



Utilisation du bois dans le bâtiment

Analyse environnementale

Rapport final

Préparé par :

Violaine Magaud (Quantis)
Luc Trottier (Lutz architectes)
Denis Bochatay (Quantis)

Pour :



REPUBLIQUE
ET CANTON
DE GENEVE

POST TENEBRAS LUX

Contact:

Denis Bochatay

Denis.bochatay@quantis-intl.com

Titre du document	Rapport final
Version	V2.2
Date	09.10.2020
Auteur(s)	Violaine Magaud (Quantis) Luc Trottier (Lutz Architecte) Denis Bochatay (Quantis)
Contact client	Alexia Dufour

Abréviations et acronymes

ACV	Analyse de cycle de vie
CO2	Dioxyde de carbone
DALY	Disability Adjusted Life Years
EICV	Evaluation des impacts du cycle de vie
EPS	Polystyrène expansé (Expanded PolyStyrene)
EU	Europe
GE	Genève
MDF	Panneau de fibres de bois à moyenne densité (Medium Density Fiberboard)
MJ	Mega joules
OSB	Panneau à lamelles minces orientées (Oriented Strand Board)
PDF	Potential Disappeared Fraction
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
PUR	Polyuréthane
PVC	Polyvinylchloride
R+2	Rez-de-chaussée + 2 étages
UVTD	Usine de Valorisation et de Traitement des Déchets

Table des matières

ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES	3
RÉSUMÉ EXÉCUTIF	6
1.1. CONTEXTE.....	6
1.2. CONSTRUCTION.....	6
1.2.1. <i>Description des scénarios</i>	6
1.2.2. <i>Résultats – Empreinte carbone</i>	7
1.2.3. <i>Résultats – Autres indicateurs</i>	9
1.3. MOBILIER.....	10
1.4. CONCLUSION	10
1. CONTEXTE	12
2. MÉTHODOLOGIE.....	12
2.1. ANALYSE DU CYCLE DE VIE	12
2.2. SÉLECTION DES INDICATEURS PERTINENTS.....	13
2.3. LE BOIS : EFFET CLIMATIQUE DU STOCKAGE DE CARBONE	14
2.4. LE BÉTON : CAPTURE DE DIOXYDE DE CARBONE PAR LE PHÉNOMÈNE DE CARBONATATION	16
3. CONSTRUCTION.....	17
3.1. PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE.....	17
3.2. ÉTAPES DU CYCLE DE VIE CONSIDÉRÉES.....	17
3.3. DESCRIPTION GÉNÉRALE DES SCÉNARIOS	19
3.4. DÉTAILS ARCHITECTURAUX DES SCÉNARIOS	23
3.4.1. <i>Généralités</i>	23
3.4.2. <i>Description générale du bâtiment</i>	24
3.4.3. <i>Description des typologies</i>	25
3.4.4. <i>Description des façades</i>	27
3.4.5. <i>Fenêtres</i>	28
3.5. DURÉES DE VIE DU BÂTIMENT ET DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS	28
3.6. RÉSULTATS	29
3.6.1. <i>Production de la structure – Analyse comparative de l'empreinte carbone totale</i>	29
3.6.2. <i>Production de la structure – Influence de l'effet climatique du stockage de carbone dans le bois et de la capture de CO₂ par le béton par carbonatation</i>	30
3.6.3. <i>Fin de vie de la structure</i>	32
3.6.4. <i>Analyse par élément structurel des étages – Empreinte carbone</i>	33
3.6.5. <i>Production de la structure – Empreinte carbone des différents niveaux</i>	34
3.6.6. <i>Production de la structure - Évolution des résultats pour les déclinaisons R+2, R+5 et R+8</i>	35
3.6.7. <i>Contribution des matériaux aux différents éléments - Empreinte carbone</i>	35
3.6.8. <i>Façades et fenêtres – Impact environnemental, contribution à l'empreinte carbone de la production de la structure</i>	39
3.6.9. <i>Production de la structure – Analyse comparative multi-indicateurs</i>	40
3.7. CONCLUSION	44
4. MOBILIER.....	46
4.1. PÉRIMÈTRE DE L'ÉTUDE.....	46

4.2.	ÉTAPES DU CYCLE DE VIE CONSIDÉRÉES.....	46
4.3.	DESCRIPTION GÉNÉRALE DES SCÉNARIOS	47
4.4.	DONNÉES ET HYPOTHÈSES	48
4.5.	RÉSULTATS.....	49
4.5.1.	<i>Analyse comparative du mobilier en bois avec d'autres scénarios – Empreinte carbone.....</i>	<i>49</i>
4.5.2.	<i>Comparaison du mobilier en bois avec d'autres scénarios : contribution des étapes du cycle de vie</i> <i>50</i>	<i>50</i>
4.5.3.	<i>Analyse comparative du mobilier en bois avec d'autres scénarios – Multi-indicateurs.....</i>	<i>52</i>
4.5.4.	<i>Analyses de scénarios</i>	<i>53</i>
4.6.	CONCLUSION	55
5.	ANNEXES.....	56
5.1.	CONSTRUCTION - RÉSULTATS GLOBAUX DE LA PRODUCTION DE LA STRUCTURE POUR LES TROIS DÉCLINAISONS.....	56
5.2.	CONSTRUCTION - PRODUCTION DE LA STRUCTURE – EMPREINTE CARBONE DES DIFFÉRENTS ÉLÉMENTS POUR LES TROIS DÉCLINAISONS	59
5.3.	MOBILIER - COMPARAISON MULTI-INDICATEURS DU MOBILIER EN BOIS AVEC D'AUTRES SCÉNARIOS : CONTRIBUTION DES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE	62
5.4.	DESCRIPTION DES INDICATEURS D'IMPACT	65
5.5.	PLANS ET DIMENSIONNEMENT D'INGÉNIEURS.....	69

Résumé exécutif

1.1. Contexte

L'utilisation du bois dans le bâtiment, c'est-à-dire dans la construction et dans le mobilier, est encouragé par l'État de Genève, par exemple en encourageant le recours au bois dans les projets de construction émanant des pouvoirs publics¹. Cependant, des informations manquent au sujet de son bilan environnemental. Est-il préférable aux alternatives classiques ? Quel pourrait être sa contribution à la transition écologique et climatique de l'Etat de Genève. ?

Quantis a utilisé la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV, ou écobilan) pour répondre à cette question. L'écobilan permet d'évaluer l'empreinte environnementale d'un produit sur tout son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie, avec une approche multi-indicateur.

1.2. Construction

1.2.1. Description des scénarios

Plusieurs bâtiments « génériques » composés d'une structure simple (système poteau – poutres) et de murs extérieurs porteurs ont été modélisés par des bureaux d'architecture et d'ingénieurs, sur la base de plans d'un bâtiment existant. L'intérieur du bâtiment peut être organisé de façon flexible, afin de permettre différentes affectations tels que bureaux, logements ou écoles.

Deux typologies principales de construction ont été modélisées :

- bâtiment privilégiant les biomatériaux (structure bois, chape anhydrite, isolation en fibre de bois, etc.)
- bâtiment classique (structure béton, chape ciment, isolation polystyrène, etc.).

Les paramètres des bâtiments sont identiques, en particulier la surface brute de plancher, la performance énergétique (Minergie-P), la performance phonique, la résistance mécanique, la résistance au feu.

¹ Règlement d'application de la loi sur les forêts, art. 43.

Une typologie mixte supplémentaire (disponible uniquement dans le corps principal du rapport) a été modélisée afin de tester l'influence de l'utilisation de certains matériaux de la structure classique combinés avec des matériaux de la structure bois.

Par ailleurs, trois déclinaisons de hauteur sont proposées : R + 2 (deux étages sur rez), R + 5 et R + 8. Ces déclinaisons ont été définies afin de couvrir le spectre des bâtiments construits à Genève. L'effet du renforcement de la structure en fonction du nombre d'étages, ainsi que des contraintes supplémentaires de la norme anti-incendie pour les bâtiments de plus de 11 mètres sont ainsi pris en compte.



Figure 0-1 : Trois déclinaisons de hauteur de bâtiments étudiées pour chacune des trois typologies de construction

1.2.2. Résultats – Empreinte carbone

En terme d'empreinte carbone (impact sur les changements climatiques), le bâtiment en bois est sensiblement préférable au bâtiment classique. **L'empreinte carbone du bâtiment en bois (scénario R + 5) est 30% inférieure à celle du bâtiment classique².**

De plus, le bâtiment en bois stocke du carbone biogénique durant toute sa durée de vie, ce qui a un effet climatique bénéfique supplémentaire. Il s'agit du PRG bio, ou potentiel de réchauffement global pour les matériaux biogéniques. En intégrant le bénéfice climatique du stockage du bois (PRG bio), en considérant une durée de vie du bâtiment de 60 ans, l'empreinte carbone du scénario bois devient **70% inférieure à celle du scénario classique**. Plus la durée de vie du bâtiment augmente, plus le bénéfice est important, et inversement.

