

Projet de Recherche et d'Innovation

ÉMISSIONS DE CO₂ LIEES A LA CONSTRUCTION



ÉMISSIONS DE CO₂ LIEES A LA CONSTRUCTION : BOIS ET BETON

COMPARAISON DES EMISSIONS DE CO₂EQ ENTRE LA CONSTRUCTION EN BOIS ET EN BETON, INCLUANT LES PERTES DE SEQUESTRATION FORESTIERE

Mindjid Maizia

Année Scolaire 2024-2025

Auteure :

Camille Jean

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur de cette recherche a signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche, **M. Maizia**, pour son précieux accompagnement et ses conseils éclairés tout au long de mes recherches. Sa disponibilité et son expertise ont été des atouts essentiels à la réussite de ce projet.

Je remercie également les professeurs **M. Hamdouch** et **Mme. Lehec**, qui m'ont guidée dans mon travail de recherche avec bienveillance et rigueur. Leur soutien académique m'a permis de structurer et approfondir mes réflexions tout au long de ce parcours.

Je suis également reconnaissante envers mon école, **Polytech Tours**, qui m'a offert les connaissances et l'intérêt nécessaires à la réalisation de ces recherches.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement mes proches, mes amis ainsi que ma famille, pour leur soutien indéfectible et leur encouragement tout au long de cette aventure. Leur présence et leurs mots bienveillants ont été une source de motivation constante.

Table des matières

Avertissement.....	3
Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement.....	4
Remerciements	5
Introduction.....	8
Méthode.....	9
1. Analyse de Cycle de Vie.....	9
a. Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	10
b. Analyse de l'inventaire.....	11
c. Evaluation de l'impact.....	16
d. Résultats de l'analyse de cycle de vie	16
2. Perte de séquestration carbone.....	17
a. Méthode de calcul des pertes de sequestration	17
b. Données clés	17
c. Cadre de la séquestration carbone	19
Résultats.....	20
Emissions directe.....	20
Perte de séquestration carbone.....	20
Emissions nettes totales.....	21
Discussion	22
Résumé.....	23
Référence.....	24
Annexes.....	25

Table des illustrations :

FIGURE 1 : SCENARIOS DE L'ETUDE	8
FIGURE 2 : CADRE DE L'ACV	9
FIGURE 3 : ETAPES DU CYCLE DE VIE D'UN BATIMENT.....	10
FIGURE 4 : INVENTAIRE PRODUCTION.....	14
FIGURE 5: INVENTAIRE CONSTRUCTION	14
FIGURE 6: INVENTAIRE OPERATION	15
FIGURE 7: INVENTAIRE FIN DE VIE	16
FIGURE 8 : VOLUME EPICEA COMMUN EN FONCTION DU TEMPS ¹⁰	18
FIGURE 9 : CALCUL DU VOLUME D'UN EPICEA COMMUN EN FONCTION DU TEMPS	18
FIGURE 10 : HISTOGRAMME DES EMISSIONS DIRECTES POUR LES SCENARIOS BOIS ET BETON.....	20
FIGURE 11 : HISTOGRAMME DES PERTES DE SEQUESTRATION POUR LES SCENARIOS BOIS ET BETON	20
FIGURE 12 : HISTOGRAMME DES EMISSIONS NETTES POUR LES SCENARIOS BOIS ET BETON	21

Table des tableaux :

TABEAU 1 : ELEMENTS EXCLUS DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES BATIMENTS	11
TABEAU 2 : INVENTAIRE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION	13

Introduction

Le secteur du bâtiment et de la construction est un contributeur majeur aux émissions mondiales de CO₂. En 2022, il représentait environ 37 % des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie et aux processus opérationnels, soit près de 10 gigatonnes de CO₂.¹

Dans ce contexte, le choix des matériaux de construction devient déterminant pour réduire l'empreinte carbone. Les émissions de CO₂ équivalentes (CO₂eq) désignent une mesure de l'impact des gaz à effet de serre, calculée en fonction de la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) qui produirait un effet équivalent sur le réchauffement climatique. Ce concept est central dans l'analyse de l'impact environnemental des bâtiments, car il permet de comparer les effets des différents matériaux sur le climat. Dans une étude de Gatien Geraud Essoua Essoua², il est estimé que les émissions de CO₂eq associées à la construction de bâtiments en bois sont environ 20 % inférieures à celles des bâtiments en béton. Toutefois, cette analyse ne prend pas en compte l'impact de la coupe des arbres, qui interrompt leur capacité à capturer le CO₂ de l'atmosphère. Cette omission soulève une question cruciale : comment l'intégration des pertes de séquestration forestière dues à la coupe des arbres affecte-t-elle la comparaison des émissions de CO₂eq entre la construction en bois et en béton ?

L'objectif est d'évaluer si, même après avoir pris en compte la perte de séquestration du CO₂ liée à l'abattage des arbres, la construction en bois génère toujours un bilan net d'émissions de CO₂eq inférieur à celui de la construction en béton. Pour se faire nous allons étudier deux scénarios bien distincts (figure 1) :

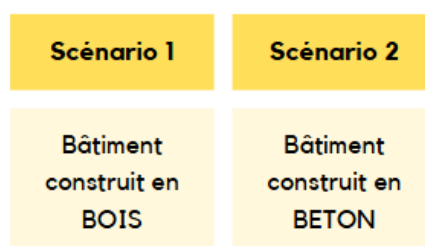


Figure 1 : Scénarios de l'étude

Cette étude a pour objectif de comparer l'impact environnemental global des bâtiments construits en bois et en béton. Elle combine une analyse de cycle de vie de chaque scénario, permettant de calculer les émissions directes liées à la construction, avec un calcul précis des émissions nettes dues à la séquestration forestière.

¹ Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). (n.d.). *Les émissions du secteur mondial du bâtiment restent élevées malgré des investissements record dans l'efficacité énergétique*. ONU Environnement. Consulté le 22 janvier 2025, sur <https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/communiqu%C3%A9-de-presse/les-emissions-du-secteur-mondial-du-batiment-restent>

² Essoua Essoua, G. G., & Lavoie, P. (2019). *Analyse de cycle de vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Méthode

L'étude repose sur deux analyses complémentaires. Tout d'abord, une analyse de cycle de vie (ACV) est menée pour deux scénarios : un bâtiment construit en bois et un autre en béton. Cette ACV permet de quantifier les émissions de CO₂eq générées tout au long du cycle de vie de chaque bâtiment, depuis la production des matériaux jusqu'à leur fin de vie.

Ensuite, l'étude se concentre uniquement sur le scénario 1, à savoir la construction en bois, car elle s'intéresse spécifiquement à la quantité de CO₂ qui aurait été séquestrée par les arbres si ceux-ci n'avaient pas été abattus pour produire les matériaux nécessaires.

En combinant ces deux analyses, nous calculerons le **bilan net des émissions de CO₂eq** pour chaque scénario selon la formule suivante :

$$\text{Emissions nettes} = \text{Emissions directes} + \text{Perte séquestration carbone}$$

Les émissions directes correspondent aux gaz à effet de serre (GES) générés par l'ensemble des étapes de construction. La perte de séquestration carbone, quant à elle, reflète la quantité de CO₂ que les arbres auraient pu capturer s'ils n'avaient pas été abattus.

Cette approche comparative visera à identifier lequel des deux matériaux, le bois ou le béton, présente la plus faible émission de gaz à effet de serre dans le secteur de la construction.

1. Analyse de Cycle de Vie

L'ACV est une méthode utilisée pour évaluer les flux d'énergie, de matière et les émissions d'un système donné. Cette méthode est utilisée ici pour déterminer la quantité de CO₂ équivalent émise lors de la construction d'un bâtiment, depuis la production des matériaux jusqu'à leur fin de vie, en prenant en compte chaque étape de son cycle de vie. Les étapes principales de l'ACV (figure 2) sont définies dans les normes ISO 14040/44 (2006). Cette analyse se basera sur les éléments trouvés dans la littérature, tout en suivant rigoureusement les étapes de l'ACV.³

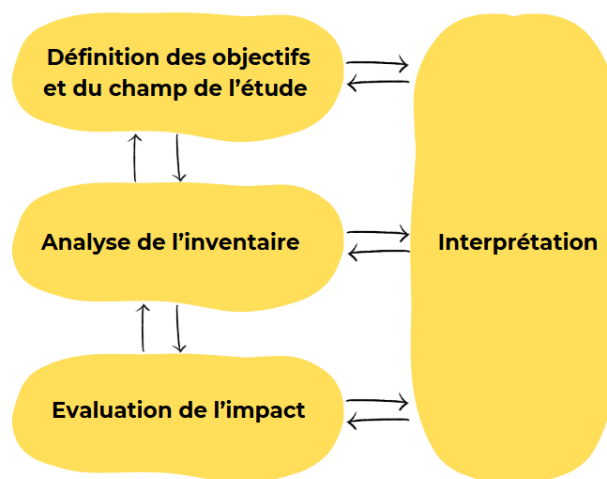


Figure 2 : Cadre de l'ACV

³ ISO. (2006). ISO 14040:2006 - Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization.

a. Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'objectif de ce raisonnement est de comparer les deux scénarios distincts en réalisant leur ACV :

1. ACV d'un bâtiment construit en **bois**.
2. ACV d'un bâtiment construit en **béton**.

Pour définir le champ d'étude, nous nous basons sur un exemple issu de la littérature⁴, mettant en comparaison deux bâtiments équivalents. Ces bâtiments sont identiques en termes de conception (dimensions, structure et fonctions), mais réalisés avec des matériaux différents.

