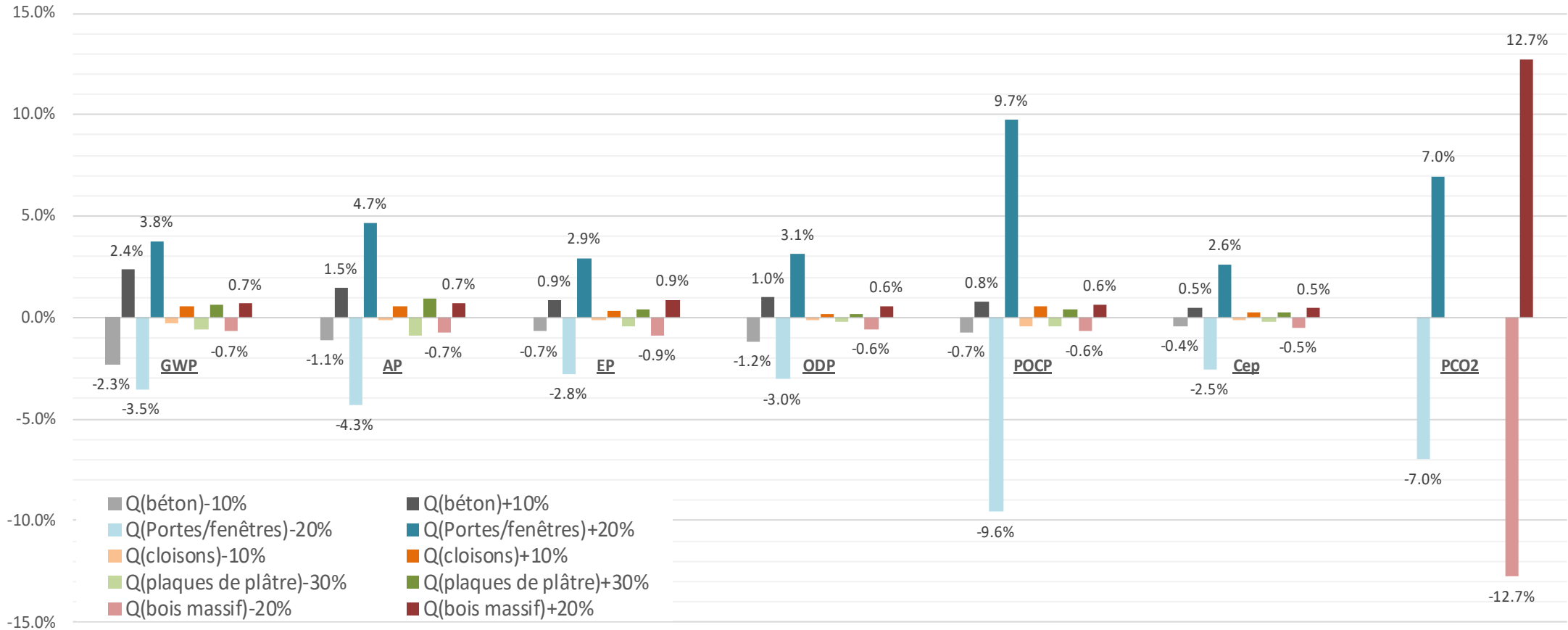


Figure 5.4-1 : analyse de la sensibilité des données d'entrées les plus représentées ou influentes sur l'indicateur GWP

La Figure 5.4-1 récapitule sous forme de graphique les résultats des 10 scénarios réalisant l'analyse de la sensibilité. Ces 10 scénarios résultent de l'identification des données d'entrée les plus représentées et des matériaux ou catégories de produits les plus influents sur le potentiel de réchauffement climatique. L'analyse de la sensibilité n'est pas dépendante des paramètres d'importation, car l'importation a été évaluée robuste. (voir point 3.7).

Les résultats de l'analyse montre que la quantité de portes et fenêtres est le paramètre le plus influent sur le potentiel de réchauffement climatique. Une variation des données d'entrées de $\pm 20\%$ implique une variation sur le potentiel de réchauffement climatique de $\pm 3.5\%$. L'influence de ces variations sur l'indicateur GWP sont donc relativement faible, mais non négligeables.

D'autre part, l'influence sur le stockage de carbone biogénique est aussi non négligeable, puisque les variations générées sur la quantité de CO₂ stocké sont de 7%.

Les sensibilités différentes sur le stockage de CO₂ et sur le potentiel de réchauffement climatique peuvent s'expliquer grâce à la Figure 5.4-2.