De même, le béton est un matériau pouvant capturer le dioxyde de carbone de l'atmosphère par une réaction chimique naturelle. Cependant, même si l'on considère la capture de carbone

² Dans l'analyse principale, les résultats sont présentés uniquement pour la phase de construction. Les impacts liés au traitement de fin de vie sont présentés en analyse de sensibilité en section 3.6.3.

maximale pendant toute la durée de vie du bâtiment et après sa fin de vie (concassage et stockage du béton), cet effet reste faible et le scénario bois reste nettement préférable au scénario classique.

La comparaison de ces scénarios est présentée dans la Figure 0-2.

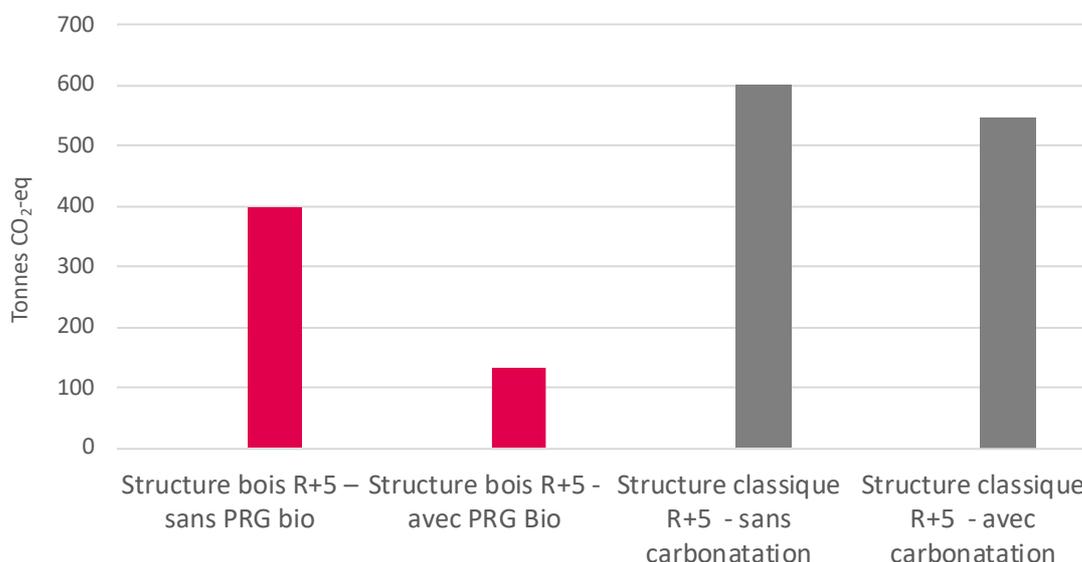


Figure 0-2: Comparaison de l'empreinte carbone de la production de la structure d'un bâtiment R+5 pour différents scénarios de structures bois et classique.

Ce résultat principal représente une piste d'action majeure pour réduire l'empreinte carbone de la construction d'une part, mais surtout une solution simple et éprouvée pour stocker du carbone biogénique à long terme. Réaliser des simulations à l'échelle du canton serait utile pour évaluer le potentiel de la construction en bois en vue d'atteindre les objectifs du plan climat cantonal.

Le deuxième enseignement de l'étude est **plus l'on augmente le nombre d'étages, plus les bénéfices de la construction en bois sont importants**, en tout cas jusqu'à la limite R + 8. En effet, le bâtiment bois étant un bâtiment léger, il y a peu de changement dans les éléments porteurs lorsque l'on augmente le nombre d'étages. Au contraire, il faut augmenter fortement le dimensionnement de la structure porteuse (sous-sol, rez-de-chaussée et armature dans les poteaux bétons) du bâtiment classique, afin de supporter le poids des étages supplémentaires.

Dans le détail, **la différence entre le bâtiment en bois et le bâtiment classique s'explique avant tout par l'empreinte carbone :**

- Des éléments porteurs : la production de ciment et la production d'acier d'armature ont beaucoup plus d'impact que la production des éléments porteurs en bois, malgré leurs connecteurs en acier ;

- De l'isolation : les panneaux en polystyrène (EPS) représentent trois à quatre fois l'impact des panneaux en fibre de bois ;
- De la chape : la chape en ciment représente un impact quatre fois plus important que la chape anhydrite.

Si la construction tout bois n'est pas possible ou souhaitée, cette analyse montre qu'une partie des gains environnementaux peuvent être réalisés en modifiant l'un ou l'autre des éléments de la construction. Le scénario mixte conçu dans le cadre de cette étude ne représente finalement pas un scénario optimum pour une diminution partielle des impacts, notamment en raison des dalles mixtes béton/bois, qui nécessitent une grande quantité de ferrures et visserie afin de supporter le poids d'une telle dalle. L'analyse du scénario mixte dans son ensemble, par élément structurel et par matériau permettent de définir quels sont les éléments qui peuvent être utilisés en priorité pour diminuer les impacts d'un bâtiment classique : les dalles d'étage (structure complètement bois au lieu de structure bois/béton, chape anhydrite), puis la structure de l'enveloppe extérieure (poteaux bois et murs extérieurs en panneaux de bois au lieu de briques en terre cuite), l'isolation, et dans une moindre mesure les cloisons intérieures.

1.2.3. Résultats – Autres indicateurs

En raison de l'urgence climatique et de la fiabilité de cet indicateur, l'indicateur principal considéré dans l'étude est l'empreinte carbone. Toutefois, comme les enjeux de la transition écologique vont plus loin que le seul climat, d'autres indicateurs sont intégrés à l'étude, et notamment les impacts sur les écosystèmes (biodiversité). Ces indicateurs sont toutefois nettement plus incertains que l'empreinte carbone.

Sans tenir compte des effets indirects des changements climatiques sur les écosystèmes, les impacts sur les écosystèmes sont plus élevés pour la construction en bois que pour la construction classique³.

Si l'on considère les effets indirects du changement climatique sur les écosystèmes, l'écart entre les scénarios s'atténue fortement.

Quoiqu'il en soit, l'exploitation d'une forêt n'est pas sans effet sur l'écosystème forestier par rapport à une forêt laissée à l'état naturel. L'évaluation faite dans cette étude considère une exploitation forestière moyenne européenne. Il faut noter que des variations significatives dépendent du type d'exploitation forestière, difficilement quantifiables aujourd'hui par la méthode retenue dans l'étude. L'utilisation du bois dans les constructions de l'État devraient donc provenir de forêts gérées durablement (par exemple, label FSC), situées à proximité de

³ Ce constat ne tient pas compte des impacts des changements climatiques sur les écosystèmes terrestres ou aquatiques. Cependant et malgré les incertitudes scientifiques en vigueur, les économies de CO₂-eq de la solution bois viennent atténuer les impacts sur la biodiversité de l'exploitation des forêts, en particulier si elles sont gérées durablement.

Genève (par exemple, < 300 km). Par ailleurs, la pression sur la ressource forestière s'accroît, en particulier pour l'utilisation de bois-énergie. Une utilisation judicieuse et rationnelle de la ressource devrait pousser à une utilisation en cascade : en premier lieu sous forme de ressource-matière puis seulement sous forme énergétique.

L'étude ne permet pas de conclure de manière significative au sujet des autres indicateurs d'impact. Il est important de noter que l'indicateur « santé humaine » analysé dans la présente étude représente les impacts indirects tout au long du cycle de vie, mais ne représente pas les impacts directs liés aux émissions pendant le chantier (par exemple, gestion des poussières) et lors de l'utilisation du bâtiment (par exemple, émissions de formaldéhydes). Ces effets sur la santé humaine dépendent fortement de choix précis des matériaux utilisés pour les revêtements intérieurs (dérivés du bois, peintures, revêtements de sols, etc.) Ce niveau de détail va au-delà de l'étude qui fait l'objet de ce rapport. Plusieurs aides existent pour maîtriser cet aspect, comme le volet ECO du label Minergie ainsi que les fiches techniques produites spécifiquement par l'association Lignum au sujet des produits dérivés du bois. Nous recommandons à l'État de Genève d'imposer des critères spécifiques à ce sujet.

1.3. Mobilier

Le second volet de l'étude concerne le mobilier, où les scénarios suivants ont été comparés :

- Mobilier en lamellé-collé (bois d'épicéa) ;
- Mobilier en panneau de fibre de bois recouvert d'une laque en polyuréthane ;
- Mobilier en métal et résine époxy, recouvrant un panneau de particules.