- **Bâtiment de référence :**

- 8 étages hors sol et 2 niveaux en sous-sol.
- Surface au plancher : **13 776 m²**.
- Système d'enveloppe identique pour les deux bâtiments.

Les deux bâtiments sont situés au même emplacement afin de neutraliser l'impact du transport des matériaux sur les résultats. L'étude couvre quasiment l'intégralité du cycle de vie du bâtiment sur une durée de **60 ans**, depuis la phase de production jusqu'à la fin de vie (figure 3). Certaines étapes du cycle de vie ont été exclues en raison du manque de données, notamment lié à l'introduction récente du **CLT (Cross-Laminated Timber)**, le matériau en bois retenu pour cette analyse, dans les bâtiments de moyenne et grande hauteur (moins de 10 ans), ainsi qu'à la longue durée de vie des matériaux.

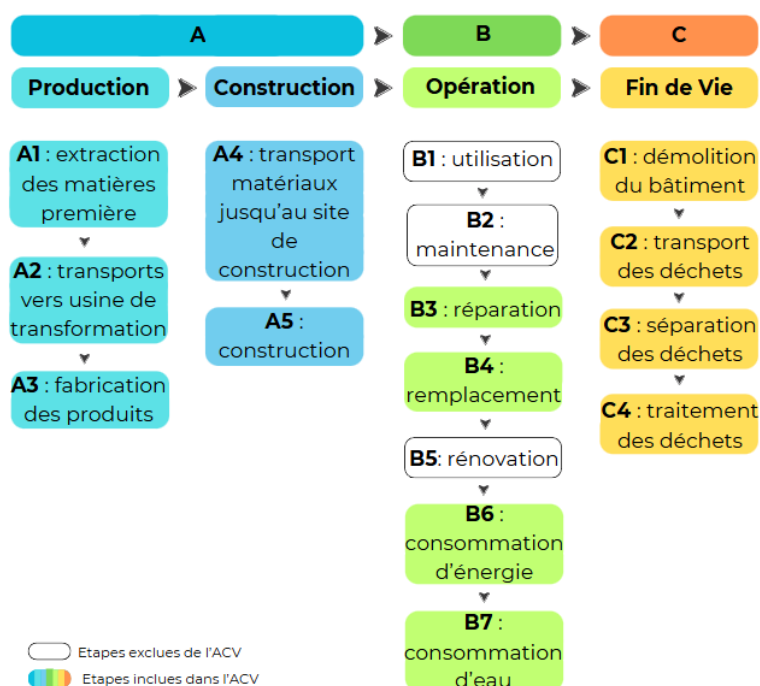


Figure 3 : Etapes du cycle de vie d'un bâtiment⁵

⁴ Essoua Essoua, G. G., & Lavoie, P. (2019). *Analyse de cycle de vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

⁵ Adapté de *Analyse de cycle de vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*, par G. G. Essoua Essoua et P. Lavoie, 2019, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Les données utilisées dans cette étude proviennent des bases Ecoinvent 3 et USLCI, reconnues pour leur robustesse et leur fiabilité. Afin d'assurer une évaluation précise des impacts environnementaux, la méthode **TRACI 2.1 v1.04**, développée par l'Agence de Protection Environnementale Américaine (EPA), a été retenue. Cette méthode, à la fois simple et efficace, permet de clarifier les résultats obtenus.

L'étude se concentre uniquement sur l'indicateur des **changements climatiques**, les résultats étant exprimés en kilogrammes équivalent CO₂, ce qui reflète les émissions générées tout au long du cycle de vie. Toutefois, certaines composantes du bâtiment ont été volontairement exclues de l'analyse (tableau 1), notamment celles situées en dessous du rez-de-chaussée. Cette exclusion repose sur le principe d'équilibre des flux entrants et sortants, qui garantit la cohérence des processus analysés.

Eléments
Murs des fondations
Dalles des fondations
Murs des niveaux SS1 et SS2
Dalles des niveaux SS1 et SS2
Colonnes et poutres des niveaux SS1 et SS2
Fournitures (ameublement, quincailleries, sanitaires)
Finitions intérieures (peinture, planchers et moulures)

Tableau 1 : Eléments exclus de l'analyse de cycle de vie des bâtiments ⁶

b. Analyse de l'inventaire

L'inventaire se divise en plusieurs parties. Il commence par recenser les matériaux nécessaires à la construction (uniquement des entrants), puis détaille les intrants et extrants des différentes étapes du cycle de vie, indispensables ensuite pour calculer les émissions de CO₂ équivalent.

Matériaux :

Le bilan des matériaux (tableau 2) permet d'avoir un aperçu global des matériaux impliqués dans la construction des deux bâtiments analysés. Il inclut les matériaux du plancher du RDC à la toiture du 8^{ème} étage. Les matériaux inventoriés composent la structure, les balcons, l'enveloppe, les cloisons et escaliers.

⁶ Adapté de *Analyse de cycle de vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*, par G. G. Essoua Essoua et P. Lavoie, 2019, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Nom des matériaux	Quantité (kg)	
	Bâtiment bois	Bâtiment Béton
Gravier de 19 mm	74 575	74 575
Poussière de pierre	22 430	22 430
Panneau drainant - 15 mm	10 823	10 823
Béton coulé	3 782 022	10 924 002
Panneau Soprasmart	1 056	1 506
Brique blanche - 90 mm	223 381	211 855
Brique grise - 90 mm	177 958	168 776
Brique noire - 90 mm	22 473	21 313
Brique noire - 90 mm - damier	28 120	26 669
Aluminium anodisé - charbon/gris	6 444	6 444
Bâti en acier	9 968	9 437
Fourniture résiliente - 13 mm	2 620	655
Persienne - aluminium anodisé - charbon	63 404	60 133
Bois - CLT	973 261	0
Bois - poutres	182 660	0
Panneau de contreplaqué - 16 mm	7 685	7 685
Acier pré-peint noir	197	187
Isolant d'uréthane giclé - 50 mm	17	17
Isolant d'uréthane giclé - 90 mm	5 671	5 671
Isolant de laine de fibre de verre - 92 mm	1 120	1 120
Isolant de laine de fibre de verre - 152 mm	1 346	1 346
Isolant en pente - 13 mm @ 141 mm	3 896	0
Isolant polyisocyanurate	4 242	4 242
Isolant rigide de type 4	659	0
Isolant rigide en panneau de fibres de type 2	11	11
Isolant rigide type 4 - 50 mm	24	24
Isolant rigide type 4 - 100 mm	24	24
Isolant semi-rigide	11 630	11 630
Membrane-acoustique (liège 5 mm)	201 495	0
Membrane autocollante	1 209	1 209
Membrane de toiture remontée	53	53
Panneau d'aluminium pré-peint 32 mm	2 487	2 487
Panneau Prodema - 8 mm	3 336	3 164
Pare-air/pare-vapeur en feuilles soudées à chaud	21	21
Solin en acier pré-peint	78	78
Toile de filtration tissée de polyoléfines	609	609
Cadre en acier	15 096	15 096
Fourniture d'acier galvanisé - 22 mm	1 254	1 254
Fourniture oméga en aluminium - 19 mm	740	740