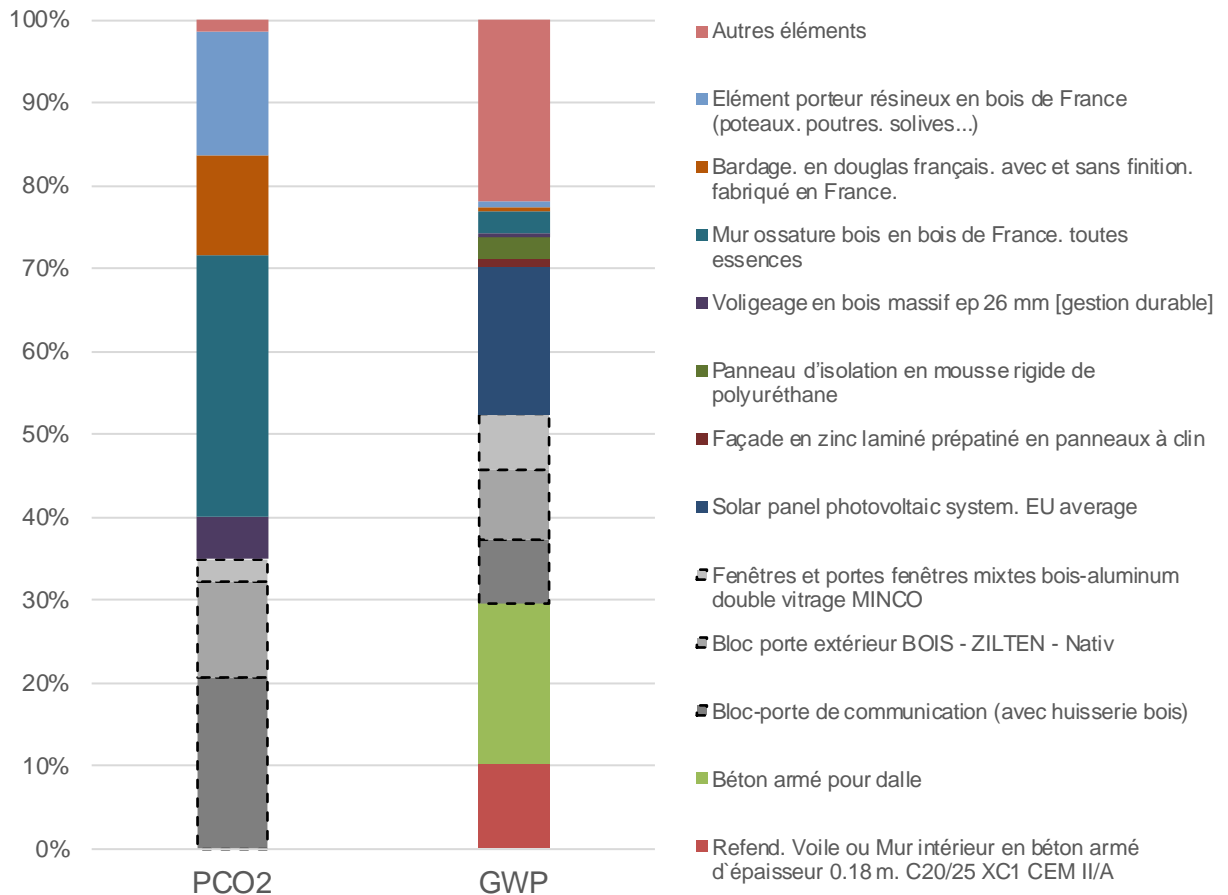


Figure 5.4-2 : Comparaison des contributions des matériaux aux indicateurs PCO₂ et GWP

Cette figure permet de constater que la contribution des portes et fenêtres à l'indicateur GWP est de 22% (lots encadrés en pointillés) contre une contribution à 35% pour le stockage de carbone biogénique. La contribution proportionnelle est différente entre les deux indicateurs. Elle est 13% supérieure pour le stockage de carbone biogénique. Il n'est donc pas étonnant de constater une plus grande sensibilité de la quantité de portes et fenêtres sur PCO₂ que sur GWP la Figure 5.4-1.

La Figure 5.4-1 illustre aussi la grande sensibilité de la quantité de carbone biogénique stocké vis-à-vis des variations des quantités de bois brut et tendre. Les résultats de l'analyse de la sensibilité donnent qu'une variation de 20% du volume de bois implique une variation conséquente de 13% de la quantité de carbone biogénique. La Figure 5.4-2 permet d'expliquer ces résultats par la proportion que représentent les matériaux en bois brut dans la contribution au stockage de carbone biogénique. En effet, le bois brut représente presque 65% des matériaux permettant le stockage de carbone biogénique dans le cas d'étude analysé. Cette constatation n'est pas

surprenante dans la mesure où la conception analysée n'a recours qu'à trois sources de stockage de carbone biogénique, dans la charpente et les façades via les poutres de structures et les ossatures en bois, et dans le bois contenu dans les châssis de fenêtre.

La Figure 5.4-2 illustre aussi la contribution significative des ossature bois dans le stockage de carbone biogénique. Ce système constructif permet en effet de stocker plus de 30% du carbone biogénique dans les façades et dans la toiture. A titre de comparaison, les éléments porteurs en bois, utilisé dans la charpente de la toiture et dans la structure de la coursive ne représente que 15% du stockage de carbone biogénique. L'utilisation des caissons bois préfabriqués en usine est définitivement une excellente technique de construction permettant de minimiser l'impact sur le réchauffement climatique et de maximiser le stockage de carbone biogénique.

La variation de la quantité de portes et fenêtres est par ailleurs un facteur influent fortement l'indicateur POCP. Une variation de 20% des données d'entrées implique une influence de presque 10% sur cet indicateur. Ces résultats ne sont pas négligeables.

