

Travail de fin d'études / Projet de fin d'études : Benchmark d'émissions carbone et classification typologique de bâtiments résidentiels neufs surbase de leur impact sur le réchauffement climatique

Auteur : Forey, Simon

Promoteur(s) : Reiter, Sigrid

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

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

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23251>

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.

Benchmark d'émissions carbone et classification typologique de bâtiments résidentiels neufs sur base de leur impact sur le réchauffement climatique

FOREY Simon

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du grade de :

**Ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en
ingénierie architecturale et urbaine**

Promotrice :

REITER Sigrid

Année académique : 2024 – 2025

Remerciements

Je souhaiterais tout d'abord remercier ma famille et mes amis qui m'ont toujours encouragé et ont toujours été derrière moi lors de l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie également les membres de mon jury : Gentiane HAESBROECK, Iris REUTER et Shady ATTIA pour leur écoute et la qualité de leurs conseils.

Je tiens aussi à remercier Sophie KLENKENBERG et Mathieu THOREL pour leur aide primordiale.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement ma promotrice, Mme Sigrid REITER, pour sa bienveillance, sa disponibilité et sa réactivité, qui ont grandement facilité la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Ce mémoire explore les déterminants des émissions de gaz à effet de serre (GES) associées aux bâtiments résidentiels neufs, dans un contexte où la réduction de l'empreinte carbone du secteur du bâtiment est un enjeu central de la transition écologique. L'analyse repose sur l'exploitation approfondie de la base de données de l'expérimentation française E+C-, qui regroupe des indicateurs environnementaux issus d'analyses de cycle de vie (ACV) réglementaires. Trois indicateurs sont étudiés : l'émission de GES totale (E_{GES}), l'émission de GES relative aux produits de construction et équipements ($E_{GES\ PCE}$), et les émissions de GES opérationnelles liées aux usages ($E_{GES\ OPE}$).

La méthodologie combine un benchmarking typologique (croisant morphologies architecturales, hauteurs et types d'occupation) avec des modèles de régression linéaire multiple, afin d'identifier les choix de conception ayant un impact significatif sur les émissions carbone.

Les résultats soulignent le rôle déterminant des systèmes techniques, notamment le chauffage au gaz, dont l'impact est nettement plus élevé que celui des alternatives comme la pompe à chaleur. La morphologie des bâtiments, notamment la compacité et la forme de la toiture, influence également fortement les émissions. Des effets inattendus apparaissent dans certaines catégories, notamment l'absence d'effet significatif de la ventilation double flux sur l' $E_{GES\ OPE}$, ou l'augmentation des émissions liée à la présence de panneaux photovoltaïques.

Les matériaux (terre cuite, béton, bois) et composants d'enveloppe (façades, menuiseries) exercent aussi des effets contrastés, souvent liés à la phase produit (PCE). En conclusion, le travail propose des recommandations concrètes pour la conception bas carbone et identifie plusieurs limites : qualité hétérogène des données, absence d'informations sur la géométrie ou les quantités de matériaux, difficulté à distinguer certaines typologies intrinsèques à la base de données.

Des perspectives sont ouvertes pour enrichir les futures analyses : meilleure caractérisation des matériaux, intégration du réemploi, modélisation dynamique, et anticipation des exigences croissantes de la RE2020 à horizon 2031.

Abstract

This master thesis investigates the key determinants of greenhouse gas (GHG) emissions in newly constructed residential buildings, in a context where reducing the carbon footprint of the building sector is a central objective of ecological transition strategies. The analysis is based on an in-depth exploitation of the French E+C– experimental database, which compiles environmental indicators derived from regulatory life cycle assessments (LCAs). Three indicators are examined: total GHG emissions (E_{GES}), emissions from construction products and equipment ($E_{GES\ PCE}$), and operational GHG emissions linked to building use ($E_{GES\ OPE}$).

The methodology combines a typological benchmarking approach, cross-referencing building morphologies, heights, and occupancy types with multiple linear regression models to identify design choices that have a statistically significant impact on carbon emissions

Results highlight the decisive role of technical systems, particularly gas heating, whose impact is significantly higher than that of alternatives such as heat pumps. Building morphology, especially compactness and roof design, also has a strong influence on emissions. Some unexpected effects emerge in specific categories, such as the lack of a significant impact of double-flow ventilation on $E_{GES\ OPE}$, or the increased emissions associated with the presence of photovoltaic panels.

Material choices (clay, concrete, wood) and envelope components (facades, window frames) also show contrasting effects, often linked to the production stage (PCE). The study concludes with concrete recommendations for low-carbon building design and identifies several limitations: heterogeneous data quality, lack of information on geometry or material quantities, and difficulty distinguishing between certain typologies inherent to the database structure.

Finally, the study outlines future directions for enriching subsequent analyses, including improved material characterization, the integration of reuse and circular economy principles, dynamic LCA modeling, and anticipation of the increasingly stringent requirements of the RE2020 regulation by 2031.

Liste des abréviations

ACV : Analyse de Cycle de Vie

GHG : « Greenhouse Gas »

GES : Gaz à Effet de Serre

ECS : Eau Chaude Sanitaire

PAC : Pompe à Chaleur

HQE : Haute Qualité Environnementale

CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

ICV : Inventaire du Cycle de Vie

IQR : Écart Interquartile

AIC : Critère d'information d'Akaike

VIF : « Variance Inflation Factor » ou indice d'inflation de la variance

GVIF : Indice d'inflation de la variance généralisé

VMC : Ventilation Mécanique Contrôlée

SdP : Surface de Plancher

SHAB : Surface Habitable

PCE : Produits de construction et équipements

Table des matières

1.	Introduction	1
1.1.	Avant-propos	1
1.2.	Objectifs du TFE	3
1.3.	Structure du travail et principes méthodologiques.....	4
2.	État de l'art	5
2.1.	Contexte réglementaire de la performance carbone en France	5
2.1.1.	RT 2012 ou une réglementation centrée sur la performance énergétique	5
2.1.2.	Introduction du carbone et de l'ACV avec l'expérimentation E+C-.....	6
2.1.3.	La RE2020 et son approche globale de l'impact environnemental	8
2.2.	L'analyse en cycle de vie appliquée au bâtiment	12
2.2.1.	Définition et intérêt de l'ACV	12
2.2.2.	Émissions incorporées vs. émissions opérationnelles dans les ACV bâtiment	14
2.3.	Le benchmarking environnemental des bâtiments à travers l'ACV	18
2.3.1.	La collecte des données	18
2.3.2.	Définition et structuration des valeurs de référence pour le benchmarking ACV	19
2.4.	Déterminants des émissions carbone des bâtiments résidentiels	20
2.4.1.	Influence de la typologie et du système structurel	21
2.4.2.	Matériaux de construction et intensité carbone	21
2.4.3.	Systèmes techniques et performance énergétique	23
2.4.4.	Contexte géographique et climatique	24
2.5.	Présentation et visualisation des résultats de benchmarking	28
2.5.1.	Identification des objectifs de l'interprétation des résultats de l'ACV	28
2.5.2.	Classification des types de visualisation	29
2.5.3.	Représentations visuelles adaptées au benchmarking ACV des bâtiments	30
3.	Méthodologie	32
3.1.	Schéma méthodologique	32
3.2.	Présentation de la base de données d'ACV E+C-.....	32
3.3.	Étude préliminaire de la structure et du contenu de la base E+C-.....	33
3.3.1.	Cohérence entre les feuilles	33
3.3.2.	Filtrage inhérent au sujet du mémoire	34
3.3.3.	Filtrage supplémentaire.....	34

3.4.	Méthodologie de création de benchmark des émissions carbone par catégorie de bâtiments selon leur typologie et leur hauteur	36
3.4.1.	Rappel sur les émissions de gaz à effet de serre (GES).....	36
3.4.2.	Normalisation des indicateurs et définition de l'impact opérationnel	37
3.4.3.	Objectifs de l'analyse	37
3.4.4.	Obtenir une unité comparable des seuils de la RE2020	38
3.4.5.	Génération des résultats.....	39
3.5.	Méthodologie de régression multiple appliquée à la détection des choix constructifs influents sur les émissions carbones.....	40
3.5.1.	Objectifs de l'analyse	40
3.5.2.	Sélection des variables basée sur la littérature	40
3.5.3.	Diminution du nombre de variables	41
3.5.4.	Génération des résultats à l'aide du logiciel « RStudio »	44
3.5.5.	Choix de présentation des résultats	55
4.	Résultats	57
4.1.	Benchmark des émissions carbone par catégorie de bâtiments selon leur typologie et leur hauteur	57
4.1.1.	Comparaison typologique et de hauteur par catégorie de bâtiments	57
4.1.2.	Valeurs benchmark des émissions carbone par catégorie de bâtiments selon leur typologie et leur hauteur	59
4.2.	Régression multiple appliquée à la détection des choix constructifs déterminants sur les émissions carbone	63
4.2.1.	Détection des paramètres influents sur les EGES par régression multiple	63
4.2.2.	Détection des paramètres influents sur les EGES PCE par régression multiple	65
4.2.3.	Détection des paramètres influents sur les EGES OPE par régression multiple	68
4.2.4.	Regroupement des trois indicateurs environnementaux.....	71
5.	Discussion	74
5.1.	Sobriété énergétique et hiérarchisation des équipements pour le choix des systèmes techniques	74
5.2.	Compacité de la morphologie, typologie et structure.....	75
5.3.	Matériaux et composants de l'enveloppe	75
6.	Conclusion	77
	Bibliographie	79

Liste des figures

Figure 1 Emissions de gaz à effet de serre des bâtiments en France (Observatoire Climat-Énergie, s.d.)	1
Figure 2 Schéma synthétique de la structure du travail du TFE, correspondant aux étapes principales de la méthodologie de recherche	5
Figure 3 Présentation du cycle de vie du bâtiment et des contributeurs aux impacts (Ministère de la Transition écologique et solidaire, & Ministère de la Cohésion des territoires, 2017)	8
Figure 4 Emprise au sol de la surface de plancher (SdP) (Périé Architecte, 2019).....	10
Figure 5 Emprise au sol de la surface habitable en résidentiel (SHAB) (Périé Architecte, 2019)	10
Figure 6 Diagramme de flux de l'ACV (Southwest Environmental, 2016)	13
Figure 7 Cadre de l'ACV basé sur la norme ISO 14040 (INIES, n.d.)	13
Figure 8 Étapes du cycle de vie du bâtiment (ISO, 2011)	15
Figure 9 Énergie sur le cycle de vie vs énergie grise pour les études de cas considérées (Sartori & Hestnes, 2007).....	16
Figure 10 Aperçu des résultats individuels concernant les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie et la part des impacts incorporés, avec un focus sur les exemples à faibles émissions sur le cycle de vie (Röck et al., 2020)	17
Figure 11 Émissions de CO ₂ liées aux matériaux de construction des logements en immeuble collectif (Jeong et al., 2012)	22
Figure 12 Carte du zonage sismique de la France métropolitaine (République Française. 2010)	24
Figure 13 Carte des types de climat de Köppen-Geiger en Europe (Peel et al., 2007)	25
Figure 14 RE2020 – Zones Climatiques de France (Ministère de la Transition Écologique, 2021)	26
Figure 15 Diagramme température/profondeur selon la zone climatique considérée (Martin, 2013)	27
Figure 16 Synthèse des objectifs de l'ACV, des groupes de types de visualisation et de la quantité d'information représentée dans la visualisation (Hollberg et al., 2021)	31
Figure 17 Schéma méthodologique du mémoire	32
Figure 18 Répartition réelle des usages principaux des bâtiments de la base E+C-	33
Figure 19 Décomposition de l'indicateur « Ic bâtiment » dans la RE2020 (Ministère de la Transition écologique, 2024)	38
Figure 20 Histogramme des résidus réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés	50
Figure 21 QQ-plot réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés	51
Figure 22 Test d'homoscédasticité réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés	52
Figure 23 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre (Eges) par typologie et hauteur de bâtiment ($n \geq 10$)	58
Figure 24 Effets estimés des paramètres de conception sur les émissions globales de GES (EGES).....	63

Figure 25 Effets significatifs des paramètres de conception (en KgCO ₂ eq/m ² .an) sur les émissions globales de GES (EGES) regroupés par modalité	64
Figure 26 Effets estimés des paramètres de conception sur les EGES PCE	66
Figure 27 Effets significatifs des paramètres de conception (en KgCO ₂ eq/m ² .an) sur les émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements (PCE) regroupés par modalité	67
Figure 28 Effets estimés des paramètres de conception sur les EGES OPE.....	69
Figure 29 Effets significatifs des paramètres de conception (en KgCO ₂ eq/m ² .an) sur les émissions de GES liées aux consommations énergétiques du bâtiment en phase d'usage (OPE) regroupés par modalité	70

Liste des tableaux

Tableau 1 Comparatif entre la méthodologie E+C- et celle RE2020 (Institut Français pour la Performance du Bâtiment (IFPEB), Carbone 4, CSTB, 2022)	9
Tableau 2 Facteurs d'émission de CO ₂ pour différents matériaux de construction (exprimés en tonnes de CO ₂ par tonne de matériau) (Li et Chen, 2017)	22
Tableau 3 Seuils d'émissions de gaz à effet de serre de la RE2020 pour les bâtiments résidentiels (2022–2024 et 2025–2027) (Ministère de la Transition écologique, 2014)	39
Tableau 4 Regroupement et réduction des modalités catégorielles « structure et enveloppe » en vue de l'analyse de régression multiple	41
Tableau 5A Regroupement et réduction des modalités catégorielles « consommation d'énergie fossile et d'électricité » en vue de l'analyse de régression multiple.....	43
Tableau 6 Tableau de corrélation entre les modalités "nrj_princ" et "chauf_princ" réalisé dans le « logiciel RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés	48
Tableau 7 Indice d'inflation de la variance (Vif) réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés	55
Tableau 8 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de gaz à effet de serre (Eges) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO ₂ e/m ² .an)	60
Tableau 9 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements (EGES PCE) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO ₂ e/m ² .an)	61
Tableau 10 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de GES liées aux consommations opérationnelles (EGES OPE) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO ₂ e/m ² .an)	61
Tableau 11 Modalités de référence utilisées pour le modèle d'EGES total	65
Tableau 12 Modalités de référence utilisées pour le modèle d'EGES PCE.....	68
Tableau 13 Modalités de référence utilisées pour le modèle d'EGES OPE	71
Tableau 14 Effets estimés des choix de conception sur les indicateurs d'EGES.....	72

Introduction

1. Introduction

1.1. Avant-propos

Les activités humaines, principalement par le biais des émissions de gaz à effet de serre (GES), sont sans équivoque responsables du réchauffement climatique. Entre 2011 et 2020, la température moyenne à la surface du globe a augmenté de 1,1 °C par rapport à la période comprise entre 1850 et 1900 (IPCC, 2023). Les émissions mondiales de GES ont continué d'augmenter, avec des contributions historiques et actuelles inégalement réparties entre pays.

En 2023, la France a émis 58,4 MtCO₂e pour le secteur du bâtiment, respectant ainsi le budget carbone fixé par la Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), qui établissait un plafond de 71 MtCO₂e (voir Figure 1).

Cette baisse s'explique notamment par la diminution des consommations d'énergie pour le chauffage, attribuée à la hausse des prix de l'énergie, aux efforts de sobriété et aux rénovations énergétiques (CITEPA, 2024).

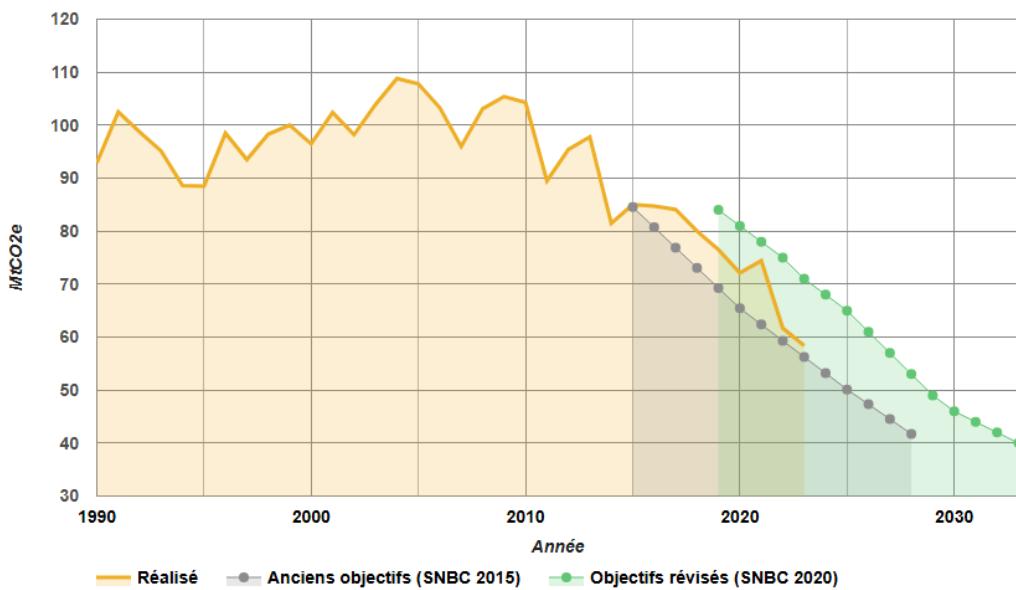


Figure 1 Emissions de gaz à effet de serre des bâtiments en France (Observatoire Climat-Énergie, s.d.)

Bien que ces résultats soient encourageants à l'échelle nationale, il est important de rappeler que la responsabilité des pays développés demeure d'engager des efforts continus. Les tendances globales restent préoccupantes, les émissions mondiales de GES poursuivant leur trajectoire ascendante.

Le secteur du bâtiment occupe une place centrale dans cette problématique : il représente environ 44 % de la consommation énergétique nationale et 25 % des émissions de GES. L'Analyse en Cycle de Vie (ACV) dans le bâtiment a émergé dès les années 1990 comme outil de mesure des impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie des constructions (Jardi, Meurisse & Peroumal, 2017).

Introduction

Depuis, plusieurs facteurs ont favorisé la démocratisation de cette méthode dans le secteur : d'une part, l'évolution du cadre législatif et environnemental, avec le « Grenelle de l'Environnement » (2007) et la « Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte » (2015) et d'autre part, la montée en maturité des outils, référentiels et bases de données disponibles (cadres ISO 14040, EN 15978, EN 15804, base INIES, logiciels ACV bâtiment).

Ce développement s'est accompagné, en France, de dispositifs d'incitation (aides financières via l'agence de la transition écologique (ADEME), bonus de constructibilité, etc.) et a culminé avec le lancement de l'expérimentation E+C- en 2016. Cette dernière visait à anticiper l'actuelle réglementation environnementale (la RE2020) en évaluant les performances des bâtiments neufs selon deux indicateurs : l'énergie (E+) et le carbone (C-). Elle repose sur une approche en cycle de vie pour mesurer les émissions de gaz à effet de serre, encourageant ainsi des conceptions plus sobres et durables. Cette initiative marque l'intégration de l'ACV dans un label public, fruit d'une gouvernance multi-acteurs mêlant institutions, normalisateurs, chercheurs et professionnels du secteur.

C'est sur la base de données issue de cette expérimentation E+C- que s'appuie ce mémoire.

Introduction

1.2. Objectifs du TFE

L'objectif de ce travail de fin d'études est d'évaluer l'impact sur le réchauffement climatique lié aux bâtiments résidentiels neufs à travers une approche quantitative basée sur les données issues de l'expérimentation E+C-.

En mobilisant les résultats de très nombreuses ACV de bâtiments récemment construits en France et regroupés dans la base de données E+C-, ce mémoire vise à identifier les paramètres de conception ayant le plus d'influence sur les émissions de gaz à effet de serre, tout au long du cycle de vie des bâtiments.

À l'aide d'un traitement statistique de la base de données, l'étude cherche également à établir une classification typologique des performances carbone, permettant de dégager des tendances, des leviers d'optimisation et des bonnes pratiques en matière de construction bas-carbone.

Plus largement, ce travail qui s'inscrit dans la continuité du travail de fin d'études de Lesley KEMVOU, offre une perspective de meilleure compréhension des choix architecturaux et techniques qui conditionnent la performance environnementale globale du secteur résidentiel, afin de conseiller les créateurs de projet avec des pratiques concrètes plus responsables. Cette démarche s'aligne également avec les travaux de Zabalza Bribián et al. (2009), qui identifient les promoteurs immobiliers, les architectes et les urbanistes comme les principaux utilisateurs potentiels de l'ACV dès les phases en amont de conception.

Trois questions de recherche principales structurent ce travail :

- Comment établir une classification typologique des bâtiments résidentiels neufs en fonction de leurs émissions de GES sur le cycle de vie ?
- Quels paramètres de conception architecturale et technique influencent le plus significativement les émissions carbone des bâtiments résidentiels neufs, selon les données de l'expérimentation E+C- ?
- Les bâtiments les plus performants en matière d'émissions carbone présentent-ils des caractéristiques communes révélatrices de stratégies de conception bas-carbone efficaces ?

Introduction

1.3. Structure du travail et principes méthodologiques

Ce travail de fin d'études se compose de 4 grandes parties correspondant aux 4 étapes de la méthodologie de recherche utilisée comme le montre la Figure 2.

La première phase, consacrée à la revue de la littérature, établit le cadre conceptuel et réglementaire de l'étude. Elle commence par un rappel du contexte français en matière de performance carbone dans le bâtiment, avant d'explorer l'ACV appliquée au secteur. Cette section examine également les pratiques de benchmarking environnemental des bâtiments résidentiels, identifie les principaux déterminants d'émissions carbone, et se termine par un état des lieux des formes de présentation et de visualisation des résultats issus de l'ACV.

La deuxième phase regroupe les pratiques méthodologiques mises en œuvre pour analyser la base de données E+C-. Une première sous-étape consiste à étudier la structure et le contenu de la base afin de garantir la cohérence des données exploitées. Ensuite, deux axes sont développés en parallèle : la création d'un benchmark des émissions carbone par typologie et hauteur de bâtiment, et l'application d'une régression linéaire multiple afin d'identifier les paramètres constructifs les plus influents sur les émissions de GES.

La troisième phase, dédiée à la présentation des résultats, s'organise en deux volets. D'une part, les valeurs issues du benchmarking sont exposées et comparées entre catégories de bâtiments. D'autre part, les résultats issus des modèles de régression sont analysés afin de détecter les choix de conception ayant un effet significatif sur les trois indicateurs environnementaux étudiés.

Enfin, la dernière phase de l'étude est consacrée à la discussion et à la conclusion. Les résultats sont comparés à ceux de la littérature existante afin d'évaluer leur cohérence ou

État de l'art

leurs spécificités. Une analyse critique est ensuite menée, mettant en lumière les limites de l'étude ainsi que les perspectives d'approfondissement possibles.

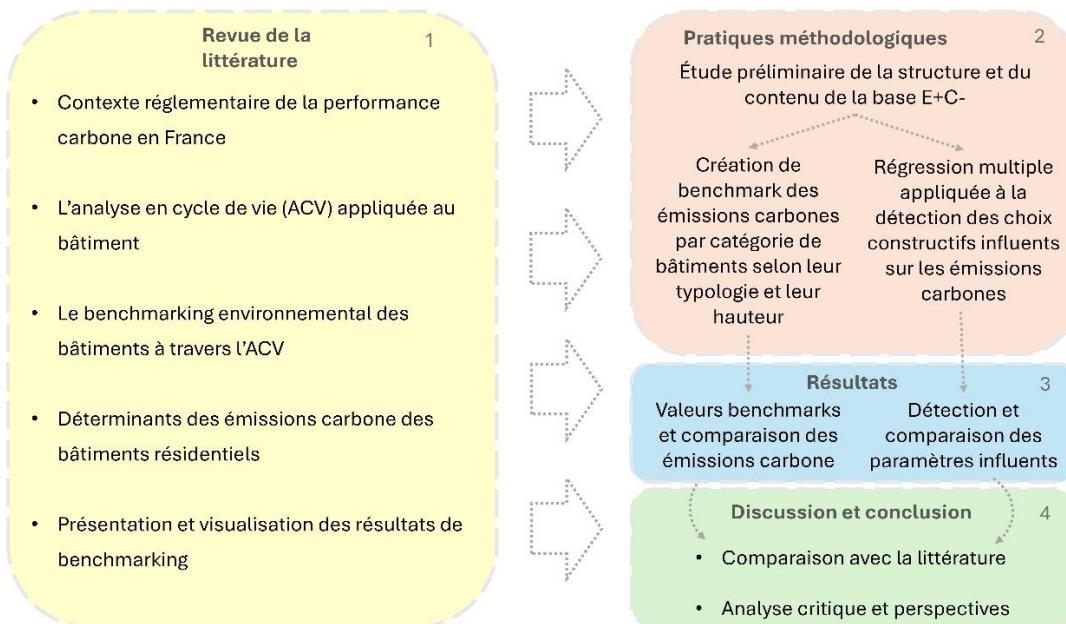


Figure 2 Schéma synthétique de la structure du travail du TFE, correspondant aux étapes principales de la méthodologie de recherche

2. État de l'art

2.1. Contexte réglementaire de la performance carbone en France

2.1.1. RT 2012 ou une réglementation centrée sur la performance énergétique

La RT 2012 est née du Grenelle de l'environnement et s'inscrit dans la volonté de réduire drastiquement la consommation énergétique des bâtiments neufs. Elle s'applique à tous les permis de construire déposés à partir du 1er janvier 2013. Son objectif principal est de limiter la consommation d'énergie primaire (l'énergie disponible dans la nature avant toute transformation) des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWh/m²/an en moyenne, tous usages confondus (chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, auxiliaires). Cette réglementation marque un tournant par rapport à la RT 2005 en introduisant une exigence de performance globale plutôt que des exigences élément par élément (Ministère de la Transition Écologique, 2010).

Elle repose sur trois exigences de résultats novatrices pour l'époque qui seront reprises dans l'expérimentation E+C- :

- La consommation d'énergie primaire (Cep), exprimée en kWh/(m².an), qui reprend les consommations de chauffage, de refroidissement, de production d'eau chaude sanitaire (ECS), d'éclairage et d'auxiliaires (ventilation et pompes).

État de l'art

Ce coefficient ne doit pas dépasser « Cep_{max} », fixé à 50kWhEP/m²/an en moyenne mais qui peut être modulé par la localisation géographique du bâtiment, sa capacité à éviter les surchauffes sans recours à la climatisation, son nombre de logements, son altitude, etc. (République Française, 2010).

- Le besoin bioclimatique (Bbio), qui représente les besoins en énergie liés au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage artificiel, indépendamment des systèmes techniques utilisés. Il est sans dimension et exprimé en nombre de points. Il reprend le principe de maximum à ne pas dépasser avec un coefficient « Bbio_{max} » modulable comme pour la Cep.
- La température intérieure conventionnelle (Tic), soit la température maximale atteinte à l'intérieur du bâtiment en période estivale dans des conditions standards d'occupation et sans climatisation. Pour le résidentiel, la période d'occupation considérée est la journée entière (Ministère de la Transition Écologique, 2010).

Bien qu'âgé de 15 ans aujourd'hui, l'arrêté prévoyait déjà des exigences concrètes de résultats avec une méthode de calcul simplifiée réglementaire (la Th-BCE 2012). Il prend également en compte les apports solaires, la maîtrise de l'étanchéité à l'air ainsi qu'un recours obligatoire aux énergies renouvelables.

Des attestations de conformité sont déjà mises en place avec certaines dérogations pour des bâtiments spécifiques avec des contraintes patrimoniales ou des zones climatiques extrêmes ce qui est une première pour l'époque.

Cependant, une composante principale pour le bien bâtir en France n'est pas encore présente : l'ACV, qui sera introduite par la suite avec l'expérimentation E+C-.

2.1.2. Introduction du carbone et de l'ACV avec l'expérimentation E+C-

L'expérimentation E+C- a été lancée en 2016 par les pouvoirs publics en France dans le but de préparer la nouvelle réglementation environnementale, aujourd'hui connue sous le nom de RE2020. Cette initiative s'inscrit dans la continuité des engagements de la France en matière de transition énergétique et climatique, notamment avec la « Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte » (LTECV, 2015) et l'accord de Paris signé la même année.

Elle a permis de fédérer les acteurs de la filière du bâtiment autour d'un objectif commun : anticiper la conception de bâtiments à faible consommation énergétique, voire à énergie positive, tout en intégrant une évaluation de leur impact carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie selon une démarche d'ACV (Cegibat, 2020).

L'expérimentation, menée sur une base volontaire, s'applique exclusivement aux bâtiments neufs, aussi bien en phase de conception qu'à leur réception. Le label est délivré par cinq certificateurs différents selon qu'il s'agisse de maisons individuelles, de logements collectifs ou de bâtiments non résidentiels (Jardi, Meurisse & Peroumal, 2017). Les projets de rénovation ainsi que les constructions situées hors du territoire métropolitain en sont exclus.

L'expérimentation vise à tester deux indicateurs innovants :

État de l'art

– L'énergie (E+) : contrairement à la RT2012 qui se limite aux cinq usages réglementaires, l'expérimentation élargit le périmètre d'évaluation à l'ensemble des consommations énergétiques du bâtiment.

– Le carbone (C-) : elle introduit une approche inédite en quantifiant les émissions de GES générées par le bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie. (Cerema, 2018).

L'expérimentation intègre également un nouvel indicateur relatif au bilan énergétique sur l'ensemble des usages du bâtiment : le bilan bâtiment à énergie positive ou BEPOS. Il est défini par la différence, exprimée en énergie primaire, entre la quantité d'énergie n'étant ni renouvelable ni de récupération consommée par le bâtiment et la quantité d'énergie renouvelable ou de récupération produite et injectée dans le réseau par le bâtiment et ses potentielles annexes.

L'indicateur valorise à la fois le recours aux énergies renouvelables utilisées en autoconsommation, ainsi que la production d'énergie renouvelable destinée à être injectée sur le réseau. Il prend également en compte l'amélioration de la performance du bâti et des systèmes énergétiques mis en œuvre. (Ministère de la Transition écologique et solidaire, & Ministère de la Cohésion des territoires, 2017).

Comme dit précédemment, l'expérimentation apporte un nouvel indicateur, le carbone C-. Ce dernier détermine des coefficients qui sont ensuite utilisés dans le calcul de deux indicateurs relatifs aux émissions de GES : l'E_{GES} et l'E_{GES PCE}.