Nom des matériaux	Quantité (kg)	
	Bâtiment bois	Bâtiment Béton
Montant en acier galvanisé - 64 mm type "CH"	41 515	10 379
Montant en acier galvanisé - 64 mm	912	862
Montant en acier galvanisé - 92 mm	14 342	13 555
Montant en acier galvanisé - 152 mm	619	585
Panneau de gypse régulier - 12.7 mm	149 342	147 482
Panneau de gypse type C - 12.7 mm	266 092	241 590
Panneau de gypse type X - 15.9 mm	26 417	26 448
Panneau de gypse type X - 25.4 mm	275	69
Panneau support en mats fibre verre - 12.7 mm	24 259	23 007
Verre générique	10 727	10 727
Verre opacifié	1 166	1 166
Acier - balcon	55 507	0
Carton fibre	3 516	0
Panneau de porte	9 114	9 114
Finitions intérieures - Placoplatre	443 892	443 892
Grfv - gypse renforcé de fibres de verre	1 533	1 449
Métal - faible épaisseur	369	349
Métal - montants	717 569	678 175
Métal - montants CH	2 106	1 991
Porte - cadre	1 502	1 502
Porte - panneau	3 959	3 959
Colonne	82 893	464 173
Verre	4	4
Armature	51 775	437 575
Acier inoxydable	0	2 507
Neopor	0	687
Structure acier brique	51 793	30 589
Total	7 805 293	14 147 122

Tableau 2 : Inventaire des matériaux de construction⁷

Les quantités de matériaux varient entre les deux bâtiments pour les raisons suivantes :

- Résistance au feu des matériaux de construction en bois
- Performance acoustique des planchers en CLT (bois d'ingénierie)
- Baisse de la hauteur des plafonds pour l'installation de la mécanique du bâtiment, dans le bâtiment en bois
- Absence d'isolants en pente au niveau de la toiture du bâtiment en béton

Le bois utilisé dans le domaine de la construction n'est pas choisi de manière aléatoire, il doit répondre à des critères spécifiques en fonction de son utilisation. Dans le cadre de cette étude, nous avons opté pour du bois lamellé-croisé (CLT), un matériau de plus en plus prisé dans la construction moderne. Le bois

⁷ Adapté de *Analyse de cycle de vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*, par G. G. Essoua Essoua et P. Lavoie, 2019, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

lamellé-croisé est fabriqué à partir de l'**épicéa commun**, une essence de bois reconnue pour ses bonnes propriétés mécaniques et sa disponibilité.

Production :

L'étape de production d'un matériau est constituée de trois modules : l'extraction des ressources naturelles (A1), leur transport vers l'usine de fabrication (A2), et la fabrication du produit final (A3). Pendant cette étape, des ressources naturelles (comme le bois ou le métal), de l'énergie et des moyens de transport sont utilisés. Ces entrées permettent de produire des matériaux prêts à l'emploi (panneaux, pièces métalliques, etc.), mais génèrent également des déchets et des émissions de gaz à effet de serre. Cette étape est donc clé pour transformer les matières premières en produits finis, tout en ayant un impact environnemental direct (figure 4).

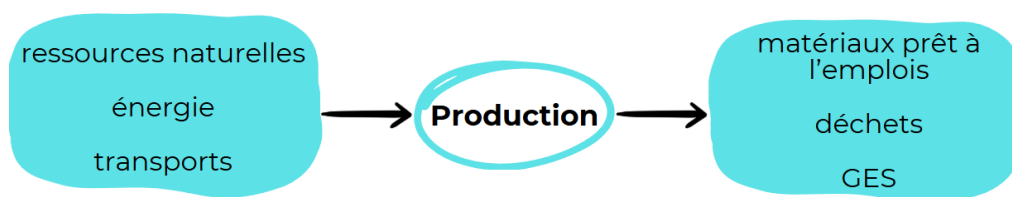


Figure 4 : Inventaire Production

Construction :

L'étape de construction est constituée de deux modules : le transport des produits fabriqués jusqu'au site de construction (A4) et la construction des bâtiments (A5).

Lors du transport des produits fabriqués (A4), deux principaux intrants sont à considérer. Tout d'abord, l'énergie nécessaire au transport des matériaux, qui varie en fonction des distances parcourues et des quantités transportées, différentes pour chaque scénario. Ensuite, l'énergie liée aux déplacements de la main-d'œuvre, influencée par la durée du chantier. Dans le scénario 2 (béton), cette dernière est plus élevée, car le chantier, deux fois plus long, nécessite une mobilisation prolongée de la main-d'œuvre.

L'étape de construction des bâtiments (A5) implique l'utilisation d'équipements tels que des grues, nacelles, chariots élévateurs, ventilateurs, scies, perceuses/visseuses, cloueuses, et agrafeuses, pour lesquels l'énergie consommée provient de l'hydroélectricité. L'énergie requise est plus importante pour la construction de bâtiments en béton, car la durée de construction est deux fois plus longue comparée à celle des structures en bois. Cette étape génère également des déchets, et la quantité de déchets sera plus élevée pour le bâtiment en béton, en raison de la masse plus importante de matériaux utilisés (cf. *tableau 2*). Ces étapes génèrent toutes les deux aussi l'émission de gaz à effet de serre (figure 5).



Figure 5: Inventaire Construction

Opération du bâtiment :

L'étape d'opération du bâtiment inclut plusieurs modules, mais cette étude se concentre sur quatre d'entre eux : la réparation, le remplacement, l'énergie d'opération et la consommation d'eau.

Concernant la réparation, les intrants principaux, identiques pour les deux scénarios, incluent des matériaux comme le silicone, le mortier, et le polyuréthane. Cependant, la consommation énergétique liée aux réparations et au transport des matériaux jusqu'au site de réparation est considérée négligeable et n'est pas incluse dans cette analyse.

Le remplacement, quant à lui, nécessite en intrants l'énergie pour le transport des matériaux et produits de remplacement jusqu'au chantier ainsi que l'énergie nécessaire pour fabriquer les nouveaux matériaux. Parmi les extrants, on retrouve les matériaux remplacés, qui doivent également être transportés, ainsi que l'énergie utilisée pour leur tri. Cependant, l'absence de données précises dans la littérature scientifique limite l'évaluation complète de cet aspect. Enfin, des émissions de gaz à effet de serre sont également générées lors du processus de remplacement.

Le module opération repose sur une demande en énergie hydroélectrique. Cet intrant produit des pertes d'énergie comme principaux extrants.

Enfin, la consommation d'eau, bien qu'elle ne génère pas d'impact sortant mentionner ici, est également prise en compte comme un intrant dans cette étape (figure 6).



Figure 6: Inventaire Opération

La fin de vie du bâtiment :

L'étape de fin de vie du bâtiment, dernière phase du cycle de vie, comprend quatre modules : la démolition (C1), le transport des matériaux de démolition vers les centres de tri (C2), le tri ou la séparation des matériaux récupérés (C3), et la gestion des déchets (C4). Cette étape repose principalement sur l'utilisation d'énergie comme ressource essentielle.

Pour la démolition (C1), les intrants incluent l'énergie nécessaire au transport de la flotte d'équipements vers le site de démolition ainsi que l'énergie requise pour effectuer la démolition elle-même.

Lors du transport des matériaux vers le centre de tri (C2), l'intrant principal est l'énergie de transport utilisée pour acheminer les débris.

Le tri et la séparation des matériaux récupérés (C3) nécessitent une demande énergétique comme intrant.

Enfin, pour la gestion des déchets (C4), qui inclut des processus d'incinération et d'enfouissement, les intrants sont également basés sur l'énergie utilisée. Les extrants de cette étape incluent des émissions de CO₂ issues de l'incinération et du méthane généré par l'enfouissement.

En conclusion, l'étude analyse toutes les étapes du cycle de vie des bâtiments en bois et en béton, de la production à la fin de vie, afin de quantifier les émissions de CO₂ équivalent (figure 7).

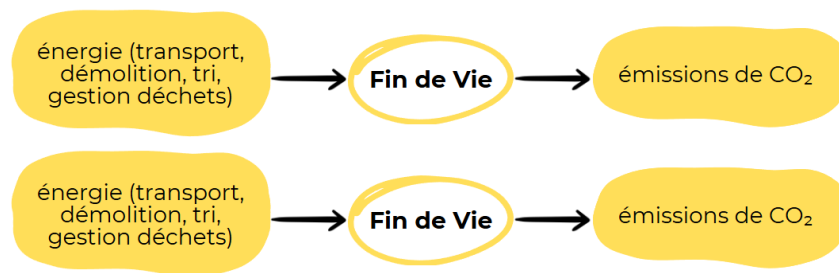


Figure 7: Inventaire Fin de Vie

c. Evaluation de l'impact

Une fois les flux entrants et sortants identifiés et quantifiés dans l'ACV, il faut établir une méthode dans le but de traduire ces flux en impacts environnementaux. Dans cette étude, deux méthodes largement reconnues et utilisées ont été sélectionnées : TRACI 2.0 et IMPACT 2002+. La méthode principale utilisée pour cette analyse est TRACI 2.0 (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts), qui permet une évaluation détaillée des impacts environnementaux en les distinguant en plusieurs catégories comme le réchauffement climatique, l'acidification, la pollution de l'eau, et l'épuisement des ressources naturelles. En complément, la méthode IMPACT 2002+ est utilisée pour valider les résultats obtenus avec TRACI 2.0, afin d'assurer une cohérence et une fiabilité dans l'évaluation des impacts environnementaux. D'après ces impacts, nous allons déterminer les quantités de CO₂ équivalent émises par les deux types de constructions.

d. Résultats de l'analyse de cycle de vie

Dans la première partie de cette étude, nous obtenons une première série de résultats concernant les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction. Ces résultats seront ensuite complétés par l'intégration des données issues de la deuxième partie de l'étude, qui se concentre sur les pertes de séquestration de carbone.