La Table 5.4-1 présente les résultats de l'analyse de la sensibilité sur l'indicateur de potentiel de réchauffement climatique GWP. Les résultats montrent qu'une faible variation des quantités de béton à hauteur de 10% du volume introduit des effets de 2.4% sur le potentiel de réchauffement climatique et la quantité de CO₂ émise dans l'environnement.

D'autre part, malgré la grande représentativité de certaines surfaces dans l'inventaire sur le cycle de vie, telle que les surfaces de plaques de plâtres ou de murs intérieurs permanents, et malgré les possibilités de redondances ou d'erreurs dans la modélisation, la sensibilité de ces paramètres sur la contribution au réchauffement climatique est faible, voire négligeable.

Table 5.4-1 : Résultats de l'analyse de la sensibilité sur l'indicateur GWP

Catégorie de matériaux ou produit	Unité des données d'entrée	Variation	Influence sur GWP (kg eq. CO ₂)
Béton pour les murs ou les dalles	m ³	± 10 %	± 2.4%
Portes, fenêtres, et portes fenêtres	m ²	± 20 %	± 3.5%
Systèmes de murs permanents et cloison	m ²	± 10 %	± 0.3%
Plaques de plâtres ordinaires	m ²	± 30 %	± 0.6%
Bois brut ou tendre	m ³	± 20 %	± 0.7%

Ces résultats permettent d'établir plusieurs constatations. Tout d'abord, l'utilisation juste et raisonnée du béton doit être le facteur principal de décision dans la conception. En effet, non seulement le béton concerne une grosse partie de l'inventaire du cycle de vie (86% des données d'entrée en volume), mais c'est le matériau le plus contributeur aux émissions de CO₂ dans le cas d'étude envisagé (36% des émissions en équivalent de CO₂). De plus, des faibles variations de volumes entraînent des variations sur le potentiel de réchauffement climatique.

D'autre part, ces résultats permettent de prendre du recul sur les erreurs de modélisation. En effet, l'introduction d'erreurs potentiellement importantes sur des lots de partitionnement intérieur n'entraîne pas de sur ou sous-estimation conséquente du potentiel de réchauffement climatique.

Enfin, le lot concernant les menuiseries doit faire l'objet d'une conception précise, car des variations de l'ordre de 20% peuvent entraîner des variations non négligeables sur le potentiel de réchauffement climatique et sur le stockage de carbone biogénique. Il est d'autant plus important de mentionner ce point que les données d'entrée représentant ces lots peuvent paraître faible et d'importance minimale aux yeux des concepteurs.

6. Discussion

Pour servir de base à la discussion, voici un rappel des questions de recherche et des objectifs abordés dans ce travail.

En France, quels sont les impacts de la mise en œuvre d'un système constructif mixte bois et béton sur le cycle de vie d'un bâtiment de logements collectifs ?

Elle s'accompagne d'une question secondaire, qui peut être formulée de la manière suivante :

Quels leviers de conception sont pertinents pour réduire l'impact sur le réchauffement climatique d'un bâtiment de logements collectifs construit en France ?

L'objectif du travail est donc de constater la possibilité de mise en œuvre de méthodes et matériaux respectant ces exigences environnementales. Ce travail pourra donc s'adresser aux professionnels du bâtiment, tels que les architectes et ingénieurs de la construction. Ce travail pourra aussi être utiles aux maîtres d'ouvrage souhaitant découvrir les avantages et inconvénients de ces leviers sur la conception de bâtiment à basse empreinte carbone.

6.1 Découvertes et recommandations

6.1.1 Matériaux et postes influents sur GWP

Ce travail réalise l'évaluation des impacts environnementaux et l'analyse sur le cycle de vie d'un bâtiment de 23 logements. Cette approche permet de quantifier le potentiel de réchauffement climatique de cette conception, ainsi que de mesurer la quantité de carbone biogénique stocké par cette conception.

Les résultats qui peuvent tout d'abord être mis en avant sont ceux concernant la Figure 5.3-1 : Contribution au potentiel de réchauffement (GWP) climatique des différents matériaux. Le matériaux béton est le contributeur principal aux émissions en kilogramme d'équivalent de CO₂. Le béton utilisé dans la conception pour les dalles représente en effet plus 23% des émissions réalisées sur le cycle de vie, et le béton pour les voiles et murs de refend 13%.

L'utilisation du béton dans les murs et les dalles est à mettre en vis-à-vis avec les seuils réglementaires de la RE2020 sur les matériaux. Comme évoqué dans l'état de l'art au point 2.2.4, le seuil de l'indicateur mesurant la contribution des matériaux au réchauffement climatique est $I_{\text{Construction}} < 640 \text{ kg eq. CO}_2 / \text{m}^2$ pour les logements collectifs.

Un premier levier de conception pour réduire la proportion jouée par le béton dans la construction est de réduire cette quantité, en utilisant d'autre méthode de construction. En particulier pour les dalles, des planchers en bois peuvent être substitués aux planchers en béton. Le recours à l'utilisation de solives de plancher en bois permet d'autre part d'utiliser un matériau biosourcé, source de stockage de carbone biogénique. Les bénéfices de ce carbone biogénique pourraient être utiles lors de la réalisation d'ACV prenant en compte le module D. En outre, les murs porteurs en béton devraient aussi être substitués à des murs porteurs en Cross Laminated Timber (CLT), permettant la diminution des quantités de béton utilisées et le stockage de carbone biogénique.