Les résultats sont clairement en faveur du bois en lamellé-collé, pour tous les indicateurs, et en particulier pour l'empreinte carbone. Le résultat dépend non seulement de la production du mobilier, mais aussi de la fin de vie. En effet, l'incinération en UVTD (usine de valorisation et de traitement des déchets) permet de remplacer la combustion de ressources fossiles pour alimenter le réseau de chauffage à distance ou pour la production d'électricité..

1.4. Conclusion

L'utilisation du bois dans la construction et pour le mobilier est souhaitable du point de vue environnemental, et plus particulièrement en terme d'impact sur le changement climatique.

Des politiques publiques devraient dès lors être mises en œuvre pour favoriser l'utilisation du bois dans le parc immobilier de l'État de Genève, mais également des autres collectivités publiques et des privés. Si le « tout en bois » présente le meilleur bilan, des solutions intermédiaires moins contraignantes peuvent constituer un consensus raisonnable, plus facile à mettre en œuvre.

Favoriser le bois dans la construction est une mesure importante, et souvent négligée, des stratégies climatiques des organisations, pour :

- Réduire leurs émissions de gaz à effet de serre
- Stocker du carbone biogénique dans l'anthroposphère, de façon simple et efficace.

Afin d'éviter d'éventuels effets indésirables de ces politiques publiques, il convient d'imposer l'utilisation de bois provenant de ressources forestières locales et gérées durablement (par exemple selon le label FSC), si possible.

En outre, un accompagnement devrait être apporté pour assurer une excellente qualité de l'air intérieur afin de minimiser les impacts directs sur la santé humaine pendant la phase d'utilisation. Différents cadres émettent des recommandations et freinent l'usage de matériaux susceptibles de polluer l'air intérieur, dont certains sont des dérivés du bois.

1. Contexte

L'utilisation du bois dans le bâtiment, c'est-à-dire dans la construction et dans le mobilier, est encouragé par l'État de Genève, par exemple en encourageant le recours au bois dans les projets de construction émanant des pouvoirs publics⁴.

A priori, privilégier l'utilisation d'une ressource renouvelable locale telle que le bois devrait être bénéfique pour l'environnement. En effet, le bois stocke du carbone et les faibles distances de transport permettent de réduire l'énergie grise de la construction.

L'État de Genève souhaite vérifier cette intuition en conduisant une étude pour comprendre l'empreinte environnementale de l'utilisation du bois dans la construction, que ce soit pour la construction des bâtiments ou leur ameublement. Cette étude devrait permettre d'estimer la contribution possible de l'utilisation du bois dans la transition écologique et climatique souhaitée par l'État de Genève.

Pour la construction, différentes typologies d'immeubles de bureaux sont analysés.

Pour le mobilier, une comparaison est réalisée pour un meuble-type représentatif d'autres pièces de mobilier, en l'occurrence une table de bureau.

2. Méthodologie

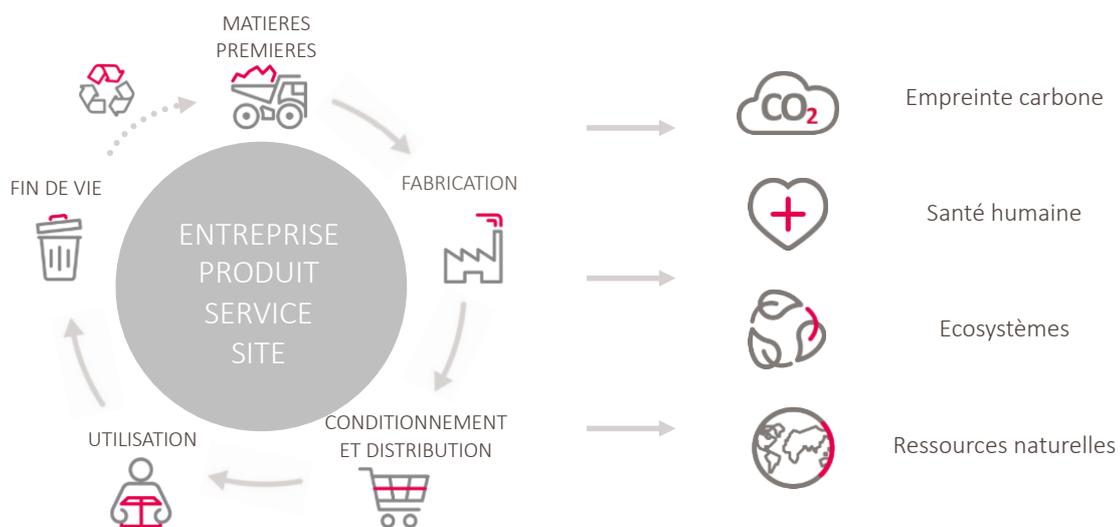
2.1. Analyse du cycle de vie

L'analyse du cycle de vie quantifie les impacts sur l'environnement d'un produit en :

- prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières jusqu'à sa fin de vie ;
- proposant une compréhension multi-indicateurs, afin de refléter de la façon la plus exhaustive possible l'ensemble des impacts environnementaux d'une activité.

Le principe de la méthodologie de l'ACV est schématisé dans la figure ci-dessous. Quantis réalise l'analyse pour l'ensemble des indicateurs d'impact de la méthode considérée, et communique les indicateurs les plus pertinents.

⁴ Règlement d'application de la loi sur les forêts, art. 43.



Dans le cadre de ce projet, la méthode d'évaluation des impacts environnementaux est IMPACT 2002+, dont les indicateurs sont décrits en annexe, et la base de données d'inventaire est la base de données ecoinvent v3.

2.2. Sélection des indicateurs pertinents

Les résultats de l'étude sont présentés dans un premier temps pour l'indicateur *Empreinte carbone*, pour des raisons de simplifications du message d'une part, mais aussi pour les raisons suivantes :

- Il s'agit de l'indicateur pour lequel l'incertitude est la plus faible, notamment parce qu'il s'agit d'un inventaire d'émissions à l'air et non de la modélisation d'un impact ;
- Si l'on considère une autre méthodologie d'analyse de l'impact que IMPACT 2002+ (e.g. ReCiPe⁵), on considère qu'il y a trois aires de protection à considérer pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit ou d'un service: la santé humaine, la biodiversité (écosystèmes), et la disponibilité des ressources naturelles. Dans cette méthodologie, le changement climatique (ou Empreinte carbone) est un des phénomènes ayant un impact sur la santé humaine, tout comme l'émission de particules fines par exemple. De même, le changement climatique est un des phénomènes ayant un impact sur la biodiversité, au même titre que l'eutrophisation ou l'acidification des sols. Lorsque l'on analyse l'impact du mobilier et de la construction sur ces deux aires de protection en utilisant la méthode ReCiPe, le

⁵ Description disponible ici: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>

Huijbregts MAJ, Steinmann ZJN, Elshout PMF, Stam G, Verones F, Vieira MDM, Hollander A, Van Zelm R, 2016. ReCiPe2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. RIVM Report 2016-0104. Bilthoven, The Netherlands.

changement climatique (ou Empreinte carbone) est l'un des principaux contributeurs aux dommages sur la santé humaine et sur la biodiversité. Pour cette raison, les résultats de l'indicateur *Empreinte carbone* sont donc représentatifs également des impacts sur la santé humaine et sur la biodiversité.

Enfin, dans un deuxième temps, les résultats sont analysés pour l'ensemble des indicateurs de la méthodologie IMPACT 2002+ (Empreinte carbone, Santé humaine, Qualité des écosystèmes et Ressources) afin de conserver la vision multicritères propre à l'ACV, et relever d'éventuels mises en garde pour ces autres indicateurs.

Santé humaine : impact directs et impacts indirects

L'indicateur *Santé humaine* proposé dans la présente étude représente les impacts indirects sur la santé humaine liés aux émissions qui ont lieu tout au long de la chaîne de valeur du bâtiment. Cela peut être par exemple les émissions issues de la combustion de diesel pour les différentes étapes de transport tout au long de la chaîne de valeur du bâtiment. Il est important de noter que l'incertitude liée à cet indicateur est élevée.

Les impacts sur la santé humaine liés aux émissions directes pendant la phase de fabrication ou de construction (affectant les ouvriers et les riverains) et aux émissions directes pendant toute l'utilisation du bureau ou pendant l'exploitation du bâtiment (affectant les utilisateurs du mobilier ou du bâtiment) ne sont pas prises en compte dans cet indicateur, et peuvent varier très fortement au cas par cas. Il s'agit par exemple de certains matériaux de construction qui peuvent émettre des substances affectant la qualité de l'air à l'intérieur du bâtiment encore longtemps après la construction, telles que les formaldéhydes ou certains composés organiques volatils.