Afin d'exploiter ces premiers résultats, nous analysons les résultats de la catégorie "changement climatique" de l'étude menée par Gatien Geraud Essoua Essoua⁸. Cette analyse permet de comparer les émissions de GES générées par deux scénarios : une construction en bois et une construction en béton.

Ces chiffres constituent une première partie des résultats. Pour obtenir une évaluation complète des émissions nettes, il est nécessaire de prendre en compte la perte de séquestration du carbone liée à l'utilisation du bois. En effet, l'abattage des arbres utilisés comme matériau de construction entraîne une perte définitive de leur capacité à absorber le CO₂, un élément crucial pour l'analyse finale.

⁸ Essoua Essoua, G. G., & Lavoie, P. (2019). *Analyse de cycle de vie (ACV) environnementale comparative de la construction de bâtiments de grande hauteur en bois massif et en béton*. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

2. Perte de séquestration carbone

La séquestration de carbone est un processus naturel par lequel les arbres absorbent le CO₂ de l'air et stockent le carbone dans leur biomasse au cours de leur croissance. Ce phénomène est essentiel pour la lutte contre le changement climatique, car il contribue à réduire la quantité de CO₂ dans l'atmosphère.

Dans le cadre de cette étude, l'analyse se concentre sur le scénario 1, à savoir la construction en bois, nécessitant 1 155 921 kg de bois, soit **2 163 m³** (cf. annexe 4). L'objectif est d'estimer la quantité de CO₂ que cette masse de bois aurait pu séquestrer si elle n'avait pas été exploitée pour la construction, mais laissée à sa croissance naturelle sur une période de 60 ans, correspondant à la durée de vie du bâtiment étudié. Cette estimation repose sur les caractéristiques spécifiques de l'essence de l'arbre utilisé, en l'occurrence **l'Épicéa commun**, comme précisé précédemment dans l'étude

a. Méthode de calcul des pertes de séquestration

Afin d'estimer la quantité de CO₂ que le bois aurait pu séquestrer sur une période de 60 ans, nous utiliserons la formule suivante issue de la méthode Label Bas Carbone (LBC)⁹ :

$$S = 44 * \frac{(b_a + b_r) * tc + S_{lit} + S_{sol} + b_{mort}}{12}$$

Cette formule permet de calculer la quantité totale de carbone séquestrée par un hectare à un instant donné. Nous l'appliquerons pour chaque âge de l'arbre afin d'analyser les résultats obtenus. Avant d'effectuer le calcul, nous décrirons et détaillerons les variables nécessaires à son application.

b. Données clés

b_a

La biomasse aérienne, notée *b_a* représente la biomasse vivante au-dessus du sol, est calculée à partir du volume d'un arbre à un instant donné, selon la formule suivante :

$$b_a = vol * exp_{aero} * infradensité$$

Les résultats sont exprimés en tonnes de matière sèche (tMS). Les paramètres de cette formule sont les suivants :

vol : volume des tiges des arbres sur pied à l'instant t pour un arbre, exprimé en m³.

exp_{aero} : coefficient d'expansion aérienne. Ce facteur d'expansion pour les "branches" est de 1,335 pour les conifères et de 1,611 pour les feuillus, tiré du Label Bas Carbone. Dans notre cas, l'Épicéa commun étant un conifère, nous avons :

$$exp_{aero} = 1,335$$

infradensité : ratio entre la masse de bois anhydre et son volume de bois frais. Ce paramètre est spécifique à chaque essence d'arbre et pour l'Épicéa commun¹⁰, il est de :

$$infradensité = 0,37 \text{ tMS/m}^3$$

L'objectif est de déterminer le volume des Épicéas commun à chaque âge de l'arbre. Pour ce faire, j'ai supposé que mes arbres appartiennent à la classe 1, c'est-à-dire qu'ils présentent une excellente

⁹ EcoTree. (2022). *Méthodologie de quantification CO₂* (Version 3.1). EcoTree. [Méthodologie de quantification CO₂ EcoTree](#)

¹⁰ Centre national de la propriété forestière. (2020). *Méthode de boisement : Guide pour la réalisation de projets de boisement éligibles au label Bas-Carbone*. Centre national de la propriété forestière. [PDF]. Recupere de https://www.cnpf.fr/sites/socle/files/cnfp-old/methode_boisement_v2.pdf

productivité. En utilisant les données disponibles dans la littérature ¹¹, nous avons appliqué une interpolation linéaire pour obtenir les volumes annuels en fonction de l'âge. Cela nous a permis de tracer une courbe représentant l'évolution du volume des épicéas au fil du temps.

Âge (ans)	Volume (m³)
0	0
25	1,42699041
30	1,55373968
40	1,72932943
45	1,78920155
50	1,83583
55	1,87214428
60	1,90042586
65	1,92245158
70	1,93960523
75	1,95296451
130	2

Figure 8 : Volume épicéa commun en fonction du temps ¹⁰

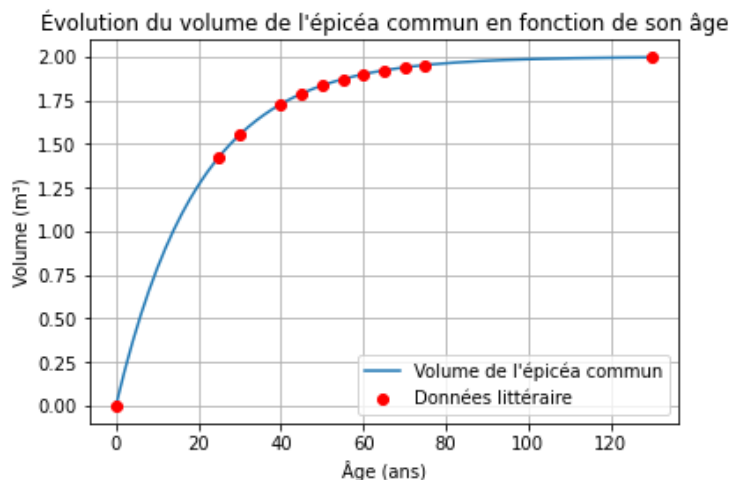


Figure 9 : Calcul du volume d'un épicéa commun en fonction du temps

Ainsi nous avons pu déterminer la biomasse aérienne pour chaque âge, de 0 à 130 ans (cf. annexe 1).

b_r

La biomasse racinaire noté b_r , autrement dit, la biomasse vivante sous le sol est calculée à partir de la biomasse aérienne avec la formule ci-dessous :

$$b_r = e^{-1,0587+0,8836*\ln(ba)+0,2840}$$

Le résultat est également exprimé en tMS. Ainsi, nous obtenons donc un résultat de b_r pour chaque âge de l'arbre.

tc

Le taux carbone noté tc correspond à la proportion de carbone présente dans la biomasse de l'épicéa commun. Selon le GIEC (2006), cette valeur est de :

$$tc = 0.475 \text{ tC/tMS}$$

S_{lit}

Le stockage de carbone dans la **litière** S_{lit} , représente le carbone accumulé dans les débris végétaux (feuilles mortes, branches, etc.) au sol, où il est stocké sous forme de matière organique en décomposition. Ce stockage atteint un équilibre lorsque les arbres sont âgés de 30 ans. Selon la littérature ¹², la dynamique du stockage de carbone dans la litière peut être exprimée par les équations suivantes :

Pour $t \leq 30$ ans :

$$S_{lit} = \frac{t*(L_{eq}-l_0)}{30}$$

Pour $t > 30$ ans : $S_{lit} = L_{eq} = 10 \text{ tC/ha}$

¹¹ Décourt, N. (1971). Tables de production pour l'épicéa commun dans le Nord-Est de la France. *Revue forestière française*, 23(4), 411-418.

¹² EcoTree. (2022). *Méthodologie de quantification CO₂* (Version 3.1). EcoTree. [Méthodologie de quantification CO₂ EcoTree](#)

Cependant dans la littérature le résultat est exprimé en tonnes de carbone par hectare (tC/ha), tandis que nous souhaitons l'obtenir par arbre, car le volume calculé concerne un arbre individuel. Il est donc logique de continuer sur cette base. De plus, l'objectif est de suivre l'évolution du volume d'un épicéa commun pour déterminer la quantité de CO₂ séquestrée par cet arbre sur la période étudiée. Pour cela, une simple mise à l'échelle nous permettra d'obtenir le résultat final en fonction du volume d'arbre requis.