L'E_{GES} correspond aux émissions de GES des quatre contributeurs (voir Figure 3) : l'I_{PCE} concerne les produits de construction et les équipements, l'I_{CHA}, le chantier, l'I_{CE}, la consommation d'énergie et l'I_{CRE}, la consommation et le rejet d'eau, le tout sur l'ensemble du cycle de vie auxquelles sont soustraits les bénéfices de GES au-delà du périmètre d'étude. Par cela nous entendons : les bénéfices et charges au-delà du cycle de vie, c'est-à-dire en dehors du périmètre d'évaluation qui sont calculés à partir de l'énergie exportée ainsi que de la valorisation des produits de construction et des équipements (Ministère de la Transition écologique et solidaire, & Ministère de la Cohésion des territoires, 2017).

État de l'art

		Performance environnementale du bâtiment sur son cycle de vie					
		Phase de production	Phase de construction	Phase d'exploitation	Phase de fin de vie	Bénéfices et charges au-delà du cycle de vie	
Contributeurs	Produits de construction et équipements	✓	✓	✓	✓	Potentiel de réutilisation, récupération et recyclage Export de production locale d'énergie	
	Consommation d'énergie			✓			
	Chantier		✓				
	Consommation d'eau			✓			

Figure 3 Présentation du cycle de vie du bâtiment et des contributeurs aux impacts (Ministère de la Transition écologique et solidaire, & Ministère de la Cohésion des territoires, 2017)

L'EGES,PCE quant à lui correspond aux émissions de GES liées uniquement au contributeur I_{PCE} (produits de construction et équipements), sur l'ensemble du cycle de vie auxquelles sont également soustraits les bénéfices de gaz à effet de serre au-delà du périmètre d'étude (Ministère de la Transition écologique et solidaire, & Ministère de la Cohésion des territoires, 2017).

Les opérations expérimentales sont référencées dans une base de données nationale, constituant un matériau d'analyse précieux tant pour les pouvoirs publics que pour la recherche. Un observatoire accompagne les acteurs en assurant le suivi des résultats, à travers des analyses techniques et économiques, en faisant évoluer la méthode et ses niveaux d'exigence, et en favorisant le partage d'expériences (Jardi, Meurisse & Peroumal, 2017).

Toutefois, en tant qu'expérimentation volontaire, l'E+C présente une certaine hétérogénéité dans les méthodes utilisées (logiciels ACV, hypothèses de modélisation, etc.), ce qui doit être pris en compte dans l'interprétation des résultats.

2.1.3. La RE2020 et son approche globale de l'impact environnemental

La RE2020 s'inscrit dans la continuité des objectifs fixés par la loi de Transition énergétique pour la croissance verte (LTECV, 2015) et la loi d'Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique (ÉLAN) promulguée en novembre 2018. Elle vise à améliorer la performance énergétique des bâtiments neufs, à réduire leur impact environnemental en intégrant les émissions de GES sur l'ensemble de leur cycle de vie, et à renforcer leur capacité d'adaptation face aux conditions climatiques futures, notamment en matière de confort d'été (Ministère de la Transition écologique, Cerema, 2024).

Trois objectifs principaux guident cette nouvelle réglementation :

État de l'art

- Favoriser la sobriété énergétique et accélérer la décarbonation énergétique.
- Réduire significativement l'empreinte carbone des bâtiments.
- Garantir un niveau de confort acceptable, notamment en période de forte chaleur, dans un contexte de changement climatique.

Afin d'en définir les contours, une vaste phase de concertation a été lancée en janvier 2019. Elle a mobilisé l'ensemble des parties prenantes du secteur : industriels, maîtres d'ouvrage, bureaux d'études, architectes, représentants de l'État, etc. Les échanges ont été nourris par les travaux de 16 groupes d'expertise thématique, eux-mêmes enrichis par les retours d'expérience de l'expérimentation E+C- menée depuis fin 2016. Ce processus collaboratif a permis d'identifier à la fois les points de convergence et les points de friction, facilitant ainsi l'élaboration d'un cadre réglementaire ambitieux et partagé (Ministère de la Transition écologique, s.d.).

Cependant la RE2020 apporte tout de même des modifications par rapport à l'expérimentation E+C- qui était basée sur la méthode de calcul Th-BCE de la RT2012 (voir Tableau 1).

Tableau 1 Comparatif entre la méthodologie E+C- et celle RE2020 (Institut Français pour la Performance du Bâtiment (IFPEB), Carbone 4, CSTB, 2022)

Scénario modèles de consommations	Méthodologie E+C-	Méthodologie RE2020
	Moteur de calcul de la RT 2012 (Th-BCE)	Modification des scénarios météorologiques et scénarios d'occupation
Titre V de la RT2012	-	-
Coefficients d'énergie primaire	Coefficient d'énergie primaire de l'électricité à 2,58	Coefficient d'énergie primaire de l'électricité à 2,3
Analyse de cycle de vie	Méthode statique	Méthode dynamique
Facteurs d'émissions	Electricité : méthode saisonnalisée par usage (210 gCO ₂ e/kWhEf pour le chauffage) Gaz naturel : 240 gCO ₂ e/kWh	Electricité : méthode mensualisée par usage (79 gCO ₂ e/kWhEf pour le chauffage) Gaz naturel : 227 gCO ₂ e/kWh
Surface de référence	Surface de plancher (m ² SDP)	Surface habitable en résidentiel (m ² SHAB)

Les scénarios météorologiques ont été actualisés, notamment par la mise à jour des années de référence établies à partir de données issues de Météo-France sur la période allant de janvier 2000 à décembre 2018. Deux stations météorologiques ont également été modifiées : La Rochelle a été remplacée par Tours, et Nice par Marignane. Par ailleurs, les scénarios d'occupation ont été ajustés afin de mieux refléter le comportement réel des usagers. Toutefois, il s'agit toujours de scénarios conventionnels basés sur des profils moyens, ce qui limite leur usage à une évaluation normative, sans vocation prédictive des consommations réelles (Ministère de la Transition écologique, Cerema, 2024).

État de l'art

2.1.3.1. Surface de référence

Nous remarquons également sur le Tableau 1 que la surface de référence des bâtiments a changé avec la RE2020. Nous passons de la surface de plancher (SdP) à la surface habitable en résidentiel (SHAB).

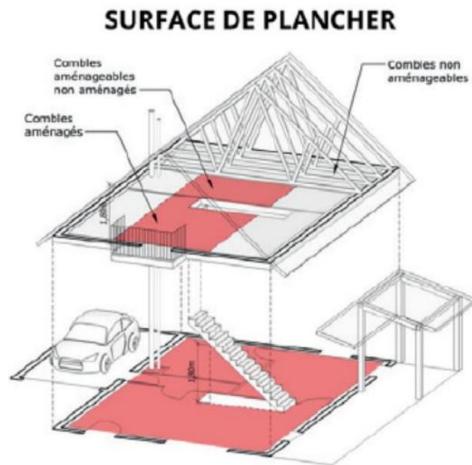


Figure 4 Emprise au sol de la surface de plancher (SdP) (Périé Architecte, 2019)

Comme illustré sur la Figure 4, la SdP correspond à la somme des surfaces closes et couvertes de chaque niveau, mesurées au nu intérieur des murs, sous une hauteur sous plafond supérieure à 1,80 mètre. L'épaisseur des murs n'est pas prise en compte dans ce calcul (Groupe d'experts transversaux GE11, 2019).

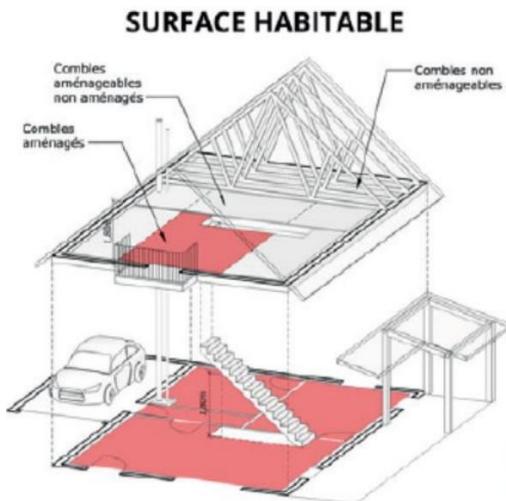


Figure 5 Emprise au sol de la surface habitable en résidentiel (SHAB) (Périé Architecte, 2019)

La SHAB, en Figure 5, correspond à la surface de plancher construite, après déduction des espaces tels que les escaliers, cages d'escaliers, gaines, ainsi que les embrasures de portes et fenêtres. Ne sont pas pris en compte dans cette surface les combles non aménagés, caves, sous-sols, remises, garages, terrasses, loggias, balcons, séchoirs extérieurs au logement, vérandas, volumes vitrés, locaux communs, autres dépendances des logements, ni les parties

État de l'art

de locaux dont la hauteur sous plafond est inférieure à 1,80 mètre (Ministère de la Transition écologique, Cerema, 2024).

Dans le cadre de la RT 2012, une exigence de moyens repose sur cette surface : pour les bâtiments résidentiels, la surface des menuiseries (portes et fenêtres) doit représenter au minimum un sixième de la surface habitable.

Par ailleurs, les calculs des consommations en énergie finale utilisent la surface dite « chauffée et éclairée », qui correspond également à la SHAB pour les bâtiments résidentiels.

L'avantage de cette nouvelle surface est qu'elle est déterminée et calculée à chaque phase du projet. Elle est opposable juridiquement et peut être facilement vérifiée par les organismes certificateurs ainsi que par les contrôleurs techniques. De plus, elle est aisément compréhensible, car elle correspond aux surfaces d'intérêt principal pour les investisseurs. Elle est dorénavant utilisée pour tous les indicateurs énergétiques réglementaires car elle se concentre sur l'usage réel du bâtiment. Cela permet de comparer les consommations d'énergie rapportées à la surface effectivement habitable, ce qui est cohérent du point de vue de l'usager.

Cependant, pour l'analyse de cycle de vie, la surface de référence reste la SdP car l'empreinte carbone ne dépend pas seulement des espaces habitables. Elle dépend de tout ce qui est construit : murs, circulations, combles, parties communes, locaux techniques, etc. Donc l'impact environnemental est rapporté à la surface construite, pas à la surface habitable.

2.1.3.2. Méthode statistique vs méthode dynamique

La RE2020 propose également une nouvelle méthode dynamique d'ACV. La méthode statique de l'E+C- repose sur des valeurs forfaitaires fournies par le ministère de la Transition écologique pour certains lots ou sous-lots, notamment ceux relatifs aux composants, au chantier, à la parcelle ou à l'eau. Elle permet ainsi d'estimer les impacts même en l'absence de données spécifiques au projet.

L'approche détaillée de la RE2020, quant à elle, s'adresse aux maîtres d'ouvrage souhaitant valoriser leurs efforts. Elle exige l'utilisation de données réelles du projet pour chacun des lots, offrant une évaluation plus précise et représentative de l'impact environnemental.

Contrairement à l'approche statique, qui suppose que toutes les émissions ont lieu immédiatement, l'ACV dynamique introduit une pondération temporelle : les émissions de GES sont affectées d'un coefficient dépendant de leur date d'émission. Ainsi, une émission ayant lieu au début de la vie du bâtiment aura un poids plus important qu'une émission différée. Cette méthode permet également de prendre en compte les effets du stockage temporaire de carbone, notamment pour les matériaux biosourcés.

Par exemple, une poutre en bois capte du CO₂ durant la croissance de l'arbre, ce qui génère un « crédit carbone » au début de sa vie. Ce carbone est ensuite relâché à la fin de vie du bâtiment. L'approche dynamique prend en compte cette temporalité, ce qui peut améliorer le bilan carbone global des matériaux stockant temporairement du carbone. À l'inverse, pour des matériaux tels que le béton ou l'acier, dont les émissions ont principalement lieu en phase

État de l'art

de production, les résultats entre approche statique et dynamique sont très proches (Ministère de la Transition écologique, Cerema, 2024).

Ainsi, la réglementation française en matière de performance environnementale des bâtiments neufs repose désormais sur une évaluation plus fine et plus cohérente des émissions de GES tout au long du cycle de vie du bâtiment. Ce changement de paradigme, marqué par l'introduction de l'ACV dynamique dans la RE2020, reflète une volonté d'intégrer la dimension temporelle des impacts carbone et d'encourager des choix de conception plus vertueux. Pour mieux comprendre les implications de cette méthode et les leviers d'optimisation qu'elle propose, il est nécessaire de revenir plus en détail sur le fonctionnement, les principes et les enjeux de l'ACV appliquée au secteur du bâtiment.

2.2. L'analyse en cycle de vie appliquée au bâtiment

2.2.1. Définition et intérêt de l'ACV

L'ACV est un outil permettant d'évaluer de manière systématique la performance environnementale de produits ou de procédés tout au long de leur cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières (première étape de la Figure 6), la fabrication, l'utilisation, jusqu'à leur fin de vie (étape 7 « disposal » (élimination) de la Figure 6). Elle est ainsi souvent considérée comme une approche du berceau à la tombe (« cradle to grave ») dans l'évaluation des impacts environnementaux (Ciambrone, D. F., 1997).

L'approche du berceau à la sortie d'usine (« cradle to gate »), quant à elle, se limite à une portion du cycle de vie, depuis l'extraction des ressources jusqu'à la sortie d'usine (deuxième étape de la Figure 6), c'est-à-dire avant le transport vers le consommateur (troisième étape de la Figure 6)(Cao, C., 2017).

Finalement, l'approche du berceau au berceau (« cradle to cradle ») est une forme particulière d'évaluation du berceau à la tombe (« cradle to grave »), dans laquelle l'étape de fin de vie du produit consiste en un processus de recyclage ou de réutilisation. Cette méthode vise à minimiser l'impact environnemental des produits en adoptant des pratiques durables tout au long de leur production, utilisation et élimination, tout en intégrant une dimension de responsabilité sociale dans le développement des produits (Cao, C., 2017).

État de l'art

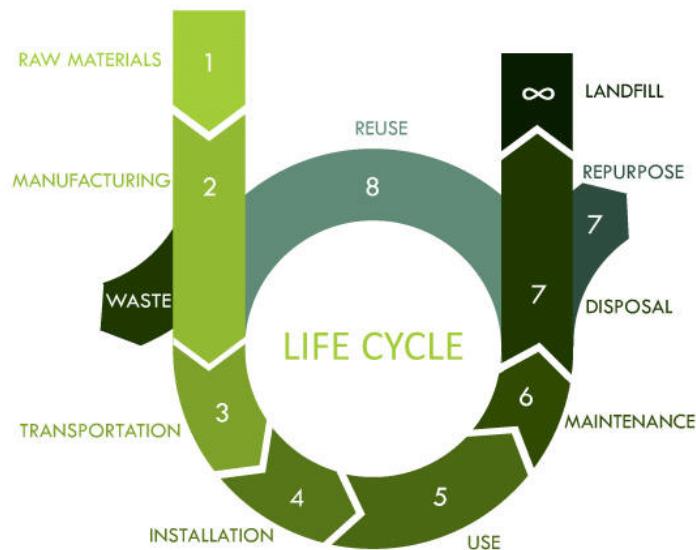


Figure 6 Diagramme de flux de l'ACV (Southwest Environmental, 2016)

La description de la méthodologie ACV repose sur les normes internationales de la série ISO 14040 et se compose de quatre étapes analytiques distinctes comme illustré en Figure 7 : la définition des objectifs et du périmètre, la réalisation de l'inventaire, l'évaluation des impacts, et enfin l'interprétation des résultats (ISO, 2006).

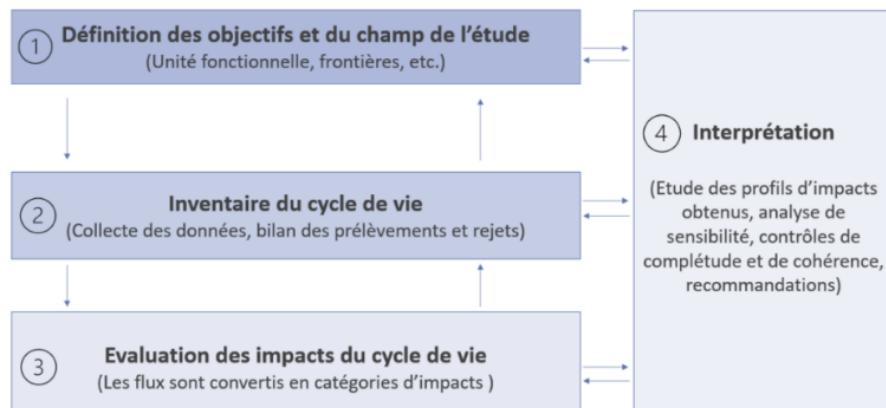


Figure 7 Cadre de l'ACV basé sur la norme ISO 14040 (INIES, n.d.)

Premièrement, la définition des objectifs et du champ d'étude consiste à préciser la finalité de l'analyse, le public visé ainsi que les frontières du système.

Deuxièmement, l'inventaire du cycle de vie (ICV) implique la collecte de données pour chaque processus unitaire, concernant tous les flux d'entrée et de sortie d'énergie et de matière, ainsi que les émissions vers l'air, l'eau et le sol.

Troisièmement, l'évaluation des impacts d'ICV permet d'estimer les impacts environnementaux potentiels ainsi que les ressources utilisées dans le système modélisé. Cette étape comprend trois éléments obligatoires : la sélection des catégories d'impact, la classification des résultats de l'ICV et la caractérisation des indicateurs d'impact. La classification consiste à assigner les émissions, déchets et ressources aux catégories d'impact

État de l'art

choisies (par exemple : dioxyde de carbone CO₂, méthane CH₄, monoxyde de carbone CO). Les résultats convertis de l'ICV sont ensuite regroupés pour produire un indicateur final, représentant le résultat principal de l'analyse d'impact.

Enfin, la dernière étape définie par la norme ISO 14040 est l'interprétation. Elle vise à identifier les éléments significatifs, à analyser les résultats pour tirer des conclusions et formuler des recommandations. Le rapport final constitue l'aboutissement de toutes les phases de l'ACV selon cette norme (Ortiz et al., 2009).

Dans la continuité des applications classiques de l'ACV pour l'évaluation de produits, plusieurs études se sont concentrées sur l'évaluation environnementale des matériaux de construction. L'objectif de ces recherches, et de ce travail de fin d'études, est de permettre la sélection de matériaux et de produits ayant un meilleur profil environnemental, en identifiant les sources des impacts les plus significatifs (Singh et al., 2011).

Cette méthode fournit donc un cadre clair et structuré pour analyser les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie d'un système, quelle que soit sa complexité. Appliquée au domaine du bâtiment, elle permet d'appréhender des enjeux spécifiques que nous aborderons dans la partie suivante.

2.2.2. Émissions incorporées vs. émissions opérationnelles dans les ACV bâtiment

L'application de l'ACV dans le secteur du bâtiment a connu un essor significatif au cours des quinze dernières années, à la suite de la publication de la norme ISO 14040, puis plus récemment de la norme EN 15978, qui définit la méthodologie ACV spécifique aux bâtiments (ISO, 2006).

Cependant, contrairement à un produit manufacturé lambda, les bâtiments sont des systèmes complexes en raison de leur conception spécifique à leur environnement, de la diversité des matériaux employés, de leur durée d'utilisation et de la multitude de parties prenantes impliquées. Toute cette complexité est démontrée sur la Figure 8. Les impacts des bâtiments sur l'environnement sont divisés en deux : en impacts incorporés (ou « embodied impacts ») et en impacts opérationnels (ou « operational impacts ») (Roberts, et al., 2020).

Ce chapitre examine comment cette dualité influence la performance environnementale globale d'un bâtiment, à partir des enseignements tirés de la littérature scientifique, et introduit les bases de la réflexion qui sera développée dans ce mémoire sur les leviers de conception permettant de réduire les émissions de GES.

État de l'art

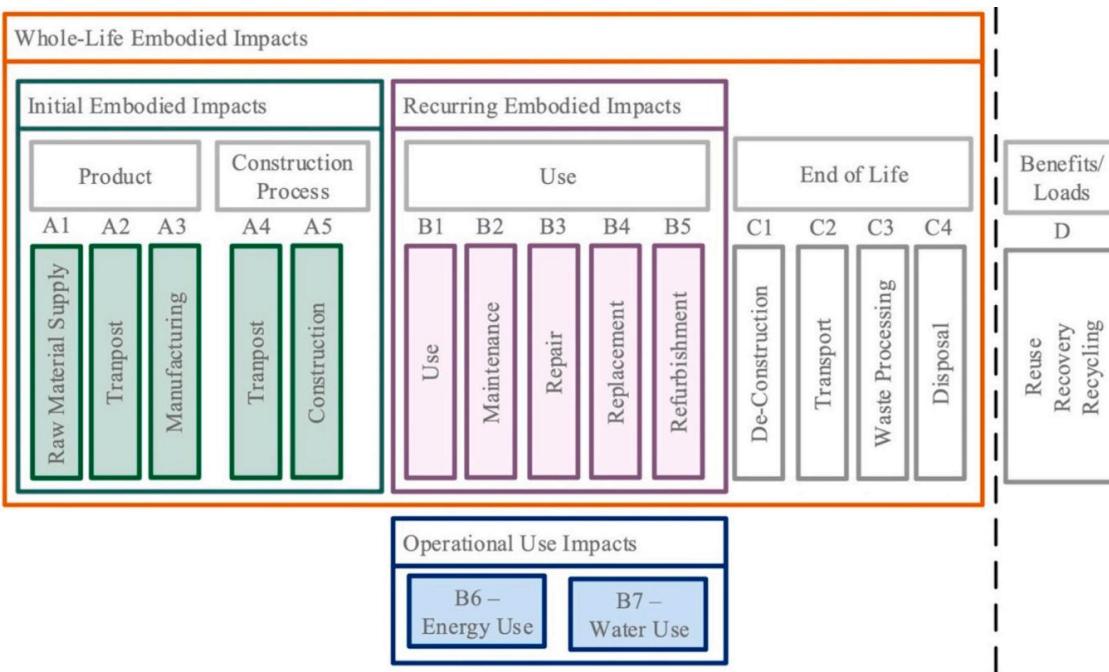


Figure 8 Étapes du cycle de vie du bâtiment (ISO, 2011)

La Figure 8 présente les différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment, telles qu'idéalement intégrées dans une ACV complète selon la norme européenne EN 15978. Seule l'étape D, portant sur le recyclage et la réutilisation des matériaux, est optionnelle (ISO, 2011).

Les impacts incorporés (ou « embodied impacts ») concernent la fabrication des matériaux, leur transport jusqu'au site, la construction sur place, la rénovation et les processus de fin de vie. Ces derniers peuvent être redévisés en impacts incorporés initiaux (ou « initial embodied impacts »), ce qui englobe la naissance des différents produits et leurs assemblage en un bâtiment, et en impacts incorporés récurrents (« recurring embodied impacts »), ce qui désigne tout le processus d'utilisation d'un bâtiment, allant de sa simple utilisation à sa rénovation.

Les émissions de GES incorporées sont attribuées aux matériaux et à l'énergie nécessaires à la construction du bâtiment. Elles proviennent principalement de la consommation de combustibles fossiles (pour l'électricité, le transport et l'énergie utilisée sur le chantier) ainsi que de réactions chimiques (notamment les émissions de CO₂ lors de la calcination du calcaire pour la production de ciment) (Simonen et al., 2017).

Les impacts opérationnels (ou « operational impacts ») sont les émissions générées par la consommation d'énergie et d'eau liée au fonctionnement du bâtiment (RICS, 2017).

Historiquement, l'énergie grise (ou « embodied energy ») a toujours été inférieure à l'énergie déployée en phase d'exploitation des bâtiments. Cependant, des études récentes comme celle de Sartori et Hestnes (2007) ou celle de Röck et al. (2020) montrent un changement dans le rapport entre énergie grise et énergie déployée en phase d'exploitation. Ces premiers ont étudié la consommation d'énergie sur le cycle de vie de bâtiments conventionnels, basse énergie et zéro énergie. Six versions d'un même bâtiment ont été analysées dans le contexte

État de l'art

allemand : une version conventionnelle, quatre versions basse énergie et une version autosuffisante.

Les résultats en Figure 9 montrent que l'énergie totale consommée sur le cycle de vie du bâtiment autosuffisant est plus élevée que celle de certaines versions basse énergie. Cela s'explique par le fait que, dans le cas des bâtiments basse énergie, l'augmentation de l'énergie grise liée aux mesures d'efficacité énergétique est relativement faible par rapport à la réduction de l'énergie opérationnelle.

Cela diminue donc sensiblement leur énergie totale sur le cycle de vie. En revanche, dans le cas de la maison autosuffisante, bien que l'énergie opérationnelle soit nulle, l'énergie grise est si élevée qu'elle dépasse l'énergie de cycle de vie de certains scénarios basse énergie (Cabeza, et al., 2014).

Cela indique qu'elle se repose sur des systèmes techniques complexes et fortement énergivores. Il existe donc une limite aux économies d'énergie globales qu'on peut atteindre uniquement par la réduction de l'énergie d'usage et se préoccuper également de l'énergie grise d'un bâtiment devient de plus en plus primordial.

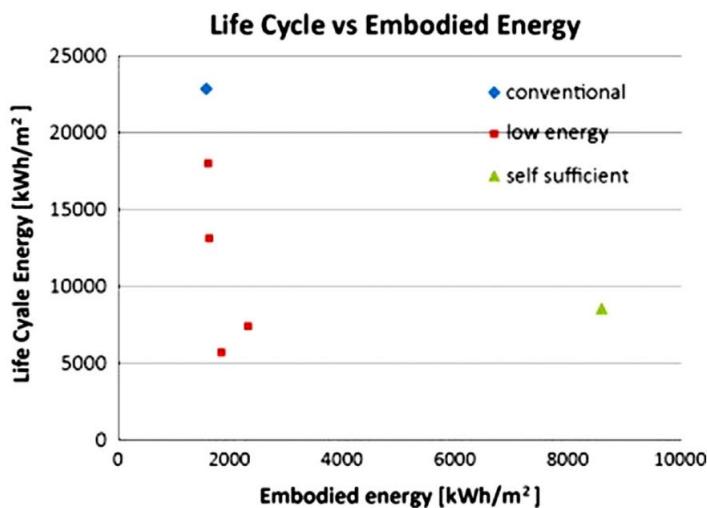


Figure 9 Énergie sur le cycle de vie vs énergie grise pour les études de cas considérées (Sartori & Hestnes, 2007)

Cette dépense d'énergie se reflète également sur les émissions de GES comme l'ont montré Röck et al. (2020). La Figure 10 illustre les émissions totales de GES sur le cycle de vie, relatives aux émissions incorporées (« embodied GHG emissions ») dans cette étude. Cette dernière examine les tendances mondiales des émissions de GES générées tout au long du cycle de vie des bâtiments, en compilant et analysant de manière systématique plus de 650 études de cas d'ACV. Les résultats sont présentés selon différentes classes de performance énergétique sur la base d'un échantillon final de 238 cas. Les zones colorées montrent ces différentes classes de performance énergétique.

État de l'art

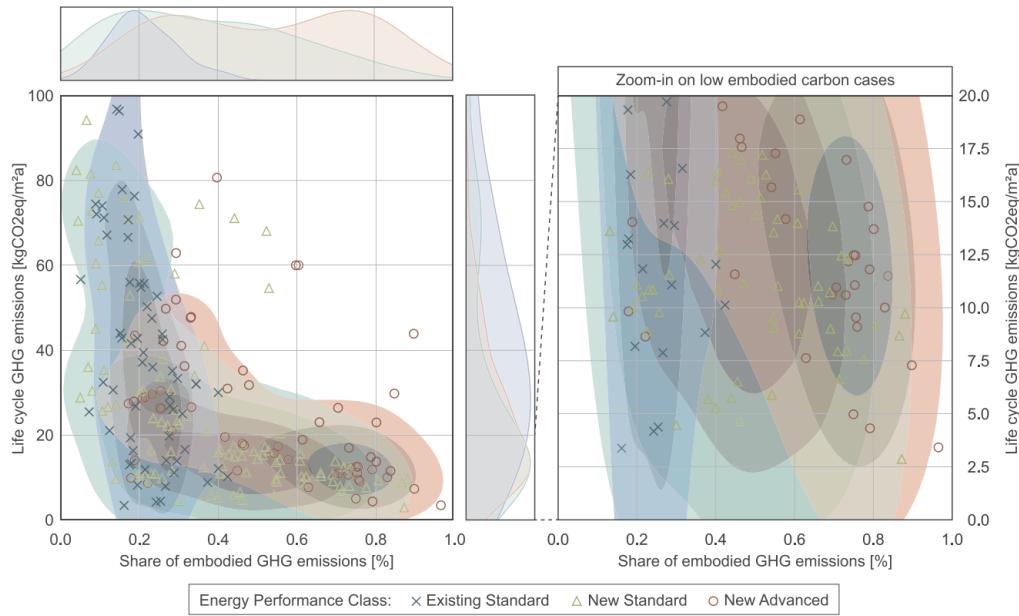


Figure 10 Aperçu des résultats individuels concernant les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie et la part des impacts incorporés, avec un focus sur les exemples à faibles émissions sur le cycle de vie (Röck et al., 2020)

On observe une tendance nette qui se dégage : les bâtiments à haute performance énergétique, dont la consommation d'énergie opérationnelle a été réduite (ce qui se traduit par une part plus élevée d'émissions incorporées), présentent globalement des émissions totales plus faibles sur le cycle de vie.

En se focalisant sur les bâtiments ayant de faibles émissions de GES sur le cycle de vie pendant la période de référence (inférieures à 20 kgCO₂éq/m².an), ces auteurs constatent que la part des émissions incorporées a tendance à augmenter en passant des bâtiments existants aux bâtiments neufs standards, puis aux bâtiments neufs à haute performance. On remarque de nouveau que les bâtiments construits selon des normes existantes ont un faible niveau d'émissions incorporées et une contribution plus importante en terme d'énergie opérationnelle. À l'inverse, pour un même niveau d'émissions totales, les bâtiments conformes aux nouvelles normes, plus avancées, présentent une part nettement plus élevée d'émissions incorporées. Cela signifie que les économies réalisées sur l'énergie d'exploitation ont été compensées, voire annulées, par une augmentation des émissions dues aux matériaux et aux systèmes techniques.

Les deux études confirment que certains cas sont capables d'atteindre un faible niveau d'émissions globales sans nécessairement accroître la part des émissions incorporées. Parallèlement, ces résultats montrent une tendance générale vers une augmentation de la part des émissions incorporées, ce qui soutient qu'un intérêt particulier doit y être attribué. C'est l'objet de ce mémoire, qui vise à identifier, à partir d'un large corpus de données issues de l'expérimentation E+C-, les leviers de réduction les plus efficaces pour orienter la conception de bâtiments résidentiels neufs à faible empreinte carbone.