2.3. Le bois : effet climatique du stockage de carbone

Les matériaux à base de bois sont des matériaux que l'on dit « bio-sourcés » (matériaux issus de la biomasse d'origine animale ou végétale), et contiennent du carbone que l'on dit « biogénique ». Ce carbone biogénique vient de l'absorption de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique par la plante au cours de la croissance (sous l'effet de la photosynthèse), incorporé ainsi dans la biomasse. Ce carbone biogénique peut ensuite être libéré lors de la décomposition ou de la combustion en fin de vie. Le bois est donc un matériau « carbone neutre » : le dioxyde de carbone capturé par l'arbre lors de sa croissance est entièrement réémis dans l'atmosphère lors de l'incinération de cet arbre en fin de vie, amenant à un équilibre final de 0 kg CO₂-eq.

Cependant, un produit “carbone neutre” ne signifie pas “climatiquement neutre” en raison du délai entre l’émission de carbone biogénique et le moment de la pleine repousse de la plante. Dans l’analyse principale (mobilier et construction), l’effet climatique lié au stockage à plus ou moins long terme de ce carbone biogénique n’est pas considéré (conforme à la norme NEN-EN 15804+A2⁶).

Quantis propose cependant de réaliser systématiquement une analyse de scénario afin d’évaluer les effets climatiques du stockage de carbone biogénique, en évaluant un potentiel de réchauffement global (PRG bio) qui tient compte de la **période de stockage du produit** et de la **période de rotation** de la forêt⁷.

En raison du temps de croissance des arbres, on considère qu’un produit forestier doit durer au moins la moitié du temps de rotation forestière pour atteindre la neutralité climatique. En dessous de ce ratio, le produit (s’il est incinéré) libère son carbone trop tôt pour réaliser un profit et génère un impact. Au-dessus de ce ratio, il y a un avantage.

Le PRG bio varie donc théoriquement entre + 1 et -1 kg CO₂-eq/kg CO₂ biogénique en fonction de la durée de vie du produit et de la période de rotation de la culture (période de croissance de l’essence utilisée). La valeur - 1 kg CO₂-eq/kg CO₂ biogénique correspond à un crédit de carbone total dans le cadre d’une période de rotation très courte (exemple : bambou) et d’une durée d’utilisation très longue (exemple : charpente de cathédrale multi-centenaire). A l’inverse, la valeur de +1 kg CO₂-eq/kg CO₂ biogénique ne présente aucune valeur de stockage de carbone biogénique. C’est le cas de produit à durée de vie très courte (ex : crayon, papier) produit à partie de période de rotation très longue (ex : baobab, séquoia). Un exemple réel est celui de l’utilisation de poteaux en bois d’épicéa dans la construction, pour une période de 60 ans. On estime que la période de rotation de l’épicéa en Suisse pour la production de poteaux en bois est de 50 ans. Dans ce cas précis, le PRG bio est de -0.309 kg CO₂-eq/kg CO₂ biogénique, correspondant à un stockage de carbone bénéfique du point de vue climatique.

Ainsi, le stockage de carbone dans le bois utilisé pour la construction représente un bénéfice climatique du fait d’une période de rotation plus courte que la période de stockage, alors que le stockage de carbone dans le bois utilisé pour le mobilier représente un impact climatique

⁶ Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products

⁷ Guest G, Cherubini F, Strømman AH (2013) Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and Used for Bioenergy at End of Life. *J Ind Ecol* 17:20–30. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x

Levasseur A, Lesage P, Margni M, et al (2010) Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. *Environ Sci Technol* 44:3169–74. doi: 10.1021/es9030003

Levasseur A, Lesage P, Margni M, Samson RR (2013) Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. *J Ind Ecol* 17:117–128. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x

du fait d'une période de rotation plus longue que la période de stockage. Ces analyses sont présentées dans la section 3.6.2 pour la construction, et dans la section 4.5.4.2 pour le mobilier.

2.4. Le béton : capture de dioxyde de carbone par le phénomène de carbonatation

Le béton est un matériau qui peut capturer du dioxyde de carbone atmosphérique par une réaction chimique naturelle: le CO₂ atmosphérique pénètre dans le béton et réagit avec les produits d'hydratation (Ca (OH)₂). La carbonatation devient un problème lorsqu'elle atteint l'armature (rouille), raison pour laquelle des additifs sont inclus dans le béton afin d'éviter la carbonatation.

La carbonatation a lieu pendant la phase d'utilisation du bâtiment, puis pendant et après la fin de vie :

- La carbonatation pendant la phase d'utilisation est liée à la surface de béton exposée (progressive ensuite dans l'épaisseur), puis au type de béton, aux conditions auxquelles est exposé le béton (intérieur, extérieur, exposé à la pluie, etc...) qui vont définir la profondeur de carbonatation ;
- La carbonatation pendant et après la fin de vie est liée au traitement du béton (concassage) et au temps de stockage.

Dans le cadre de la présente étude, on considère les conditions les plus favorables à la carbonatation du béton pour recalculer les impacts des différentes typologies⁸ afin de voir si les conclusions de l'étude peuvent être renversées :

- Le béton est considéré non traité contre la carbonatation (l'utilisation d'additifs dans le béton permet de réduire la carbonatation du béton en contact direct avec l'air) ;
- On considère qu'en fin de vie, le béton est concassé en petits morceaux puis stocké un grand nombre d'années avant d'être mis en décharge ou réutilisé, permettant d'atteindre une valeur maximale de carbonatation qui correspond à 75% de la carbonatation maximale théorique du clinker.

Cette analyse est présentée dans la section 3.6.2 pour la construction.

⁸ Calculs réalisés selon la norme: *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements; English version EN 16757:2017 – Annex BB*

3. Construction

3.1. Périmètre de l'étude

L'objet modélisé est un bâtiment « hors d'eau », c'est à dire qui comprend toute l'enveloppe extérieure (structure, cloisons extérieures, toiture, façades et fenêtres). L'unité fonctionnelle, à savoir l'objet d'étude, est la suivante :

« Fournir un bâtiment « hors d'eau » sur toute sa durée de vie, dans le Canton de Genève ».

Une durée de vie de 60 ans est considérée pour le bâtiment⁹.

3.2. Étapes du cycle de vie considérées

La présente étude est une analyse **comparative** complète de type « **berceau à la tombe** » avec les caractéristiques suivantes :

- Excluant **les étapes identiques** des scénarios considérés;
- Comprenant chacune des étapes du cycle de vie d'un bâtiment de l'extraction des matières premières jusqu'à la gestion des déchets de déconstruction en fin de vie.

La Figure 3-1 présente les frontières du système pour les différences scénarios.

⁹ Cahier technique SIA 2032 – L'énergie grise des bâtiments – Annexe C Durée d'amortissement

FRONTIÈRES DU SYSTEME

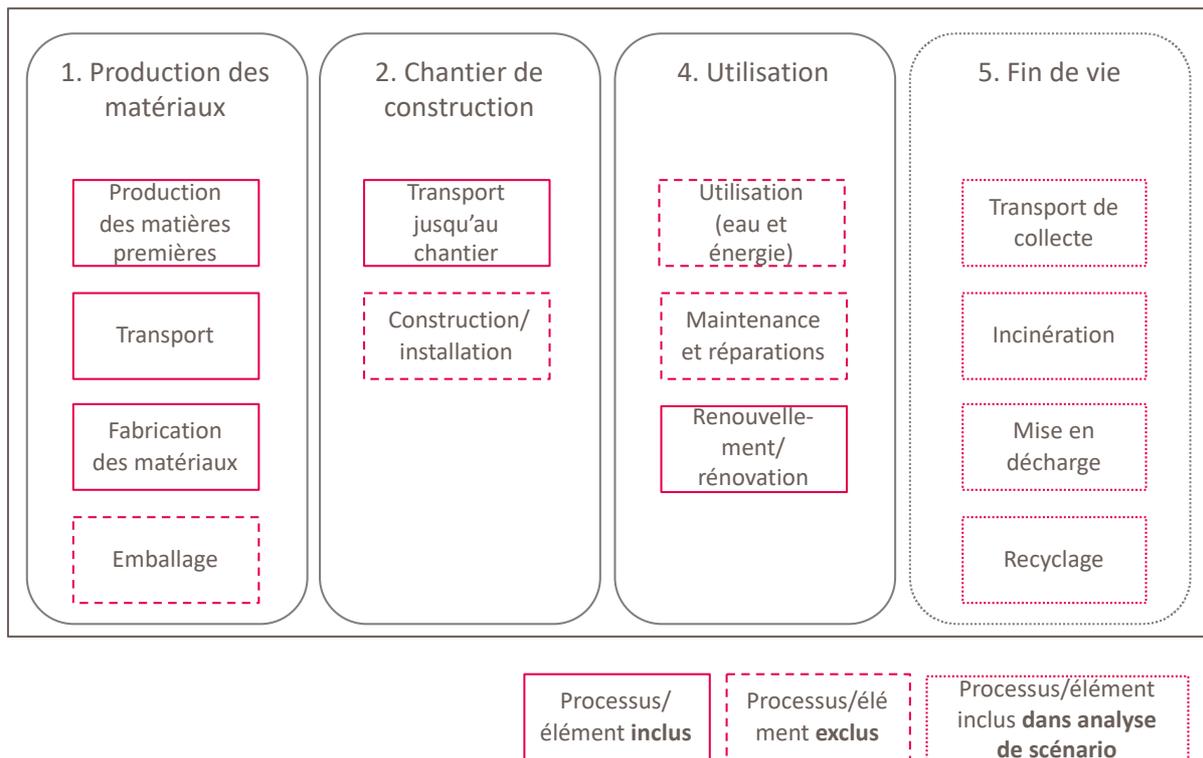


Figure 3-1: Frontières du système: étapes et sous-étapes du cycle de vie incluses et exclues de l'analyse