D'après la littérature¹³, on compte 1000 épicéas communs par hectare. Ainsi, $L_{eq} = 0,01 \text{ tC/arbre}$ et donc pour $t > 30$ ans : $S_{lit} = L_{eq} = 0,01 \text{ tC/arbre}$.

S_{sol}

Le stockage de carbone, noté S_{sol} désigne le carbone stocké dans le sol, principalement sous forme de matière organique issue des racines des arbres. Ce stockage atteint un équilibre au fil du temps, en fonction des caractéristiques du sol et de la végétation. Il est donné par la formule suivante :

$$S_{sol} = C_{ref} + (C_f - C_{ref}) * (1 - e^{-0.0175*t})$$

Dans le cas présent, on considère que les sols cultivés sont des **prairies**. Ce qui conduit à une égalité entre C_{ref} et C_f . Ainsi, dans notre cas, on a :

$$S_{sol} = C_{ref} = 70 \text{ tC/ha}$$

En convertissant en valeur pour un arbre, on obtient :

$$S_{sol} = C_{ref} = 0,07 \text{ tC/arbre}$$

b_{mort}

Le stockage de carbone dans le bois mort, b_{mort} fait référence au carbone stocké dans les arbres et les branches mortes, ainsi que dans les troncs tombés au sol. Ce carbone est progressivement libéré à mesure que le bois se décompose ou est transformé par des micro-organismes et des champignons. D'après la méthode LBC, il est négligé, donc nous avons :

$$b_{mort} = 0$$

c. Cadre de la séquestration carbone

Pour interpréter correctement les résultats, il est essentiel de sélectionner les données pertinentes. Tout d'abord, un arbre doit atteindre un âge minimum pour être utilisé comme matériau de construction. En général, les arbres destinés à la fabrication de bois CLT sont coupés autour de 70 ans, âge auquel le bois présente les propriétés structurelles nécessaires¹⁴.

La durée de vie d'un bâtiment étant de 60 ans, notre étude se concentre donc sur la période de 70 à 130 ans. Nous avons calculé la quantité de CO₂ séquestré à chaque âge de l'arbre et déterminé la quantité supplémentaire que l'arbre aurait pu absorber entre 70 et 130 ans, en calculant la différence entre les valeurs obtenues pour ces deux âges.

Nous ajoutons cette quantité à celle obtenue lors de l'analyse de cycle de vie pour le scénario 1. Cela nous permettra de déterminer le bilan net des émissions de CO₂eq pour la construction en bois, et de le comparer au scénario 2 (construction en béton), afin d'évaluer l'impact de la séquestration sur les émissions dans le domaine de la construction.

¹³ Centre Régional de la Propriété Forestière Rhône-Alpes. (2015). Les épicéas par hectare. CRPF Rhône-Alpes.

¹⁴ Itinéraires techniques de *Picea abies*. (2020). *Épicéa commun en futaie régulière*. France entière

Résultats

Cette étude a permis de comparer les émissions de CO₂eq liées à la construction de bâtiments en bois et en béton en considérant les émissions directes ainsi que l'impact de la perte de séquestration de carbone due à l'abattage des arbres.

Emissions directe

Lors de la première étape de l'analyse, les émissions directes ont été calculées (figure 10).

- Un **bâtiment en bois** génère environ **6,9 ktCO₂eq** sur une période de 60 ans.
- Un **bâtiment en béton** produit, dans le même laps de temps, **8,8 ktCO₂eq**.

Ainsi, la construction en bois engendre environ **20 % de gaz à effet de serre en moins** que celle en béton.

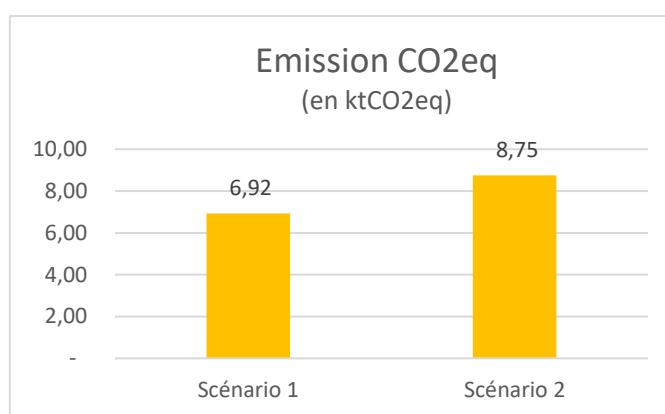


Figure 10 : Histogramme des émissions directes pour les scénarios bois et béton

Perte de séquestration carbone

La deuxième étape de l'étude a porté sur la perte de séquestration de carbone liée à l'abattage des arbres pour le scénario bois. Sur une période de 60 ans, cette perte est estimée à **0,09 ktCO₂eq** (figure 11).

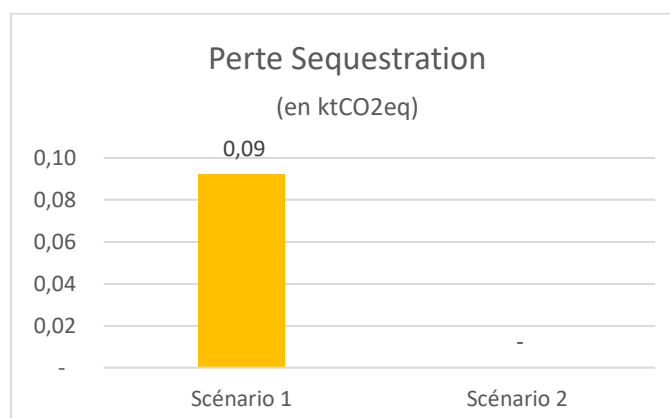


Figure 11 : Histogramme des pertes de séquestration pour les scénarios bois et béton

Emissions nettes totales

Les émissions nettes totales ont été obtenues en additionnant les émissions directes et la perte de séquestration, selon la formule :

$$\text{Emissions nettes} = \text{Emissions directes} + \text{Perte séquestration carbone}$$

Les résultats finaux sont les suivants (figure 12) :

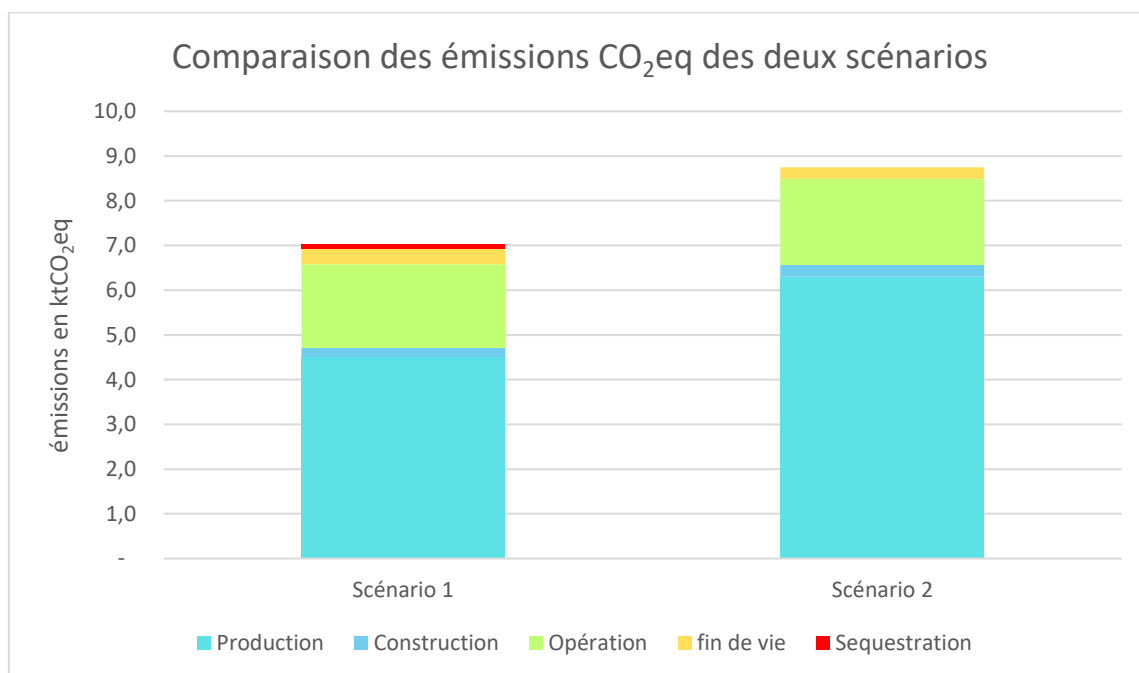


Figure 12 : Histogramme des émissions nettes pour les scénarios bois et béton

Titre : Histogramme des émissions nettes pour les scénarios bois et béton

- **Bâtiment en bois** : Les émissions totales s'élèvent à 7,02 ktCO₂eq, avec la plus grande part attribuée à la production.
- **Bâtiment en béton** : Les émissions totales atteignent 8,75 ktCO₂eq, principalement en raison des processus énergivores liés à la production.