État de l'art

2.3. Le benchmarking environnemental des bâtiments à travers l'ACV

Selon la norme ISO 21678:2020, le benchmarking est défini comme :

« un processus de collecte, d'analyse et de mise en relation des données de performance de bâtiments comparables ou d'autres types d'ouvrages de construction » (International Organization for Standardization, 2020, section 3.1, page 2).

Il est couramment utilisé dans les systèmes de certification environnementale des bâtiments, tels que le « Leadership in Energy and Environmental Design » (ou LEED), le « Building Research Establishment Environmental Assessment Method » (ou BREEAM), la « Haute Qualité Environnementale » (ou HQE), le « Sustainable Building Tool » (ou SBTool), le « Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen » (ou DGNB), etc. Dans ces outils, l'évaluation de la performance d'un bâtiment, fondée sur des critères sélectionnés, est comparée à des seuils prédéfinis ou à des valeurs de référence. Les indicateurs quantitatifs et qualitatifs sont ensuite traduits en notes qui sont agrégées pour aboutir à un score final. Les principales limites de ces systèmes étant qu'ils ne permettent pas une réelle comparabilité en raison des divergences dans le périmètre d'analyse et les choix méthodologiques (Gervasio & Dimova, 2018).

Ainsi, l'objectif principal du développement de benchmarks appliqués aux bâtiments est de créer un référentiel cohérent et transparent pour évaluer la performance environnementale de ces derniers, dans une logique de réduction efficace des impacts sur notre planète.

2.3.1. La collecte des données

La définition des benchmarks implique la collecte de deux types de données distincts (Gervasio & Dimova, 2018) :

- La collecte de données relatives aux bâtiments.
- La collecte de données environnementales nécessaires à la quantification des impacts environnementaux potentiels.

Dans le cas de l'expérimentation E+C-, la collecte des données s'est faite de manière volontaire par les maîtres d'œuvre, bureaux d'études ou promoteurs immobiliers. Elles étaient saisies via une plateforme dédiée (l'OBEC) et possiblement avec une mise à jour à la réception des bâtiments. Les contributions peuvent donc être inégales selon le niveau de détail ou la rigueur des acteurs.

Le premier type de données provient d'études de conception, de DOE, de maquettes BIM ou de déclarations manuelles. Pour les données environnementales elles sont issues des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) ou des Profils Environnementaux Produit (PEP) pour les équipements les deux étant issues de la base INIES en France.

État de l'art

2.3.2. Définition et structuration des valeurs de référence pour le benchmarking ACV

2.3.2.1. Définition des valeurs de benchmarks

Pour l'élaboration de benchmarks, des données quantitatives relatives à la performance environnementale des bâtiments sont nécessaires. Elles permettent la définition de valeurs de référence comme décrites après. Différentes sources d'information peuvent être mises à disposition par les benchmarks en fonction de l'objectif poursuivi par ces derniers (Hernandez & Bosdevigie, 2012):

- Lorsque l'objectif est de définir des cibles stratégiques politiquement, des valeurs cibles sont recherchées. Elles représentent un niveau théorique maximal de performance.
- Si le but est de fixer des valeurs limites dans des normes ou réglementations, celles-ci peuvent correspondre à la valeur minimale acceptable qui est en fait un seuil de performance.
- Lorsque l'objectif est d'encourager une conception environnementale améliorée, des valeurs de référence peuvent être établies. Ce sont souvent les valeurs moyennes et/ou médianes.
- Un dernier objectif est d'encourager les projets exemplaires en établissant une valeur dite de « bonne pratique ».

Par ailleurs, la pratique dite « conventionnelle » est généralement représentée par la médiane des performances environnementales des bâtiments, tandis que la bonne pratique représentée par la valeur cible est définie comme la performance atteinte par les 25 % des bâtiments les plus performants (Gervasio & Dimova, 2018).

Les valeurs limites et de référence, quant à elles, sont qualifiées de valeurs de court terme : elles permettent d'exclure les bâtiments à fort impact environnemental. Toutefois, leur effet sur l'amélioration environnementale reste limité, et elles doivent être régulièrement révisées à la hausse (VITO et al., 2018).

Les pratiques conventionnelles et les bonnes pratiques relèvent plutôt d'objectifs à moyen ou long terme : elles incitent à une progression vers des performances accrues. Leur principal inconvénient est qu'elles peuvent ne pas être atteignables pour tous les projets, en raison de limites techniques ou de manque de connaissance.

Il est donc recommandé d'utiliser au moins deux types de valeurs de référence dans un système de benchmarking, afin de couvrir à la fois les objectifs immédiats et les objectifs à long terme.

2.3.2.2. Référence externe vs interne

Une première distinction essentielle dans les paramètres des benchmarks concerne la base comparative qui permet de différencier deux grandes catégories : les benchmarks externes et les benchmarks internes (Ganassali et al., 2016).

État de l'art

Les benchmarks externes présentent des valeurs moyennes ou représentatives calculées à partir d'un grand ensemble de bâtiments existants et servent de base de comparaison pour les bâtiments de cette même catégorie. À l'inverse, les benchmarks internes reposent sur un bâtiment de référence spécifiquement défini (un bâtiment jumeau), ayant des caractéristiques géométriques et contextuelles similaires au projet analysé. Parmi les systèmes de benchmarking étudiés, la majorité (dont l'E+C-) utilise des benchmarks externes ; seuls la « Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency »CASBEE et le LEED relèvent de la seconde catégorie (Gervasio & Dimova, 2018).

Les benchmarks externes permettent une comparaison entre la performance environnementale du projet et celle du parc existant, offrant ainsi un positionnement sur le marché. Ils permettent également une évaluation globale de la conception, incluant la géométrie, le choix des matériaux et la performance énergétique. À l'inverse, les benchmarks internes se concentrent principalement sur l'impact des choix de matériaux. (VITO et al., 2018).

2.3.2.3. Approche bottom-up vs top-down

Pour définir des benchmarks externes, deux approches peuvent être mobilisées en fonction des sources de données disponibles (VTT, 2012) :

La première, la plus répandue, est une approche ascendante (« bottom-up »), fondée sur une analyse statistique de bâtiments réels (comme l'expérimentation E+C-), ou sur des bâtiments génériques.

La seconde est une approche descendante (top-down), qui définit les benchmarks à partir d'objectifs environnementaux globaux ou de politiques publiques, traduits au secteur du bâtiment. Parmi ces objectifs figurent, par exemple, les objectifs de réduction des émissions de GES (Chandrakumar et al., 2019).

Ces deux approches présentent des avantages et inconvénients complémentaires (Gervasio & Dimova, 2018) :

- L'approche bottom-up permet de se baser sur des valeurs réalistes basées sur les pratiques et techniques de construction actuelles, mais elle nécessite un volume de données suffisant et représentatif.
- L'approche top-down, quant à elle, permet de fixer des objectifs de long terme cohérents avec les politiques environnementales, mais repose sur la disponibilité d'objectifs globaux et sur des procédures d'allocation robustes.

2.4. Déterminants des émissions carbone des bâtiments résidentiels

La compréhension des facteurs qui influencent les émissions de GES est essentielle pour guider la conception de bâtiments plus sobres en carbone.

La conception d'un bâtiment dépend des conditions locales, des exigences techniques et fonctionnelles issues de la réglementation de sécurité et/ou des demandes spécifiques du

État de l'art

maître d'ouvrage. Par conséquent, la performance environnementale des bâtiments sera également influencée par ces mêmes facteurs, et la définition de valeurs de référence devrait tenir compte de ces éléments de différenciation.

2.4.1. Influence de la typologie et du système structurel

La compréhension des facteurs qui influencent les émissions de GES est essentielle pour guider la conception de bâtiments plus sobres en carbone. La conception d'un bâtiment dépend notamment des conditions locales, des exigences techniques et fonctionnelles issues de la réglementation, et des demandes spécifiques du maître d'ouvrage. Ces paramètres influencent directement la performance environnementale du bâtiment, et donc les valeurs de référence associées aux émissions de GES.

Selon Gervasio et Dimova (2018), si des valeurs de référence générales peuvent être utiles pour comparer de larges groupes de bâtiments (par exemple, le résidentiel), il est toutefois préférable d'affiner les comparaisons en fonction de typologies spécifiques (maisons individuelles, immeubles collectifs, etc.). C'est ce qu'a mis en œuvre l'Association HQE et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) dans une étude regroupant 63 bâtiments, répartis en trois catégories : maisons individuelles (MI), immeubles collectifs (IC) et bâtiments de bureaux (BB), avec des analyses menées sur 50 et 100 ans (CSTB, 2013).

Les résultats montrent que les bâtiments de bureaux affichent la consommation d'énergie primaire la plus élevée (valeurs médianes autour de 300 kWh/m².an), tandis que les immeubles collectifs présentent les émissions de GES les plus importantes (environ 23 kg CO₂éq/m².an). À l'inverse, les maisons individuelles présentent des performances plus favorables sur ces deux indicateurs. La prise en compte de la typologie et de la morphologie (surface, hauteur, compacité) s'impose donc comme un déterminant clé dans toute analyse comparative.

Les choix constructifs, en particulier les éléments structurels comme les fondations, les planchers et la superstructure, influencent également fortement les impacts environnementaux des bâtiments. La structure représente la part la plus importante du poids total d'un bâtiment, ce qui en fait une source notable d'émissions grises, tant en termes d'énergie que de carbone (Kaethner & Burridge, 2012).

L'étude du CSTB (2013) révèle que, bien que les lots structurels ne représentent qu'une faible part de l'énergie primaire totale du bâtiment (<10 %), ils contribuent de manière significative aux émissions carbone. Les émissions attribuées à la structure atteignent jusqu'à 20 % pour les maisons individuelles, 23 % pour les immeubles collectifs et 33 % pour les bâtiments de bureaux. Rapportés aux seuls produits de construction et équipements, ces éléments représentent entre 22 % et 31 % de l'énergie primaire, et jusqu'à 50 % des émissions de GES dans les typologies les plus impactantes.

2.4.2. Matériaux de construction et intensité carbone

Au-delà du système constructif, le choix des matériaux influe directement sur l'empreinte carbone du bâtiment. Le secteur de la construction consomme 16 % de la production mondiale d'acier, 25 % du bois et 16 % de l'eau utilisés à l'échelle mondiale (W.S.A., 2014 ;

État de l'art

Jeong et al., 2012). Le ciment et l'acier sont identifiés comme les deux principaux contributeurs aux émissions de CO₂ des bâtiments (Wang et al., 2024).

Asif et al. (2007) ont mené une analyse sur huit matériaux de construction d'une maison en Écosse. Le béton y représentait 61 % de l'énergie grise totale et 99 % des émissions de CO₂ liées à la construction. Le bois (14 %) et les carreaux céramiques (15 %) étaient également des contributeurs notables.

Des facteurs d'émission exprimés en tonnes de CO₂ par tonne de matériau (voir Tableau 2) permettent de comparer l'intensité carbone des matériaux. Par exemple, produire une tonne de ciment émet environ 0,73 tonne de CO₂, tandis que la fonte brute et la fonte moulée dépassent les 2,3 tonnes (Li & Chen, 2017).

Tableau 2 Facteurs d'émission de CO₂ pour différents matériaux de construction (exprimés en tonnes de CO₂ par tonne de matériau) (Li et Chen, 2017)

Matériau de construction	Facteur d'émission (t CO ₂ /t matériau)
Ciment	0.73
Fonte brute	2.3
Fonte moulée	2.5
Chaux	1.2
Brique fritee	0.14
Brique perforée cuite	0.17
Gravats	2

L'étude de Jeong et al. (2012) portant sur des appartements neufs en Corée (voir Figure 11) montre également que le béton, l'acier et le ciment sont les matériaux les plus utilisés et les plus émissifs. Elle révèle aussi une corrélation entre la surface typologique des logements et les émissions totales de CO₂.

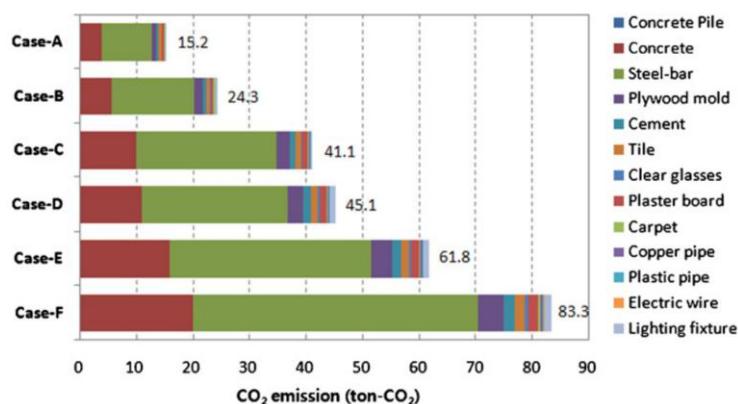


Figure 11 Émissions de CO₂ liées aux matériaux de construction des logements en immeuble collectif (Jeong et al., 2012)

D'autres travaux, comme ceux de Huang (2019) à Shanghai ou de Syngros et al. (2017) en Grèce, confirment le rôle central de l'acier et du béton dans l'empreinte carbone du bâtiment. Face à ces constats, plusieurs chercheurs préconisent l'usage de matériaux à faible empreinte carbone, tels que le bois, l'acier recyclé ou les bétons à faible teneur en ciment.

État de l'art

Cependant, comme le soulignent Gustavsson & Sathre (2006) et Peuportier (2001), l'avantage environnemental du bois dépend fortement de la méthodologie retenue (par exemple du berceau à la tombe), car le carbone séquestré est en partie relâché en fin de vie, via l'incinération ou la mise en décharge.

2.4.3. Systèmes techniques et performance énergétique

À partir des études de cas présentées par Adalberth (1997), il ressort que, dans une analyse énergétique du cycle de vie, l'énergie d'exploitation représente la part majoritaire (80 à 90 %), suivie par l'énergie grise (10 à 20 %), tandis que l'énergie liée à la démolition et à d'autres processus est négligeable ou très faible. Les émissions de carbone liées à la consommation d'énergie proviennent principalement de la combustion d'énergies fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, ainsi que de la production d'électricité (Wang et al., 2024).

La consommation d'énergie des bâtiments en phase d'exploitation est directement liée aux émissions de carbone sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ces émissions sont principalement dues au chauffage, à l'éclairage, à la ventilation, à la climatisation et aux équipements électriques (ascenseurs, pompes, etc.) (Basbagill et al., 2013). Elles reflètent également les comportements des usagers et la forte dépendance de nos sociétés aux combustibles fossiles (Norouzi et al., 2022).

Dans cette optique, de nombreuses études ont examiné, sous l'angle du cycle de vie, diverses mesures passives et actives permettant de réduire les besoins énergétiques en phase d'exploitation. Cela implique l'adoption de sources d'énergie plus propres, l'amélioration de l'efficacité énergétique, la promotion des énergies renouvelables, ainsi qu'une meilleure gestion et surveillance des systèmes énergétiques.

Plusieurs études soulignent ce potentiel de réduction des impacts environnementaux liés à la phase d'exploitation des bâtiments grâce à l'intégration de technologies énergétiques avancées et d'utilisation d'énergies renouvelables. Scheuer et Reppe (2003) ont évalué, via une ACV, la consommation d'énergie et l'impact environnemental d'un immeuble de bureaux de plusieurs étages. Ils ont montré que le remplacement des énergies fossiles par des énergies renouvelables permettrait de réduire significativement les impacts environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie.

Dans cette même logique, Wang et al. (2024) ont proposé un système hybride de cogénération solaire assistée par turbine à gaz. Les résultats montrent une réduction d'environ 41 % des émissions de carbone par unité d'électricité produite en comparaison à un système sans apport solaire.

Enfin, dans une étude de Marcela Prada et al. (2020), la transformation de bâtiments existants peu performants en bâtiments intelligents a permis d'obtenir des réductions substantielles des émissions de GES, de la consommation d'énergie primaire et de la dépendance aux énergies non renouvelables.

Ainsi, la phase d'exploitation des bâtiments constitue un levier majeur pour la réduction des émissions de GES, notamment à travers l'optimisation des systèmes techniques et le recours

État de l'art

accru aux énergies renouvelables. Toutefois, les performances énergétiques et environnementales d'un bâtiment ne peuvent être pleinement comprises sans prendre en compte les facteurs contextuels, en particulier le climat local et les spécificités géographiques, qui influencent fortement les besoins énergétiques et les choix techniques. Ces aspects font l'objet du chapitre suivant.

2.4.4. Contexte géographique et climatique

2.4.4.1. La contrainte sismique

L'une des actions de dimensionnement prescrites par les normes structurelles pour la conception des bâtiments est la charge sismique. La sévérité de cette charge dépend de la localisation du bâtiment. Dans les zones sujettes aux séismes, la charge sismique peut devenir déterminante dans le dimensionnement de la structure, ce qui influence son émission globale.

Dans ces régions, les structures doivent présenter une rigidité et une capacité portante suffisantes pour résister aux séismes fréquents, ainsi qu'une ductilité et une capacité de dissipation d'énergie adéquates pour éviter l'effondrement en cas de séismes rares (Li et al., 2015).

Par conséquent, la conception parasismique influence la manière dont la structure est pensée, et, en retour, les quantités de matériaux nécessaires à sa réalisation.

La norme de référence en Europe pour la conception parasismique des bâtiments est l'Eurocode 8 (CEN, 2005), qui établit les exigences à respecter pour garantir la protection des vies humaines et la limitation des dommages.

Ce code recommande de cartographier les zones sismiques des États membres (EM) en fonction de l'accélération de référence du sol, et la plupart des EM se sont déjà conformés à cette recommandation, dont la France, comme le montre la Figure 12.

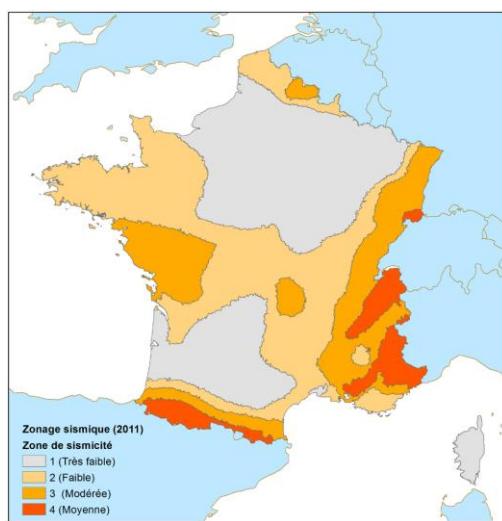


Figure 12 Carte du zonage sismique de la France métropolitaine (République Française, 2010)

Depuis l'arrêté du 22 octobre 2010, les règles de construction parasismique en France s'appliquent aux bâtiments de la classe dite « à risque normal », en fonction du niveau de

État de l'art

sismicité (zones de 1 à 5) et de la catégorie d'importance du bâtiment (I à IV selon l'usage et la fréquentation). Le logement (individuel ou collectif) entre généralement dans la catégorie II. (République Française, 2010)

Les maisons individuelles ne sont soumises à des règles parasismiques obligatoires qu'à partir de la zone 3. Les logements collectifs sont soumis à des obligations dès la zone 2 si le bâtiment est un établissement recevant du public (ERP) ou des fonctions stratégiques, il peut être reclassé en catégorie III ou IV, augmentant les exigences structurelles (République Française, 2010).

Ainsi, lors de la quantification des benchmarks pour les bâtiments, il convient de préciser la localisation du bâtiment en se référant à la carte sismique nationale correspondante (disponible pour la base E+C-).

2.4.4.2. La contrainte climatique

Le climat constitue un facteur clé dans la consommation énergétique des bâtiments. Au-delà de l'influence directe des conditions climatiques sur les besoins en chauffage et en refroidissement, la localisation et l'altitude précise du bâtiment influe également sur d'autres postes de consommation, comme une demande accrue en éclairage artificiel dans les zones où les heures d'ensoleillement sont réduites (Santos et al., 2012).

La conception d'un bâtiment doit donc prendre en compte les caractéristiques climatiques locales, afin de répondre aux exigences énergétiques réglementaires. Au niveau européen, il existe la classification climatique de Köppen-Geiger qui identifie en Europe quatre grandes zones climatiques, illustrées en Figure 13 :

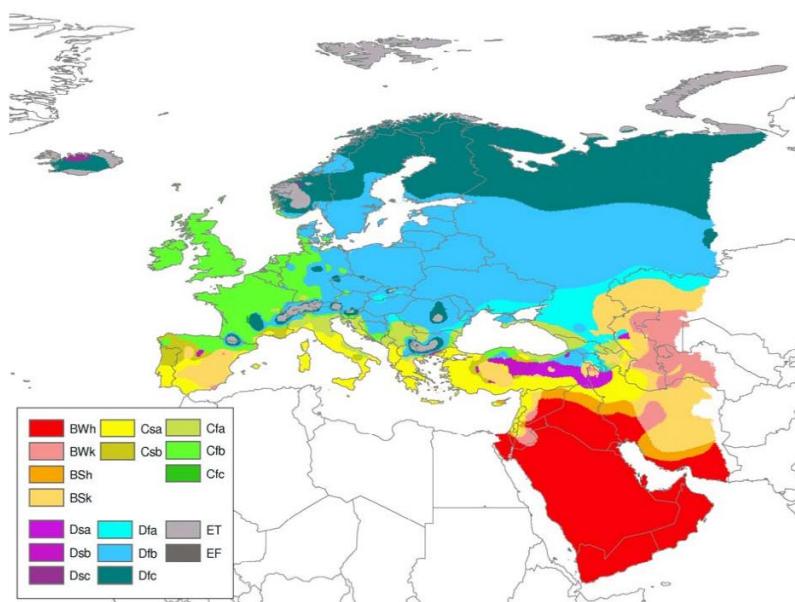


Figure 13 Carte des types de climat de Köppen-Geiger en Europe (Peel et al., 2007)

- Les régions du sud de l'Europe ;
- Les pays d'Europe de l'Ouest et du centre-ouest ;
- Les pays d'Europe de l'Est et du centre-est ;

État de l'art

- Les régions nordiques.

Comme le montre la Figure 13, un bâtiment conçu pour un pays du sud de l'Europe devra faire face à des températures élevées et à des étés chauds et secs, tandis qu'un bâtiment situé dans un pays nordique devra faire face à des températures basses, à de l'humidité, et à des étés frais. Par conséquent, un bâtiment conçu pour le sud de l'Europe n'est généralement pas adapté aux conditions climatiques du nord, et inversement (Peel et al., 2007).

Au niveau national français, l'annexe 1 de l'arrêté du 28 décembre 2012 stipule que le territoire français est divisé en plusieurs zones climatiques (voir Figure 14), chacune associée à des données météorologiques conventionnelles. Ce zonage constitue une base de référence essentielle pour l'application des exigences de normes environnementales, notamment en matière de consommation énergétique maximale des bâtiments (République Française, 2012). Ce zonage est toujours applicable de nos jours.

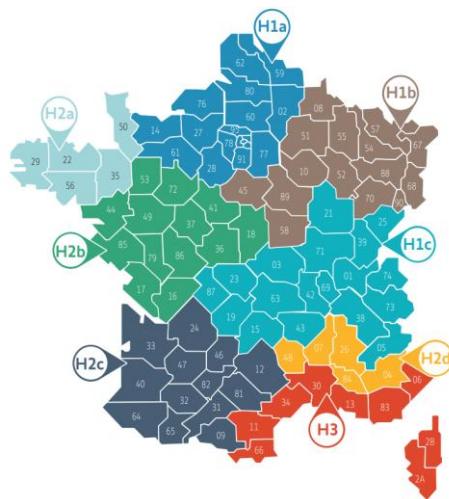


Figure 14 RE2020 – Zones Climatiques de France (Ministère de la Transition Écologique, 2021)

Selon Martin (2013), ce zonage permet notamment d'adapter les calculs de performance énergétique, en particulier ceux liés au rendement des pompes à chaleur (PAC), en fonction des conditions thermiques locales.

Dans son rapport, Martin fournit une température moyenne par zone climatique en fonction de la profondeur à laquelle les températures ont été prises (Figure 15).

État de l'art

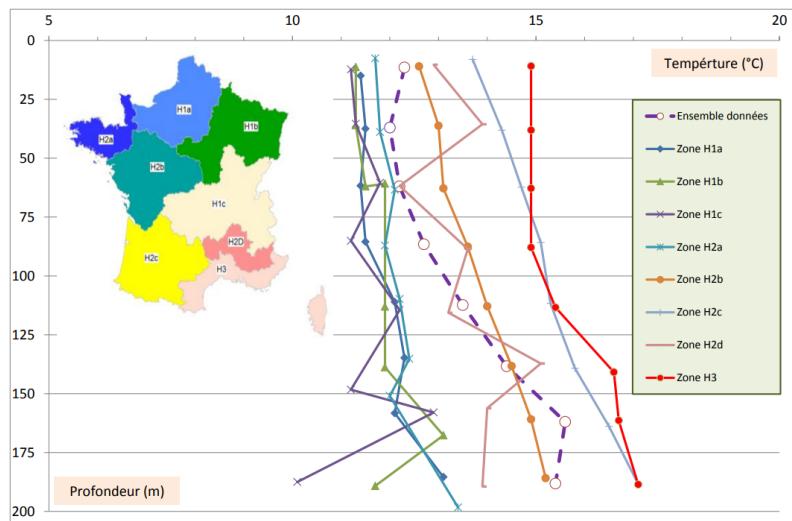


Figure 15 Diagramme température/profondeur selon la zone climatique considérée (Martin, 2013)

On remarque que deux zones sortent du lot : la zone H3 de la côte méditerranéenne et la zone H2C à l'Ouest de cette dernière. Comme le souligne l'auteur,

Les profils des zones H2c et H3 sont significativement plus « chaudes » que les profils des autres zones, en particulier les zones qualifiées de « froides » H1a, H1b, H1c et H2a. Les profils des zones H2b et H2d restent proches des valeurs moyennes (Martin, 2013, p. 14)

2.4.4.3. La pollution des sols

La contamination des sols est causée par la présence de substances chimiques dangereuses ou d'autres altérations de l'environnement naturel du sol. Ce phénomène est principalement attribuable aux émissions industrielles, à l'utilisation excessive de pesticides, herbicides et engrains, au lessivage des polluants depuis les sites de déchets, ainsi qu'à l'infiltration d'eau contaminée (Braimoh & Vlek, 2007).

En Europe, les polluants les plus fréquemment détectés sont les métaux lourds et les hydrocarbures pétroliers, qui représentent ensemble près de 60 % des cas signalés de contamination des sols (Cruz & Rodrigues, 2021).

La dépollution des sites contaminés est essentielle tant pour la préservation de l'environnement que pour le développement urbain, afin de restaurer les fonctions écologiques des sols pollués. L'auto-restauration des sols peut prendre entre 10 et 30 ans, voire plus, selon le type de sol et sa localisation (Kreuk & Annokkée, 1988).

Certaines techniques de dépollution des sols peuvent entraîner une consommation énergétique très élevée, susceptible d'influencer les résultats des analyses environnementales de type ACV. En effet, les procédés thermiques tels que la désorption thermique ou la vitrification nécessitent de chauffer les sols contaminés à des températures comprises entre 600 °C et 1700 °C, ce qui génère une quantité significative d'émissions de GES (Santos et al., 2025).

État de l'art

2.5. Présentation et visualisation des résultats de benchmarking

A ce jour, la phase d'interprétation de l'ACV est encore perçue comme complexe (Zanghelini et al., 2018). Des études antérieures (Frankl & Rubik, 2018) montrent que l'un des freins à une diffusion plus large de l'ACV réside dans les difficultés de compréhension et de communication des résultats. Souvent, les résultats d'ACV sont peu lisibles pour les décideurs, alors que des travaux antérieurs ont démontré que l'intégration des aspects de cycle de vie dans le processus de conception peut améliorer la prise de décision, y compris chez les non-experts (Basbagill et al., 2013).

En pratique, les résultats d'ACV des bâtiments sont principalement utilisés à des fins de certification ou de documentation, mais rarement pour améliorer la conception ou orienter des décisions fondamentales relatives au projet (Wittstock et al., 2009). Pour que les résultats puissent effectivement servir de base à la décision en phase de conception, ils doivent être clairs, compréhensibles et exploitables.

2.5.1. Identification des objectifs de l'interprétation des résultats de l'ACV

La phase d'interprétation des résultats dans une ACV poursuit plusieurs objectifs, que les visualisations viennent appuyer de manière stratégique. Selon Hollberg et al. (2021), six grands types d'usages peuvent être distingués, chacun mobilisant des formes spécifiques de représentation graphique.

Un premier objectif consiste à identifier les principaux contributeurs environnementaux, aussi appelés points chauds (ou « heatmap »). Il peut s'agir de matériaux particuliers, d'éléments constructifs, ou encore de phases spécifiques du cycle de vie. Les visualisations en « heatmap » permettent alors de mettre en évidence les postes les plus impactants et de cibler les leviers d'optimisation.

Un second usage fréquent est la comparaison de variantes de conception, qu'il s'agisse de projets différents, de choix constructifs alternatifs ou de matériaux de substitution. Les outils visuels facilitent ici la lecture comparative entre options et l'argumentation des décisions.

Certaines représentations visent à éclairer les relations entre paramètres, à travers des analyses de corrélation ou de sensibilité. Ces approches permettent de hiérarchiser les déterminants de l'impact environnemental, d'évaluer la robustesse des résultats à différents choix méthodologiques, ou encore d'explorer la variabilité induite par les incertitudes sur les données d'entrée (ISO, 2006 ; Guo & Murphy, 2012).

Les visualisations jouent également un rôle central dans l'établissement de benchmarks, que ce soit en positionnant un projet par rapport à des références sectorielles, des moyennes nationales ou des seuils réglementaires. Certaines approches mobilisent aussi des objectifs globaux, tels que l'alignement avec les limites planétaires (Rockström et al., 2009) ou les trajectoires de décarbonation compatibles avec les accords climatiques.

Deux autres objectifs concernent la dimension spatio-temporelle des impacts. Sur le plan spatial, des cartes ou diagrammes localisés permettent d'associer les impacts à des zones ou

État de l'art

composantes du bâtiment. Sur le plan temporel, des courbes de répartition illustrent la chronologie des émissions ou consommations tout au long du cycle de vie.

En somme, cette typologie met en lumière la polyvalence des visualisations dans les démarches ACV et souligne leur capacité à adapter la lecture des résultats aux intentions d'analyse. Elle fournit ainsi une grille de lecture précieuse pour concevoir des représentations pertinentes selon les enjeux du projet.