Les étapes **exclus** des frontières du système sont:

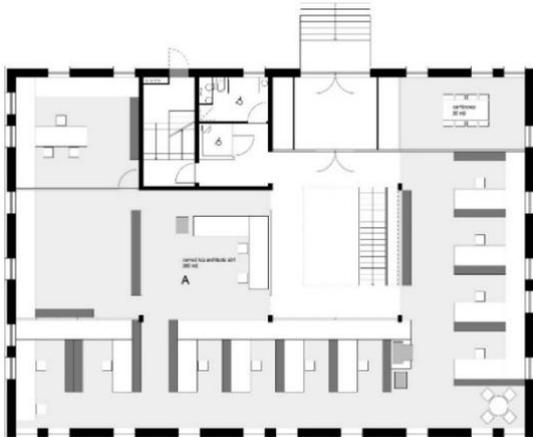
- Les emballages des matériaux (production et fin de vie), les impacts étant considérés négligeables¹⁰;
- Le processus de construction installation (chantier de construction), incluant la consommation d'énergie et d'eau, les transports sur site, et le traitement des déchets de chantiers, les impact étant considérés négligeables ¹⁰;
- Les consommations d'énergie et d'eau pendant l'utilisation du bâtiment, celles-ci étant considérées identiques pour les trois typologies de bâtiments (mêmes performances thermiques), ainsi que la maintenance et les réparations mineures. En revanche, les rénovations majeures liées à une durée de vie inférieure à 60 ans de certains éléments sont incluses dans le cadre de l'étude (voir section 3.5).

La phase de fin de vie n'est pas considérée dans l'analyse principale du rapport en raison de la haute incertitude sur le traitement des déchets de déconstruction 60 ans après la construction. La fin de vie est donc présentée en analyse de scénario dans la section 3.6.3.

¹⁰ Cahier technique SIA 2032 – L'énergie grise des bâtiments

3.3. Description générale des scénarios

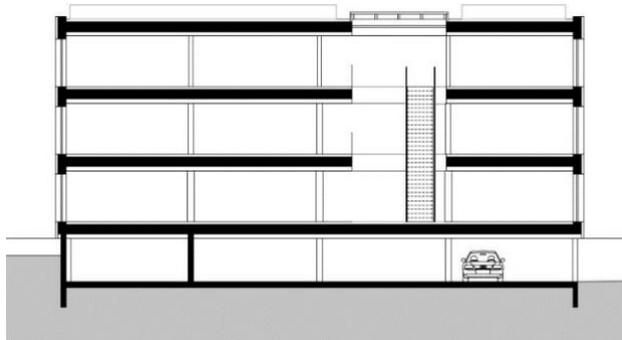
L'étude propose de se baser sur un bâtiment «générique» composé d'une structure simple (système poteau – poutres) et d'un mur extérieur porteur. Les étages présentent des espaces en open-space qui peuvent facilement être divisés avec des cloisons intérieures afin d'accueillir des bureaux, du logement ou même un établissement scolaire.



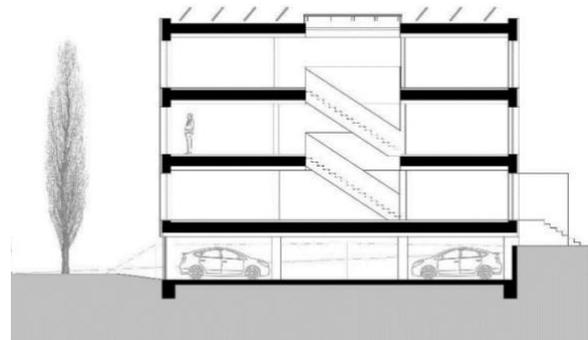
Rez-de-chaussée



Etage type



Coupe longitudinale



Coupe transversale

Cette typologie présente des compositions de matériaux qui reprennent tous les éléments couramment utilisés lors de la construction de bâtiments traditionnels. Toute la structure porteuse est en béton (poteaux, dalles, contreventement), les murs extérieurs sont en maçonnerie, les cloisons intérieures en plaques de plâtre et l'isolation périphérique est en polystyrène.

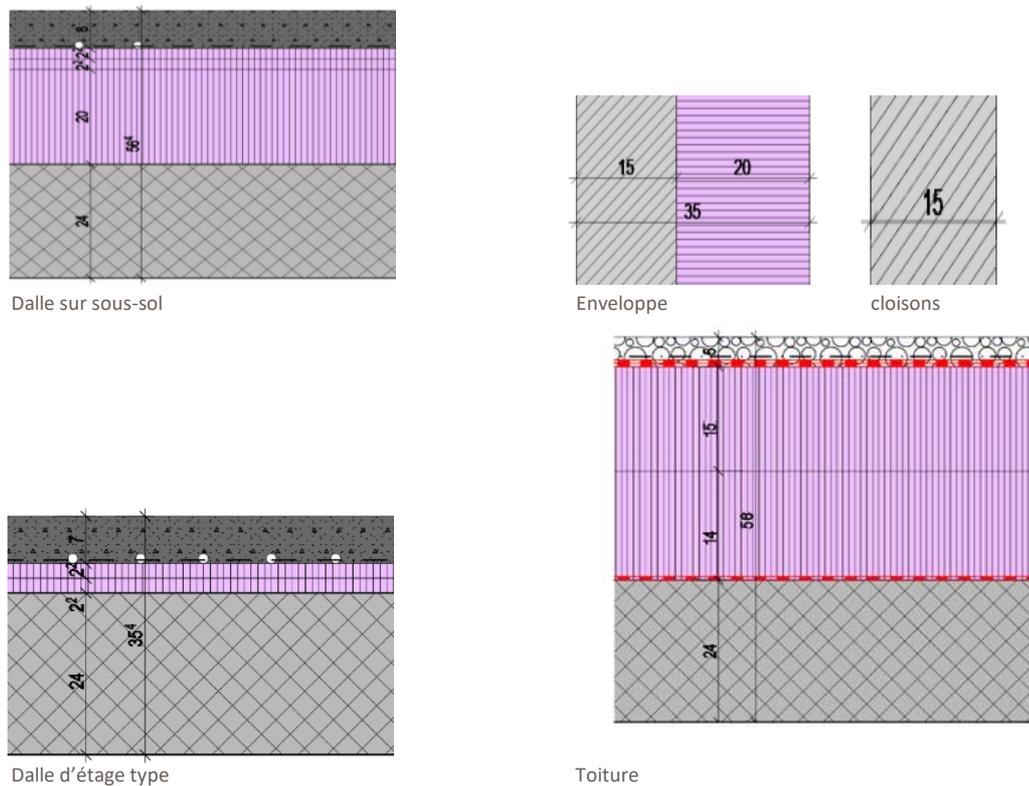
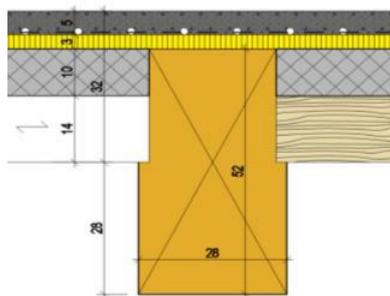


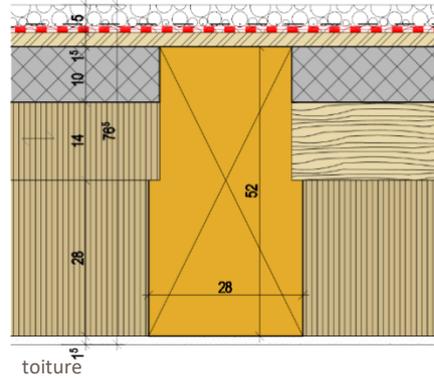
Figure 3-3: Coupes et composition des différents éléments structurels de la typologie structure classique

- Typologie structure mixte

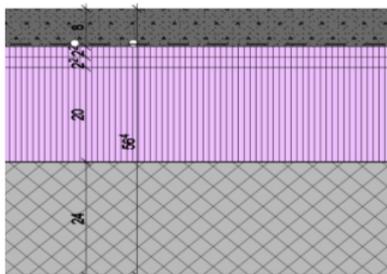
Pour ce bâtiment, une structure mixte bois-béton est analysée avec des compositions de matériaux alternatifs aux deux typologies ci-dessus pour augmenter le spectre des matériaux analysés. Cette typologie permet de vérifier quels efforts peuvent être facilement réalisés dans la recherche d'une solution intermédiaire et quelles compositions ont le plus d'impact lors de la construction d'un bâtiment.