La Figure 5.4-2 illustre par ailleurs l'excellente compétence des systèmes de façade à ossature bois préfabriqués en usine. Ce système constructif allie de très faibles contributions au réchauffement climatique ainsi qu'un fort pouvoir de stockage du carbone biogénique, dont les bénéfices pourraient être pris en compte en fin de vie du bâtiment. La façade à ossature bois est donc un excellent levier de conception pour diminuer les émissions de CO₂ et maximiser le carbone biogénique.

L'étude de Al-Obaidy et al. (2022) montre en effet que le système constructif en bois émet 3 fois moins d'émissions de CO₂ que des systèmes constructifs en béton. Cette étude montre aussi que par rapport aux systèmes constructif en acier, bien que ces derniers soient modulables et permettent une déconstruction et une circularité dans l'utilisation des aciers, les systèmes constructifs mixtes bois béton permettent de réduire par 4 les émissions de CO₂.

Cependant ces premiers leviers de conceptions doivent faire l'objet d'une comparaison multicritère, prenant en compte le coefficient de transfert thermique et la capacité thermique des parois. En effet, la capacité thermique du béton (de 2050 à 2600 kJ/m³.K) est plus de 2 fois supérieure à celle du bois (\approx 1100 kJ/m³.K). Les éléments en béton permettent de mieux stocker l'énergie en été comme en hiver, prodiguant un plus grand confort thermique. La RE2020 imposant un seuil de surchauffe maximal de 1250 DH (voir point 2.2.5), il serait intéressant de comparer ces différents types de parois au regard de ce critère de confort, et ainsi d'identifier les limitations dans l'utilisation de systèmes structurels en bois ou matériaux biosourcés.

Aste et al. (2009) montrent que la contribution de l'inertie thermique peut être négligeable ou conséquente, pour un climat donné, appliqué à des barres de logements résidentiels. La réduction de la consommation d'énergie sur des parois de capacité thermique différentes varie de de quelques pourcents à plus de 80%. Selon les conclusions de cette étude et d'études similaires, l'utilisation de parois avec une grande inertie thermique contribue en général à la réduction de la consommation énergétique. Mais elle contribue surtout à l'augmentation du confort en été en réduisant le nombre d'heure de surchauffe.

Le changement climatique va aussi impacter la surchauffe dans les bâtiments d'habitation. Comme le montrent Attia & Gobin (2020), le changement climatique va augmenter le nombre d'heure de surchauffe dans les bâtiments d'habitation. Le nombre d'heure de surchauffe comportant un seuil réglementaire à ne pas dépasser dans la RE2020, le respect de ce seuil pourrait devenir un critère de conception principal à l'avenir.

6.1.2 Variations des quantités

L'analyse de la sensibilité de cette étude met aussi en évidence que des variations minimales de la quantité de béton ($\pm 10\%$) induisent des variations non négligeables des émissions de CO₂ sur le cycle de vie du bâtiment ($\pm 2.4\%$).

Concrètement, dans les phases préliminaires de conception, ces résultats indiquent que de modifier une épaisseur de dalle béton en passant de 180 mm à 200 mm fait varier le volume de béton de 10% dans les dalles. Si l'ACV est réalisée en phase préliminaire de conception, les concepteurs doivent alors être conscients que cette prise de décision sur l'épaisseur des matériaux peut avoir une incidence non négligeable sur les résultats de l'indicateur GWP.

De la même manière, des décisions de changement de matériaux de structure, tels que le changement en structure béton de balcons initialement prévus en ossature bois, peuvent être à l'origine de ces variations sur l'indicateur GWP. Dans ce cas, l'impact est d'autant plus élevé qu'une quantité non négligeable de bois est remplacé par du béton. L'impact d'une variation de $\pm 20\%$ du volume de bois de structure induit une variation de $\pm 13\%$ du carbone biogénique stocké. Cette variation peut conduire à la perte des bénéfices réalisés par ce carbone biogénique dans le module D de l'ACV.

L'analyse de la sensibilité montre aussi qu'une variation de $\pm 20\%$ des surfaces d'ouverture implique la variation de $\pm 3.5\%$ du potentiel de réchauffement climatique. Ce résultat montre que le poste concernant les portes et fenêtres est très contributeur d'émission de CO₂, et de sensibilité non négligeable. Ce poste est aussi susceptible lors des phases préliminaires de conception d'être l'objet de variations et de changements, pour diverses raisons. D'une part, la quantité de surfaces vitrées est liée aux études thermiques et de surchauffe. D'autre part elle est liée à des considérations esthétiques à propos des dimensions. La nature des châssis (tout bois, tout aluminium, mixte bois-aluminium ou PVC) est déterminée par l'aspect extérieur.

La quantité de portes dans les bâtiments de logement est lié au partitionnement intérieur, qui fait aussi l'objet de plusieurs itérations de conception avant d'avoir sa conception finale. Les exigences d'évacuation en cas d'incendies peuvent aussi jouer un rôle dans ces variations.

Pour éviter ces trop fortes variations sur le résultat des émissions de CO₂, afin de limiter les sur ou sous-estimations des impacts sur l'environnement, il conviendrait donc de réaliser l'ACV des bâtiments de logements collectifs quand ces choix sont arrêtés et définitifs, et quand les considérations de structure, de confort thermique, d'esthétique visuelle sont prises en compte et sont dans leur version finale.