2.5.2. Classification des types de visualisation

La visualisation des résultats d'ACV joue un rôle clé dans la mise en relation des variables de conception et des impacts environnementaux. Toutefois, le choix du type de graphique à utiliser dépend de plusieurs paramètres structurels. Hollberg et al. (2021) identifie quatre dimensions principales permettant de classer les visualisations employées dans le contexte d'une ACV bâtiment.

Le premier critère concerne le nombre d'indicateurs environnementaux représentés. Certaines visualisations se concentrent sur un indicateur unique (souvent agrégé), tandis que d'autres permettent d'en afficher plusieurs simultanément, parfois exprimés dans des unités différentes. Dans ce dernier cas, la représentation devient plus complexe, ce qui peut nuire à la lisibilité. L'agrégation, lorsqu'elle est possible et justifiée, simplifie l'analyse en ramenant les données à une échelle commune.

Le second critère renvoie au type de variables mobilisées. Il peut s'agir de variables discrètes (comme les matériaux ou variantes de conception), ou de variables continues (telles que l'épaisseur d'isolation ou le taux de vitrage). Ce caractère influe directement sur la structure graphique : les variables discrètes sont souvent représentées par des catégories, tandis que les continues s'expriment le long d'axes quantitatifs.

Le nombre de variables constitue un troisième facteur structurant. Une visualisation peut ne représenter qu'une variable (dans une analyse simple) ou en intégrer plusieurs (dans des cas de comparaison multi-critères ou d'optimisation). Toutefois, la capacité d'un graphique à intégrer un grand nombre de dimensions est limitée, ce qui nécessite parfois de recourir à des codages visuels complémentaires (comme la couleur ou la taille des symboles) pour enrichir la représentation sans la surcharger.

Enfin, le quatrième critère concerne la présence de niveaux hiérarchiques dans les données. Dans les ACV bâtiment, les résultats peuvent être décomposés selon des hiérarchies variées : par phases du cycle de vie, par composants du bâtiment, ou encore par sous-catégories environnementales. Certains types de graphiques permettent de représenter ces structures en arborescences ou en niveaux imbriqués, mais la profondeur et la clarté de ces visualisations varient selon les formats choisis.

Cette classification proposée par Hollberg et al. (2021) offre ainsi une grille d'analyse précieuse pour choisir les visualisations les plus adaptées aux objectifs poursuivis. Elle souligne notamment l'importance de trouver un équilibre entre lisibilité et richesse informationnelle, afin de favoriser une interprétation pertinente et accessible des résultats d'ACV.

État de l'art

2.5.3. Représentations visuelles adaptées au benchmarking ACV des bâtiments

Dans le cadre d'un benchmarking ACV multicritère portant sur des bâtiments résidentiels neufs, il est nécessaire de croiser plusieurs typologies, choix de conception et indicateurs environnementaux. Ce niveau de complexité appelle des visualisations capables de représenter simultanément un grand volume d'information sans perdre en lisibilité.

Les diagrammes en barres (simples, groupés et empilés) restent les plus utilisés. Ces visualisations sont adaptées à une communication simple des résultats et permettent de comparer efficacement un petit nombre de variantes. Cependant, ces représentations deviennent limitées lorsque le nombre de bâtiments, de variables ou d'indicateurs augmente. Leur utilisation pour représenter plusieurs indicateurs impose souvent des adaptations comme la normalisation ou la juxtaposition de graphiques indépendants.

Les fronts de Pareto apparaissent comme les visualisations complexes les plus fréquemment utilisées, notamment pour l'analyse de compromis entre plusieurs objectifs environnementaux. Ces graphiques sont particulièrement adaptés à une base de données comme celle mobilisée dans ce mémoire, où plusieurs centaines de bâtiments sont analysés. Ils permettent de repérer des clusters, des cas extrêmes ou des compromis environnementaux pertinents.

Les graphes en coordonnées parallèles et les « spider charts » permettent de comparer un petit nombre d'objets sur un grand nombre de critères, ce qui peut être utile dans une seconde phase, centrée sur les cas les plus vertueux.

La Figure 16 issue de l'article de Hollberg et al. (2021) propose une cartographie claire des types de visualisation selon les objectifs de l'ACV, la quantité d'information transmise et le nombre d'objets visualisés. Elle montre que :

- Pour le benchmarking, les options restent limitées mais peuvent gagner en richesse si plusieurs représentations sont combinées.
- Pour la comparaison d'options ou l'identification des « hotspots », les visualisations complexes deviennent incontournables dès lors qu'on traite plusieurs bâtiments et plusieurs indicateurs.

La capacité à traiter beaucoup d'objets ($N > 100$) est essentielle dans le cadre d'un benchmarking basé sur une base de données volumineuse.

État de l'art

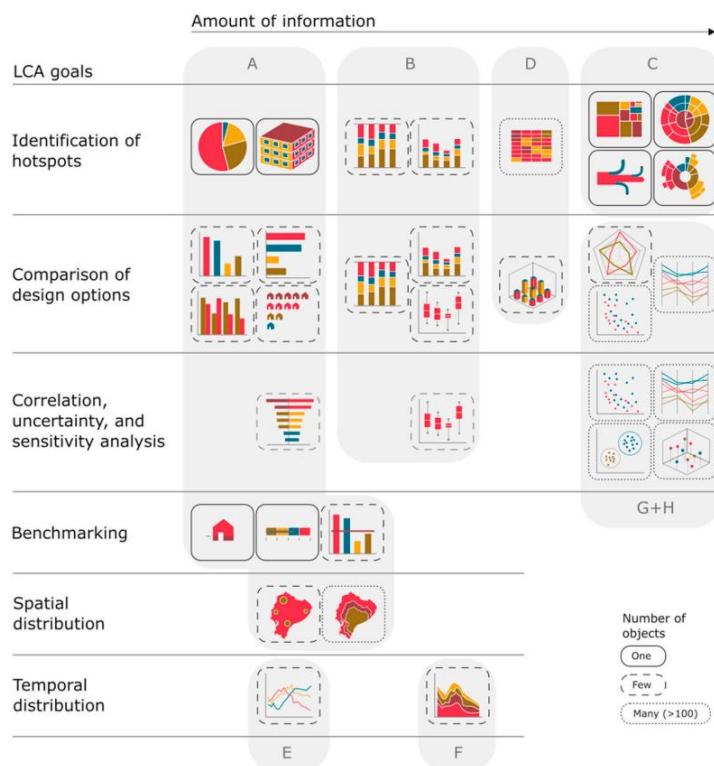


Figure 16 Synthèse des objectifs de l'ACV, des groupes de types de visualisation et de la quantité d'information représentée dans la visualisation (Hollberg et al., 2021)

En résumé, le choix des visualisations dans un cadre de benchmarking ACV multicritère ne peut se limiter à des représentations standard. Si les diagrammes en barres conservent leur utilité pour des comparaisons simples, l'analyse d'un grand volume de bâtiments et de paramètres impose de recourir à des visualisations plus complexes, capables de restituer la richesse des données sans compromettre la lisibilité.

Méthodologie

3. Méthodologie

3.1. Schéma méthodologique

Le schéma méthodologique (Figure 17) présente les grandes étapes de la démarche méthodologique adoptée dans ce mémoire, structurée autour de l'exploitation de la base E+C-, du benchmarking des émissions carbone et d'une analyse par régression multiple.

La première phase consiste en une étude critique de la base de données, visant à vérifier la cohérence des feuilles, exclure les projets hors périmètre et constituer un échantillon sur lequel les choix de conception peuvent réellement influencer les émissions.

La deuxième phase porte sur la mise en place d'un benchmark environnemental, en classant les bâtiments selon leur typologie et leur hauteur. Cette étape repose sur la normalisation des indicateurs et des seuils de référence, et donne lieu à des visualisations statistiques (boîtes à moustaches, tableaux) pour comparer les performances.

Enfin, une analyse de régression multiple est menée afin d'identifier les paramètres constructifs les plus impactants. Cela inclut un filtrage en amont des variables selon la littérature, puis la création de modèles sous le logiciel « RStudio ». Les modèles sont évalués via des tests statistiques (colinéarité, AIC, résidus), corrigés si besoin (méthode de White), et leurs résultats sont restitués sous forme de graphiques comparatifs (barres, « heatmaps »).

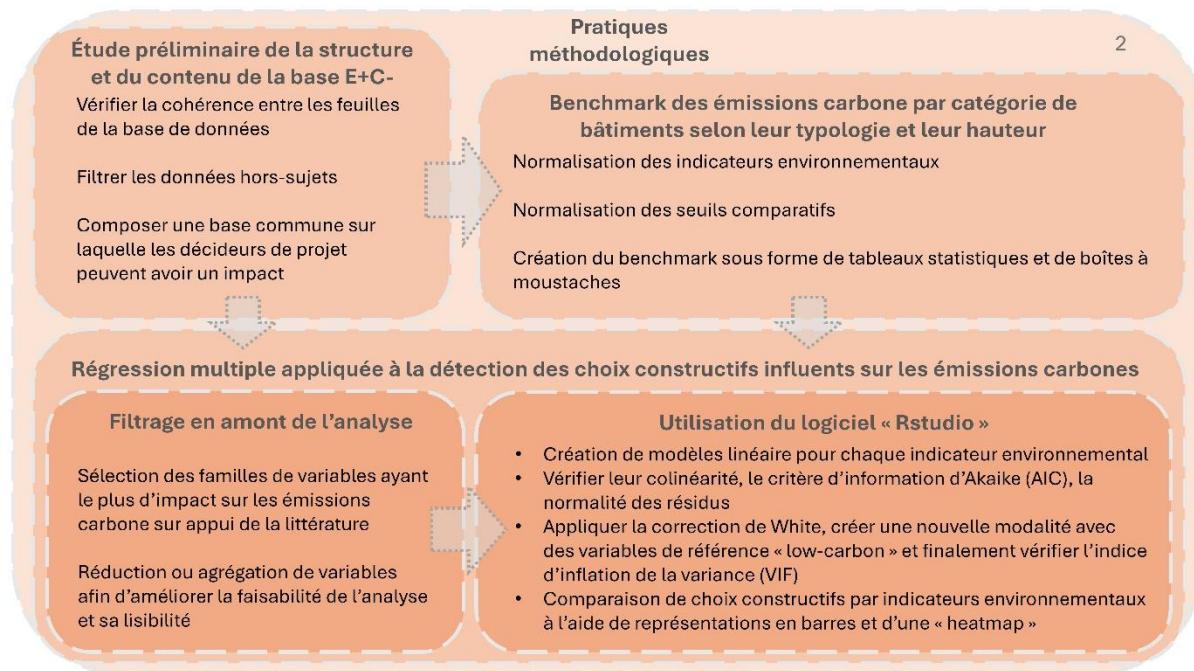


Figure 17 Schéma méthodologique du mémoire

3.2. Présentation de la base de données d'ACV E+C-

La base de données utilisée dans le cadre de ce mémoire est issue de l'expérimentation française E+C-, lancée en 2016 par le ministère de la Transition écologique. Cette initiative visait à préfigurer la future réglementation environnementale des bâtiments (RE2020), en

Méthodologie

testant deux indicateurs complémentaires : la performance énergétique (Énergie +) et l'impact carbone sur le cycle de vie (Carbone -).

Les données publiques au format tabulaire de cette expérimentation sont disponibles sur internet mais il est important de préciser qu'elle n'a pas fait l'objet de vérifications de la part de l'observatoire. Il s'agit d'une version brute et sans documentation constituée des dépôts volontaires des acteurs.

Selon l'Observatoire E+C- (n.d.) la base de données contient 853 opérations pour 1233 bâtiments ce qui illustre déjà une première incohérence car le fichier Excel contient 941 opérations pour 1397 bâtiments.

La feuille « opération » rassemble des informations administratives et géographiques sur les bâtiments. La feuille « bâtiments » regroupe l'ensemble des données issues de l'analyse du cycle de vie pour les projets référencés. La feuille « contributeurs » recense les éléments pris en compte dans l'évaluation, tels que l'eau ou l'énergie utilisée sur chantier. Les feuilles « lots » et « sous-lots » présentent les listes de données encodées pour chaque lot de construction. Enfin, la feuille « nouveaux indicateurs » introduit des indicateurs environnementaux complémentaires intégrés dans le cadre de la RE2020.

Parmi les bâtiments, 781 sont des maisons individuelles ou accolées, 408 sont des logements collectifs et 208 sont des bâtiments tertiaires comme l'illustre en pourcentage la Figure 18.

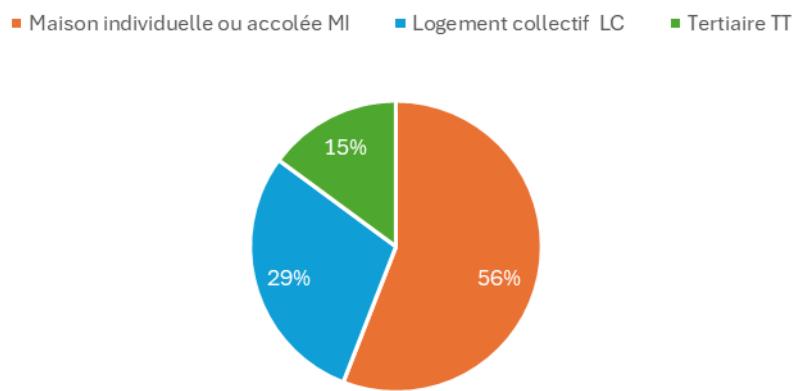


Figure 18 Répartition réelle des usages principaux des bâtiments de la base E+C-

3.3. Étude préliminaire de la structure et du contenu de la base E+C-

3.3.1. Cohérence entre les feuilles

Les deux feuilles qui vont servir à l'étude de la base de données sont les feuilles « opérations » et « bâtiments ». La première étape est de vérifier la cohérence des données entre ces deux feuilles pour pouvoir les rassembler en une seule. On remarque alors que la feuille « opérations » contient 1392 bâtiments alors que la feuille « bâtiments » en contient 1397. En harmonisant ces données, à l'aide de mise en forme conditionnelle sur Excel, on passe à un nombre de 1386 bâtiments. **Cela conserve 99.2% de ces derniers.**

Méthodologie

3.3.2. Filtrage inhérent au sujet du mémoire

Le sujet du mémoire, en soit, possède déjà quelques exigences. Les bâtiments doivent être neufs et à usage résidentiel. Ce dernier critère comprend les maisons individuelles et accolées ainsi que les logements collectifs. Par ailleurs, la période d'étude de référence doit impérativement être fixée à 50 ans, faute de quoi l'ensemble des indicateurs environnementaux, exprimés en moyenne annuelle, seraient biaisés, puisque directement divisés par cette durée.

Cette opération enlève 207 bâtiments de la base de données. **A ce stade, 84.4% des bâtiments sont conservées.**

3.3.3. Filtrage supplémentaire

3.3.3.1. Zone sismique

Un filtrage qui semble nécessaire d'après la partie 2.4.4.1 est celui en lien avec les zones sismiques. L'adaptation structurelle d'un bâtiment par rapport à sa zone sismique entraîne une dépense de matière supplémentaire qui se reflète par un impact sur l'environnement plus important.

Cependant, pour certains bâtiments résidentiels, il est recommandé mais pas obligé par la loi de prendre des mesures parasismiques. C'est pour cela que le filtrage ne se fera pas en fonction de la colonne « zone sismique » de la base de données mais plutôt avec la colonne « renforcement structurel » qui stipule si oui ou non le bâtiment possède un renforcement structurel. Si un bâtiment en possède ou si ce n'est pas renseigné, sa ligne est supprimée.

Cette opération enlève 126 bâtiments de la base de données. **A ce stade, 75.4% des bâtiments sont conservées.**

3.3.3.2. Surface de plancher

La vérification suivante consiste à bien s'assurer que toutes les surfaces de plancher soient bien renseignées pour tous les bâtiments. Sinon cela pourrait donner des indicateurs environnementaux faussés car divisés par 0.

Après vérification, tous les bâtiments restant possède une surface de plancher renseignée. **Cette opération n'enlève donc pas de bâtiments à la base de données. Il en reste 1053.**

3.3.3.3. Altitude

Une altitude a été relevé pour toutes les opérations de la base de données. Elle se divise en 3 catégories : 0-400m, 400-800m et supérieure à 800m. Comme stipulé en 2.4.4.2, un changement d'altitude va de pair avec un changement climatique. Pour avoir une base comparable entre les données, nous allons nous intéresser uniquement aux habitations allant jusqu'à 400m d'altitude. **Cela enlève 83 bâtiments de l'étude et conserve 69.4% des données.**

3.3.3.4. Zone climatique

Une zone climatique a été relevé pour toutes les opérations de la base de données. Comme stipulé en 2.4.4.2, une différence de climat engendre une différence de conception qui peut

Méthodologie

se traduire en un bilan environnemental différent. Comme le montre la Figure 15, les 8 zones climatiques reprises de la RT2012 ont des moyennes de température différentes mais 3 groupes se démarquent significativement : les zones H1A, H1B, H1C et H2A, les zones H2B et H2D et les zones H2C et H3.

Pour les bienfaits de l'étude, nous allons garder le groupe qui contient le plus de bâtiments. Les zones H1A, H1B, H1C et H2A sont donc conservées, ce qui enlève 282 bâtiments de la base de données. **A ce stade, 49.2% des bâtiments sont conservées.**

3.3.3.5. Types de fondations et nature géotechnique du sol

La relation entre deux variables qualitatives, par exemple, la nature géotechnique du sol et le type de fondation, relève de ce que l'on appelle, dans notre approche, une dépendance statistique.

Pour tester cette dépendance, il est courant d'utiliser un test du χ^2 d'indépendance appliqué à un tableau croisé. Ce test permet de déterminer si les fréquences observées diffèrent significativement de ce que l'on attendrait si les deux variables étaient indépendantes (G. Haesbroeck, communication personnelle, 28 mars 2025).

Dans le cadre de cette étude, cette relation de dépendance est importante : elle implique que certaines fondations sont conditionnées par la nature du sol. Cependant, il apparaît comme logique qu'un sol peu compacte demande plus d'attention vis-à-vis des fondations d'un bâtiment qu'un sol qui ne l'est pas. C'est pour cette raison qu'un test χ^2 ne sera pas conduit pour cette problématique.

La base de données contient 21 natures géotechniques du sol différentes. 251 bâtiments présentent un sol d'argile limoneuse et 231 autres ont un sol de terre végétale sèche. Aucune nature géotechnique du sol ne fait donc l'unanimité.

Cependant, du côté des types de fondations, les semelles filantes constituent une large majorité, avec 564 bâtiments qui en possèdent. Cette opération enlève 124 bâtiments de la base de données. **A ce stade, 40.4% des bâtiments sont conservées.**

3.3.3.6. Dépollution des sols

Comme énoncé en 2.4.4.3, certaines techniques de dépollution des sols peuvent engendrer une quantité d'émission de CO₂ non négligeable. Ces émissions peuvent potentiellement être répercutées dans l'indicateur d'émissions de GES (E_{GES}), si la phase de dépollution est incluse dans le périmètre de l'analyse.

Par conséquent, un sol initialement pollué peut, en l'absence de traitement spécifique, masquer une partie de son impact environnemental réel, tandis qu'un sol ayant nécessité une dépollution lourde pourra présenter une E_{GES} plus élevé, indépendamment des choix de conception du bâtiment. Il apparaît nécessaire de se séparer de ces bâtiments pour avoir une base comparative juste et fiable.

La base de données contient, à ce stade, 11 bâtiments qui ont eu recours à une dépollution des sols. **Il reste 553 bâtiments. Cela correspond à un taux de 39.6% des bâtiments qui sont conservés.**

Méthodologie

3.3.3.7. Dernières vérifications pour garantir l'intégralité des données

Afin de garantir l'intégralité des données, une dernière vérification est importante. L'objectif est de déceler les valeurs anormales pour ne pas qu'elles fausses les résultats. Cela enlève : un bâtiment qui présentait 1810 étages, 7 autres sans E_{ges} PCE et deux derniers possédant des indicateurs environnementaux bien trop élevés pour être réels. **Il reste au total 543 bâtiments, ce qui représente un échantillon suffisant pour nos études. Finalement, 38.9% des bâtiments qui sont conservés.**

3.4. Méthodologie de création de benchmark des émissions carbone par catégorie de bâtiments selon leur typologie et leur hauteur

Une première analyse consistera en la comparaison des typologies des bâtiments basée sur leur impact sur le réchauffement climatique via les indicateurs environnementaux « E_{ges} » et « E_{ges} PCE » stipulés en 2.1.2. L'E_{GES} OPE relatif aux émissions carbone de la phase opérationnelle d'un bâtiment sera aussi calculée comme décrit dans le sous-chapitre 3.4.2. Pour rappel, ces indicateurs, exprimés en kg équivalent CO₂ par mètre carré de surface de plancher et sur une durée d'étude de 50 ans, sont calculés conformément à la norme EN 15978 relative à l'ACV des bâtiments.

3.4.1. Rappel sur les émissions de gaz à effet de serre (GES)

Selon Borg (2001), le potentiel de réchauffement climatique (GWP), l'occupation des sols, l'acidification, l'eutrophisation, la destruction de la couche d'ozone stratosphérique, l'épuisement des ressources abiotiques et la toxicité pour l'homme sont des impacts particulièrement pertinents dans le secteur du bâtiment. Le principal facteur influençant le changement climatique est constitué par les émissions de GES.

L'E_{GES} (Émissions de Gaz à Effet de Serre totales) regroupe l'ensemble des émissions directes et indirectes liées au bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du bâtiment (« cradle to grave », du berceau à la tombe). Il comprend les phases suivantes :

- Modules A1 à A3 : production des matériaux de construction (matières premières, fabrication, transport amont)
- Modules A4 à A5 : transport vers le site et mise en œuvre
- Modules B1 à B7 : phase d'usage (maintenance, remplacement, consommation d'énergie et d'eau)
- Modules C1 à C4 : fin de vie (déconstruction, transport, traitement)

L'E_{GES} PCE (Émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements) est un sous-indicateur de l'E_{GES}. Il se limite aux modules A1 à A3, A4, A5, B1 à B5, C1 à C4, du cycle « cradle to grave » (du berceau à la tombe), mais ne prend en compte que les produits de construction et les équipements techniques. Il exclut donc les émissions liées à la consommation d'énergie (module B6) et d'eau (module B7) pendant l'exploitation du bâtiment. L'E_{GES} PCE permet

Méthodologie

d'évaluer plus précisément l'impact intrinsèque du bâtiment, indépendamment de son usage et de ses systèmes énergétiques.

En référence au chapitre 2.2.2, l'E_{GES} représente l'impact du bâtiment sur le réchauffement climatique sur l'ensemble de son cycle de vie (« whole life cycle »), en intégrant à la fois les émissions embarquées (« embodied ») et les émissions d'exploitation (« operational »). L'E_{GES} PCE, quant à lui, se concentre uniquement sur les émissions embarquées (« embodied carbon »), c'est-à-dire celles liées aux matériaux de construction, aux équipements techniques et à leur mise en œuvre, maintenance, remplacement et fin de vie. Il constitue donc un indicateur de l'impact climatique intrinsèque du bâtiment, indépendamment de son usage énergétique.

3.4.2. Normalisation des indicateurs et définition de l'impact opérationnel

Afin de distinguer les émissions liées à la phase d'usage du bâtiment (consommation d'énergie et d'eau ou phase B6 et B7 de l'ACV) des émissions intrinsèques aux matériaux et équipements, une soustraction entre les deux indicateurs fournis par la base de données est réalisée. La différence entre l'E_{GES} et l'E_{GES} PCE est ici interprétée comme l'E_{GES} OPE représentant l'impact carbone opérationnel du bâtiment (« operational carbon impact »), soit les émissions dues à l'exploitation sur 50 ans. Cette approche permet d'isoler les effets des choix énergétiques et des performances d'usage, indépendamment des matériaux de construction.

Dans la base de données, ces trois indicateurs sont exprimés en kg équivalent CO₂. Cela corrobore les études de Houghton et al (2001) en ce qui concerne la sélection des catégories d'impact. Les auteurs ont identifié comme les gaz à effet de serre les plus significatifs : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les perfluorocarbures (PFC).

Les trois indicateurs seront également exprimés par mètre carré de surface de plancher et sur une durée d'étude de 50 ans. Pour faciliter la comparaison avec d'autres indicateurs environnementaux ou d'autres études, les impacts seront rapportés à une durée d'un an. Cette normalisation permet également d'éviter que les résultats traduisent simplement le fait qu'une surface plus importante génère mécaniquement davantage d'émissions de GES, ce qui relèverait de l'évidence.

3.4.3. Objectifs de l'analyse

Cette première analyse vise à identifier les typologies de bâtiments les plus émissives en termes de GES, en distinguant notamment les logements individuels ou accolés des logements collectifs. L'objectif est de dégager des tendances globales entre catégories, en s'appuyant sur les trois indicateurs d'impact carbone décrits précédemment. Une analyse complémentaire sera réalisée en fonction du nombre d'étages, afin d'explorer plus finement l'effet de la hauteur sur les performances environnementales des bâtiments résidentiels. Gervasio & Dimova (2018) et Gursel et al. (2023) ont différencié leurs typologies pour les bâtiments de 5 étages en vue de leurs émissions. Le but est de voir si cette même précision est aussi pertinente avec la base de données E+C-.

Méthodologie

Afin de contextualiser les performances carbone des bâtiments issus de l'expérimentation E+C-, deux niveaux de référence issus de la RE2020 sont mobilisés. Le premier correspond aux seuils en vigueur pour la période 2022–2024, soit immédiatement après la fin de l'expérimentation. Le second, applicable à la période 2025–2027, reflète le renforcement progressif des exigences réglementaires en matière d'impact carbone. Cette double référence permet de comparer les résultats observés à la fois aux premiers niveaux de performance exigés par la RE2020, et à ceux vers lesquels tend le secteur à court terme.

Cette première étude servira également de base de classification typologique pour la régression linéaire multiple à suivre. Le but est de savoir si la typologie (maisons individuelles ou accolées et logements collectifs) et la hauteur (nombre d'étages) d'un bâtiment constitue une différence dans son émission de GES.

3.4.4. Obtenir une unité comparable des seuils de la RE2020

Ces seuils sont définis par la RE2020 avec deux indices (voir Figure 19).

« Ic construction » correspond à la somme des contributions « Composants » et « Chantier », c'est l'indice sur les produits de construction et équipements et leur mise en œuvre exprimé en kg équivalent CO₂/m² de SHAB.

Et « Ic énergie » qui représente l'impact du contributeur « Énergie », c'est l'indice sur les impacts des énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment. Cet indice est également exprimé en kg équivalent CO₂/m² de SHAB.

L'addition de ces deux indices représente plus de 90 % des impacts totaux d'une opération selon le Ministère de la Transition écologique (2024). Le produit de cette somme sera appelé « Ic bâtiment » même s'il ne correspond pas parfaitement à cet indice de la RE2020.



Figure 19 Décomposition de l'indicateur « Ic bâtiment » dans la RE2020 (Ministère de la Transition écologique, 2024)

Afin de rendre les seuils de la RE2020 comparables aux résultats issus de l'expérimentation E+C-, certaines adaptations sont nécessaires pour obtenir un dénominateur commun.

Tout d'abord, les seuils de la RE2020 étant exprimés par mètre carré de SHAB, ils doivent être convertis en fonction de la SdP, utilisée comme surface de référence dans la base E+C-. Pour ce faire, un ratio moyen entre la SdP et la SHAB est calculé à partir des données disponibles. Ce ratio est ensuite appliqué aux seuils réglementaires pour exprimer les résultats en kgCO₂e/m²(SdP).

Ensuite, la RE2020 et l'expérimentation E+C- partagent une même période de référence de 50 ans. Il convient donc de diviser les valeurs obtenues par 50 afin d'exprimer les seuils en kgCO₂e/m².an, ce qui permet une comparaison directe avec les indicateurs

Méthodologie

environnementaux calculés dans le cadre de cette étude. Les étapes de ce processus sont récapitulés dans le Tableau 3.

Tableau 3 Seuils d'émissions de gaz à effet de serre de la RE2020 pour les bâtiments résidentiels (2022–2024 et 2025–2027)
(Ministère de la Transition écologique, 2014)

Seuils 2022-2024					
Typologie	Ic énergie [KgCO ₂ eq/m ² SHAB]	Ic construction [KgCO ₂ eq/m ² SHAB]	Ic bâtiment [KgCO ₂ eq/m ² SHAB]	Ic bâtiment [KgCO ₂ eq/m ² SdT]	Ic bâtiment [KgCO ₂ eq/m ² SdT.a]
Maison individuelle ou accolée	160	640	800	735.97	14.72
Logements collectifs	560	740	1300	1195.95	23.92
Seuils 2025-2027					
Typologie	Ic énergie [KgCO ₂ eq/m ² SHAB]	Ic construction [KgCO ₂ eq/m ² SHAB]	Ic bâtiment [KgCO ₂ eq/m ² SHAB]	Ic bâtiment [KgCO ₂ eq/m ² SdT]	Ic bâtiment [KgCO ₂ eq/m ² SdT.a]
Maison individuelle ou accolée	160	530	690	634.77	12.70
Logements collectifs	320	650	970	892.36	17.85

3.4.5. Génération des résultats

Afin de visualiser la distribution des émissions GES pour les différentes catégories de bâtiments, des boîtes à moustaches (ou « boxplots ») ont été utilisées. Il s'agit d'un outil statistique permettant de représenter, de manière synthétique, la dispersion d'un ensemble de données.

Chaque boîte indique :

- la médiane (valeur centrale) et la moyenne,
- le premier et le troisième quartile (Q1 et Q3, encadrant les 50 % des valeurs les plus centrales),
- ainsi que les valeurs extrêmes non considérées comme aberrantes (définies par l'intervalle interquartile prolongé de 1,5 fois sa valeur).

Selon le chapitre 2.3.2.1 de l'état de l'art intitulé « Définition des valeurs de benchmarks », la valeur de référence correspond à la médiane des résultats observés pour un groupe donné de bâtiments (par typologie et hauteur). Cette valeur est considérée comme représentative des pratiques courantes et plus robuste que la valeur moyenne par rapport à l'effet des valeurs extrêmes.

La valeur cible, quant à elle, est définie comme le premier quartile (Q1), soit la valeur au-dessous de laquelle se situent les 25 % des bâtiments les plus performants. Elle reflète ainsi un objectif ambitieux, inspiré des meilleures pratiques disponibles dans l'échantillon.

Dans le cadre de cette étude, les boîtes à moustaches permettent de comparer la variabilité et la répartition des émissions carbone (E_{GES} total, E_{GES} PCE et E_{GES} OPE) entre différentes typologies de bâtiments résidentiels. Elles offrent une lecture claire des tendances centrales, des écarts-types apparents, ainsi que de l'hétérogénéité des performances environnementales au sein de chaque catégorie comme le montre Hollberg et al. (2021) sur la Figure 16. Un tableau récapitulatif des valeurs obtenues par les boîtes à moustache sera réalisé par indicateur environnemental afin d'avoir un outil d'analyse des valeurs plus concret.