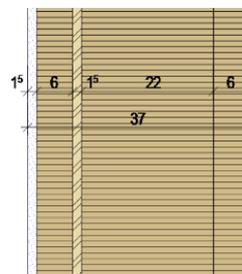
Dalle d'étage type



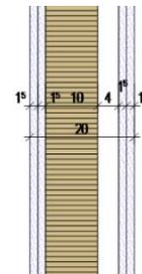
toiture



Dalle sur sous-sol



Enveloppe



cloisons

Figure 3-4: Coupes et composition des différents éléments structurels de la typologie structure mixte

Par ailleurs, trois déclinaisons de hauteurs du même bâtiment seront analysés pour chacun des système constructif ci-dessus : Rez + 2 étages (R + 2), R + 5, R + 8. L'intérêt de cette déclinaison est de vérifier l'incidence de la hauteur sur l'impact des bâtiments afin de mieux rentabiliser la surface au sol mais également de vérifier « l'amortissement » de l'impact du socle du bâtiment (sous-sol et rez-de-chaussée) en fonction du nombre d'étage. Les déclinaisons R + 5 et R +8 correspondent à la plupart des constructions actuelles sur sol genevois. R + 2, rare aujourd'hui à Genève en nouvelle construction, présente toutefois un intérêt car un immeuble de moins de 11 mètres doit respecter des contraintes beaucoup moins complexes en terme de protection anti-incendie.



Figure 3-5: Modélisation des différentes déclinaisons de bâtiments (R+2, R+5, R+8)

Le tableau suivant résume les neuf scénarios analysés dans la présente étude, pour les trois typologies de bâtiments et les trois déclinaisons :

Table 3-1: Présentation des neuf scénarios analysés dans la présente étude.

	Déclinaison R + 2	Déclinaison R + 5	Déclinaison R + 8
Typologie structure bois	X	X	X
Typologie structure classique	X	X	X
Typologie structure mixte	X	X	X

3.4. Détails architecturaux des scénarios

3.4.1. Généralités

Afin que les différents scénarios soient comparables entre eux, l'ensemble des typologies structurelles et déclinaisons de nombre d'étages présentent des compositions analogues. Ainsi, les scénarios sont relativement homogènes par rapport à leur performance phonique (deux types de performance phonique sont inclus dans chaque scénario), performance énergétique (Minergie-P), résistance mécanique, résistance au feu, épaisseur totale des compositions (dalles, enveloppe, cloisons).

Chaque scénario a été entièrement modélisé et dimensionné par des bureaux d'ingénieur spécialisés (Bois Initial Sa et SEGC SA) afin de prendre en compte les variantes de hauteur,

l'incidence sur le dimensionnement des fondations et des étages inférieurs, respect des contraintes sismiques et résistance aux efforts horizontaux (pression de vents).

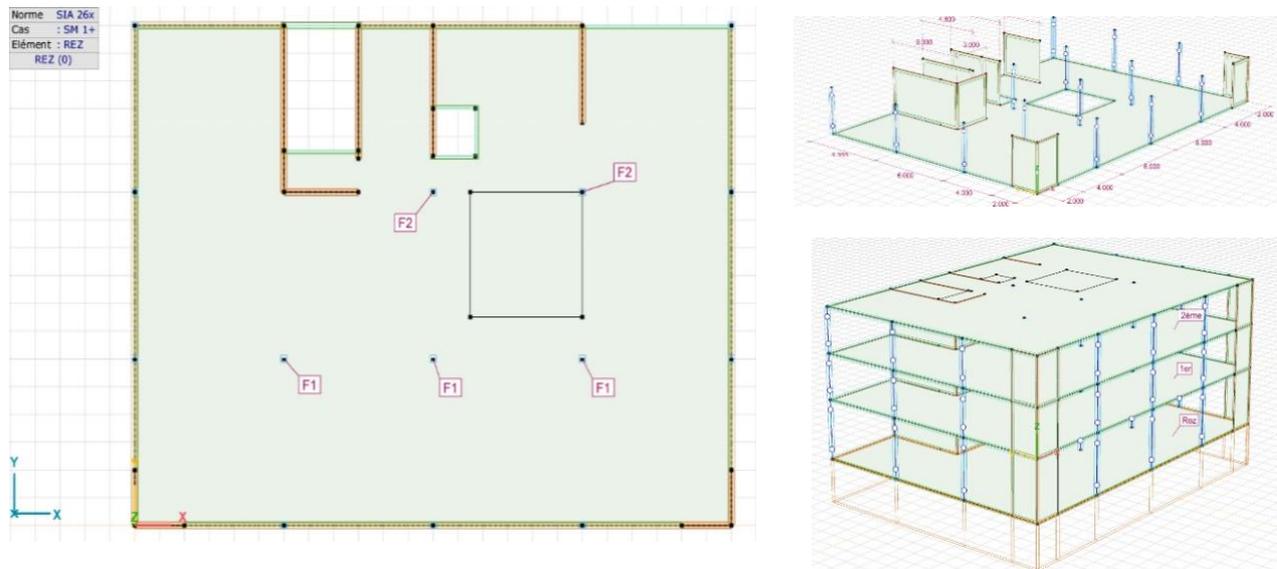


Figure 3-6: Calculs statiques du bâtiment béton

En outre l'analyse présente des bâtiments complets, mais sans finition intérieure ni équipement technique. Ces éléments étant totalement interchangeable et au gré des utilisateurs, ils ne constituent pas des facteurs déterminants pour conduire l'étude de l'analyse comparative du cycle de vie.

3.4.2. Description générale du bâtiment

L'étude se base sur un bâtiment à la forme simple et aux surfaces modulables afin de pouvoir s'appliquer à plusieurs fonctions. La forme, les surfaces et le fonctionnement est identique pour tous les scénarios.

Composition du bâtiment :

Sous-sol : Composé d'un socle en béton et maçonnerie pour tous les scénarios, il comporte un parking, un local technique et un local rangement/archives. 50% de la surface du sous-sol est chauffée (tempérée) et l'autre partie est froide (parking, caves non chauffées, etc.). La hauteur est de 2.20m.

Rez-de chaussée : Ce niveau est légèrement plus haut que le terrain et présente une hauteur importante (3.70m) pour accueillir des fonctions diverses. Un

noyau de circulation vertical en lien avec l'entrée et l'atrium central assure la distribution dans les étages.

Étages : Tous les niveaux supérieurs sont identiques. Ils sont composés d'espaces libres organisés autour de l'atrium. Le noyau de circulations assure la distribution (y.c en cas d'incendie) et sert d'élément rigide pour contreventer le bâtiment. La hauteur est de 2.76m. Deux types de composition acoustique sont simulées pour chaque bâtiment : une composition avec une performance acoustique standard et une seconde avec une performance accrue pour mieux correspondre aux contraintes normalement exigées pour ce type de bâtiment.

Toiture : Le bâtiment possède une toiture plate recouverte de gravier. Selon les scénarios, la pente nécessaire à l'écoulement de l'eau est réalisée par de l'isolation de pente ou une construction en bois située au-dessus des caissons isolés. Dans tous les cas, l'étanchéité est assurée par des lés d'étanchéité bitumineux.

3.4.3. Description des typologies

Typologie structure bois

Cette typologie comprend un sous-sol en béton sur lequel est construit tous les étages en bois. La section des poteaux est dégressive en fonction du nombre d'étages. Le contreventement est assuré par le noyau de circulations verticales et des éléments de charpente insérés dans les façades.

La structure des planchers est assurée par des dalles à caissons préfabriqués. L'acoustique est assurée par une composition de graviers calcaires et d'une isolation en fibre de verre complétée par une chape anhydrite.

Les éléments d'enveloppe sont composés de murs préfabriqués qui s'insèrent entre les dalles d'étage et participent à la statique. Ils sont composés de structures de bois collés, de fermacell et de panneaux OSB. L'isolation présente à l'intérieur des éléments est composée de fibre de bois. Les agrafes, les fixations scotch et la colle nécessaire à l'assemblage du bâtiment ont également été pris en compte¹².