6.2 Forces et limitations de l'étude

Cette étude est réalisée sur un cas d'étude comportant 23 logements collectifs. Le cas d'étude se situe en France. Le nombre d'étude portant sur cette typologie est assez limité. Ce travail permet donc de combler ces manquements en proposant une méthodologie qui se concentre sur 2 indicateurs de l'empreinte carbone d'un bâtiment.

Une autre force de ce travail est qu'il identifie clairement la méthode de prise en compte du carbone biogénique dans l'analyse du cycle de vie. Ce travail est rendu possible par un listing des méthodologies utilisées dans l'ACV pour la RE2020 et pour les autres études en général, réalisé par Hoxha et al. (2020).

L'étude se base sur la méthodologie proposée par la norme EN15978, et le travail détaille point par point quelles hypothèses ont été prises pour réaliser le travail. Cela donne à cette étude une bonne réplicabilité. D'autre part les sources de données environnementales utilisées sont concernent des produits et matériaux disponibles en France, et dont l'évaluation des données environnementales est faite suivant la norme européenne EN 15804+A2. Cette norme permet la prise en compte du carbone biogénique stocké dans les matériaux biosourcés.

L'étude de l'analyse du cycle de vie se limite au bâtiment et ne prend pas en compte les aménagements extérieurs réalisés. LA RE2020 implique la réalisation d'une ACV comprenant les aménagements extérieurs. Le travail ne permet donc pas une comparaison rigoureuse avec les indicateurs de la RE2020. D'autre part, la méthode d'ACV utilisée est une méthode statique, déterminée selon la norme EN15978. La RE2020 utilise un autre type d'ACV, dite dynamique, qui prend en considération la temporalité des émissions. Enfin, les données concernant le processus de construction n'étant pas disponibles, le module A5 n'est pas couvert par cette étude. Cela fait un point divergent de plus avec la RE2020 qui prend en compte les émissions réalisées pendant le processus de construction.

La source des données pour les consommations d'énergie dans le module B6 est une source gouvernementales issue d'une base de données. (Ministère de la cohésion des territoires, s.d.). Une étude thermique réalisée à l'aide d'outil de simulation thermique sur le cas d'étude permettrait de caractériser plus rigoureusement le comportement thermique du cas d'étude et les consommations d'énergie.

Le travail propose une identification des matériaux les plus contributeurs aux émissions de CO₂, et identifie certains leviers de conception sans prendre rigoureusement en considération des contraintes structurelles, thermique ou technique que ces alternatives impliquent.

6.3 Possibilité de poursuites du travail

Ce travail ouvre la porte à d'autres études concernant les bâtiments de logements collectifs. Tout d'abord, il serait intéressant de comparer les résultats d'analyses du cycle de vie statiques et dynamiques sur les indicateurs de potentiel de réchauffement climatique et de stockage de carbone biosourcé. Cela permettrait d'identifier les erreurs possibles sur les résultats d'une ACV suivant la norme EN15978 par rapport à l'utilisation d'une ACV dynamique. Hoxha et al. (2020) comparent l'approche 0/0 et -1/+1 pour prendre en compte le carbone biogénique dans l'analyse du cycle de vie, mais il serait aussi intéressant de comparer ces approches statiques à des approches dynamiques sur l'ACV de bâtiment de logements collectifs.

Une autre piste de recherche concernerait la disponibilité des matériaux, et leur coût. En effet en ces temps d'inflation du prix des matériaux, il serait intéressant d'envisager le choix des systèmes constructifs aux regards de l'empreinte carbone en considérant une approche d'optimisation financière (« cost-optimal approach »). Une étude de Amer et al. (2020) applique cette démarche à une extension passive sur le toit d'un bâtiment existant. Différentes options concernant les éléments de structure sont considérées. Il serait intéressant d'envisager ce type de démarche pour l'appliquer aux bâtiments de logements collectifs. Cela permettrait de créer un critère de décision supplémentaire entre différentes options de construction bas carbone.

Concernant ce travail de fin d'étude, le travail peut être complété en réalisant une ACV sur un scénario de construction en alternative biosourcée, afin de comparer le respect des seuils réglementaires de la RE2020 aux regards des performances thermiques. La prise en compte des différentes capacités thermique pourrait être un critère de décision supplémentaire dans l'identification des leviers de conceptions. Une autre piste de réflexions serait de considérer la sensibilité des indicateurs en utilisant des scénarios d'évolution du mix énergétique différents. En effet, pour accompagner la France dans la décision de la production d'une électricité 100% d'origine renouvelable d'ici 2050, le gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE a publié en octobre 2021 un rapport proposant 6 scénarios de transition énergétique d'ici 2050. Ces scénarios pourraient servir de base à cette étude.

La conception de bâtiment bas carbone en France est au centre de toutes les attentions. Il est donc pertinent d'envisager toute étude permettant une analyse multicritère, sur base des performances environnementales, énergétiques et financières. Ces travaux permettraient aux concepteurs et professionnels de la construction de prendre des décisions pertinentes lors des phases de conception.