Méthodologie

3.5. Méthodologie de régression multiple appliquée à la détection des choix constructifs influents sur les émissions carbone

3.5.1. Objectifs de l'analyse

Dans cette seconde partie, l'objectif est d'identifier les choix de conception ayant le plus d'influence sur les différentes émissions de GES (EGES, EGES PCE, EGES OPE) des bâtiments résidentiels neufs, exprimées en kgCO₂éq/m².an. L'approche méthodologique retenue repose sur une analyse statistique exploratoire, suivie d'une régression linéaire multiple appliquée à la base de données.

Seules les variables relevant directement de décisions de conception, et donc potentiellement actionnables par l'architecte ou la maîtrise d'œuvre, sont conservées dans les modèles. Les variables purement contextuelles ou imposées (comme la zone climatique ou la nature du sol) sont exclues de l'analyse, afin de centrer la réflexion sur les leviers concrets de réduction de l'impact carbone. On utilise donc la même base de donnée préalablement épurée qui retient 543 bâtiments

3.5.2. Sélection des variables basée sur la littérature

3.5.2.1. Sélection des variables « typologie, système structurel et matériaux de construction »

Le chapitre 2.4.1 et 2.4.2 reprend les typologies, systèmes structurels et matériaux de construction ayant le plus d'impact sur les émissions carbone.

Les colonnes sélectionnées sont alors les suivantes : Usage principal ; Type de structure principale ; Matériau principal relatif à la structure ; Matériau de remplissage de façade ; Type de toiture ; Type de menuiserie. Elles contiennent respectivement 2,4, 7, 12, 4 et 4 variables, pour un total de 33.

3.5.2.2. Sélection des variables « systèmes techniques et performance énergétique »

Le chapitre 2.4.3 reprend les systèmes techniques ayant le plus d'impact sur les émissions carbone.

Les colonnes sélectionnées sont alors les suivantes : Type de ventilation principale ; Générateur principal de chauffage ; Générateur principal d'eau chaude sanitaire (ECS) ; Générateur principal de refroidissement ; Énergie de chauffage ; Énergie ECS ; Énergie de refroidissement ; Surface de capteurs photovoltaïques (en mètre carré) ; Type d'émetteurs principaux de chauffage. Elles contiennent respectivement 4, 11, 14, 6, 7, 7, 4 et 11 variables, pour un total de 64.

Au total nous avons 97 variables, ce qui paraît trop pour une analyse lisible et compréhensible. Nous allons donc réduire ce nombre en faisant des choix censés qui n'entraveront pas à la justesse de l'analyse.

Méthodologie

3.5.3. Diminution du nombre de variables

3.5.3.1. Filtrage des variables « structure et enveloppe »

Le tableau ci-dessous présente, pour chaque catégorie retenue, les modalités initiales, les regroupements opérés ainsi que le nombre final de modalités prises en compte dans le modèle pour les variables « structure et enveloppe ».

Tableau 4 Regroupement et réduction des modalités catégorielles « structure et enveloppe » en vue de l'analyse de régression multiple

Catégories	Avant affinage	Après affinage	Nombre de variables	
Usage principal	Logement collectif	Logement collectif (n=89)	2	
	Maison individuelle ou accolée	Maison individuelle ou accolée (n=352)		
Type de structure principale	Maçonnerie	Maçonnerie (n=300)	3	
	Ossature	Système à ossature (n=47)		
	Poteaux/poutres			
	Voiles porteurs	Voiles porteurs (n=94)		
Matériau principal	Béton	Béton (n=277)	3	
	Béton cellulaire			
	Béton haute performance			
	Bois massif	Bois (n=54)		
	Bois massif reconstitué			
	Mixte Béton/Bois	Pas assez représenté		
	Terre cuite	Terre cuite (n=110)		
Matériau de remplissage de façade	Autre matériau biosourcé	Matériaux biosourcés (n=50)	3	
	Bois massif			
	Béton de chanvre			
	Béton de bois			
	Panneaux de particules et de fibres			
	Bois massif reconstitué	Béton (n=270)		
	Béton ordinaire			
	Bloc de béton manufacturé			
	Béton haute performance			
	Béton cellulaire			
Type de toiture	Verre	Pas assez représenté	3	
	Terre cuite	Terre cuite (n=121)		
	2 pans	Pente simple (n=266)		
	monopente			
Type de menuiserie	3 pans et plus	Pente complexe (n=83)	3	
	terrasse	Toiture plate (n=92)		
	Aluminium à rupture de pont	Aluminium à rupture de pont (n=159)		
	Bois	Bois (n=37)		
	Mixte bois/aluminium	Pas assez représenté	3	
	PVC	PVC (n=245)		
		Total	17	

On passe de 33 variables, avant affinage, à 17 après affinage. C'est quasiment une division par 2 du nombre de variables initiales.

Les types de structure principale « ossature » et « poteaux/poutre » sont rassemblés en une seule variable « système à ossature » qui définit correctement les deux types de structure sans effacer une caractéristique propre à l'un ou l'autre. Les différentes variantes d'un même matériau sont rassemblées le plus possible, comme « béton », « béton cellulaire » et « béton

Méthodologie

haute performance » qui sont trois produits issus du même élément. La toiture à 2 pans et considérée comme une toiture simple par comparaison aux toitures à 3 pans ou plus qui possèdent une géométrie plus complexe.

3.5.3.2. *Filtrage des variables « consommation d'énergie »*

Les tableaux ci-dessous présentent, pour chaque catégorie retenue, les modalités initiales, les regroupements opérés ainsi que le nombre final de modalités prises en compte dans le modèle pour les variables « consommation d'énergie fossile et d'électricité ».

On passe de 64 variables, avant affinage, à 18 après affinage. C'est une division par 3.5 du nombre de variables initiales.

Les ventilations sont réparties entre simple flux et double flux pour faciliter la lecture et la compréhension des données. Les catégories « générateur principal de refroidissement » et « énergie refroidissement » sont regroupées pour former la catégorie « présence de climatisation » qui devient une catégorie binaire exprimée par « oui » ou « non ». Si une des deux catégories, avant affinage, stipule un système de refroidissement ou une énergie de refroidissement, cela résulte en un « oui » après affinage, même s'il est écrit « sans » dans l'autre catégorie. L'étude se fait sur des bâtiments qui se situent principalement en climat tempéré, le choix d'avoir un système de climatisation est alors optionnel et c'est pour cela que le seul fait d'en posséder est suffisamment significatif dans notre cas. Pour les générateurs principaux, que ce soit pour la production de chauffage ou d'eau chaude sanitaire (ECS), ils sont regroupés par types (chaudières, PAC, chauffe-eau) ou par énergie utilisée (bois et électricité). Pour certains cas, le regroupement évite la suppression de variables. Par exemple il n'y a que 3 instances de chaudières à gaz standard, mais le regroupement dans la variable « chaudière gaz » évite son effacement de l'étude. Toutes les variables qui n'ont pas été retenues par manque de représentation figuraient moins de 10 cas. Ce filtrage permet ainsi de limiter les biais liés aux effectifs insuffisants et d'assurer la fiabilité des comparaisons entre modalités.

Méthodologie

Tableau 5A Regroupement et réduction des modalités catégorielles « consommation d'énergie fossile et d'électricité » en vue de l'analyse de régression multiple

Catégories avant affinage	Catégories après affinage	Avant affinage	Après affinage	Nombre de variables		
Type de ventilation principale		VMC simple flux par extraction hygroréglable A et B VMC simple flux par extraction fixe ou autoréglable VMC double flux collective avec échangeur collectif (logements collectifs) VMC double flux individuelle avec échangeur individuel (maison individuelle ou par appartement)	VMC simple flux (n=424) VMC double flux (n=17)	2		
Générateur principal de refroidissement	Présence de climatisation	PAC air/eau PAC air extérieur/air recyclé PAC sol/eau Réseau de froid Système DRV	Oui (n=40)	2		
Énergie refroidissement		Sans Bois plaquettes Électricité Gaz naturel ou GPL Réseau de fourniture Sans			Non (n=401)	
Générateur principal de chauffage		Chaudière bois Poêle à bois Chaudière gaz à condensation Chaudière gaz standard Convector électrique, panneaux rayonnants électriques 				Bois (n=16) Chaudière gaz (n=286) Électrique (n=16) Pas assez représenté
Générateur principal d'ECS		PAC air/eau PAC air extérieur/air recyclé PAC sol/eau Réseau de chaleur Système DRV				Pompe à chaleur (n=123) Pas assez représenté Pas assez représenté
		Autres, à préciser Chaudière bois Chaudière gaz à condensation Chaudière gaz standard Chauffe-eau solaire avec appoint intégré Chauffe-eau thermodynamique électrique sur air ambiant Chauffe-eau thermodynamique électrique sur air extérieur Chauffe-eau thermodynamique électrique sur air extrait Chauffe-eau thermodynamique électrique sur eau de nappe Chauffe-eau thermodynamique électrique sur eau glycolée Chauffe-eau thermodynamique électrique sur sol Chauffe-eau thermodynamique gaz sur air extérieur Chauffe-eau thermodynamique gaz sur eau glycolée PAC moteur gaz sur air Réseau de chaleur				Autres, à préciser (n=131) Pas assez représenté Chaudière gaz (n=166) Pas assez représenté Chauffe-eau électrique (n=144) Pas assez représenté Pas assez représenté Pas assez représenté
			Total			11

Méthodologie

Tableau 5B Regroupement et réduction des modalités catégorielles « consommation d'énergie fossile et d'électricité » en vue de l'analyse de régression multiple

Catégories avant affinage	Catégories après affinage	Avant affinage	Après affinage	Nombre de variables		
Type d'émetteurs principaux de chauffage	Autres cas	Pas assez représenté	2			
	Convector électrique	Pas assez représenté				
	Panneaux rayonnants électriques					
	Plafond chauffant, radiants électriques infrarouges moyens ou courts	Aéraulique (n=18)				
	Diffusion d'air chaud par réseau aéraulique					
	Soufflage d'air chaud					
	Ventilo-convector					
	Plafon chauffant eau chaude	Hydraulique (n=423)				
	Plancher chauffant eau chaude					
	Radiateur à eau chaude					
Énergie chauffage	Émetteurs à forte induction	Pas assez représenté	3			
	Émetteurs muraux rayonnants	Pas assez représenté				
Énergie ECS	Biogaz	Pas assez représenté				
	Bois bûches	Bois (n=16)				
	Bois granulés					
	Bois plaquettes					
Surface de capteurs photovoltaïques [m ²]	Électricité	Électricité (n=151)	2			
	Gaz naturel ou GPL	Gaz (n=274)				
	Réseau de fourniture	Pas assez représenté				
		Oui (n=164)	Total	7		
		Non (n=277)				

Les types d'émetteurs principaux de chauffage sont divisés en deux groupes : « aéraulique » et hydraulique ». Beaucoup ne présentent pas assez d'occurrences pour être compris dans l'étude mais la taille de l'échantillon final reste satisfaisant (n=441). L'énergie de chauffage et l'énergie d'ECS, sont regroupées en une seule catégorie « énergie principale ». Pour la majorité des cas (76%), les deux catégories présente la même énergie. Si ce n'est pas le cas, l'énergie de chauffage est priorisée par rapport à l'énergie d'ECS car uniquement 12% de la consommation énergétique d'un ménage est utilisée pour l'ECS dans le secteur domestique selon Andreau et al. (2021). La variable quantitative représentée par la surface de capteurs photovoltaïques est changée en variable qualitative « oui » ou « non » qui recense si les bâtiments en possèdent ou non. Cela apporte une meilleure cohérence dans l'étude qui s'articule en une comparaison de variables qualitatives pour déterminer leurs effets sur des variables quantitatives, représentés par les indicateurs environnementaux cités en 3.5.1.

3.5.4. Génération des résultats à l'aide du logiciel « RStudio »

L'analyse statistique des données de ce mémoire a été réalisée à l'aide du logiciel « RStudio », un environnement open-source dédié au traitement et à la visualisation de données, particulièrement adapté aux méthodes d'analyse multivariée. « Rstudio » constitue un outil de référence dans le milieu académique, notamment en raison de sa fiabilité, de ses nombreuses fonctionnalités statistiques et de sa large adoption dans les travaux de recherche.

Sur recommandation de Madame Haesbroeck, doyenne de la Faculté des Sciences et professeure de statistique à l'Université de Liège, le choix s'est porté sur ce logiciel afin de

Méthodologie

garantir la rigueur des analyses. Dans le cadre de ce travail, une régression linéaire multiple a été effectuée à l'aide de « RStudio » pour identifier les déterminants significatifs des émissions de GES. Cette démarche a été menée en suivant le tutoriel réalisé par Sophie Klenkenberg, assistante de Madame Haesbroeck, spécifiquement conçu pour l'utilisation du logiciel « RStudio » dans le contexte des régressions linéaires.

L'ensemble des scripts des codes venant du logiciel a été conservé en annexe pour assurer la traçabilité des résultats.

3.5.4.1. Chargement des données dans « RStudio »

L'extrait de code 1 montre le chargement correcte des données dans « RStudio ». Le fichier de la base de données, préparé au préalable, a été importé au format texte à l'aide de la fonction « `read.delim()` ». Le paramètre « `fileEncoding = "latin1"` » a été utilisé afin d'assurer une lecture correcte des caractères accentués, autrement le logiciel affiche un message d'erreur.

```
# chargement des données #

setwd("C:/Users/yesis/OneDrive/Documents/Études/Travail/ULiège/M2/Q2/TFE")

data <- read.delim("analyse.txt", header = TRUE, fileEncoding = "latin1")
View(data)

# précision données qualitatives #

cols <- c("usage_princ", "struct_princ", "matériaux_princ", "façade",
"toiture", "menuiserie", "ventil_princ", "chauf_princ", "ecs_princ", "clim",
"nrj_princ", "pp", "émet_chauf_princ")
data[cols] <- lapply(data[cols], as.factor)
```

Extrait de code 1 Chargement des données réalisé dans le logiciel « RStudio »

Une fois les données chargées dans « RStudio », plusieurs colonnes représentants des variables qualitatives ont été identifiées. Par variables qualitatives, on entend ici des données catégorielles, c'est-à-dire des variables non numériques, qui prennent des valeurs sous forme de catégories (par exemple : structure bois, béton, etc).

Pour permettre au logiciel de traiter ces variables dans le modèle de régression, il est nécessaire de les convertir au type "facteur" (« `as.factor` »). Un facteur est une structure de données spécifique dans « RStudio » qui permet de représenter les catégories comme des modalités discrètes, et non comme des valeurs continues. Cette transformation a été réalisée grâce à la fonction « `lapply()` » appliquée sur les colonnes concernées, ce qui garantit que chaque modalité sera interprétée comme une variable indépendante lors de la régression.

3.5.4.2. Coefficients du modèle linéaire

En guise d'exemple, nous allons évaluer l'impact des choix constructifs sur l'EGES totale des bâtiments. Le même processus s'appliquera pour les deux sous-indicateurs que sont l'EGES PCE et l'EGES OPE. L'indicateur environnemental en question est alors appelée « variable

Méthodologie

dépendante » et le reste (comme « chauf_princ », « clim », etc) constitue les variables dites « explicatives ».

L'extrait de code 2 montre les lignes de codes à rentrer pour avoir un premier modèle linéaire ou « linear model » (lm) en anglais. Le code est ici réduit au nécessaire pour un soucis d'espace mais sa version complète est en annexe comme énoncé précédemment.

```
> # régression multiple pour les eges #

> mod <- lm(eges ~ chauf_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ + façade +
  matériau_princ + menuiserie + nrj_princ + pp + struct_princ + toiture +
  usage_princ + ventil_princ, data = data)

> # analyse de modèle #

> summary(mod)

Call:
lm(formula = eges ~ chauf_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ + façade +
  matériau_princ + menuiserie + nrj_princ + pp + struct_princ + toiture +
  usage_princ + ventil_princ, data = data)

Residuals:
    Min      1Q   Median      3Q     Max 
-11.8447 -2.2005  0.1924  2.2611 10.4149 

Coefficients: (1 not defined because of singularities)
                                         Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)    
(Intercept)                         18.0886   1.7885 10.114 < 2e-16 ***
chauf_princchaudière_gaz          6.5044    1.2006  5.418 1.02e-07 ***
chauf_princÉlectrique           -5.3627   1.8633 -2.878 0.004205 **  
---
nrj_princgaz                      NA         NA       NA       NA      
usage_princmaison_indiv        -3.1575   0.5602 -5.636 3.20e-08 ***
ventil_princvmc_simple_flux     2.6144    1.3110  1.994 0.046778 *  
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.621 on 419 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.593,    Adjusted R-squared:  0.5726 
F-statistic: 29.07 on 21 and 419 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Extrait de code 2 Modèle linéaire réalisé dans le logiciel « RStudio » expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

Plusieurs coefficients s'affichent avec l'appel du résumé du model « summary(mod) » :

- Le coefficient de détermination multiple (« Multiple R-squared ») mesure la proportion de la variance de la variable dépendante (ici, l'EGES totale) expliquée par l'ensemble des variables indépendantes du modèle. Dans ce cas, la valeur de 0.593 signifie que 59,3 % de la variabilité des émissions de GES est expliquée par les variables explicatives intégrées dans la régression. Il s'agit d'un indicateur mesurant à quel point

Méthodologie

les variables explicatives parviennent à reproduire les variations des émissions de GES observées. Plus ce coefficient est élevé, plus le modèle est jugé performant.

- La « p-value » associée à la statistique de Fisher (« F-statistic ») teste l'hypothèse nulle selon laquelle aucune des variables explicatives n'a d'effet sur la variable dépendante. Ici, la « p-value » est inférieure à 2.2e-16, ce qui indique que le modèle global est hautement significatif : on peut donc rejeter l'hypothèse nulle et conclure que les variables explicatives ont un effet global significatif sur les émissions de GES.
- « L'intercept » correspond à la valeur estimée des émissions de GES pour un bâtiment présentant les modalités de référence pour toutes les variables catégorielles (c'est-à-dire les catégories choisies par défaut par le logiciel). Il constitue le point de départ à partir duquel les effets de chaque modalité différente sont ensuite ajoutés ou soustraits. Dans ce modèle, l'intercept est 18, ce qui représente les émissions de GES estimées pour le profil de référence (bâtiment ayant toutes les modalités de base, par exemple : chauffage de référence, pas de climatisation, etc.).
- La colonne « Pr(>|t|) » fournit la « p-value » associée à chaque coefficient estimé. Elle permet de tester l'hypothèse selon laquelle le coefficient est significativement différent de zéro, donc que la variable explicative a un effet sur la variable dépendante. Plusieurs niveaux de confiances y sont associés, souvent notée par « * », « ** » ou « *** », correspondant respectivement à 5%, 1% et 0.1%, ce qui indique que l'effet estimé n'est pas statistiquement significatif au seuil de 5 %, 1% et 0.1%.
- Finalement, la colonne « Estimate » correspond aux coefficients estimés dans le modèle de régression. Elle indique, pour chaque variable ou modalité, l'effet moyen attendu sur les émissions de GES, par rapport à une situation de référence. Une valeur positive traduit une augmentation des émissions estimées, tandis qu'une valeur négative indique une réduction.

3.5.4.3. Tests de colinéarité

On observe ici que la modalité « nrj_princgaz » a été automatiquement exclue du modèle. Cette exclusion est due à une colinéarité quasi-parfaite entre les variables « nrj_princ » (énergie principale) et « chauf_princ » (système de chauffage principal). En d'autres termes, le logiciel « RStudio » a détecté que, dans l'échantillon analysé, il pouvait déduire avec certitude la source d'énergie "gaz" à partir du type de chauffage, ce qui rend la variable « nrj_princgaz » redondante. Elle a donc été supprimée automatiquement par le modèle pour éviter un problème de multicolinéarité.

Cependant, cette suppression n'a concerné qu'une seule modalité de la variable « nrj_princ ». Les autres modalités, comme « nrj_princelec », restent présentes dans le modèle, ce qui introduit un biais potentiel. En effet, puisque la modalité "gaz" a été éliminée, la modalité de référence pour « nrj_princ » n'est plus clairement identifiable, ce qui rend l'interprétation des autres coefficients de cette variable ambiguë.

Par exemple, un coefficient de +4.63 pour « nrj_princelec » pourrait être interprété, à tort, comme l'impact de l'électricité par rapport à une référence telle que "bois". Or, dans ce cas précis, la variable « chauf_princ » capture déjà l'effet de la source d'énergie "gaz", ce qui signifie qu'il y a un recouvrement partiel d'information entre les deux variables. Cette

Méthodologie

situation peut entraîner un double comptage ou des contradictions d'interprétation, rendant certains coefficients difficiles à analyser de manière fiable.

Pour vérifier cette corrélation entre les deux modalités « chauf_princ » et « nrj_princ » nous créons un tableau croisé entre variables (cf Tableau 6).

Tableau 6 Tableau de corrélation entre les modalités "nrj_princ" et "chauf_princ" réalisé dans le « logiciel RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

	bois	elec	gaz
Électrique	0	16	0
bois	16	0	0
chaudière_gaz	0	13	273
Pompe_à_chaleur	0	122	1

On remarque que toutes les lignes ont quasiment une seule colonne remplie ce qui indique une corrélation quasi parfaite.

Pour confirmer cette observation nous faisons un test supplémentaire : le test de « chi-carré ». Il nous indique une « p-value » extrêmement faible signifiant une forte dépendance entre les deux modalités.

Cela s'explique par le lien logique entre le système de chauffage installé et l'énergie utilisée. Afin d'éviter toute colinéarité et d'améliorer l'interprétabilité du modèle, seule la variable « chauf_princ », plus représentative des choix de conception, sera conservée dans l'analyse.

3.5.4.4. Critère d'information d'Akaike (AIC)

Après avoir relancé le modèle sans la modalité « nrj_princ » nous pouvons procéder à l'AIC (voir Extrait de code 3). C'est un indicateur utilisé pour évaluer la qualité d'un modèle statistique tout en pénalisant sa complexité. Plus l'AIC est faible, meilleur est le compromis entre la qualité d'ajustement et la simplicité du modèle. Ce critère est particulièrement utile pour comparer plusieurs modèles entre eux et orienter les choix de sélection de variables.

Concrètement, le critère AIC teste le taux d'explication de la variable dépendante par les variables explicatives et retire celles qui ne sont pas assez significatives.

Méthodologie

```
> # sélection de variables selon le critère AIC #
> library(MASS)
> mod_step <- stepAIC(modv1)
Start:  AIC=1170.01
eges ~ chauf_princ + clim + ecs_princ + émet_chauf_princ + façade +
      matériau_princ + menuiserie + pp + struct_princ + toiture +
      usage_princ + ventil_princ

          Df  Sum of Sq    RSS    AIC
- émet_chauf_princ  1     2.66 5695.1 1168.2
- struct_princ      2    42.55 5735.0 1169.3
<none>                      5692.5 1170.0
- ventil_princ      1    69.53 5762.0 1173.4
- matériau_princ    2   152.73 5845.2 1177.7
- menuiserie         2   174.13 5866.6 1179.3
- clim               1   188.38 5880.8 1182.4
- ecs_princ          2   232.52 5925.0 1183.7
- façade              2   278.12 5970.6 1187.0
- toiture             2   324.35 6016.8 1190.5
- pp                 1   336.74 6029.2 1193.4
- usage_princ        1   456.53 6149.0 1202.0
- chauf_princ        3  1755.68 7448.1 1282.6

Step:  AIC=1168.22
eges ~ chauf_princ + clim + ecs_princ + façade + matériau_princ +
      menuiserie + pp + struct_princ + toiture + usage_princ +
      ventil_princ
```

Extrait de code 3 Sélection des variables selon le critère d'information d'Akaike (AIC) réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

Comme le montre l'*Extrait de code 3*, le tableau généré par la fonction « `stepAIC()` » présente les différentes options de retrait de variables, accompagnées des valeurs d'AIC associées à chaque scénario.

La première étape de la sélection de variable consiste à supprimer la modalité « `émet_chauf_princ` » puisque l'AIC associé à ce modèle est de 1168.2, et il constitue la valeur la plus faible parmi toutes les options testées. On peut vérifier que l'AIC supprime bien cette modalité avec la ligne de description du modèle en conclusion. Ici on remarque, en effet, que le type d'émetteur principal de chauffage a bien été écarté du modèle.

La ligne « `<none>` » correspond au modèle initial complet, c'est-à-dire celui qui inclut toutes les variables explicatives. L'AIC s'arrête toujours avec cette ligne étant donné qu'aucune modification du modèle ne permettrait de réduire son indice. A cette étape, le modèle est

Méthodologie

conservé car il est jugé optimal selon le critère AIC. Cela indique que toutes les variables incluses apportent une contribution utile à l'explication de la variable dépendante (ici, les EGES).

3.5.4.5. Tests de normalité des résidus

Dans le cadre de la régression linéaire multiple, l'un des postulats fondamentaux est que les résidus du modèle, c'est-à-dire les différences entre les valeurs réellement observées et les valeurs prédictes par le modèle, doivent être répartis selon une loi normale (courbe en cloche symétrique). Autrement dit, l'erreur commise par le modèle lorsqu'il fait une prédiction doit être aléatoire et centrée autour de zéro, sans biais ni comportement particulier.

La Figure 20 représente l'histogramme des résidus pour le premier modèle après AIC qui tente d'expliquer les émissions de GES totales en fonction des choix constructifs préalablement sélectionnés.

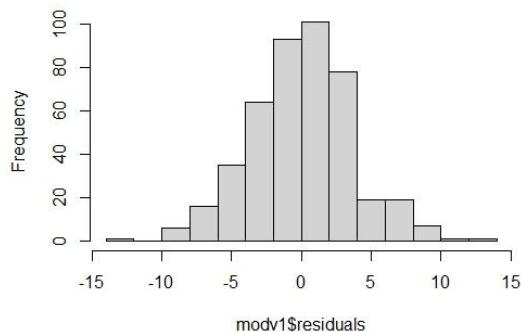


Figure 20 Histogramme des résidus réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

L'histogramme est bien centré autour de 0, la courbe symétrique semble être respectée avec tout de même une petite chute à 5. De manière générale, la distribution normale est respectée et nous ne remarquons pas de déviations significatives. L'histogramme ne révèle donc pas d'anormalité.

Un « quantile-quantile plot » (QQ-plot) a également été généré (voir Figure 21). Ce graphique permet de visualiser la normalité des résidus en comparant la distribution observée (« Sample Quantiles ») à une distribution normale théorique (« Theoretical Quantiles »). Sur ce graphique, chaque point représente un résidu du modèle, et sa position indique comment il se compare à ce qui serait attendu s'il provenait d'une loi normale.

Si les points suivent une ligne droite, ici représentée en rouge, cela signifie que la distribution des résidus est proche d'une distribution normale. En revanche, si les points s'écartent fortement de cette ligne (surtout aux extrémités), cela peut indiquer des anomalies de normalité.

Méthodologie

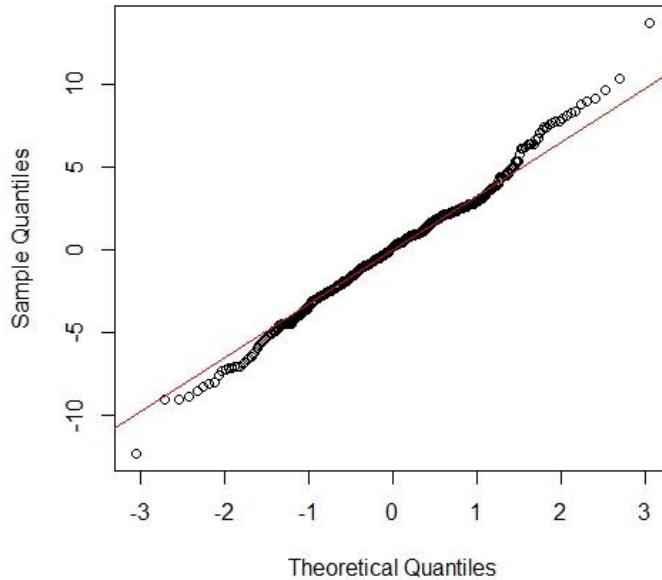


Figure 21 QQ-plot réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

Nous remarquons sur la Figure 21 que les points suivent la ligne de distribution normale. Il n'y a donc pas trop de déviance par rapport à cette dernière.

Finalement, le test de « Shapiro-Wilk » évalue de manière statistique et formelle la normalité des résidus. Comme les test précédents, l'objectif est de montrer si les données suivent une loi normale en comparant la distribution des résidus à une distribution normale idéale. L'hypothèse nulle (H_0) du test est que les résidus sont normalement distribués. Si la « p-value » est supérieure à 0,05, on ne rejette pas cette hypothèse : la normalité est considérée comme plausible. Si la « p-value » est inférieure à 0,05, on rejette l'hypothèse de normalité : cela signifie que la distribution des résidus s'écarte significativement d'une loi normale.

Le test de « Shapiro-Wilk » appliqué aux résidus a donné une p-value inférieure à 0,05, ce qui signifie que l'on peut rejeter l'hypothèse selon laquelle les résidus suivent une loi normale. Autrement dit, les erreurs de prédiction du modèle ne sont pas réparties de façon aléatoire et symétrique autour de zéro, comme le postule la régression linéaire classique.

Ce résultat ne remet pas en cause la validité du modèle dans son ensemble, mais il implique que certaines hypothèses statistiques sont erronées. En particulier, la non-normalité des résidus peut affecter la fiabilité des tests de significativité associés aux coefficients (notamment les « p-values »), qui pourraient être légèrement biaisés ou moins robustes. Par conséquent, les résultats du modèle doivent être interprétés avec prudence.

Par souci de rigueur, et afin de s'assurer de la robustesse du modèle, une vérification complémentaire de l'homoscédasticité a été réalisée (voir Figure 22). L'hypothèse d'homoscédasticité stipule que les résidus du modèle doivent avoir une variance constante, indépendamment des valeurs des variables explicatives. Cela signifie que le modèle doit commettre des erreurs d'amplitude similaire tout au long de la plage de prédiction. Sa violation (appelée hétéroscédasticité) peut entraîner une sous-estimation ou surestimation des erreurs standard, et donc fausser « les p-values ».

Méthodologie

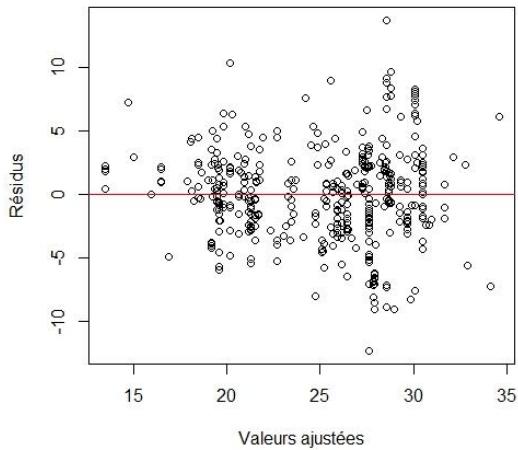


Figure 22 Test d'homoscédasticité réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

La Figure 22 représente les résidus (en ordonnée) en fonction des valeurs ajustées (ou prédictes) par le modèle de régression (en abscisse). Chaque point correspond à un bâtiment de l'échantillon.

La ligne rouge horizontale représente le niveau zéro, autour duquel les résidus doivent théoriquement se répartir de manière aléatoire et sans structure particulière si l'hypothèse d'homoscédasticité est respectée.

Nous pouvons observer que les résidus sont en majorité centrés autour de 0. Cependant, la présence de "colonnes verticales" de points peut traduire le fait que plusieurs observations ont la même valeur ajustée, mais des résidus différents. Cela s'explique par l'usage majoritaire de variables qualitatives dans le modèle. Par exemple, plusieurs bâtiments du jeu de données partagent exactement la même combinaison de caractéristiques constructives, comme un chauffage au gaz, une menuiserie en PVC, une façade en terre cuite et une structure porteuse en béton. Comme ces variables sont qualitatives, le modèle leur attribue une même valeur prédictive (valeur ajustée). Cependant, leurs valeurs observées d'émissions réelles diffèrent légèrement, ce qui génère des résidus variés pour une même prédiction. Ce phénomène est attendu dans un contexte de régression sur données catégorielles et ne remet pas en cause l'hypothèse d'homoscédasticité, tant que la dispersion verticale des résidus reste stable.

Le test de « Breusch-Pagan » a été utilisé pour vérifier l'hypothèse d'homoscédasticité. Ce test repose sur une régression auxiliaire. Cette régression ne vise pas à prédire une variable réelle, mais à détecter une variation systématique de la variance des erreurs. Contrairement à une régression linéaire classique, on n'interprète pas les coefficients de cette régression auxiliaire, mais uniquement la « p-value » du test au global.

L'hypothèse nulle du test est que la variance est constante (homoscédasticité). Si la « p-value » est inférieure à 0,05, on conclut à la présence d'hétéroscédisticité, ce qui signifie que la précision du modèle varie selon les observations. Dans le cas contraire, si la p-value est supérieure à 0,05, on considère que l'hypothèse d'homoscédasticité est respectée, ce qui renforce la validité des inférences statistiques du modèle.

Méthodologie

Le test de « Breusch-Pagan » appliqué au modèle a donné une « p-value » de 2,5^e-14, indiquant une hétéroscédasticité très significative des résidus. Cela signifie que la variance des erreurs n'est pas constante selon les observations.

Bien que les coefficients estimés restent valides, cette situation rend les « p-values » classiques peu fiables, car les erreurs standards sont faussées.

Pour pallier ce problème, une correction de « White » a été envisagée.

3.5.4.6. Correction de « White »

Afin de tenir compte d'une potentielle hétéroscédasticité détectée via le test de « Breusch-Pagan », les erreurs standards des coefficients ont été recalculées à l'aide de la méthode robuste de « White ».

Cette correction repose sur le recalculation d'erreurs standards dites "robustes", qui restent valides même si les résidus du modèle n'ont pas une variance constante. Elle ne nécessite pas de connaître la forme exacte de l'hétéroscédasticité, ce qui en fait une méthode particulièrement souple et fiable.

La commande, présente dans l'Extrait de code 4 ci-dessous, applique la méthode de White (type « HC1 »), qui ajuste les erreurs standards pour assurer la validité des tests même en présence d'hétéroscédasticité, garantissant ainsi une interprétation fiable des coefficients du modèle.

La fonction « coeftest() » permet de tester la significativité des coefficients d'un modèle en utilisant une matrice de variance-covariance personnalisée via l'argument « vcov ». Ici, cette matrice est fournie par la fonction « vcovHC() » afin d'intégrer des erreurs standards robustes, adaptées à la situation d'hétéroscédasticité.