Ces résultats confirment que, même en tenant compte de la perte de séquestration, la construction en bois génère **19,8 % d'émissions en moins** que celle en béton. Ce qui valide ainsi l'hypothèse formulée.

(Les données brutes sont disponibles en annexe pour une consultation détaillée (annexe 6).)

Discussion

Les résultats obtenus corroborent les études précédentes mettant en avant les avantages environnementaux du bois en tant que matériau de construction par rapport au béton.

L'analyse montre que la perte de séquestration de carbone liée à l'abattage des arbres a un impact marginal. Pour le scénario bois, elle augmente les émissions de CO₂eq de **6,92 ktCO₂eq à 7,02 ktCO₂eq**, soit une différence de seulement **0,092 ktCO₂eq** (environ **1,3 %** des émissions totales). Bien que la séquestration joue un rôle important sur le plan environnemental, son impact reste limité par rapport aux émissions liées au domaine de la construction.

Toutefois cette étude présente tout de même quelques limites. Tout d'abord l'analyse repose sur des données existantes, se limite à un type de bâtiment et à une distance de transport unique, ce qui restreint la possibilité de généraliser les résultats à d'autres types de constructions ou contextes géographiques. De plus, la modélisation de la séquestration a été réalisée en prenant uniquement l'épicéa commun comme référence, ce qui peut réduire la représentativité des résultats, car d'autres espèces d'arbres peuvent avoir des capacités de séquestration différentes et sont utilisés dans le domaine de la construction. Enfin, la perte de séquestration de CO₂ a été calculée uniquement sur la durée de vie du bâtiment, soit environ 60 ans. Cependant, certains arbres peuvent continuer à séquestrer du CO₂ pendant plusieurs siècles, jusqu'à 500 ans certaines espèces. Ce facteur n'a pas été pris en compte dans cette étude et pourrait influencer les résultats à long terme. En effet, lorsqu'un arbre est abattu pour la construction, il perd sa capacité à séquestrer du CO₂ pendant le reste de sa vie. Un autre facteur non pris en compte est la carbonatation du béton, un processus au cours duquel le béton absorbe du CO₂ au fur et à mesure de sa dégradation en fin de vie. Ce phénomène pourrait compenser partiellement les émissions de CO₂ générées lors de la production du béton, mais son impact n'a pas été inclus dans notre analyse.

En conclusion, bien que la perte de séquestration due à l'abattage des arbres ait été intégrée dans cette étude, elle n'a qu'un impact marginal sur le total des émissions d'une construction en bois. Les résultats confirment que le bois reste une alternative plus favorable en termes d'émissions de CO₂eq, mais des études supplémentaires seraient nécessaires pour explorer plus en profondeur l'impact de la séquestration à long terme, de la carbonatation du béton et d'autres facteurs environnementaux. Enfin, pour une généralisation des résultats, il serait pertinent d'étudier une plus grande diversité de bâtiments, d'espèces d'arbres et de pratiques de construction.

Directeur de recherche :

Mindjid Maizia

Camille Jean

PRI / DAE5

RESEAU

2024-2025

Émissions de CO₂ liées à la construction : Bois et Béton : Comparaison des émissions de CO₂eq entre la construction en bois et en béton, incluant les pertes de séquestration forestière

Résumé

Dans un contexte où le secteur de la construction représente 37 % des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie, cette étude évalue l'impact environnemental des constructions en bois et en béton, en intégrant pour la première fois les pertes de séquestration du carbone dues à l'abattage des arbres.

Dans un premier temps, en ne considérant que les émissions directes, c'est-à-dire sans intégrer les pertes de séquestration, le bâtiment en bois génère 20 % de gaz à effet de serre en moins que celui en béton (6,92 ktCO₂eq contre 8,75 ktCO₂eq). Ensuite, dans la seconde étape de l'étude, en intégrant les pertes de séquestration de carbone, estimées à 0,09 ktCO₂eq, les émissions nettes du bois restent inférieures de 19,8 % à celles du béton.

L'étude met en lumière l'impact marginal de ces pertes de séquestration (représentant seulement 1,3 % des émissions totales du bois), tout en soulignant les avantages environnementaux du bois comme matériau de construction. Elle recommande d'approfondir les recherches sur la séquestration à long terme, la carbonatation du béton et les différentes typologies de constructions.

Mots clés : émissions CO₂ équivalents – séquestration carbone – analyse de cycle de vie

Référence

PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT (PNUE). (N.D.). LES EMISSIONS DU SECTEUR MONDIAL DU BATIMENT RESTENT ELEVEES MALGRE DES INVESTISSEMENTS RECORD DANS L'EFFICACITE ENERGETIQUE. ONU ENVIRONNEMENT. CONSULTE LE 15 DECEMBRE 2024, SUR [HTTPS://WWW.UNEP.ORG/FR/ACTUALITES-ET-RECITS/COMMUNIQUE-DE-PRESSE/LES-EMISSIONS-DU-SECTEUR-MONDIAL-DU-BATIMENT-RESTENT](https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/communique-de-presse/les-emissions-du-secteur-mondial-du-batiment-restent)

ESSOUA ESSOUA, G. G., & LAVOIE, P. (2019). ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV) ENVIRONNEMENTALE COMPARATIVE DE LA CONSTRUCTION DE BATIMENTS DE GRANDE HAUTEUR EN BOIS MASSIF ET EN BETON. MINISTERE DES FORETS, DE LA FAUNE ET DES PARCS DU QUEBEC.

ISO. (2006). ISO 14040:2006 - ENVIRONMENTAL MANAGEMENT - LIFE CYCLE ASSESSMENT - PRINCIPLES AND FRAMEWORK. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.

ECOTREE. (2022). METHODOLOGIE DE QUANTIFICATION CO₂ (VERSION 3.1). ECOTREE. METHODOLOGIE DE QUANTIFICATION CO₂ ECOTREE

ICI YAURA INFRADENSITE

CENTRE NATIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE. (2020). METHODE DE BOISEMENT : GUIDE POUR LA REALISATION DE PROJETS DE BOISEMENT ELIGIBLES AU LABEL BAS-CARBONE [PDF]. RECUPERE DE [HTTPS://WWW.CNPF.FR/SITES/SOCLE/FILES/CNPF-OLD/METHODE BOISEMENT V2.PDF](https://www.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpf-old/methode_boisement_v2.pdf)

DECOURT, N. (1971). TABLES DE PRODUCTION POUR L'EPICEA COMMUN DANS LE NORD-EST DE LA FRANCE. REVUE FORESTIERE FRANÇAISE, 23(4), 411-418.

CENTRE REGIONAL DE LA PROPRIETE FORESTIERE RHONE-ALPES. (2015). LES EPICEAS PAR HECTARE. CRPF RHÔNE-ALPES.

GONG, X., NIE, Z., WANG, Z., CUI, S., GAO, F., & ZUO, T. (2012). LIFE CYCLE ENERGY CONSUMPTION AND CARBON DIOXIDE EMISSION OF RESIDENTIAL BUILDING DESIGNS IN BEIJING: A COMPARATIVE STUDY. JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY, 16(4), 583-595.

SATHRE, R. (2007). LIFE-CYCLE ENERGY AND CARBON IMPLICATIONS OF WOOD-BASED PRODUCTS AND CONSTRUCTION (DOCTORAL THESIS, MID SWEDEN UNIVERSITY).