7. Conclusions

Le secteur du bâtiment représente près de 44% de l'énergie consommée en France. Afin de respecter les accords de Paris, limitant le réchauffement climatique de 1.5°C par rapport à l'ère préindustrielle en 2040, la France a amorcé sa politique de transition écologique et énergétique. Cette politique se traduit dans le secteur de la construction par la mise en place d'une nouvelle réglementation, définissant des objectifs énergétiques et environnementaux. Les professionnels de la construction sont sceptiques par rapport à ces exigences, avec des seuils contraignants l'empreinte carbone des constructions neuves.

D'autre part, la littérature ne fait pas état de beaucoup de travaux concernant analyse du cycle de vie de bâtiments collectifs. Les études sur les habitations développent des méthodologies pour les maisons unifamiliales, mais peu concernent des bâtiments de logements collectifs.

Ce travail se base donc sur ces deux constatations. Elle permet de compléter la littérature d'une étude développant une méthodologie pour l'analyse du cycle de vie des bâtiments de logements collectifs, centrée sur l'empreinte carbone. Ce travail permet aussi d'identifier les leviers de conception permettant de faire baisser l'impact sur le réchauffement climatique du bâtiment et permettant de maximiser le stockage de carbone biogénique.

Les résultats permettent de constater que la mise en œuvre de dalle en béton dans la conception de logements collectif est responsable à plus de 23% des émissions de CO₂ sur le cycle de vie du bâtiment. Cumulée avec l'utilisation d'un système de voiles porteurs, les émissions du béton représentent plus de 1/3 des quantités de GES émises sur le cycle de vie du bâtiment. La réduction de ces quantités en favorisant des systèmes porteurs en bois ou CLT est donc un moyen de réduire la contribution de ces parois au potentiel de réchauffement climatique. L'analyse de la sensibilité montre par ailleurs que des variations de quantités de béton de $\pm 10\%$ impliquent des variations sur GWP de $\pm 2.4\%$.

D'autre part, la quantité de carbone biogénique stocké dans la conception est directement liée à l'utilisation de bois dans la conception. Le recours à une façade en bois permet de stocker plus de 30% du carbone biogénique, en contribuant faiblement au réchauffement climatique. L'utilisation de châssis mixtes bois-aluminium permet aussi de stocker une quantité importante de carbone biogénique, tout en réduisant l'impact sur le réchauffement climatique par rapport à des châssis en aluminium.

Finalement, il est à noter que bien que le cas d'étude analysé ait de bonnes performances énergétiques, avec une consommation en énergies primaires de seulement 9,4 kWh_{ep}/m².an, sa performance environnementale est encore loin d'être optimale. Ces décisions concernant les systèmes constructifs et techniques sont à mettre en perspectives avec d'autres types de contraintes, structurelles, thermiques, ou esthétiques. L'introduction de nouvelles contraintes environnementales sur la construction neuve rend le processus de décision complexe. Ce travail a tenté de donner quelques clés pour comprendre et décider ces points.

8. Références

Al-Obaidy, M., Courard, L., & Attia, S. (2022). A Parametric Approach to Optimizing Building Construction Systems and Carbon Footprint : A Case Study Inspired by Circularity Principles. *Sustainability*, 14(6), 3370. <https://doi.org/10.3390/su14063370>

Amer, M., Hamdy, M., Wortmann, T., Mustafa, A., & Attia, S. (2020). Methodology for design decision support of cost-optimal zero-energy lightweight construction. *Energy and Buildings*, 223, 110170.

Arrêté du 9 décembre 2021 relatif aux attestations de prise en compte des exigences de performance énergétique et environnementale et de réalisation d'une étude de faisabilité relative aux diverses solutions d'approvisionnement en énergie pour les constructions de bâtiments en France métropolitaine et modifiant l'arrêté du 11 octobre 2011 relatif aux attestations de prise en compte de la réglementation thermique et de réalisation d'une étude de faisabilité relative aux approvisionnements en énergie pour les bâtiments neufs ou les parties nouvelles de bâtiments (J.O 15 avril 2022)

Aste, N., Angelotti, A., & Buzzetti, M. (2009). The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. *Energy and Buildings*, 41(11), 1181-1187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.005>

Atmaca, A., & Atmaca, N. (2015). Life cycle energy (LCEA) and carbon dioxide emissions (LCCO2A) assessment of two residential buildings in Gaziantep, Turkey. *Energy and Buildings*, 102, 417-431. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.008>

Attia, S., & Gobin, C. (2020). Climate change effects on Belgian households: a case study of a nearly zero energy building. *Energies*, 13(20), 5357.