```
# méthode white car hétéroscédasticité significative #

library(sandwich)

coeftest(modv1, vcov = vcovHC(modv1, type = "HC1"))

t test of coefficients:

            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)

(Intercept)    17.98430   1.52686 11.7786 < 2.2e-16 ***
chauf_princchaudière_gaz     6.72495   1.17701  5.7136 2.089e-08 ***

-----
usage_princmaison_indiv      -3.21779   0.67533 -4.7648 2.603e-06 ***
ventil_princvmc_simple_flux    3.03464   1.17847  2.5751 0.0103611 *

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Extrait de code 4 Correction de "White" réalisée dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

Méthodologie

On remarque, par rapport à l'Extrait de code 2, des coefficients ajustés, ce qui prouve l'agissement de la correction de « White ». Par exemple, la variable « chauf_princchaudière_gaz » passe d'un « intercept » de 18.09 à un « intercept » de 17.98. Comme nous pouvons le remarquer, les changements de ce coefficient entraîne des ajustements partout ailleurs (« Estimate », « Std. Error », « t value » et « Pr(>|t|) »).

3.5.4.7. *Nouvelles modalités de référence*

Une fois les erreurs standards corrigées avec des « p-values » plus fiables, nous observons que certains « Estimate » de variables sont négatifs, cela veut dire qu'ils contribuent à réduire les émissions de GES (totales en l'occurrence).

De plus, cette colonne « Estimate » présente les coefficients estimés du modèle de régression. Elle exprime, pour chaque variable explicative ou modalité, l'effet moyen attendu sur les émissions de GES par rapport à une situation de référence.

Dans le cas où nous n'avons que des variables explicatives qualitatives, le modèle de régression utilise un codage par variables indicatrices (appelé « dummy variables »). Une modalité de référence est choisie automatiquement (souvent la première modalité par ordre alphabétique), et elle est intégrée dans l'intercept du modèle. Les autres modalités donnent lieu à des coefficients estimés qui traduisent l'écart moyen (positif ou négatif) de la variable dépendante par rapport à cette modalité de référence.

Cependant, à l'aide de l'Extrait de code 5 et de la fonction « relevel() », nous pouvons changer ces références pour ne mettre que des modalités avec un impact positif sur les émissions GES, afin de former un modèle d'habitation idéal, plus facile à comparer avec les autres variables à effet négatif.

```
# nouvelles modalités de référence pour habitation "low-carbon" #
data$chauf_princ      <- relevel(data$chauf_princ, ref = "Électrique")
-----
data$usage_princ       <- relevel(data$usage_princ, ref = "maison_indiv")
```

Extrait de code 5 Nouvelles modalités de référence réalisées dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

Pour l'indicateur environnemental d'EGES totales, on remarque alors que le meilleur type de chauffage est électrique et que les maisons individuelles ou accolées émettent moins que les logements collectifs.

3.5.4.8. *Indice d'inflation de la variance (VIF)*

Après avoir recréer un modèle avec les nouvelles modalités de référence et avoir appliquer de nouveau la correction de « White », nous pouvons vérifier l'absence de multicolinéarité entre les variables explicatives. L'indice d'inflation de la variance (« Variance Inflation Factor » ou VIF) évalue dans quelle mesure la variance estimée d'un coefficient de régression est amplifiée en raison de la corrélation avec les autres variables. Une valeur de VIF élevée (supérieure à 5 ou 10 selon les conventions) suggère une redondance d'information et peut compromettre l'interprétation des coefficients du modèle.

Méthodologie

Même si, dans un premier temps, le logiciel le fait automatiquement comme avec « nrj_princgaz », il est toujours intéressant de vérifier avant de considérer les résultats exploitables.

Le Tableau 7 montre les indices d'inflation de la variance généralisés (GVIF) calculés. GVIF est l'indice brut, sensible au nombre de modalités de la variable (Df). Toutes les variables catégorielles du modèle comportant plusieurs modalités, une correction a été appliquée selon $GVIF^{\frac{1}{2*Df}}$ permettant une comparaison directe entre variables.

Tableau 7 Indice d'inflation de la variance (Vif) réalisé dans le logiciel « RStudio » pour le modèle expliquant les EGES en fonction des choix constructifs sélectionnés

	GVIF	Df	GVIF^(1/(2*Df))
chauf_princ	3.133729	3	1.209698
clim	1.194296	1	1.092839
ecs_princ	2.263713	2	1.226607
façade	7.558149	2	1.658074
matériau_princ	7.935121	2	1.678373
menuiserie	1.857442	2	1.167425
pp	1.925999	1	1.387804
toiture	1.670573	2	1.136885
usage_princ	1.661899	1	1.289147
ventil_princ	1.687624	1	1.299086

Nous ne remarquons aucune des variables explicatives dépassant le seuil critique de 2, ce qui permet de conclure à une absence de multicolinéarité problématique dans le modèle. L'interprétation des coefficients peut donc être considérée comme stable et fiable.

Après avoir vérifié les VIF sur le modèle complet, il est d'usage de les vérifier également pour le modèle restreint, c'est-à-dire le modèle après AIC. Même si cela ne résulte presque jamais en des indices problématiques.

3.5.5. Choix de présentation des résultats

Dans le cadre de l'analyse des résultats issus de la régression linéaire multiple appliquée aux indicateurs environnementaux, deux types de visualisations principales ont été mobilisées : des diagrammes en barres et une carte thermique (« heatmap ») de comparaison.

La Figure 16, par Hollberg et al. (2021), montre que le benchmarking et l'analyse de corrélation ou de sensibilité nécessitent des visualisations synthétiques mais capables de conserver une bonne lisibilité même lorsque le nombre de variables est important.

Les diagrammes en barres sont ici utilisés pour représenter les coefficients issus des modèles de régression pour chaque modalité de variable explicative. Ils permettent une lecture directe de l'effet moyen de chaque variable sur les émissions de GES, avec une bonne perception des ordres de grandeur. Ce type de graphique est recommandé pour la comparaison d'options de conception, notamment lorsque le nombre d'objets (ici les variables) reste modéré, et qu'on souhaite rendre lisible l'influence relative de chaque facteur (groupe A de la Figure 16).

La « heatmap », quant à elle, résume visuellement les effets des variables sur les trois indicateurs de façon conjointe. En positionnant les familles de variables en lignes et les indicateurs en colonnes, elle permet d'identifier rapidement les facteurs les plus influents et

Méthodologie

de comparer les comportements différenciés d'un même paramètre selon l'indicateur environnemental considéré. Cette approche s'inscrit pleinement dans la logique d'identification de « hotspots » et de benchmarking multicritère, comme le recommande les visualisations du groupe D de la Figure 16.

Résultats

4. Résultats

4.1. Benchmark des émissions carbone par catégorie de bâtiments selon leur typologie et leur hauteur

4.1.1. Comparaison typologique et de hauteur par catégorie de bâtiments

La Figure 30, en annexe, montre le premier graphique obtenu. Toutes les hauteurs, par typologie, disponibles dans la base de données sont représentées. Cependant, certaines ne possèdent pas un échantillon de bâtiments assez satisfaisant pour notre étude. Cette limitation statistique peut entraîner une perte de robustesse dans l'estimation des valeurs de référence (médiane) et des valeurs cibles (premier quartile). De ce fait, les catégories possédant moins de 10 bâtiments ont été exclues dans l'analyse comparative afin de garantir la validité des tendances observées. Finalement, les points individuels représentatifs de chaque bâtiment résidentiel ont été supprimés par soucis de lisibilité.

La Figure 23 présente, sous forme de diagrammes en boîte, les émissions de GES exprimées en kgCO₂éq/m².an pour différents types de bâtiments résidentiels sur leur cycle de vie. Les données sont différencierées selon la typologie (logement collectif ou maison individuelle ou accolée) et la hauteur (nombre d'étages au-dessus du rez-de-chaussée). Trois indicateurs sont représentés pour chaque catégorie comme indiqué en 3.4.1 et 3.4.2 :

- EGES, qui regroupe l'ensemble des émissions directes et indirectes liées au bâtiment sur l'ensemble de son cycle de vie (50 ans), depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie du bâtiment (en bleu) ;
- EGES PCE ne prend en compte que les produits de construction et les équipements techniques et se concentre uniquement sur les émissions embarquées (« embodied carbon »)(en rouge) ;
- EGES OPE représentant l'impact carbone opérationnel du bâtiment (« operational carbon impact »)(en vert).

Les lignes continues et pointillées indiquent les seuils réglementaires de la RE2020 comme cités en 3.4.4, en vigueur sur deux périodes :

- Seuils 2022–2024 :
 - En orange pour les logements collectifs,
 - En jaune pour les maisons individuelles ou accolées.
- Seuils 2025–2027 :
 - En orange pointillé pour les logements collectifs,
 - En jaune pointillé pour les maisons individuelles ou accolées.

Les croix représentent les moyennes, les lignes médianes sont indiquées à l'intérieur des boîtes, et les moustaches couvrent l'intervalle des valeurs extrêmes hors valeurs aberrantes.

Les logements collectifs sont à gauche du graphique et sont définis par l'étiquette « Coll ». Les maisons individuelles ou accolées se situent à droite du graphique et sont définies par l'étiquette « Ind ».

Résultats

« n » indique le nombre de bâtiments d'une catégorie. Comme énoncé précédemment, aucun n'échantillon n'a moins de 10 occurrences par soucis de représentabilité et de validité des tendances observées.

Les seuils obtenus de la RE2020 et transformés dans le chapitre 3.4.4 se remarquent en orange pour les logements collectifs et en jaune pour les maisons individuelles ou accolées.

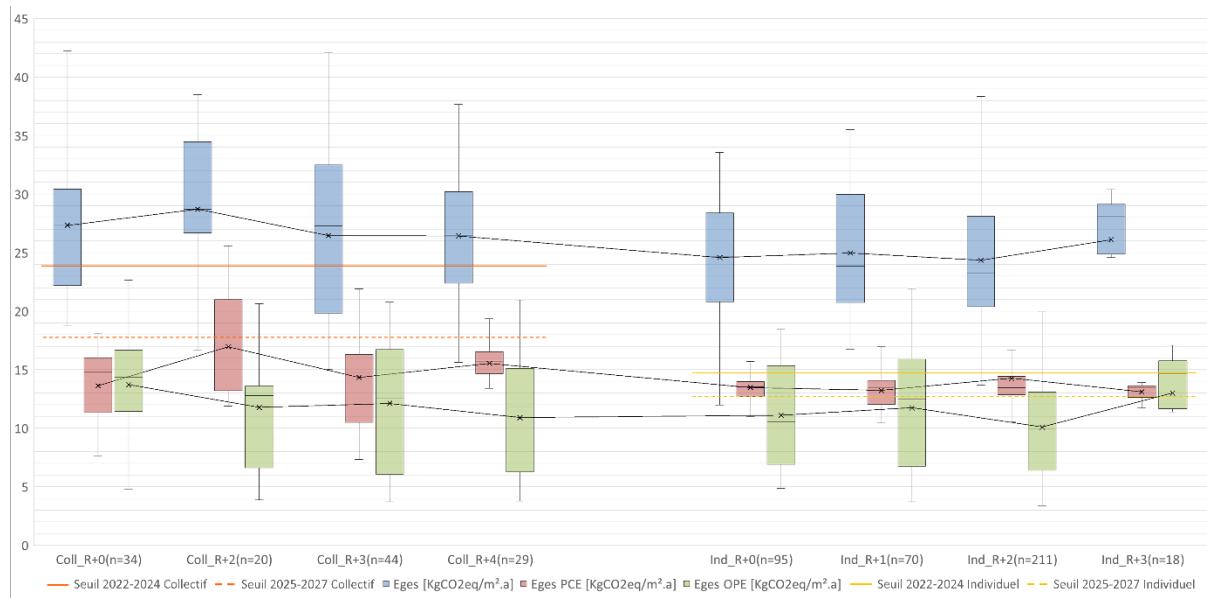


Figure 23 Comparaison des émissions de gaz à effet de serre (Eges) par typologie et hauteur de bâtiment ($n \geq 10$)

Une première observation du graphique met en évidence plusieurs tendances notables selon la typologie et la hauteur des bâtiments.

Les médianes et les moyennes des EGES totales pour les logements collectifs sont compris entre 29 et 26 kgCO2eq/m².an, avec une moyenne de typologie à 27.23 kgCO2eq/m².an et une médiane à 27.47 kgCO2eq/m².an (voir Tableau 8). Cela se trouve à environ 3.5 kgCO2eq/m².an au-dessus du seuil de 2022-2024 prévu par la RE2020 et 9.5 kgCO2eq/m².an au-dessus du seuil prévu pour 2025-2027. Pour rappel, l'expérimentation a eu lieu entre 2017 et 2021.

Les moyennes des EGES totales des maisons individuelles ou accolées se situent entre 24 et 27 kgCO2eq/m².an avec des médianes un peu plus écartées entre 23 et 29 kgCO2eq/m².an. La moyenne de typologie se situe à 25 kgCO2eq/m².an pour une médiane à 24.95 kgCO2eq/m².an. C'est au-dessus du seuil prévu pour 2022-2024 de 10 kgCO2eq/m².an à peu près et au-dessus du seuil de 2025-2027 de 12.3 kgCO2eq/m².an.

Les EGES totales des logements collectifs sont légèrement supérieures à celles des maisons individuelles mais ils sont plus proches des seuils prévus par la RE2020, que cela soit pour les années 2022-2024 ou 2025-2027.

Cet écart d'émissions se retrouve également dans les EGES PCE et les EGES OPE. On observe une différence d'à peu près 1.7 kgCO2eq/m².an entre les EGES PCE des logements collectifs et celles

Résultats

des maisons individuelles ainsi qu'une différence d'1 kgCO₂eq/m².an entre les E_{GES} OPE respectives.

Pour la quasi-totalité des cas, les écarts interquartiles (IQR) des E_{GES} OPE sont significativement supérieures aux IQR des E_{GES} PCE. Cela sera discuté plus tard dans le mémoire.

Les IQR des E_{GES} PCE liés aux maisons individuelles sont tous très similaires et oscillent entre 1 et 2 kgCO₂eq/m².an. Ceux des logements collectifs sont sensiblement plus élevés avec une moyenne d'IQR à 4.71 kgCO₂eq/m².an.

De manière générale, une hausse des E_{GES} totales en lien avec le nombre d'étages des bâtiments n'est pas observée.

4.1.2. Valeurs benchmark des émissions carbone par catégorie de bâtiments selon leur typologie et leur hauteur

4.1.2.1. Émissions de GES totales

Le Tableau 8 présente une analyse statistique des émissions de GES sur le cycle de vie, exprimées en kgCO₂e/m².an, selon la typologie (logements collectifs ou maisons individuelles/accolées) et la hauteur des bâtiments (de R+0 à R+4). Pour rappel, les données sont issues de l'expérimentation E+C-, qui constitue une base de données représentative du parc de bâtiments résidentiels neufs en France.

Comme expliqué en 2.3.2.3, cette analyse relève d'une approche ascendante « bottom-up », fondée sur des données réelles et actuelles issues de bâtiments existants (VTT, 2012 ; Gervasio & Dimova, 2018). Elle s'inscrit ainsi dans une logique de benchmark externe, dans la mesure où les valeurs de référence sont établies à partir d'un large ensemble de cas observés, sans recourir à un bâtiment jumeau (Ganassali et al., 2016). Les valeurs cibles sont ici définies comme le premier quartile (Q1), représentant les performances les plus vertueuses du panel étudié, tandis que les valeurs de référence correspondent aux médianes, utilisées pour représenter un niveau de performance central au sein de chaque catégorie.

Comme pour la partie précédente, « Coll » fait référence aux logements collectifs et « Ind » aux maisons individuelles ou accolées.

Afin de contextualiser les valeurs de ce tableau, il convient de rappeler que l'E_{GES} (Émissions de Gaz à Effet de Serre totales) correspond à la somme des émissions directes et indirectes générées par un bâtiment tout au long de son cycle de vie complet. Tel que défini à la section 3.4.1, cet indicateur intègre l'ensemble des modules de l'analyse du cycle de vie :

- la production des matériaux (A1-A3),
- le transport et la mise en œuvre sur site (A4-A5),
- la phase d'usage (B1-B7),
- et la fin de vie du bâtiment (C1-C4).

Résultats

Tableau 8 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de gaz à effet de serre (Eges) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO₂e/m².an)

		Eges [KgCO ₂ eq/m ² .a]									
Typologie		Logements collectifs			Maisons individuelles ou accolées						
Hauteur		Coll_R+0 (n=34)	Coll_R+2 (n=20)	Coll_R+3 (n=44)	Coll_R+4 (n=29)	Coll_moy	Ind_R+0 (n=95)	Ind_R+1 (n=70)	Ind_R+2 (n=211)	Ind_R+3 (n=18)	Ind_moy
Maximum		42.23	38.50	42.05	37.65	40.11	33.56	35.48	38.33	30.38	34.44
Minimum		18.80	16.70	15.00	15.63	16.53	11.97	16.75	13.68	16.23	14.66
Valeur cible (Q1)		22.49	26.90	19.87	22.55	22.95	20.81	20.78	20.39	25.24	21.80
Moyenne		27.34	28.72	26.46	26.43	27.23	24.57	24.96	24.35	26.11	25.00
Valeur de référence (médiane)		27.38	28.71	27.30	26.47	27.47	24.65	23.82	23.22	28.12	24.95

En toute logique par rapport aux résultats précédents, on retrouve une valeur cible plus élevée d'à peu près 1 kgCO₂e/m².an pour les logements collectifs par rapport aux maisons individuelles.

La valeur cible la plus élevée pour ces derniers correspond aux bâtiments de 2 étages avec une valeur de 26.90 kgCO₂e/m².an. Pour les maisons individuelles, la valeur cible la plus importante est liée aux constructions de 3 étages.

A l'opposé, les valeurs cibles les plus minimes correspondent aux logements collectifs de 3 étages et aux maisons individuelles de 2 étages avec des valeurs respectives de 19.87 et 20.39 kgCO₂e/m².an.

Aucune surprise également pour les valeurs de référence des deux typologies principales. Celle des logements collectifs est supérieure d'à peu près 2.5 kgCO₂e/m².an par rapport à celle des maisons individuelles ou accolées.

Les valeurs de référence des bâtiments à logement collectif se tiennent entre 26 et 29 kgCO₂e/m².an pour les 4 hauteurs représentées. Pour les bâtiments individuels l'écart est plus conséquent, avec des valeurs qui oscillent entre 23 et 29 kgCO₂e/m².an. L'écart se réduit si on écarte les bâtiments de 3 étages et passe de 23 à 25 kgCO₂e/m².an.

4.1.2.2. Émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements (PCE)

Le Tableau 9, similaire en tout point au Tableau 8, présente néanmoins un différent indicateur environnemental : les statistiques descriptives des émissions de GES associées aux produits de construction et équipements techniques (EGES PCE), exprimées en kgCO₂e/m².an.

Comme rappelé dans la section 3.4.1, l'EGES PCE est un sous-indicateur de l'EGES total. Il ne prend en compte que les modules A1 à A5, B1 à B5 et C1 à C4 du cycle de vie, en se limitant aux matériaux et équipements techniques. Il exclut donc les émissions liées à l'exploitation énergétique et à l'usage de l'eau (modules B6 et B7). Ce sous-indicateur permet d'évaluer l'impact environnemental intrinsèque du bâtiment, indépendamment de ses usages.

Résultats

Tableau 9 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements (EGES PCE) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO₂e/m².an)

Eges PCE [KgCO2eq/m ² .a]										
Typologie	Logements collectifs					Maisons individuelles ou accolées				
Hauteur	Coll_R+0 (n=34)	Coll_R+2 (n=20)	Coll_R+3 (n=44)	Coll_R+4 (n=29)	Coll_moy	Ind_R+0 (n=95)	Ind_R+1 (n=70)	Ind_R+2 (n=211)	Ind_R+3 (n=18)	Ind_moy
Maximum	23.49	25.58	26.42	19.35	23.71	24.77	24.47	24.87	13.92	22.01
Minimum	4.08	11.88	7.33	10.87	8.54	6.72	8.70	8.64	11.73	8.95
Valeur cible (Q1)	11.63	13.28	10.72	14.64	12.57	12.72	12.10	12.85	12.64	12.58
Moyenne	13.63	16.95	14.34	15.53	15.11	13.47	13.22	14.26	13.11	13.52
Valeur de référence	14.83	15.66	14.70	15.72	15.23	13.54	13.44	13.45	13.44	13.47

Tout d'abord, on remarque que les valeurs cibles moyennes, correspondant aux valeurs des premiers quartiles des deux typologies, sont quasi-similaires. La différence la plus fragrante entre les émissions PCE des logements collectifs et des maisons individuelles est d'à peu près 2 kgCO₂e/m².an et se fait entre les bâtiments de 3 étages.

En terme de valeurs de référence, on retrouve la tendance habituelle des logements collectifs à plus émettre de GES que les maisons individuelles. Les valeurs oscillent entre 14 et 16 kgCO₂e/m².an pour les bâtiments à usage collectif. Les valeurs de référence pour les maisons individuelles se contiennent dans un dixième, entre 13.44 et 13.54 kgCO₂e/m².an, montrant une baisse conséquente de la variance par rapport aux émissions de GES globales de cette même typologie.

4.1.2.3. Émissions de GES liées aux consommations opérationnelles (OPE)

Comme expliqué en section 2.2.2, les impacts opérationnels (« operational impacts ») désignent les émissions de GES liées à la consommation d'énergie et d'eau durant la phase d'exploitation du bâtiment (RICS, 2017). Historiquement, cette part opérationnelle a toujours été supérieure à l'énergie incorporée dans les matériaux. Ces émissions correspondent aux modules B6 et B7, qui sont inclus dans l'EGES total, mais exclus de l'EGES PCE.

Comme précisé en section 3.3.2, ce mémoire interprète la différence entre l'EGES total et l'EGES PCE comme représentant l'EGES OPE, soit l'impact carbone lié à l'exploitation du bâtiment sur 50 ans. Cette distinction permet d'isoler l'effet des choix énergétiques et des performances d'usage, indépendamment des caractéristiques constructives et des matériaux employés.

Le Tableau 10, similaire en mise en forme aux deux tableaux précédents, reprend ces émissions d'EGES OPE.

Tableau 10 Statistiques descriptives et valeurs de benchmarking des émissions de GES liées aux consommations opérationnelles (EGES OPE) selon la typologie et la hauteur des bâtiments résidentiels (en kgCO₂e/m².an)

Eges OPE [KgCO2eq/m ² .a]										
Typologie	Logements collectifs					Maisons individuelles ou accolées				
Hauteur	Coll_R+0 (n=34)	Coll_R+2 (n=20)	Coll_R+3 (n=44)	Coll_R+4 (n=29)	Coll_moy	Ind_R+0 (n=95)	Ind_R+1 (n=70)	Ind_R+2 (n=211)	Ind_R+3 (n=18)	Ind_moy
Maximum	22.63	20.62	20.76	20.97	21.25	18.42	21.94	19.91	17.07	19.34
Minimum	4.79	3.88	3.71	3.79	4.04	4.88	3.71	3.40	4.23	4.05
Valeur cible (Q1)	11.97	6.63	6.12	6.32	7.76	6.93	6.79	6.40	11.89	8.00
Moyenne	13.71	11.77	12.12	10.90	12.12	11.10	11.74	10.09	13.00	11.48
Valeur de référence (médiane)	14.33	12.79	12.53	11.83	12.87	10.51	12.45	9.98	14.61	11.89

Résultats

On remarque immédiatement que la tendance historique n'est pas vérifiée dans notre cas car les différentes valeurs (de cible et de référence) sont toutes inférieures à celles observées pour les EGES PCE. Cela sera exploité plus en détail dans la section de discussion des résultats.

Pour les maisons individuelles ou accolées on remarque une certaine stabilité pour les valeurs cibles qui sont comprises entre 6 et 7 kgCO₂e/m².an hormis pour les habitations à 3 étages qui sortent du lot avec une valeur à 11.89 kgCO₂e/m².an. Cela hausse significativement la valeur cible moyenne pour cette typologie qui arrive à 8 kgCO₂e/m².an.

Cette disparité entre les valeurs cibles se retrouve également pour les valeurs de référence avec les habitations à 3 étages qui représente le maximum avec une valeur à 14.61 kgCO₂e/m².an. Le type de hauteur qui consomme le moins reste les bâtiments à deux étages avec une valeur de référence à 9.98 kgCO₂e/m².an et une valeur cible à 6.4 kgCO₂e/m².an.

Concernant les logements collectifs, la tendance inverse s'observe, avec la typologie sans étage représentant les émissions les plus élevées avec une valeur cible à 11.97 kgCO₂e/m².an, ce qui est quasi deux fois plus important que pour les autres hauteurs.

Les valeurs de référence pour les bâtiments à usage collectif sont un peu plus resserrés dans une intervalle définie entre 11 et 15 kgCO₂e/m².an même si la hauteur émettant le plus reste le R+0 avec 14.33 kgCO₂e/m².an avec une deuxième hauteur la plus émettrice à 12.79 kgCO₂e/m².an pour une médiane à 12.87 kgCO₂e/m².an.

Résultats

4.2. Régression multiple appliquée à la détection des choix constructifs déterminants sur les émissions carbone

Afin d'identifier les facteurs de conception les plus significatifs sur les émissions carbone des bâtiments résidentiels neufs, une série de régressions linéaires multiples a été réalisée à l'aide du logiciel « RStudio ». Cette démarche permet de quantifier l'effet moyen de chaque variable explicative sur les différents indicateurs environnementaux réglementaires issus de l'expérimentation E+C-. Chaque sous-section suivante détaille les résultats obtenus pour les trois indicateurs : EGES, EGES PCE et EGES OPE.

4.2.1. Détection des paramètres influents sur les EGES par régression multiple

Cette première régression vise à expliquer la variation de l'indicateur d'EGES totales, qui représente l'ensemble des émissions de GES sur le cycle de vie du bâtiment. L'analyse met en évidence les choix architecturaux, techniques et énergétiques dont l'impact est statistiquement significatif sur cet indicateur global.

La Figure 24 présente les effets estimés de plusieurs paramètres de conception sur l'indicateur EGES, exprimés en kgCO₂éq/m².an. Les barres bleues correspondent aux variables significatives dans le modèle de régression (ayant une « p-value » supérieure à 0,05), tandis que les barres bleues clair indiquent des effets non significatifs.