E-WOOD. (N.D.). ÉPICÉA. E-WOOD. [HTTPS://WWW.E-WOOD.FR/ESSENCES/EPICEA.HTML](https://www.e-wood.fr/essences/epicea.html)

Annexes

Âge (ans)	Volume (m³)	Âge (ans)	Volume (m³)
0	0	66	1,926233665
1	0,097541151	67	1,929831292
2	0,190325164	68	1,93325346
3	0,278584047	69	1,936508727
4	0,362538494	70	1,939605233
5	0,442398434	71	1,942550721
6	0,518363559	72	1,945352555
7	0,590623821	73	1,948017742
8	0,659359908	74	1,950552947
9	0,724743697	75	1,952964508
10	0,786938681	76	1,955258456
11	0,846100379	77	1,957440527
12	0,902376728	78	1,959516177
13	0,955908446	79	1,961490596
14	1,006829392	80	1,963368722
15	1,055266895	81	1,965155251
16	1,101342072	82	1,966854649
17	1,145170136	83	1,968471167
18	1,186860681	84	1,970008846
19	1,226517953	85	1,971471532
20	1,264241118	86	1,972862882
21	1,300124502	87	1,974186375
22	1,334257833	88	1,97544532
23	1,366726461	89	1,976642866
24	1,397611576	90	1,977782007
25	1,426990406	91	1,978865591
26	1,454936414	92	1,979896329
27	1,481519479	93	1,980876796
28	1,506806072	94	1,981809446
29	1,530859424	95	1,98269661
30	1,55373968	96	1,983540506
31	1,575504052	97	1,984343245
32	1,596206964	98	1,985106834
33	1,615900183	99	1,985833182
34	1,634632952	100	1,986524106
35	1,652452113	101	1,987181333
36	1,669402224	102	1,987806507
37	1,685525667	103	1,988401191
38	1,700862762	104	1,988966871
39	1,715451857	105	1,989504963
40	1,729329434	106	1,990016812
41	1,742530193	107	1,990503698
42	1,755087143	108	1,990966838
43	1,767031684	109	1,991407391
44	1,778393683	110	1,991826457
45	1,789201551	111	1,992225086
46	1,799482313	112	1,992604273
47	1,809261676	113	1,992964966
48	1,818564093	114	1,993308069
49	1,827412827	115	1,993634438
50	1,835830003	116	1,993944891
51	1,843836668	117	1,994240202
52	1,851452844	118	1,99452111
53	1,858697574	119	1,994788319
54	1,865588975	120	1,995042496
55	1,872144278	121	1,995284276
56	1,878379875	122	1,995514265
57	1,884311358	123	1,995733036
58	1,88995356	124	1,995941139
59	1,895320588	125	1,996139092
60	1,900425863	126	1,99632739
61	1,905282151	127	1,996506506
62	1,909901595	128	1,996676885
63	1,914295746	129	1,996838956
64	1,918475592	130	1,996993122
65	1,922451584		

Annexe 1 : Tableau des volumes d'un épïcéa commun en fonction du temps

Données			
nom	valeur	unités	def
exp(aero)	1,335		coef d'expansion aérienne. Facteur d'expansion "branches" de 1,335 pour les conifères et de 1,611 pour les feuillus, tirés du Label Bas Carbone ou bien de la littérature
infradensité	0,37	tMS/m ³	valeurs utilisées sont définies par essence
Cref	0,07	tC/arbre	Stock initial de carbone dans le sol (référence), ici 45 tC/ha.
Cf	0,07	tC/arbre	Stock final de carbone possible (équilibre naturel), ici 70 tC/ha.
Leq	0,01	tC/arbre	stock de carbone à l'équilibre
l0	0	tC/ha	stock initial de carbon dans la litière
tc	0,475	tC/tMS	taux de carbone

Annexe 2 : Données pour effectuer calcul des pertes de séquestration

t (âge)	stocke	stocke	ba	Volume	br	Ssol	Slit
en âge	en teqCO2	en tMS	en tMS	en m³	en tMS	en tC/arbres	en tC/arbres
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,396846138	0,10823076	0,04818045	0,09754115	0,03160361	0,07	0,00033333
2	0,522208661	0,14242054	0,09401111	0,19032516	0,05704968	0,07	0,00066667
3	0,639127486	0,1743075	0,13760659	0,27858405	0,07988288	0,07	0,001
4	0,749036435	0,20428266	0,17907589	0,36253849	0,10081744	0,07	0,00133333
5	0,852732728	0,23256347	0,21852271	0,44239843	0,12020741	0,07	0,00166667
6	0,950773908	0,25930197	0,25604568	0,51836356	0,13827427	0,07	0,002
7	1,04359616	0,28461713	0,29173864	0,59062382	0,15517463	0,07	0,00233333
8	1,131562938	0,30860807	0,32569083	0,65935991	0,17102793	0,07	0,00266667
9	1,214988932	0,33136062	0,35798715	0,7247437	0,18592994	0,07	0,003
10	1,294153432	0,35295094	0,38870836	0,78693868	0,19996028	0,07	0,00333333
11	1,36930846	0,37344776	0,41793128	0,84610038	0,21318681	0,07	0,00366667
12	1,440684087	0,39291384	0,44572898	0,90237673	0,22566858	0,07	0,004
13	1,508492111	0,41140694	0,47217098	0,95590845	0,23745767	0,07	0,00433333
14	1,572928709	0,42898056	0,49732338	1,00682939	0,2486006	0,07	0,00466667
15	1,634176447	0,44568449	0,52124908	1,05526689	0,25913931	0,07	0,005
16	1,692405832	0,46156523	0,54400792	1,10134207	0,26911186	0,07	0,00533333
17	1,747776559	0,47666633	0,56565679	1,14517014	0,27855304	0,07	0,00566667
18	1,800438538	0,49102869	0,58624983	1,18686068	0,28749478	0,07	0,006
19	1,850532748	0,50469075	0,60583854	1,22651795	0,29596654	0,07	0,00633333
20	1,898191966	0,51768872	0,6244719	1,26424112	0,30399558	0,07	0,00666667
21	1,943541398	0,53005674	0,6421965	1,3001245	0,31160718	0,07	0,007
22	1,986699235	0,54182706	0,65905666	1,33425783	0,31882488	0,07	0,00733333
23	2,02777714	0,55303013	0,67509454	1,36672646	0,32567065	0,07	0,00766667
24	2,066880689	0,56369473	0,69035024	1,39761158	0,33216499	0,07	0,008
25	2,104109765	0,57384812	0,70486191	1,42699041	0,33832711	0,07	0,00833333
26	2,139558916	0,58351607	0,71866584	1,45493641	0,344175	0,07	0,00866667
27	2,173317681	0,592723	0,73179655	1,48151948	0,34972557	0,07	0,009
28	2,205470896	0,60149206	0,74428686	1,50680607	0,35499468	0,07	0,00933333
29	2,237321184	0,6101785	0,75616801	1,53085942	0,35999726	0,07	0,01
30	2,265278109	0,61780312	0,76746971	1,55373968	0,36474738	0,07	0,01
31	2,291858405	0,62505229	0,77822023	1,57550405	0,36925828	0,07	0,01
32	2,317130647	0,63194472	0,78844643	1,59620696	0,37354246	0,07	0,01
33	2,341159899	0,63849815	0,7981739	1,61590018	0,37761169	0,07	0,01
34	2,364007903	0,64472943	0,80742695	1,63463295	0,38147711	0,07	0,01
35	2,385733267	0,65065453	0,81622872	1,65245211	0,38514923	0,07	0,01
36	2,406391626	0,65628863	0,82460123	1,66940222	0,38863798	0,07	0,01
37	2,426035803	0,66164613	0,8325654	1,68552567	0,39195276	0,07	0,01
38	2,444715958	0,66674072	0,84014116	1,70086276	0,39510245	0,07	0,01
39	2,46247973	0,67158538	0,84734744	1,71545186	0,39809546	0,07	0,01
40	2,479372365	0,67619246	0,85420227	1,72932943	0,40093975	0,07	0,01
41	2,495436844	0,68057368	0,86072279	1,74253019	0,40364286	0,07	0,01
42	2,510713997	0,68474018	0,86692529	1,75508714	0,40621193	0,07	0,01
43	2,525242618	0,68870253	0,8728253	1,76703168	0,40865371	0,07	0,01
44	2,539059564	0,69247079	0,87843756	1,77839368	0,41097463	0,07	0,01
45	2,552199862	0,69605451	0,88377611	1,78920155	0,41318075	0,07	0,01
46	2,564696792	0,69946276	0,88885429	1,79948231	0,41527784	0,07	0,01
47	2,576581987	0,70270418	0,8936848	1,80926168	0,41727136	0,07	0,01
48	2,587885507	0,70578696	0,89827973	1,81856409	0,41916649	0,07	0,01
49	2,598635924	0,70871889	0,90265057	1,82741283	0,42096815	0,07	0,01
50	2,608860397	0,71150738	0,90680823	1,83583	0,42268099	0,07	0,01
51	2,618584738	0,71415947	0,91076312	1,84383667	0,42430945	0,07	0,01
52	2,627833488	0,71668186	0,91452513	1,85145284	0,42585773	0,07	0,01
53	2,636629973	0,7190809	0,91810367	1,85869757	0,42732981	0,07	0,01
54	2,644996369	0,72136265	0,92150767	1,86558897	0,42872948	0,07	0,01
55	2,652953758	0,72353284	0,92474567	1,87214428	0,43006032	0,07	0,01
56	2,660522184	0,72559696	0,92782574	1,87837987	0,43132575	0,07	0,01
57	2,667720704	0,72756019	0,9307556	1,88431136	0,43252902	0,07	0,01
58	2,674567435	0,72942748	0,93354256	1,88995356	0,43367319	0,07	0,01
59	2,681079604	0,73120353	0,9361936	1,89532059	0,43476119	0,07	0,01
60	2,687273592	0,7328928	0,93871536	1,90042586	0,4357958	0,07	0,01
61	2,693164972	0,73449954	0,94111412	1,90528215	0,43677965	0,07	0,01
62	2,698768555	0,73602779	0,94339589	1,9099016	0,43771524	0,07	0,01
63	2,704098422	0,73748139	0,94556638	1,91429575	0,43860496	0,07	0,01
64	2,709167964	0,73886399	0,94763102	1,91847559	0,43945107	0,07	0,01
65	2,713989915	0,74017907	0,94959496	1,92245158	0,44025571	0,07	0,01