Les cloisons intérieures sont composées d'une structure bois (duo), de plaques fermacell et d'isolation acoustique en fibre de bois. Deux compositions ont été simulées (une première composition avec une atténuation phonique standard (parois d'environ 10cm) entre deux

¹² La composition complète ainsi que tous les paramètres liés aux matériaux pris en compte dans chaque scénario est disponible dans les annexes de l'étude.

locaux et une seconde avec une performance accrue (parois d'environ 15cm)) pour mieux correspondre aux contraintes normalement exigées pour ce type de bâtiment. L'amélioration de la performance est réalisée par une augmentation du poids de la parois et une épaisseur plus importante de l'isolation acoustique.

La toiture est composée, comme les planchers, d'éléments à caisson surmontés d'une structure en bois ventilée et d'une couche d'étanchéité bitumineuse et de graviers. L'isolation est assurée par de la fibre de bois.

Typologie structure classique

Dans ce scénario, tous les niveaux sont construits en béton et maçonnerie. Le poids du bâtiment joue un rôle important dans le dimensionnement des murs et piliers. Le sous-sol et les fondations selon le nombre de niveau présente des caractéristiques qui peuvent être très différentes. Dans les espaces de travail, la section des poteaux est dégressive en fonction du nombre d'étages mais la descente des charges est grandement assurée par une augmentation de l'armature plutôt que l'augmentation de la section. Le contreventement est assuré par le noyau de circulations verticales et des éléments en béton dans chaque angle du bâtiment

La structure des planchers est composée d'une dalle pleine de 24 cm qui permet de réaliser les éléments porteurs sans sommiers tout en intégrant la technique du bâtiment. L'acoustique est assurée par une isolation en fibre de verre et une isolation polystyrène (EPS) complétée par une chape ciment.

L'enveloppe du bâtiment est composée de briques de terre cuite et de polystyrène.

Les cloisons intérieures sont réalisées en briques de plâtre (ALBA) de différentes épaisseurs pour correspondre aux deux performances acoustiques modélisées.

La toiture se compose comme les planchers d'une dalle de 24cm isolée avec 10 cm de PUR (polyuréthane) et une isolation de pente en polystyrène d'une hauteur comprise entre 12 et 18cm (moyenne 15cm). L'étanchéité est assurée par une membrane bitumineuse, protégée par du gravier.

Typologie structure mixte

La typologie mixte présente un bâtiment intermédiaire entre le « tout bois » et le « tout béton ». Le sous-sol reprend les compositions de béton et maçonnerie des deux autres scénarios, y compris pour la dalle du rez-de-chaussée qui est aussi en béton. Par contre les étages sont composés de dalle bois-béton réalisée à l'aide d'une dalle massive en bois de 14 cm liée à une dalle béton de 10 cm. L'acoustique est assurée par une isolation en laine de verre et une isolation EPS complétée par une chape ciment.

Les poteaux sont en bois et la section est dégressive en fonction de la hauteur du bâtiment. Le contreventement est assuré par le noyau de circulations verticales et des éléments de charpente insérés dans les façades.

Les éléments d'enveloppe sont composés de murs préfabriqués qui s'insèrent entre les dalles d'étage et participent à la statique. Ils sont composés de structures de bois collés, de fermacell et d'OSB. L'isolation présente à l'intérieur des éléments est composée de fibre de bois.

Les cloisons sont composées de profilés en acier (montants métalliques), de plaques de plâtre et d'isolation acoustique en laine de verre. Deux compositions ont été simulées (une première composition avec une atténuation phonique standard (parois d'environ 10cm) entre deux locaux et une seconde avec une performance accrue (parois d'environ 15cm)) pour mieux correspondre aux contraintes normalement exigées pour ce type de bâtiment. L'amélioration de la performance est réalisée par une augmentation du poids de la parois et une épaisseur plus importante de l'isolation acoustique.

La toiture se compose comme les planchers d'une dalle mixte bois-béton isolée avec de la fibre de bois. L'étanchéité est assurée par une membrane bitumineuse, protégée par du gravier.

3.4.4. Description des façades

L'analyse du cycle du vie des bâtiments et des façades a été volontairement dissociée afin de pouvoir proposer différentes solutions de parements extérieurs indépendamment du système constructif (c'est à dire typologie bois, classique ou mixte). L'aspect esthétique des façades étant un point majeur de l'architecture, le choix est rarement dicté par les valeurs écologiques. Il n'est pas moins intéressant d'analyser plusieurs types de façades avec trois matériaux distincts afin de comparer l'impact des solutions entre elles mais aussi la pondération que représente la façades sur l'analyse globale d'un bâtiment. Les trois solutions comparées sont :

- Façade en bois (ventilée) et façade en verre (ventilée).
- Façade crépis (sur isolation périphérique),
- Façade en verre (ventilée)



Exemple de façade en bois
Swisswoodhouse, © Renggli



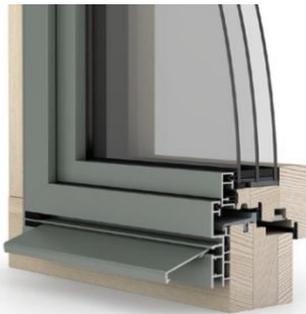
Exemple de façade en verre
© Kurth Glas + Spiegel AG



Exemple de façade crépis
© STO AG

3.4.5. Fenêtres

Deux types de fenêtres ont été choisies pour compléter l'enveloppe des bâtiments : bois-alu et PVC-alu. Ces deux types ont été choisis pour leur performances thermiques intéressantes et leur longue durée de vie ne nécessitant aucun entretien du fait de leur doublage en aluminium les protégeant des intempéries et des UV. Elles présentent également des qualités esthétiques qui permettent de s'adapter aux 3 types de bâtiment et d'offrir une large palette de couleur et textures.



Exemple de fenêtre bois alu
© EgoKiefer



Exemple de fenêtre PVC alu
© EgoKiefer

3.5. Durées de vie du bâtiment et des différents éléments

Le tableau ci-dessous présente la durée de vie du bâtiment et des différents éléments pour une usure classique. Les dommages liés aux accidents (ex : grêle) ne sont pas inclus dans le cadre de l'étude, et donc dans l'évaluation de la durée de vie des éléments.

Table 3-2: Durée de vie des différents éléments du bâtiment

Élément considéré	Durée de vie
Bâtiment complet (avant rénovations structurelles majeures)	60 ans
Dalles, cloisons extérieures, cloisons intérieures	60 ans
Toiture typologie bois et mixte	60 ans, 30 ans pour les éléments de toiture supérieurs listés ci-dessous: <ul style="list-style-type: none">• Gravier• Membrane• Géotextile
Toiture typologie classique	60 ans, 30 ans pour les éléments de toiture supérieurs listés ci-dessous:

	<ul style="list-style-type: none"> • Gravier • Membrane • Géotextile • Isolant polystyrène
Façade bois	60 ans
Façade verre	60 ans
Façade crépis	30 ans
Fenêtres (tous types de fenêtres)	30 ans

3.6. Résultats

Les résultats sont présentés en premier lieu pour l'indicateur *Empreinte carbone*, afin de faciliter la compréhension, mais également en raison de la pertinence de cet indicateur (voir explications détaillées en section 2.2). Les résultats multi-indicateurs sont présentés dans un second temps, en section 3.6.9.

Remarque : les résultats **Empreinte carbone** présentés dans le rapport **n'incluent ni les effets climatiques liés au stockage de carbone, ni la capture de carbone par carbonatation du béton**. L'influence de ces phénomènes est présentée en section 3.6.2.

3.6.1. Production de la structure – Analyse comparative de l'empreinte carbone totale

La comparaison de l'*Empreinte carbone* des typologies de production de l'ensemble de la structure (excluant les façades et fenêtres, présentées dans la section 3.6.8) est présentée dans la Figure 3-17 pour le bâtiment R+5. Les résultats pour les déclinaisons R+2 et R+8 sont présentés dans la section 5.1.

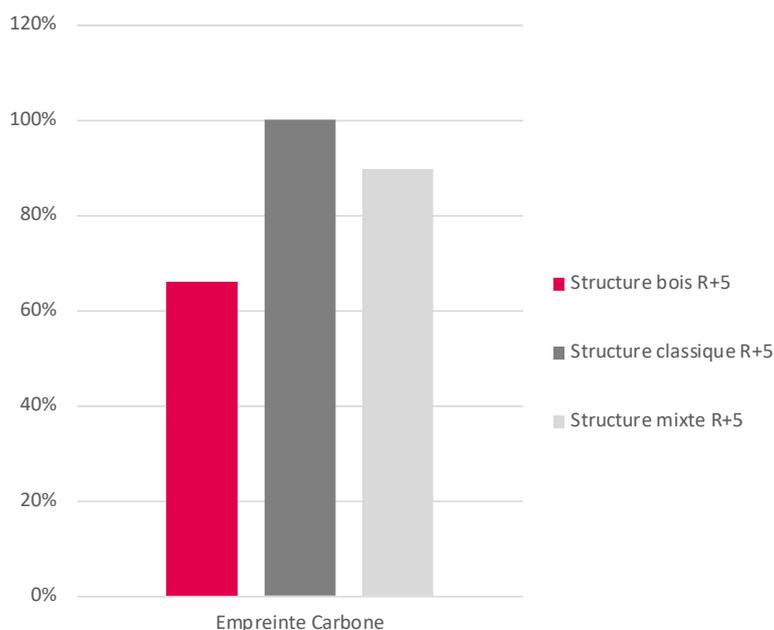


Figure 3-7: Analyse comparative de l'Empreinte carbone de la production de la structure d'un bâtiment R+5 pour les différentes typologies de bâtiment. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'Empreinte carbone maximale.