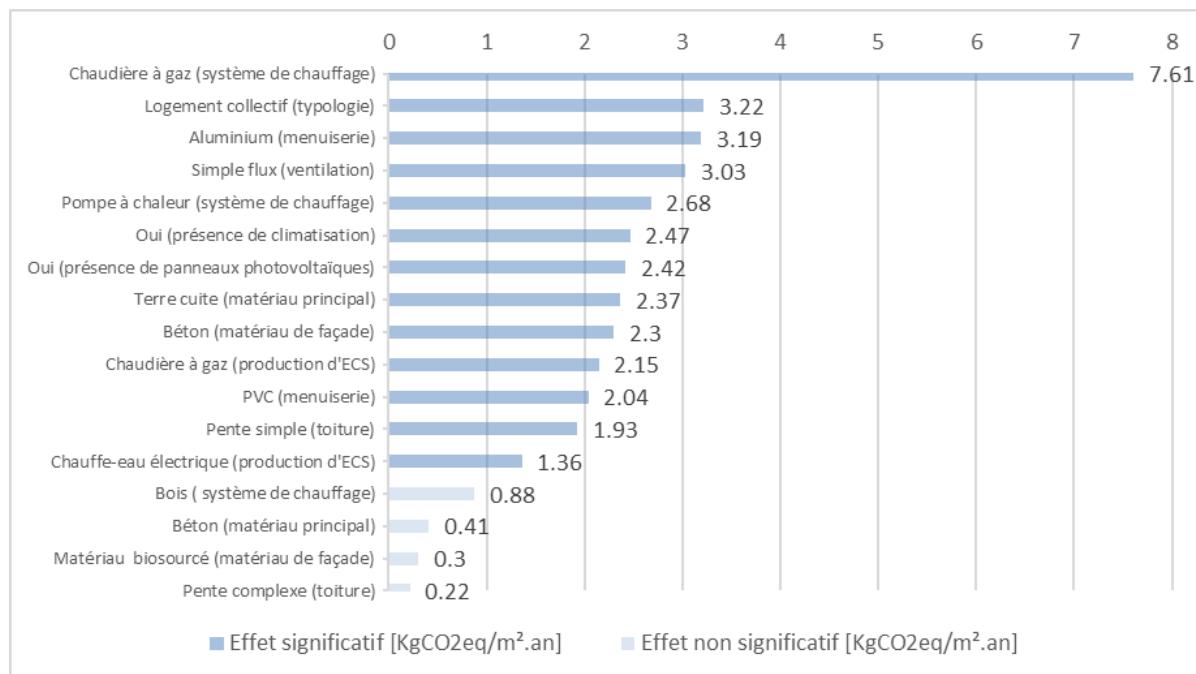


Figure 24 Effets estimés des paramètres de conception sur les émissions globales de GES (EGES)

Il apparaît que le recours à une chaudière à gaz comme système de chauffage est, de loin, le paramètre ayant l'impact moyen le plus élevé sur les EGES, avec une augmentation estimée à environ 7,6 kgCO₂éq/m².an. D'autres paramètres significatifs incluent notamment la typologie en logement collectif, la menuiserie en aluminium, la ventilation simple flux, ou

Résultats

encore la présence de climatisation, chacun contribuant à une augmentation moyenne comprise entre 2,5 et 3,2 kgCO₂éq/m².an.

À l'inverse, plusieurs caractéristiques comme l'usage du béton comme matériau principal, les matériaux biosourcés en façade, ou une toiture complexe n'ont pas montré d'effet significatif sur les EGES dans le modèle utilisé.

La Figure 25 reprend les effets estimés des modalités significatives sur les émissions de gaz à effet de serre totales (EGES), à partir du modèle de régression multiple. Cependant, seules les modalités ayant un effet statistiquement significatif (« p-value » inférieure à 0,05) ont été conservées.

Les modalités sont également regroupées par famille de variables (par exemple : système de chauffage, production d'ECS, etc), ce qui permet de mieux visualiser l'impact relatif de chaque choix de conception au sein de son groupe.

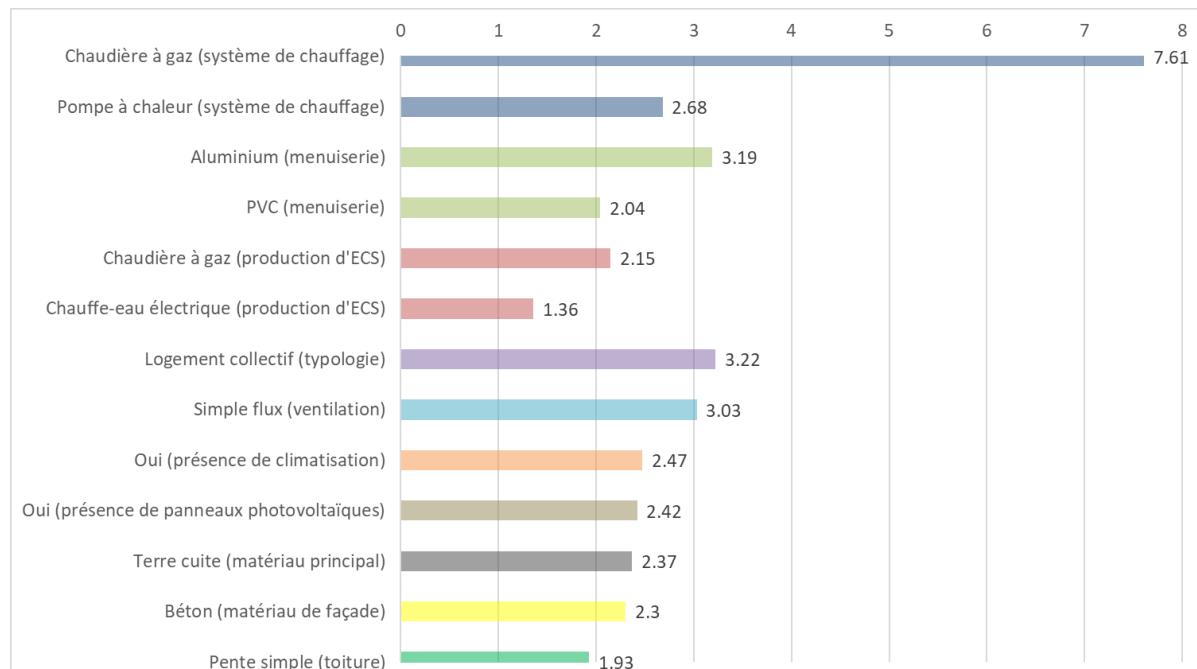


Figure 25 Effets significatifs des paramètres de conception (en KgCO₂éq/m².an) sur les émissions globales de GES (EGES) regroupés par modalité

Dans la famille des systèmes de chauffage et de production d'ECS, les différentes modalités apparaissent sur un spectre relativement étendu avec tout de même une émission plus accrue chez les systèmes de chauffage dû à l'impact de la chaudière à gaz pour ce type d'utilisation.

Pour les menuiseries, les effets associés à l'aluminium et au PVC apparaissent conjointement et ont un impact non-négligeable sur les EGES avec une moyenne d'émission aux environs de 2.6 kgCO₂éq/m².an. Cela permet de mettre en perspective les implications matérielles de ce choix constructif.

La catégorie liée à la morphologie et à l'usage du bâtiment regroupe notamment la typologie en logement collectif ainsi que la toiture en pente simple avec une émission nettement

Résultats

supérieure pour les bâtiments à usage collectif. Cela offre une base pour réfléchir à l'impact des configurations spatiales sur les émissions.

Du côté des systèmes techniques, la ventilation, la climatisation et la production photovoltaïque sont représentées côté à côté, mettant en évidence le rôle de l'équipement technique au-delà de l'enveloppe bâtie, avec des effets sur les émissions totales allant de 3.03 à 2.42 kgCO₂éq/m².an.

Enfin, dans la famille des matériaux de construction, le béton et la terre cuite sont positionnés côte à côte, facilitant ainsi la comparaison de leur contribution respective à l'EGES, en particulier lorsqu'ils sont utilisés comme matériau de façade. Comme indiqué dans le chapitre 3.4.4.7, la structure du modèle repose exclusivement sur des variables qualitatives, traitées sous forme de variables indicatrices (« dummy variables »). Dans ce cadre, une modalité de référence est automatiquement définie pour chaque variable, servant de point de comparaison pour l'interprétation des effets estimés.

Afin de faciliter l'interprétation des résultats, les modalités de référence ont été volontairement réajustées dans « RStudio ». Cette opération permet de sélectionner, pour chaque variable, la modalité associée aux émissions de GES les plus faibles. Le Tableau 11 reprend ces modalités.

Tableau 11 Modalités de référence utilisées pour le modèle d'EGES total

Variables de référence pour l'EGES total
Électrique (système de chauffage)
Non (présence de climatisation)
Autres (production d'ECS)
Terre cuite (matériau de façade)
Bois (menuiserie)
Non (présence de panneaux photovoltaïques)
Plate (toiture)
Maison individuelle (typologie)
Double flux (ventilation)
Bois (matériau principal)

On peut observer que la plupart de ces valeurs de référence correspondent à des choix attendus dans le cadre d'une stratégie bas carbone. Toutefois, l'absence de panneaux photovoltaïques mérite une attention particulière et fera l'objet d'une analyse plus approfondie dans la discussion.

4.2.2. Détection des paramètres influents sur les EGES PCE par régression multiple

L'indicateur EGES PCE, centré sur les émissions associées aux produits de construction et équipements, permet de cibler l'impact des choix constructifs indépendamment des usages en phase exploitation. Cette régression explore spécifiquement les matériaux et composants du bâtiment pour identifier ceux qui influencent le plus le bilan carbone en phase amont.

Pour cette analyse, la variable « nrj_princ » n'a pas été réintégrée dans le modèle final. Cette exclusion fait suite à la détection d'une redondance avec la variable de système de chauffage

Résultats

principal lors de l'analyse sur l'indicateur d' E_{GES} total, justifiée par une forte corrélation entre les deux variables. Afin de garantir la stabilité des coefficients estimés, « nrj_princ » a donc été écartée de l'ensemble des modèles construits sous « RStudio ».

Cependant le type de structure n'a pas été écarté de l'étude par l'AIC (voir 3.5.4.4). On le retrouve donc dans cette analyse ciblé sur les E_{GES} PCE.

La Figure 26 présente les effets estimés de différentes modalités sur les émissions de GES issues des produits de construction et équipements (EGES PCE), exprimés en $\text{kgCO}_2\text{éq}/\text{m}^2.\text{an}$. Les modalités sont triées par ordre décroissant d'impact. Les barres colorées indiquent les modalités associées à une variation significative des émissions, tandis que les modalités non significatives sont représentées de manière plus claire.

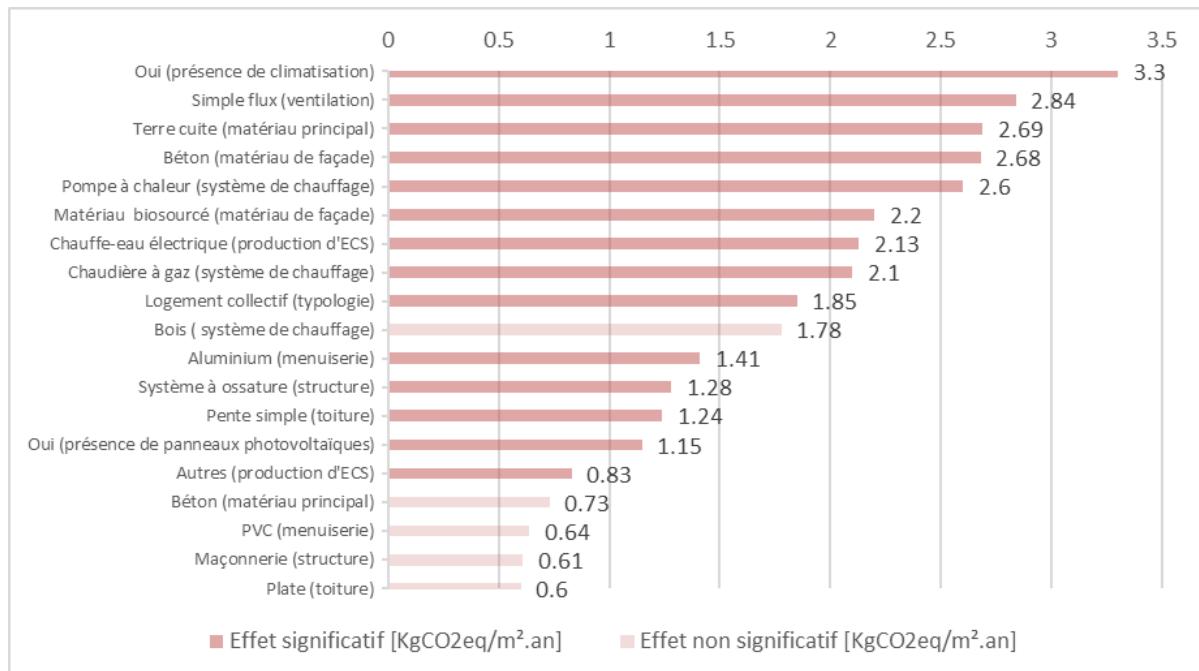


Figure 26 Effets estimés des paramètres de conception sur les EGES PCE

Parmi les modalités significatives, la présence de climatisation, l'utilisation de ventilation simple flux, l'utilisation de terre cuite comme matériaux principaux, de béton comme matériaux de façade ainsi que l'utilisation de pompe à chaleur comme système de chauffage présentent les effets les plus élevés sur les émissions de GES, avec des augmentations estimées supérieures à $2,5 \text{ kgCO}_2\text{éq}/\text{m}^2.\text{an}$. L'impact de matériaux comme les biosourcés, de l'utilisation de chauffe-eau électrique et de chaudière à gaz est également notable, avec des valeurs comprises entre 2,0 et 2,6 $\text{kgCO}_2\text{éq}/\text{m}^2.\text{an}$.

Les autres modalités, telles que la menuiserie en aluminium, la structure à ossature, la toiture en pente simple ou encore la présence de panneaux photovoltaïques, présentent des effets modérés mais significatifs, situés entre 1,0 et 1,5 $\text{kgCO}_2\text{éq}/\text{m}^2.\text{an}$. Enfin, certaines modalités

Résultats

comme la toiture plate, la maçonnerie, le PVC ou le béton en tant que matériau principal ne montrent pas d'effet statistiquement significatif à ce stade de l'analyse.

La Figure 27, quant à elle, présente les modalités regroupées par famille (matériau de façade, système de chauffage, production d'ECS, etc.) et représentées sous forme de barres colorées, chaque couleur correspondant à une modalité spécifique. Ces regroupements facilitent la comparaison intra-famille, tout en mettant en évidence les tendances générales par catégorie. Les effets considérés non significatifs par le logiciel « RStudio » ont été enlevés pour une meilleure lecture du graphique.

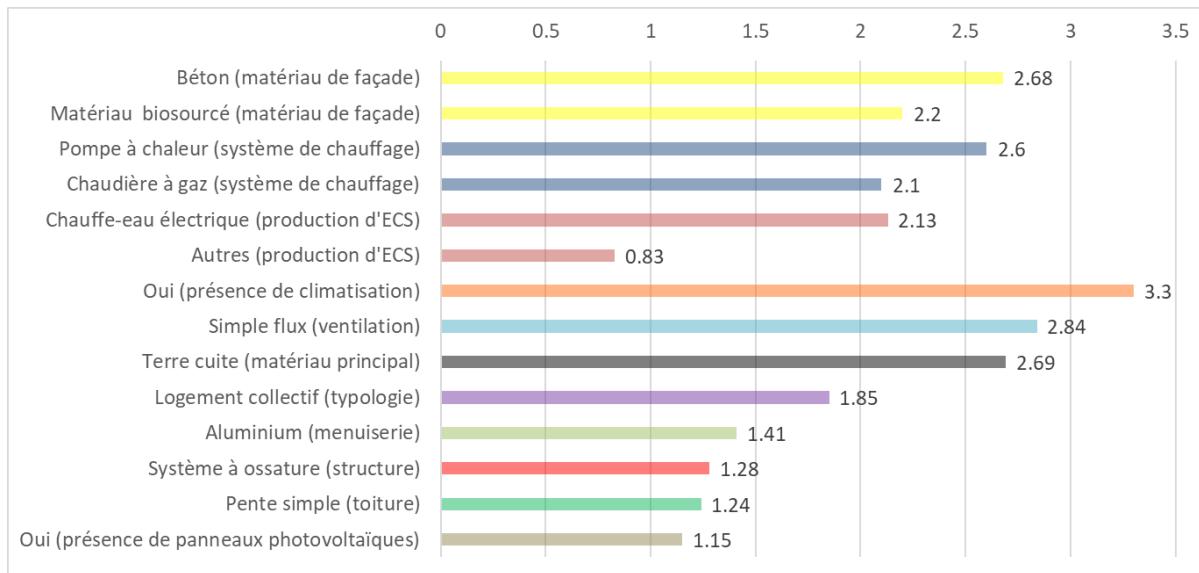


Figure 27 Effets significatifs des paramètres de conception (en KgCO₂éq/m².an) sur les émissions de GES liées aux Produits de Construction et Équipements (PCE) regroupés par modalité

Les valeurs estimées varient entre environ 0,8 et 3,3 kgCO₂éq/m².an.

Du côté des matériaux de façade, les effets estimés sont tous supérieurs à 2 kgCO₂éq/m².an : 2,68 pour le béton, 2,2 pour le matériau biosourcé et 2,69 pour la terre cuite utilisée comme matériau principal. La moyenne dans cette famille est donc proche de 2,52 kgCO₂éq/m².an, illustrant un impact significatif quel que soit le matériau choisi.

Pour les systèmes de chauffage et de production d'ECS, les valeurs varient de 0,83 à 2,6 kgCO₂éq/m².an. On observe notamment 2,6 pour la pompe à chaleur, 2,13 pour le chauffe-eau électrique, 2,1 pour la chaudière à gaz, et 0,83 pour la catégorie "autres" qui couvre principalement des systèmes peu émissifs comme nous pouvons le remarquer. Sans cette variable, la famille des systèmes de chauffage et de production d'ECS a une moyenne de 2.27 kgCO₂éq/m².an ce qui est juste en dessous des matériaux de construction.

Du côté des systèmes techniques, les modalités associées à la présence de climatisation (3,3 kgCO₂éq/m².an) et à la ventilation simple flux (2,84 kgCO₂éq/m².an) montrent un impact marqué. En considérant uniquement ces deux modalités, la moyenne d'impact dépasse 3,0 kgCO₂éq/m².an, ce qui en fait la famille la plus émissive du graphique.

Résultats

Les choix morphologiques et structurels (logement collectif, toiture en pente simple, structure à ossature) présentent des effets plus modérés, allant de 1,24 à 1,85, pour une moyenne avoisinant 1,46 kgCO₂éq/m².an.

Comme cela a été réalisé précédemment pour l'EGES total, les modalités de référence ont été volontairement réajustées dans « RStudio » afin de faciliter l'interprétation des résultats. Cette démarche consiste à définir, pour chaque variable, la modalité présentant les émissions de GES les plus faibles comme référence dans le modèle. Le Tableau 12 présente l'ensemble de ces modalités retenues.

Tableau 12 Modalités de référence utilisées pour le modèle d'EGES PCE

Variables de référence pour l'EGES PCE
Électrique (système de chauffage)
Non (présence de climatisation)
Chaudière gaz (production d'ECS)
Terre cuite (matériau de façade)
Bois (menuiserie)
Non (présence de panneaux photovoltaïques)
Pente complexe (toiture)
Maison individuelle (typologie)
Double flux (ventilation)
Bois (matériau principal)
Voiles porteurs (structure)

On retrouve des valeurs de référence qui apparaissent comme cohérentes avec une approche bas carbone, telles que l'utilisation du bois comme matériau principal ou de menuiserie, ainsi que le recours à une ventilation double flux ou à un système de chauffage électrique. En revanche, d'autres modalités apparaissent moins intuitives à première vue, comme la chaudière gaz pour la production d'ECS, la toiture en pente complexe, ou encore l'usage de voiles porteurs comme système structurel. Ces choix feront l'objet d'une analyse plus approfondie dans la suite du travail.

4.2.3. Détection des paramètres influents sur les EGES OPE par régression multiple

L'indicateur EGES OPE évalue les émissions liées aux consommations énergétiques du bâtiment en phase d'usage. L'objectif de cette régression est de repérer les paramètres influençant fortement la performance opérationnelle, notamment les systèmes énergétiques, les choix d'enveloppe, ou encore les dispositifs de ventilation.

Comme cité précédemment, et dans un souci de stabilité des coefficients estimés, la variable « nrj_princ » n'a pas été incluse dans les modèles réalisés sous « RStudio ».

L'AIC a écarté trois modalités du système de base pour l'étude des émissions OPE : les matériaux principaux, les systèmes d'émission de chauffage et le type de ventilation principal.

La Figure 28 présente les effets estimés des modalités significatives et non significatives sur les émissions opérationnelles de GES, exprimés en kgCO₂éq/m².an. Les modalités sont triées par ordre décroissant d'impact estimé.

Résultats

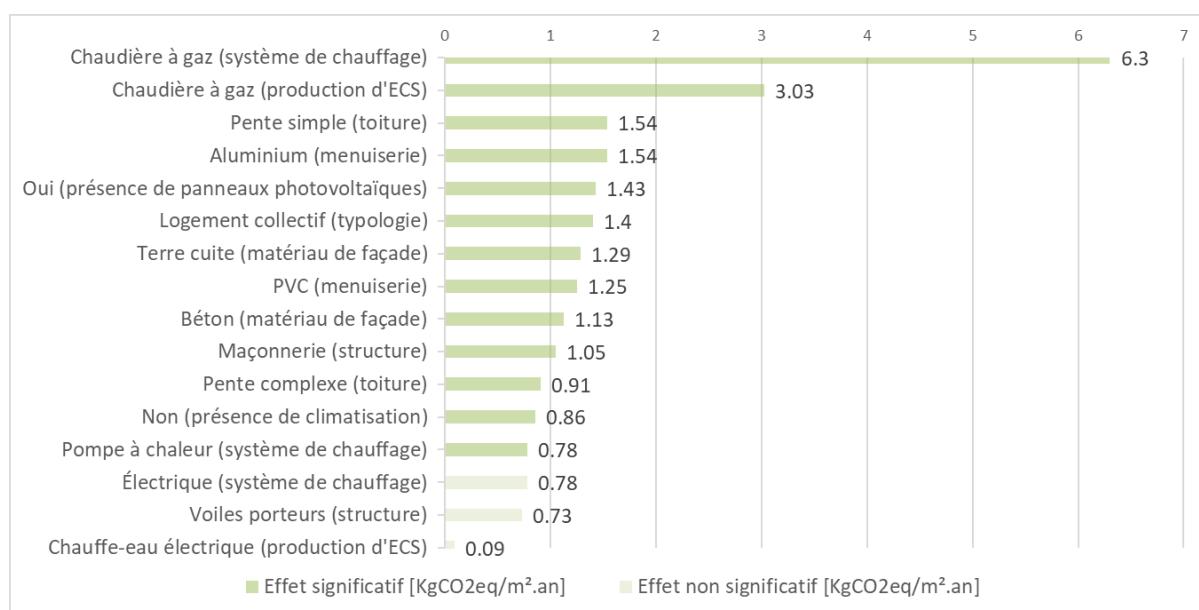


Figure 28 Effets estimés des paramètres de conception sur les EGES OPE

La chaudière à gaz comme système de chauffage se distingue comme la modalité la plus émissive, avec un effet estimé à 6,3 kgCO₂éq/m².an, suivie par la chaudière à gaz utilisée pour la production d'ECS (3,03 kgCO₂éq/m².an). Plusieurs autres modalités présentent également des effets positifs significatifs, parmi lesquelles la toiture en pente simple, la menuiserie en aluminium, la présence de panneaux photovoltaïques, ou encore la typologie en logement collectif, avec des valeurs comprises entre 1,4 et 1,54 kgCO₂éq/m².an.

D'autres paramètres techniques, tels que l'utilisation de terre cuite ou de béton en matériau de remplissage de façade, la structure maçonnerie, ou la menuiserie en PVC, présentent des effets plus modérés. Enfin, certaines modalités comme le chauffage électrique, les voiles porteurs ou le chauffe-eau électrique pour la production d'ECS sont associées à des effets estimés plus faibles, inférieurs à 1 kgCO₂éq/m².an, et ne sont pas statistiquement significatifs.

La Figure 29 ci-dessous présente les effets estimés des modalités de conception précédentes sur les émissions opérationnelles de GES (EGES OPE) avec les modalités non-significatives en moins, exprimés en kgCO₂éq/m².an. Ces dernières sont regroupées par familles (chauffage, menuiserie, toiture, façade, ECS, etc.) et classées par ordre décroissant d'impact.

Résultats

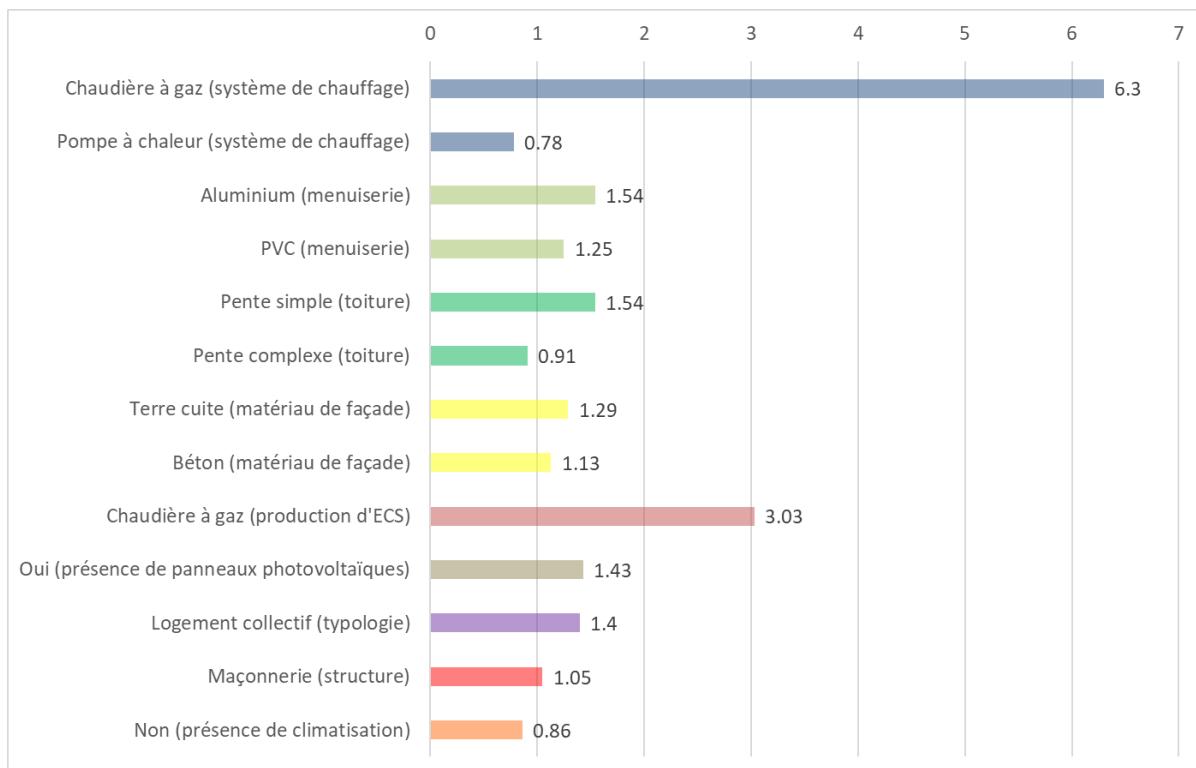


Figure 29 Effets significatifs des paramètres de conception (en KgCO₂éq/m².an) sur les émissions de GES liées aux consommations énergétiques du bâtiment en phase d'usage (OPE) regroupés par modalité

Dans la famille des systèmes de chauffage, on observe un contraste marqué : la chaudière à gaz présente un effet estimé très élevé (6,3 kgCO₂éq/m².an), tandis que la PAC affiche un effet beaucoup plus modéré (0,78 kgCO₂éq/m².an). La moyenne pour cette famille est donc de 3,54, mais masque une forte hétérogénéité entre modalités.

Concernant la menuiserie, les effets estimés sont de 1,54 pour l'aluminium et 1,25 pour le PVC, soit une moyenne de 1,40 kgCO₂éq/m².an. Ces valeurs sont modérées, mais relativement homogènes au sein de cette famille.

Pour la toiture, les effets s'élèvent à 1,54 pour la pente simple et 0,91 pour la pente complexe, ce qui donne une moyenne de 1,23 kgCO₂éq/m².an dans cette catégorie.

En ce qui concerne les matériaux de façade, les modalités de terre cuite (1,29) et de béton (1,13) affichent des effets assez proches, pour une moyenne de 1,21 kgCO₂éq/m².an.

Pour la production d'ECS, seule la chaudière à gaz est représentée ici, avec un effet estimé à 3,03 kgCO₂éq/m².an, ce qui souligne l'impact important que la consommation d'énergie fossile représente.

Parmi les autres caractéristiques techniques, la présence de panneaux photovoltaïques (1,43), la typologie en logement collectif (1,4), la structure en maçonnerie (1,05) et l'absence de climatisation (0,86) présentent des effets modérés, tous compris entre 0,8 et 1,5 kgCO₂éq/m².an. Moyennée, cette sous-catégorie affiche un impact moyen d'environ 1,19.

Une fois de plus, les modalités de référence ont été volontairement modifiées dans « RStudio ». Pour chaque variable qualitative, la modalité associée aux plus faibles émissions

Résultats

de GES a été définie comme référence dans le modèle. Le Tableau 13 présente l'ensemble de ces modalités retenues.

Tableau 13 Modalités de référence utilisées pour le modèle d'EGES OPE

Variables de référence pour l'EGES OPE
Bois (système de chauffage)
Oui (présence de climatisation)
Autres (production d'ECS)
Matériaux biosourcés (matériau de façade)
Bois (menuiserie)
Non (présence de panneaux photovoltaïques)
Plate (toiture)
Maison individuelle (typologie)
Système à ossature (structure)

Plusieurs de ces modalités apparaissent comme cohérentes avec les attentes, notamment le recours au bois comme système de chauffage et matériau de menuiserie, ainsi que la présence d'une toiture plate, souvent associée à une meilleure compacité et donc à des pertes thermiques moindres.