t (âge)	stocke	stocke	ba	Volume	br	Ssol	Slit
en âge	en teqCO2	en tMS	en tMS	en m³	en tMS	en tC/arbre	en tC/arbre
66	2,71857638	0,74142992	0,95146312	1,92623367	0,44102093	0,07	0,01
67	2,72293888	0,7426197	0,95324017	1,92983129	0,44174867	0,07	0,01
68	2,72708837	0,74375137	0,95493055	1,93325346	0,44244077	0,07	0,01
69	2,73103525	0,7448278	0,95653849	1,93650873	0,44309898	0,07	0,01
70	2,73478943	0,74585166	0,958068	1,93960523	0,44372497	0,07	0,01
71	2,73836033	0,74682554	0,95952293	1,94255072	0,44432032	0,07	0,01
72	2,7417569	0,74775188	0,96090689	1,94535256	0,44488654	0,07	0,01
73	2,74498767	0,748633	0,96222336	1,94801774	0,44542506	0,07	0,01
74	2,74806074	0,74947111	0,96347563	1,95055295	0,44593724	0,07	0,01
75	2,7509838	0,75026831	0,96466682	1,95296451	0,44642436	0,07	0,01
76	2,75376419	0,7510266	0,96579991	1,95525846	0,44688766	0,07	0,01
77	2,75640888	0,75174788	0,96687775	1,95744053	0,44732831	0,07	0,01
78	2,75892449	0,75243395	0,96790302	1,95951618	0,44774741	0,07	0,01
79	2,76131733	0,75308654	0,96887828	1,9614906	0,44814602	0,07	0,01
80	2,76359339	0,75370729	0,96980598	1,96336872	0,44852516	0,07	0,01
81	2,76575839	0,75429774	0,97068844	1,96515525	0,44888576	0,07	0,01
82	2,76781773	0,75485938	0,97152785	1,96685465	0,44922874	0,07	0,01
83	2,76977658	0,75539361	0,97232633	1,96847117	0,44955496	0,07	0,01
84	2,77163985	0,75590178	0,97308587	1,97000885	0,44986524	0,07	0,01
85	2,77341219	0,75638514	0,97380836	1,97147153	0,45016036	0,07	0,01
86	2,77509806	0,75684493	0,97449562	1,97286288	0,45044107	0,07	0,01
87	2,77670167	0,75728227	0,97514936	1,97418637	0,45070806	0,07	0,01
88	2,77822704	0,75769828	0,97577122	1,97544532	0,45096201	0,07	0,01
89	2,77967798	0,758094	0,97636274	1,97664287	0,45120356	0,07	0,01
90	2,78105814	0,7584704	0,97692542	1,97778201	0,45143332	0,07	0,01
91	2,78237095	0,75882844	0,97746066	1,97886559	0,45165185	0,07	0,01
92	2,78361972	0,75916902	0,97796979	1,97989633	0,45185971	0,07	0,01
93	2,78480757	0,75949297	0,97845409	1,9808768	0,45205743	0,07	0,01
94	2,78593746	0,75980113	0,97891478	1,98180945	0,45224549	0,07	0,01
95	2,78701223	0,76009425	0,97935299	1,98269661	0,45242437	0,07	0,01
96	2,78803457	0,76037307	0,97976983	1,98354051	0,45259452	0,07	0,01
97	2,78900704	0,76063828	0,98016635	1,98434324	0,45275636	0,07	0,01
98	2,78993207	0,76089056	0,98054352	1,98510683	0,4529103	0,07	0,01
99	2,79081197	0,76113054	0,9809023	1,98583318	0,45305672	0,07	0,01
100	2,79164894	0,7613588	0,98124358	1,98652411	0,453196	0,07	0,01
101	2,79244509	0,76157593	0,98156822	1,98718133	0,45332848	0,07	0,01
102	2,7932024	0,76178247	0,98187702	1,98780651	0,4534545	0,07	0,01
103	2,79392277	0,76197894	0,98217077	1,98840119	0,45357437	0,07	0,01
104	2,794608	0,76216582	0,98245019	1,98896687	0,45368838	0,07	0,01
105	2,79525981	0,76234358	0,98271598	1,98950496	0,45379683	0,07	0,01
106	2,79587982	0,76251268	0,9829688	1,99001681	0,45389999	0,07	0,01
107	2,79646959	0,76267352	0,9832093	1,9905037	0,45399812	0,07	0,01
108	2,79703059	0,76282652	0,98343807	1,99096684	0,45409145	0,07	0,01
109	2,79756422	0,76297206	0,98365568	1,99140739	0,45418024	0,07	0,01
110	2,79807183	0,7631105	0,98386268	1,99182646	0,45426469	0,07	0,01
111	2,79855467	0,76324218	0,98405958	1,99222509	0,45434502	0,07	0,01
112	2,79901397	0,76336745	0,98424688	1,99260427	0,45442143	0,07	0,01
113	2,79945086	0,7634866	0,98442505	1,99296497	0,45449411	0,07	0,01
114	2,79986644	0,76359994	0,98459452	1,99330807	0,45456324	0,07	0,01
115	2,80026175	0,76370775	0,98475573	1,99363444	0,45462901	0,07	0,01
116	2,80063778	0,7638103	0,98490908	1,99394489	0,45469156	0,07	0,01
117	2,80099547	0,76390786	0,98505495	1,9942402	0,45475106	0,07	0,01
118	2,80133571	0,76400065	0,9851937	1,99452111	0,45480766	0,07	0,01
119	2,80165936	0,76408892	0,98532569	1,99478832	0,4548615	0,07	0,01
120	2,80196722	0,76417288	0,98545124	1,9950425	0,45491271	0,07	0,01
121	2,80226007	0,76425275	0,98557067	1,99528428	0,45496143	0,07	0,01
122	2,80253863	0,76432872	0,98568427	1,99551426	0,45500777	0,07	0,01
123	2,8028036	0,76440098	0,98579233	1,99573304	0,45505184	0,07	0,01
124	2,80305566	0,76446972	0,98589513	1,99594114	0,45509377	0,07	0,01
125	2,80329541	0,76453511	0,9859929	1,99613909	0,45513365	0,07	0,01
126	2,80352348	0,76459731	0,98608591	1,99632739	0,45517159	0,07	0,01
127	2,80374042	0,76465648	0,98617439	1,99650651	0,45520767	0,07	0,01
128	2,80394678	0,76471276	0,98625855	1,99667689	0,455242	0,07	0,01
129	2,80414307	0,76476629	0,9863386	1,99683896	0,45527465	0,07	0,01
130	2,80432979	0,76481722	0,98641475	1,99699312	0,4553057	0,07	0,01

Annexe 3 : Tableau du calcul des pertes de séquestration

quantité de bois requis pour construction		
bois CLT	973 261	kg
Bois poutre	182 660	kg
TOTAL	1 155 921	kg
	2 569	m ³

Annexe 4 : Quantité de Bois nécessaire à la construction d'un bâtiment

Note : Densité épicéa commun = 450 kg/ m³ ¹⁵

	vol (en m ³)	CO2 fixé			
		à 70 ans	à 130 ans	Entre 70 et 130 ans	
Pour 1 arbre	1,93960523	2,73478943	2,80432979	0,069540364	teqCO2
Pour le volume de bois requis à la construction	2568,71333	3,62181435	3,71391003	0,092095679	kteqCO2

Annexe 5 : Calcul perte séquestration CO₂

	Scénario 1	Scénario 2
Production	4,5	6,3
Construction	0,2	0,3
Opération	1,9	1,9
Fin de vie	0,3	0,3
Séquestration	0,09	-
TOTAL	7,02	8,75

Annexe 6 : Emissions détaillées de l'étude

¹⁵ e-Wood. (n.d.). Épicéa. e-Wood. <https://www.e-wood.fr/essences/epicea.html>