Attia, S., Eleftheriou, P., Xenii, F., Morlot, R., Ménézo, C., Kostopoulos, V., Betsi, M., Kalaitzoglou, I., Pagliano, L., Cellura, M., Almeida, M., Ferreira, M., Baracu, T., Badescu, V., Crutescu, R., & Hidalgo-Betanzos, J. M. (2017). Overview and future challenges of nearly zero energy buildings (nZEB) design in Southern Europe. *Energy and Buildings*, 155, 439-458. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.043>

Becchio, C., Dabbene, P., Fabrizio, E., Monetti, V., & Filippi, M. (2015). Cost optimality assessment of a single family house : Building and technical systems solutions for the nZEB target. *Energy and Buildings*, 90, 173-187. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.050>;

Bodmer, M. (2020). Analyse du cycle de vie et coût du cycle de vie dans la rénovation des logements en Belgique - Analyse comparative de différents matériaux et techniques. [Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil Architecte, Université de Liège]. [matheo.uliege.be. https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10728](https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10728)

Buyle, M., Galle, W., Debacker, W., & Audenaert, A. (2019). Sustainability assessment of circular building alternatives : Consequential LCA and LCC for internal wall assemblies as a case study in a Belgian context. *Journal of Cleaner Production*, 218, 141-156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.306> ;

Centre for Industrialised Architecture (CINARK), (2019). Construction Material Pyramid - Byggeriets Materialepyramide. Available online: <https://www.materialepyramiden.dk/>

Coste, A. (2021). Chargé de Projets Maitrise d'Ouvrage chez Loire Habitat. Communication personnelle par e-mail : Logements sociaux passifs La Madeleine à Montbrison : Demande de renseignements.

Cruard, (2020, 29 juin). LES BALCONNIERES – NANTES (44). Cruard Charpente. <https://cruard-charpente.com/2020/06/24/les-balconnieres-nantes/>

Curran, M. A., Mann, M., & Norris, G. (2005). The international workshop on electricity data for life cycle inventories. *Journal of Cleaner Production*, 13(8), 853-862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2002.03.001>;

Duffaure-Gallais, I. (2016, 18 novembre). *Energie positive et réduction carbone : le label E+C- décrypté*. [lemoniteur.fr. https://www.lemoniteur.fr/article/energie-positive-et-reduction-carbone-le-label-e-c-decrypte.1360744](https://www.lemoniteur.fr/article/energie-positive-et-reduction-carbone-le-label-e-c-decrypte.1360744) ;

Dwaikat, L. N., & Ali, K. N. (2016). Green buildings cost premium : A review of empirical evidence. *Energy and Buildings*, 110, 396-403. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.021> ;

EN 15804 :2012 + A2 : 2019. (2019). Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Core rules for the product category of construction works

EN 15978:2011. (2011). Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method

EQUALIS. (2019, 19 mars). L'histoire de la Réglementation Thermique. Equalis. <https://e-quality.fr/articles/f/lhistoire-de-la-r%C3%A9glementation-thermique?blogcategory=R%C3%A9glementation>

Eurostat, (2020). *Eurostat – data explorer. Degrés-jours de chauffage et de refroidissement par région NUTS 3 - données annuelles.* https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_chddr2_a/default/map?lang=fr

Finnveden, G., & Moberg, S. (2005). Environmental systems analysis tools – an overview. *Journal of Cleaner Production*, 13(12), 1165–1173. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.06.004>

Grant, A., Ries, R., & Kibert, C. (2014). Life Cycle Assessment and Service Life Prediction. *Journal of Industrial Ecology*, 18(2), 187-200. <https://doi.org/10.1111/jiec.12089>

Helmus R. (2020). *Faut-il plutôt démolir puis reconstruire ou rénover énergétiquement un bâtiment tertiaire.* [Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil Architecte, Université de Liège]. [matheo.uliege.be. https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10240](https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/10240)

Hoxha, E., Passer, A., Saade, M. R. M., Trigaux, D., Shuttleworth, A., Pittau, F., Allacker, K., & Habert, G. (2020). Biogenic carbon in buildings : a critical overview of LCA methods. *Buildings and Cities*, 1(1), 504-524. <https://doi.org/10.5334/bc.46>

Hu, M. (2019). Does zero energy building cost more ? – An empirical comparison of the construction costs for zero energy education building in United States. *Sustainable Cities and Society*, 45, 324-334. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.026> ;

IEA , (2019). Electricity Information - Data product. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information>

ISO 14040. (2006). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.

Lacas, F. (2021, 16 décembre). Attestations RE2020 : deux arrêtés publiés avant l'entrée en vigueur du texte. Batiactu. <https://www.batiactu.com/edito/re2020-deux-arretes-publies-avant-entree-vigueur-texte-63201.php> ;

Lacas, F. (2020, 1 décembre). RE2020 : l'Etat programme la fin du chauffage gaz en logement et offre un tremplin au bois. Batiactu. <https://www.batiactu.com/edito/re2020-va-enteriner-disparition-progressive-logements-60709.php> ;

LCI. (2021). Logements neufs : bientôt de nouvelles normes environnementales... et une flambée des prix ? (2021, 16 février). LCI. ;

Leroy, T. (2021). Architecte HMONP chez Ad'Hoc Architecture. Communication personnelle par e-mail : Résidence Les Balconnières : Demande d'informations.

Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Deschênes, L., & Samson, R. (2010). Considering time in LCA: Dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environmental Science & Technology*, 44(8), 3169–3174. DOI: <https://doi.org/10.1021/es9030003>

Marszal, A. J., & Heiselberg, P. (2011). Life cycle cost analysis of a multi-storey residential Net Zero Energy Building in Denmark. *Energy*, 36(9), 5600-5609. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.07.010> ;

Ministère de la Cohésion des territoires . (s. d.) *Observatoire des performances énergétiques (OPE) - data.gouv.fr*. (s. d.). Ministère de la Cohésion des territoires. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/observatoire-des-performances-energetiques/>

Ministère de la transition écologique, Cabassud, N., Chartier, M., Colin, G., Deslot, Q., Giuly, J., Orta, L., Paradis, J., Piton, F., Prabdelle, S., Priem, L., & Thiebaut, A. (2022). *Guide RE 2020 - éco-construire pour le confort de tous*. http://www.rt-batiment.fr/IMG/pdf/guide_re2020_dhup-cerema.pdf

Ministère De La Transition Ecologique. (2019a, 2 janvier). *Contexte - Bâtiments à Énergie Positive et Réduction Carbone*. Ministère de la Transition Ecologique. <http://www.batiment-energiecarbone.fr/contexte-a2.html> ;

Ministère de la transition écologique. (2019b). Niveaux de performance - Bâtiments à Énergie Positive et Réduction Carbone. [batiment-energiecarbone.fr.
http://www.batiment-energiecarbone.fr/niveaux-de-performance-a88.html](http://www.batiment-energiecarbone.fr/niveaux-de-performance-a88.html)

Ministère de la Transition écologique. (2021a). Énergie dans les bâtiments. <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>;

Ministère de la Transition Ecologique. (2021b, 18 février). RE2020 : Eco-construire pour le confort de tous [Communiqué de presse]. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2021.02.18_DP_RE2020_EcoConstruire_0.pdf ;

Ministère de la transition écologique. (2022, mars). France 2030 et les ambitions en matière de transition écologique. Ministères Écologie Énergie Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/france-2030-et-ambitions-en-matiere-transition-ecologique>

Ministère De La Transition Ecologique. *Performance Énergétique des Bâtiments Neufs*. (2021c, 23 novembre). Ministère De La Transition Ecologique. <http://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/statistiques/experimentation-en-chiffres/#> ;

Montginoul, M. (2013). La consommation d'eau en France : historique, tendances contemporaines, déterminants. *Sciences Eaux & ; Territoires*, Numéro 10(1), 68-73. <https://doi.org/10.3917/set.010.0011>

One Click LCA® Software. (2021). End of Life Scenarios for Construction Products. <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360015064959-End-of-Life-Scenarios-for-Construction-Products>

One Click LCA® Software. (2022). Using Materials Manufacturing Localisation. <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/articles/360014865559-Using-Materials-Manufacturing-Localisation>

ONU. (2022). Climat : les experts du GIEC s'alarment des conséquences énormes. (2022, 2 mars). ONU Info. <https://news.un.org/fr/story/2022/02/1115262>

Oury, N. (2022, 4 avril). News INIES - Mars 2022 les chiffres clés au 31/12/2021. Inies. <https://www.inies.fr/news-inies-mars-2022-les-chiffres-cles-au-31-12-2021/>

Palacios-Munoz, B., Peuportier, B., Gracia-Villa, L., & López-Mesa, B. (2019). Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans : A new approach. *Building and Environment*, 160, 106203. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106203>

Petitdemange, A. (2021). Architecte HMONP chez Axe Architecture. *Communication personnelle par e-mail : HBVS FAREINS*.

Petrovic, B., Myhren, J. A., Zhang, X., Wallhagen, M., & Eriksson, O. (2019). Life Cycle Assessment of Building Materials for a Single-family House in Sweden. *Energy Procedia*, 158, 3547-3552. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.913>

Peuportier, B., Thiers, S., & Guiavarch, A. (2013). Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 39, 73-78. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.041>

Reiter, S. (2010). Life Cycle Assessment of Buildings – a review. *Proceedings of ArcelorMittal International. Network in Steel Construction 2010 : Sustainability Workshop*. orbi.uliege.be. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/96541/1/Paper-Reiter-2010.pdf>

Roux, C., Schalbart, P., Assoumou, E., & Peuportier, B. (2016). Integrating climate change and energy mix scenarios in LCA of buildings and districts. *Applied Energy*, 184, 619-629. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.043>

RTE - Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité. (2021, octobre). *Futurs énergétiques 2050 - principaux résultats*. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-10/Futurs-Energetiques-2050-principaux-resultats_0.pdf

Saint-Gobain Isover, (2019). Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du système OPTIMA MURS GR 32 Kraft 100 mm et Placoplatre® BA 13. INIES.

Saint-Gobain Isover, (2019). Fiche de déclaration environnementale et sanitaire du système Cloison acoustique 72/48 Par Phonic 45 mm et Placo® Activ'Air® BA13. INIES.

Schyns, A. (2021). *Analyse de stratégies en vue de construire des infrastructures sportives intérieures plus durables en Belgique* [Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur Civil Architecte, Université de Liège]. matheo.uliege.be. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/11458>

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2016). Simplification in life cycle assessment of single-family houses : A review of recent developments. *Building and Environment*, 103, 215-227. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>

Ventura, A., & Feraille, A. (2021, mars). Recommandations pour l'introduction de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans la Réglementation Environnementale (RE) 2020 des bâtiments - Université Gustave Eiffel - ENPC ParisTech. https://www.univ-gustave-eiffel.fr/fileadmin/Fichiers/Universite_Gustave_Eiffel/Documents/Note_Univ_Gustave_Eiffel_Analyse_du_Cycle_de_Vie_pour_la_RE2020.pdf

Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings : A review of impacts across climate and building use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2300-2318. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>