Deux modalités de référence pour l'EGES OPE apparaissent contre-intuitives : la présence de climatisation et l'absence de panneaux photovoltaïques. Ces résultats ne reflètent pas nécessairement une causalité directe, mais peuvent être influencés par des effets d'interaction avec d'autres paramètres du bâtiment, ou par les conventions de modélisation propres à la base de données E+C-. Ce point est discuté plus en détail dans la section de discussion.

4.2.4. Regroupement des trois indicateurs environnementaux

Afin de comparer les paramètres déterminants entre les trois indicateurs, une synthèse croisée des résultats est proposée. Cette dernière permet d'identifier les variables qui présentent une influence récurrente sur l'ensemble des postes d'émissions, et d'interpréter les écarts éventuels entre les logiques de performance en phase construction et en phase exploitation.

Le Tableau 14 présente une synthèse des effets estimés de chaque modalité sur les trois indicateurs environnementaux (EGES, EGES PCE, EGES OPE), répartis par grandes familles de choix de conception. Les modalités utilisées comme référence dans les modèles de régression sont indiquées par la mention « Ref ».

Afin de faciliter la lecture comparative, une échelle de couleur a été appliquée : plus la valeur est élevée (impact environnemental important), plus la cellule est colorée en rouge, tandis que les valeurs les plus faibles (faible impact) apparaissent en vert.

Les cellules non disponibles ou non significatives dans le modèle sont laissées en « #N/A ».

Résultats

Tableau 14 Effets estimés des choix de conception sur les indicateurs d'EGES

Familles de variabilité	Variables	Effet estimé sur l'EGES [kgCO2eq/m ² .an]	Effet estimé sur l'EGES PCE (kgCO2éq/m ² .an)	Effet estimé sur l'EGES OPE (kgCO2éq/m ² .an)
Système de chauffage	Bois		#N/A	Ref
	Électrique		Ref	#N/A
	Chaudière à gaz	7.61	2.1	6.3
	Pompe à chaleur	2.68	2.6	0.78
Typologie	Maison individuelle		Ref	
	Logement collectif	3.22	1.85	1.4
Menuiserie	Aluminium	3.19	1.41	1.54
	Bois		Ref	
	PVC	2.04	#N/A	1.25
Ventilation	Double flux		Ref	#N/A
	Simple flux	3.03	2.84	#N/A
Présence de climatisation	Oui	2.47	3.3	Ref
	Non		Ref	0.86
Présence de panneaux photovoltaïques	Non		Ref	
	Oui	2.42	1.15	1.43
Matériau principal	Bois		Ref	#N/A
	Béton		#N/A	
	Terre cuite	2.37	2.69	#N/A
Matériau de façade	Béton	2.3	2.68	1.13
	Matériau biosourcé	#N/A	2.2	Ref
	Terre cuite		Ref	1.29
Production d'ECS	Chaudière à gaz	2.15	Ref	3.03
	Chauffe-eau électrique	1.36	2.13	#N/A
	Autres	Ref	0.83	Ref
Toiture	Plate	Ref	#N/A	Ref
	Pente simple	1.93	1.24	1.54
	Pente complexe	#N/A	Ref	0.91
Structure	Système à ossature	#N/A	1.28	Ref
	Voiles porteurs	#N/A	Ref	#N/A
	Maçonnerie	#N/A	#N/A	1.05

Dans la famille des systèmes de chauffage, la PAC affiche des effets nettement inférieurs à la chaudière à gaz pour l'EGES et l'EGES OPE : 2,68 contre 7,61 kgCO₂éq/m².an pour l'EGES, 0,78 contre 6,3 pour l'EGES OPE et 0,93. Pour l'EGES PCE, la tendance est inversée même si la PAC n'est pas tant au-dessus de la chaudière à gaz. L'effet associé à la PAC sur les émissions opérationnelles est particulièrement faible, ce qui est en cohérence avec son fonctionnement à haut rendement. Au global, la famille des systèmes de chauffage représente celle qui émet le plus de GES de toute l'étude.

La typologie en logement collectif présente un effet estimé supérieur à celui de la maison individuelle sur l'ensemble des indicateurs, avec notamment 3,22 pour l'EGES total et 1,85 pour l'EGES PCE.

Pour les menuiseries, l'aluminium affiche un effet supérieur au PVC, avec respectivement 3,19 et 2,04 pour l'EGES total, et 1,41 et 1,25 pour l'EGES OPE.

Résultats

Concernant la ventilation, aucune des deux modalités testées (VMC simple ou double flux) n'est significative pour l'EGES OPE, un résultat notable au vu de l'importance attendue de cette variable sur les consommations d'énergie. De manière similaire, l'absence de climatisation présente un effet estimé à 0,86 kgCO₂éq/m².an pour l'EGES OPE, légèrement supérieur à celui de la présence de climatisation, ce qui peut surprendre.

La variable liée aux panneaux photovoltaïques présente aussi une tendance contre-intuitive : la présence de panneaux est associée à un effet supérieur à l'absence pour les trois indicateurs, en particulier pour l'EGES (+2,42 kgCO₂éq/m².an par rapport à la référence).

Dans les familles liées aux matériaux de construction, le bois est utilisé comme modalité de référence, ce qui s'aligne avec les tendances observées dans la littérature. Toutefois, la terre cuite présente des effets non négligeables (2,37 pour l'EGES et 2,69 kgCO₂éq/m².an pour l'EGES PCE), ce qui peut surprendre compte tenu de sa réputation perçue comme matériau traditionnel et de sa comparaison avec le béton jugé non-significatif par le logiciel « RStudio ». De plus, la façade en béton, présente quant à elle des effets plus élevés, confirmant les tendances habituelles. L'unique présence des matériaux biosourcés se résume à une émission conséquente concernant les émissions PCE, mais qui reste inférieure au béton pour ce même indicateur environnemental.

Pour la production d'ECS, la modalité « autres » affiche des effets très faibles sur les trois types d'émission, cependant, à l'instar du système de chauffage, la tendance s'inverse pour l'EGES PCE, la chaudière gaz est utilisée comme référence pour ce dernier indicateur.

La forme de la toiture influence également les émissions : la toiture à pente simple génère des effets plus élevés que celle à pente complexe pour l'EGES PCE et l'EGES OPE, . La toiture plate, utilisée comme référence dans deux cas, présente les effets les plus faibles.

Enfin, les effets associés aux modalités structurelles restent dans une fourchette assez resserrée et peu d'entre elles sont significatives. Cela suggère une influence relativement modérée de cette famille de variables sur les émissions totales.

Discussion

5. Discussion

L'analyse des résultats obtenus permet de dégager plusieurs tendances marquantes et de formuler des recommandations concrètes pour la conception de bâtiments résidentiels bas carbone. Ce chapitre articule une lecture critique des résultats issus du benchmark et des régressions multiples, en les confrontant aux attendus théoriques et aux références scientifiques, tout en identifiant les choix de conception les plus structurants.

5.1. Sobriété énergétique et hiérarchisation des équipements pour le choix des systèmes techniques

Parmi tous les postes techniques analysés, le système de chauffage au gaz ressort comme le facteur le plus influent sur les émissions, en particulier sur l'E_{GES} total et l'E_{GES OPE}. Ce résultat, conformément aux données de la littérature (voir section 2.2.2), s'explique par la combustion directe d'une énergie fossile à fort contenu carbone. L'impact climatique très élevé du gaz plaide clairement pour son exclusion progressive des projets neufs.

Les PAC apparaissent comme une alternative plus vertueuse, avec un impact très modéré sur les émissions d'usage, grâce à leur haut rendement. Leur effet plus marqué sur l'E_{GES PCE} peut s'expliquer par l'énergie grise nécessaire à leur fabrication, incluant des composants électroniques, des fluides frigorigènes et une chaîne de production plus complexe. Ce constat rejoint les observations d'Hollberg et al. (2021), qui soulignent que les équipements techniques les plus performants d'un point de vue énergétique peuvent paradoxalement présenter un impact non négligeable en phase de production. Leur généralisation constitue un levier de décarbonation essentiel, à condition qu'elles soient correctement dimensionnées et alimentées par une électricité peu carbonée.

La ventilation double flux, bien que sous-représentée dans la base, montre des effets favorables sur l'E_{GES} et l'E_{GES PCE}. Son absence d'effet sur l'E_{GES OPE}, pourtant théoriquement sensible aux pertes thermiques, peut s'expliquer par le déséquilibre de répartition dans l'échantillon (17 double flux contre 424 simple flux), limitant la portée statistique. L'intégration systématique de systèmes de ventilation performants demeure une orientation à privilégier.

La climatisation, quant à elle, présente un effet paradoxalement neutre, voire réducteur sur l'E_{GES OPE}, possiblement en raison d'effets de confusion : les logements climatisés pourraient être mieux isolés ou plus récents. Ce constat invite à ne pas surinterpréter cet effet et à continuer à limiter son usage par défaut, au profit de solutions passives de confort d'été (inertie thermique, protection solaire, ventilation nocturne).

Enfin, les panneaux photovoltaïques affichent une augmentation des émissions sur les trois indicateurs, liée au poids carbone de leur fabrication (modules A1-A3 de l'ACV) et à la sous-valorisation de l'autoconsommation dans les conventions ACV. Ces résultats ne remettent pas en cause leur intérêt environnemental, mais soulignent la nécessité de mieux modéliser les co-bénéfices de l'énergie solaire (stockage, autoconsommation, effacement de consommation réseau).

Discussion

5.2. Compacité de la morphologie, typologie et structure

La typologie des bâtiments conditionne fortement leur performance environnementale. Les logements collectifs, bien que légèrement plus émissifs en valeur absolue, se rapprochent davantage des seuils de la RE2020. Leur meilleure efficacité relative s'explique par la compacité architecturale, la mutualisation des parois, et un ratio surface utile/surface déperditive plus favorable. Cette tendance rejoue les travaux de Gervasio & Dimova (2018).

Certains cas atypiques viennent toutefois nuancer cette tendance. Les bâtiments collectifs de plain-pied (R+0) affichent des EGES OPE très élevés, probablement du fait d'une faible densité d'occupation ou d'une organisation pavillonnaire inefficace. De même, les maisons individuelles en R+3 présentent des valeurs anormalement hautes, potentiellement liées à des configurations atypiques ou à une classification discutable dans la base. Ces cas rappellent l'intérêt de vérifier la cohérence entre les données statistiques et la réalité constructive.

La forme de la toiture s'avère également discriminante : les toitures terrasses sont associées à des émissions moindres que les toitures inclinées, sans doute en raison d'une géométrie plus compacte et d'un meilleur ratio de surface utile. Dans une logique de conception bas carbone, il est donc recommandé de favoriser des morphologies compactes, de limiter les volumes développés, et d'éviter les configurations extrêmes ou mal rationalisées.

Concernant les structures porteuses, aucun effet significatif n'est observé dans les modèles. Cette absence de signal statistique est surprenante au vu de l'impact environnemental généralement reconnu de la structure (voir section 2.4.1). Elle s'explique sans doute par une faible variabilité dans l'échantillon (dominance du béton) et par des impacts similaires entre les variantes présentes. Ce constat souligne la nécessité d'une meilleure diversité des données, mais ne remet pas en cause le rôle central de la structure dans les émissions totales d'un bâtiment.

5.3. Matériaux et composants de l'enveloppe

Les matériaux de construction jouent un rôle clé dans les émissions. Les effets observés varient selon la fonction occupée dans le projet (matériau principal ou de façade). Ainsi, la terre cuite, utilisée comme matériau principal, est associée à une hausse significative des émissions, tandis que dans le cas des façades, c'est le béton qui ressort comme le plus émissif. Cette inversion d'effet illustre l'importance du contexte d'emploi, des quantités mises en œuvre et des unités fonctionnelles retenues dans les ACV.

Les menuiseries extérieures présentent également des variations notables. Le PVC et l'aluminium sont significativement plus émissifs que le bois, en raison de leur contenu en énergie grise et de leurs chaînes de production. Ce constat confirme que le choix du matériau de châssis, souvent perçu comme dérisoire, constitue un levier tangible pour améliorer le bilan carbone d'un projet.

Dans l'ensemble, ces résultats soulignent la nécessité de considérer les matériaux non pas seulement selon leur image ou leur origine (biosourcés, minéraux), mais selon leur cycle de vie complet et leur rôle dans l'équilibre thermique et structurel du projet. Une meilleure

Discussion

structuration des bases ACV, avec une description plus fine des variantes et une meilleure représentation des matériaux bas carbone, renforcerait significativement la robustesse des modélisations environnementales.

Conclusion

6. Conclusion

Ce travail a pour objectif d'analyser les déterminants des émissions de GES (EGES) dans le secteur du logement résidentiel neuf, à partir d'une exploitation statistique approfondie de la base de données de l'expérimentation E+C-. En combinant une approche de benchmark typologique et des régressions multiples sur trois indicateurs environnementaux (EGES total, EGES PCE, EGES OPE), l'étude visait à identifier les choix constructifs les plus impactants en termes d'empreinte carbone, tout en les replaçant dans une lecture critique éclairée par la littérature scientifique.

Les résultats obtenus ont permis de dégager plusieurs enseignements majeurs. D'abord, le système de chauffage au gaz se confirme comme l'un des postes les plus émissifs, tant sur le cycle de vie que sur les usages, ce qui corrobore les données théoriques et plaide pour son abandon dans les projets neufs. Ensuite, la morphologie des bâtiments, notamment la compacité et la forme de la toiture, exerce une influence significative sur les émissions, rendant la typologie un levier de conception crucial. En parallèle, certains choix de matériaux comme la terre cuite en structure ou le béton en façade apparaissent plus émissifs, alors que le bois ou les solutions biosourcées restent globalement plus sobres. Enfin, des effets inattendus ont été observés, notamment sur la climatisation et les panneaux photovoltaïques, soulignant les limites des données disponibles et la complexité des interactions entre variables.

Cette étude présente toutefois certaines limites. La qualité du renseignement dans la base E+C- reste hétérogène, certaines variables clefs comportant des valeurs manquantes ou des catégories peu représentées. Cela limite la robustesse de certaines conclusions statistiques, notamment pour les matériaux biosourcés, les systèmes techniques minoritaires ou les matériaux locaux. L'absence de données détaillées sur la géométrie précise des logements ou sur les quantités exactes de matériaux empêche également de valider certaines corrélations, là où d'autres travaux comme Wolf et al. (2020) s'appuient sur des bases quantitatives beaucoup plus fines. De plus, la distinction entre maisons individuelles et maisons accolées n'est pas toujours explicite dans la base, ce qui nuit à la précision typologique. Enfin, les ACV actuelles ne prennent que partiellement en compte la disponibilité locale des matériaux ou leur potentiel de réemploi, ce qui limite la portée territoriale des résultats.

Dans la continuité de ce travail, plusieurs pistes mériteraient d'être explorées. Une première perspective consisterait à enrichir la base de données avec des variables qualitatives ou comportementales (pratiques d'usage, autoconsommation, choix architecturaux non standardisés). Une deuxième piste réside dans l'intégration de visualisations plus interactives ou immersives, permettant de mieux comprendre les arbitrages de conception dans une logique multicritère. Il serait également pertinent d'intégrer une analyse plus fine des quantités de matériaux mis en œuvre pour relier directement l'empreinte carbone à la masse structurelle, comme le propose Wolf et al. (2020). La prise en compte de la géométrie des bâtiments, des stratégies de déconstruction-reconstruction (JRC, 2023), ou encore des matériaux issus de l'économie circulaire et de la bioéconomie (Zhang et al., 2021 ; Wang et al., 2024) permettrait également de construire une approche plus holistique. Enfin, l'analyse

Conclusion

de la réglementation RE2020 en dynamique, avec l'actualisation des seuils et la montée en exigence attendue d'ici 2031, constituerait un prolongement stratégique pour anticiper les futurs standards de la construction bas carbone.

Bibliographie

Bibliographie

Ministère de la Transition Écologique. (2010). *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments neufs*. Legifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000023061113>

République Française. (2010, 26 octobre). *Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*. Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000023024548>

Cegibat. (2020, 19 mai). *Bilan de l'expérimentation E+C-*. GRDF. <https://cegibat.grdf.fr/reglementation/energetique/bilan-experimentation-e-c>

Cerema. (2018). *E+C- : Fondamentaux – Fiche de présentation de l'expérimentation Énergie positive & Réduction carbone* (Version 6, Fiche technique). Ministère de la Transition écologique et solidaire. <https://www.batiment-energiecarbone.fr>

Ministère de la Transition écologique et solidaire, Ministère de la Cohésion des territoires. (2017, juillet). *Référentiel « Énergie – Carbone » pour les bâtiments neufs : Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs*. <https://www.ecologie.gouv.fr>

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, Ministère du Logement et de l'Habitat Durable. (2016, octobre). *Référentiel « Énergie – Carbone » pour les bâtiments neufs : Niveaux de performance « Énergie – Carbone » pour les bâtiments neufs*. <https://www.ecologie.gouv.fr>

Institut Français pour la Performance du Bâtiment (IFPEB), Carbone 4, CSTB. (2022, mai). *Quels enseignements de la conversion de l'Observatoire E+C- avec les indicateurs de la RE2020 ?* [Document non publié]. Hub des prescripteurs bas carbone.

Ministère de la Transition écologique. (s.d.). *Réglementation environnementale RE2020*. <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/reglementation-environnementale-re2020>

Ministère de la Transition écologique, Cerema. (2024, janvier). *Guide RE 2020 : Réglementation environnementale des bâtiments neufs*. Rédigé par N. Cabassud, avec la contribution de Q. Deslot, G. Colin, A. Thiebaut, S. Pradelle, L. Orta, V. Lapeyre & M. Gratiot. <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020>

Groupe d'experts transversaux GE11. (2019). *Surfaces de référence : Rapport du groupe d'expertise – Préparation de la RE2020* (Version 1, 30 janvier 2019). Ministère de la Transition écologique et solidaire.

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

Bibliographie

Ciambrone, D. F. (1997). *Environmental life cycle analysis* (1st ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9780203757031>

Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>

International Organization for Standardization. (2006). *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework* (ISO 14040:2006). CEN (European Committee for Standardisation). Brussels.

Singh, A., Berghorn, G., Joshi, S., & Syal, M. (2011). Review of life-cycle assessment applications in building construction. *Journal of Architectural Engineering*, 17(1), 15–23. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000026](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000026)

Southwest Environmental. (2016). *Life cycle assessment image*. Récupéré de http://www.southwest-environmental.co.uk/further%20info/life_cycle_assessment/life_cycle_assessment_consultants.html

Roberts, M., Allen, S., & Coley, D. (2020). *Life cycle assessment in the building design process – A systematic literature review*. *Building and Environment*, 185, 107274. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107274>

ISO. (2011). *BS EN 15978:2011 – Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method*. International Organization for Standardization.

RICS. (2017). *Whole life carbon assessment for the built environment*. Royal Institution of Chartered Surveyors.
https://www.rics.org/Global/Whole_life_carbon_assessment_for_the_BE_PG_guidance_2017.pdf

Simonen, K., Rodriguez, B. X., & De Wolf, C. (2017). Benchmarking the embodied carbon of buildings. *Technology / Architecture + Design*, 1(2), 208–218. <https://doi.org/10.1080/24751448.2017.1354626>

Röck, M., Ruschi Mendes Saade, M., Balouktsi, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258, 114107. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>

Sartori, I., & Hestnes, A. G. (2007). Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, 39(3), 249–257. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.07.001>

IPCC. (2023). *Summary for Policymakers*. In *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)].

Bibliographie

IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1–34. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>

Observatoire Climat-Énergie. (s.d.). *Émissions de gaz à effet de serre des bâtiments en France*. Données issues du CITEPA. <https://www.observatoire-climat-energie.fr/>

CITEPA. (2024, mars 5). *Émissions de gaz à effet de serre en France : nouvelle estimation pour l'année 2023 avec les données SECTEN du CITEPA*. <https://www.citepa.org/emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-en-france-nouvelle-estimation-lannee-2023-avec-les-donnees-secten-du-citepa/>

Jardi, X., Meurisse, B., & Peroumal, C. (2017). *L'analyse de cycle de vie : enjeux autour de sa monétarisation*. Actes du séminaire du 24 mai 2017. Ministère de la Transition écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/publications/Th%C3%A9ma%20-%20L%27analyse%20du%20cycle%20de%20vie%20-%20Enjeux%20autour%20de%20la%20mon%C3%A9tarisation.pdf>

Gervasio, H., & Dimova, S. (2018). *Environmental benchmarks for buildings* (EUR 29145 EN). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/073513>

Hernandez, P., & Bosdevigie, B. (2012). *Benchmarking criteria for sustainable buildings in Europe* (Deliverable 5.2, SuPerBuildings Project, 7th Framework Programme). European Commission.

International Organization for Standardization. (2020). *ISO 21678:2020 – Sustainability in buildings and civil engineering works – Indicators and benchmarks – Principles, requirements and guidelines*. ISO.

Li, G., Jin, H., & Wang, H. (2015). Enhancing performance of buildings in seismic zone with structural metal dampers. In *Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015)* (pp. 69–78). Brisbane, Australia.

Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire. (2011). *Zonage sismique de la France* [Carte]. IRSN. <https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/zonage-sismique-france>

CEN. (2005). *EN 1998-1:2005 – Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardization.

Ganassali, S., Lavagna, M., & Campioli, A. (2016). *LCA benchmarks in building's environmental certification systems*. Communication présentée à la conférence, Albufeira, Portugal.

VITO, KU Leuven, & TU Graz. (2018). *PEF4Buildings – Study on the application of the PEF Method and related guidance documents to a newly office building – Deliverable D4: Proposal for approach for benchmark and classes of performance for new office buildings*.

VTT. (2012). *Sustainability and performance assessment and benchmarking of buildings – Final report*. VTT Technology, Espoo.

Bibliographie

Chandrakumar, C., McLaren, S. J., Dowdell, D., & Jaques, R. (2019). A top-down approach for setting climate targets for buildings: The case of a New Zealand detached house. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323, 012183. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/323/1/012183>

Santos, P., Simoes da Silva, L., & Ungureanu, V. (2012). *Energy efficiency of light-weight steel-framed buildings* (1st ed., ECCS Publication No. 129). Technical Committee 14 – Sustainability & Eco-efficiency of Steel Construction, European Convention for Constructional Steelwork (ECCS).

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>

République Française. (2012). *Annexe 1 de l'arrêté du 28 décembre 2012 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux.* Journal Officiel de la République Française. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>

Martin, J.-C. (2013). *Carte de France des profils de température 0–200 m selon les zones climatiques.* Rapport final BRGM/RP-62281-FR, 17 p., 11 fig., 3 tabl. Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).

Ministère de la Transition Écologique. (2021). *RE2020 – Zones climatiques France* [Carte]. <https://assets.ctfassets.net/bek34nf1i7ji/3SK7kFMVaYJV0y0inTkyz7/7b758f5d99168e0332ba35de638eb095/RE2020-Zones-Climatiques-France.pdf>

Hollberg, A., Kiss, B., Röck, M., Soust-Verdaguer, B., Houlihan Wiberg, A., Lasvaux, S., Galimshina, A., & Habert, G. (2021). Review of visualising LCA results in the design process of buildings. *Building and Environment*, 190, 107530. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>

Zanghelini, G. M., Cherubini, E., & Soares, S. R. (2018). How multi-criteria decision analysis (MCDA) is aiding life cycle assessment (LCA) in results interpretation. *Journal of Cleaner Production*, 172, 609–622. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.230>

Frankl, P., & Rubik, F. (2018). Life Cycle Assessment (LCA) in business: An overview on drivers, applications, issues and future perspectives. *Global NEST Journal*, 20(1), 31–45. <https://doi.org/10.30955/gnj.000151>

Baldassarri, C., Mathieux, F., Ardente, F., Wehmann, C., & Deese, K. (2016). Integration of environmental aspects into R&D inter-organizational projects management: Application of a life cycle-based method to the development of innovative windows. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4050–4060. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.044>

Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., & Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 60, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>

Bibliographie

Wittstock, B., Albrecht, S., Makishi Colodel, C., Lindner, J. P., Hauser, G., & Sedlbauer, K. (2009). *Buildings from a life cycle perspective – Life cycle assessment in the construction domain (Gebäude aus Lebenszyklusperspektive – Ökobilanzen im Bauwesen)*. *Bauphysik*, 31(4), 178–187.

Kiss, B., & Szalay, Z. (2020). Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings. *Automation in Construction*, 111, 103044. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103044>

Guo, M., & Murphy, R. J. (2012). LCA data quality: Sensitivity and uncertainty analysis. *Science of the Total Environment*, 435–436, 230–243. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.006>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S. I., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., ... Foley, J. (2009). Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and Society*, 14(2), Article 32. <https://doi.org/10.5751/ES-03180-140232>

Observatoire E+C-. (n.d.). *Expérimentation en chiffres*. Ministère de la Transition écologique. <https://observatoire.batiment-energiecarbone.fr/statistiques/experimentation-en-chiffres/>

République Française. (2010). *Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction par seisme applicable aux bâtiments de la classe dite "à risque normal"*. Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022941755>

République Française. (2010). *Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français*. Légifrance. <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000022941772>

Cao, C. (2017). *Sustainability and life assessment of high strength natural fibre composites in construction*. In A. K. Bledzki & V. E. Sperber (Eds.), *Advanced high strength natural fibre composites in construction* (pp. 529–544). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100411-1.00021-2>

Braimoh, A. K., & Vlek, P. L. G. (2007). Impact of land use on soil resources. In A. K. Braimoh & P. L. G. Vlek (Eds.), *Land use and soil resources* (pp. 1–9). Springer Science & Business Media B.V. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6778-5_1

Cruz, N., & Rodrigues, S. M. (2021). Soil contamination and remediation. In W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia, & T. Wall (Eds.), *Life on Land. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals* (pp. 916–928). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_68-1

Kreuk, J. F., & Annokkée, G. J. (1988). Applied biotechnology for decontamination of polluted soils: Possibilities and problems. In K. Wolf, W. J. Van Den Brink, & F. J. Colon (Eds.), *Contaminated Soil'88* (pp. 679–686). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-009-2807-7_111

Bibliographie

Santos, L. F. C., Fernandes, J. M., & Cruz, A. (2025). *Soil Remediation: Current Approaches and Emerging Bio-Based Technologies*. *Soil Systems*, 9(2), 35. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020035>

Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., & Nyman, M. J. E. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input–output analysis. *Energy*, 32(9), 1593–1602. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.10.005>

Wang, G., Luo, T., Luo, H., Liu, R., Liu, Y., & Liu, Z. (2024). A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches. *City and Built Environment*, 2(12). <https://doi.org/10.1007/s44213-024-00036-1>

Andreau, N., Spilemont, J., Litvine, D., & Enertech. (2021). *Pratiques et consommation d'eau chaude sanitaire : Enseignements d'une expérimentation sociotechnique dans le secteur domestique (Rapport final du projet ECSPect)*. ADEME. https://www.enertech.fr/wp-content/uploads/2022/05/ECSPect_Rapport_final.pdf

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). (2013). *Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance : Rapport intermédiaire, DEE/EICV - 14.027* (235 pages + 2 annexes). HQE-GBC. https://www.hqe-gbc.org/wp-content/uploads/2013/10/2013-10_HQEPerf_RapportPrincipal_VF.pdf

Kaethner, S., & Burridge, J. (2012). Embodied CO₂ of structural frames. *The Structural Engineer*, 90(5), 33–40. [https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-90-\(2012\)/issue-5/embodied-co2-of-structural-frames/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-90-(2012)/issue-5/embodied-co2-of-structural-frames/)

Asif, M., Muneer, T., & Kelley, R. (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, 42(3), 1391–1394. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.11.023>

Gustavsson, L., & Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, 41(7), 940–951. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.008>

Peuportier, B. L. P. (2001). Life cycle assessment applied to the comparative evaluation of single family houses in the French context. *Energy and Buildings*, 33(5), 443–450. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00101-8)

Borg, M. (2001). *Environmental assessment of materials, components and buildings: Building specific considerations, open loop recycling, variations in assessment results and the usage phase of buildings* (Doctoral thesis). Royal Institute of Technology (KTH), Sweden. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:9012/FULLTEXT01.pdf>

Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., Dai, X., Maskell, K., & Johnson, C. A. (Eds.). (2001). *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGI_TAR_full_report.pdf

Bibliographie

- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., & Scarpellini, S. (2009). Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment*, 44(12), 2510–2520. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>
- Adalberth, K. (1997). Energy use during the life cycle of buildings: A method. *Building and Environment*, 32(4), 317–320. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(96\)00068-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(96)00068-6)
- World Steel Association. (2014). *Steel's contribution to a low carbon future*.
- Jeong, Y.-S., Lee, S.-E., & Huh, J.-H. (2012). Estimation of CO₂ emission of apartment buildings due to major construction materials in the Republic of Korea. *Energy and Buildings*, 49, 437–442. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.041>
- Huang, B., Chen, Y., McDowall, W., Türkeli, S., Bleischwitz, R., & Geng, Y. (2019). Embodied GHG emissions of building materials in Shanghai. *Journal of Cleaner Production*, 210, 777–785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.030>
- Syngros, G., Balaras, C. A., & Koubogiannis, D. G. (2017). Embodied CO₂ emissions in building construction materials of Hellenic dwellings. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 500–508. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>
- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., & Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 60, 81–92. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>
- Norouzi, M., Colclough, S., Jiménez, L., Gavaldà, J., & Boer, D. (2022). Low-energy buildings in combination with grid decarbonization: Life cycle assessment of passive house buildings in Northern Ireland. *Energy and Buildings*, 261, Article 111936. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111936>
- INIES. (n.d.). *L'ACV bâtiment*. Consulté le 5 juin 2025, à l'adresse <https://www.inies.fr/inies-pour-le-batiment/lacv-batiment/>
- Gursel, A. P., Shehabi, A., & Horvath, A. (2023). *Embodied energy and greenhouse gas emission trends from major construction materials of U.S. office buildings constructed after the mid-1940s*. *Building and Environment*, 234, 110196. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110196>
- Klenkenberg, S. [@ULiège]. (2021, March 18). *Régression linéaire multiple avec R* [Vidéo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Thwal0xr27E&list=PLv_QDVd5DjfB6BWUHLOc_vkqlcs4OCK8u&index=6
- Sevindik, S., Spataru, C., Domenech Aparisi, T., & Bleischwitz, R. (2021). *A Comparative Environmental Assessment of Heat Pumps and Gas Boilers towards a Circular Economy in the UK*. *Energies*, 14(11), 3027. <https://doi.org/10.3390/en14113027>
- Suszanowicz, D. (2018). *Optimisation of heat loss through ventilation for residential buildings*. *Atmosphere*, 9(3), 95. <https://doi.org/10.3390/atmos9030095>