Le scénario bois représente une *Empreinte carbone* beaucoup plus faible que le scénario classique, en raison des plus grandes quantités de béton et d'armature utilisées dans le scénario classique, puis au type d'isolation (polystyrène du scénario classique VS fibre de bois pour le scénario bois et mixte).

Le scénario mixte présente des impacts plus importants que le scénario bois en raison des plus grande quantités de béton et d'armature utilisées, mais également en raison de l'utilisation d'une certaine quantité d'isolation polystyrène (isolation mixte fibre de bois et polystyrène). Les avantages du scénario mixte par rapport au scénario classique sont liés à la plus faible quantité de béton utilisée (remplacée par des éléments porteurs en bois), à l'isolation fibre de bois, et également aux cloisons extérieures réalisées en bois plutôt qu'en éléments de maçonnerie.

3.6.2. Production de la structure – Influence de l'effet climatique du stockage de carbone dans le bois et de la capture de CO₂ par le béton par carbonatation

L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'effet climatique du stockage de carbone dans les éléments, c'est à dire de voir l'évolution des résultats de l'indicateur *Empreinte carbone*. Les typologies concernées sont la structure bois et la structure mixte, qui comprennent chacune des éléments en bois, que ce soit des poteaux bois, des panneaux MDF, ou même l'isolation en fibre de bois. L'effet climatique du stockage de carbone est donc analysé pour ces deux typologies.

De la même façon, on analyse l'influence de la carbonatation du béton (capture de CO₂ atmosphérique) par le béton afin de voir si les conclusions de l'étude peuvent être renversées. Dans le cadre de cette analyse, on considère les conditions les plus favorables à la carbonatation du béton pour recalculer les impacts des différentes typologies¹³ (béton non traité contre la carbonatation, et carbonatation maximale pendant la fin de vie).

Les résultats sont présentés dans la Figure 3-8.

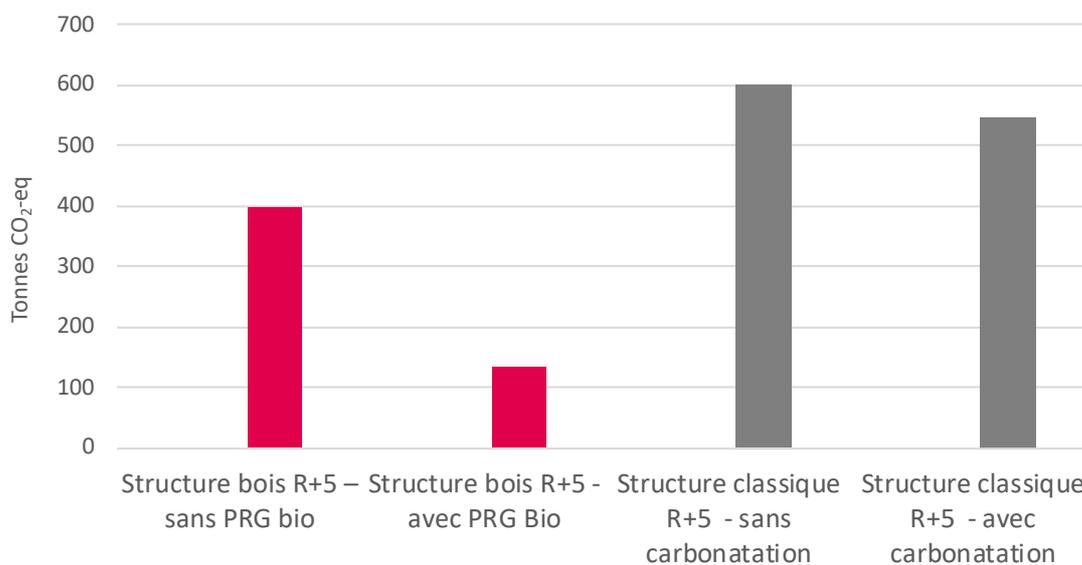


Figure 3-8: Comparaison de l'empreinte carbone de différents scénarios de structures R+5 bois et classique (bois sans PRG bio, bois avec PRG bio et classique sans et avec carbonatation).

L'effet climatique du stockage de carbone biogénique représente un important crédit d'impact. En effet, la durée de vie de la structure (60 ans) est supérieure à la période de rotation des arbres utilisés dans les différents éléments bois (50 ans en moyenne). Il y a un bénéfice climatique à court terme (100 ans) à retarder les émissions de CO₂ biogénique. **Les conclusions de l'étude sont donc renforcées lorsque l'on prend en compte l'effet climatique du stockage de carbone:** le scénario bois devient encore plus performant que le scénario classique pour l'indicateur *Empreinte carbone* (les différences se creusent entre le scénario classique et le scénario mixte, qui devient également nettement plus performant).

La carbonatation maximale du béton représente un bénéfice pour les trois scénarios. La carbonatation pendant la phase d'utilisation, qui a lieu uniquement pour le bâtiment classique recouvert d'une façade en verre, est négligeable par rapport à la carbonatation liée à la fin de vie du béton pour chacun des trois scénarios. **Cependant, même en prenant les hypothèses les plus favorables au scénario classique (béton non traité contre la carbonatation, et carbonatation maximale pendant la fin de vie du béton), les conclusions de l'étude restent**

¹³ Calculs réalisés selon la norme: *Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete elements; English version EN 16757:2017 – Annex BB*

inchangées : le scénario bois reste bien plus performant que le scénario classique pour l'indicateur *Empreinte carbone* (ainsi que le scénario mixte) même si les différences se gomment légèrement.

Il est important de noter que la suite des résultats sont présentés sans prise en compte du PRG bio des matériaux bois ni de la carbonatation du béton.

3.6.3. Fin de vie de la structure

Lorsque le bâtiment arrive en fin de vie, il est déconstruit, et chacun des matériaux suit une filière d'élimination qui lui est propre : recyclage, incinération ou décharge¹⁴. L'empreinte carbone liée au traitement de fin de vie de tous les matériaux employés dans la production de la structure est présentée dans la Figure 3-9 pour les trois typologies de bâtiment R+5.

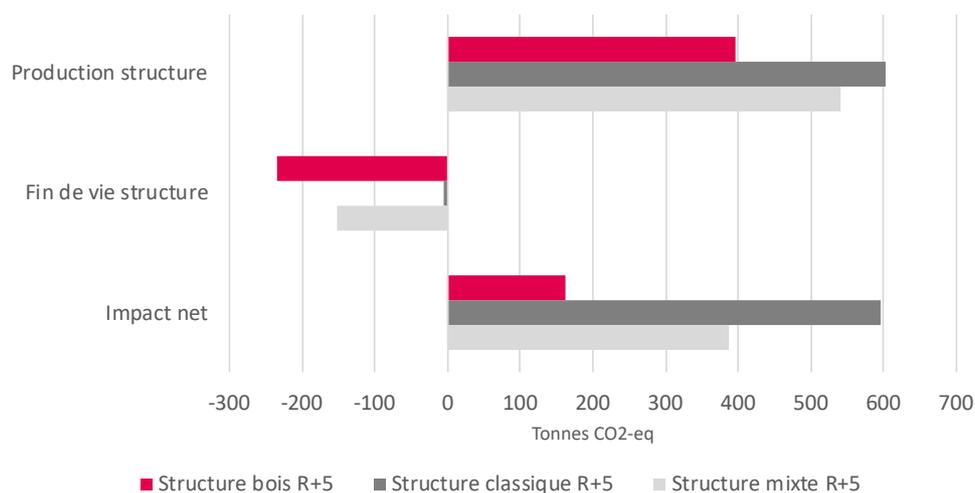


Figure 3-9: Contribution de la fin de vie de la structure à l'empreinte carbone des bâtiments R+5.

Les valeurs négatives de la fin de vie de la structure bois et de la structure mixte sont en grande partie liées à l'incinération des éléments en bois (panneaux OSB, MDF, poteaux bois, isolation fibre de bois, etc...) à l'usine de valorisation et de traitement des déchets (UVTD) des Cheneviers IV. L'énergie d'incinération étant utilisée pour alimenter le réseau de chauffage à distance et pour produire de l'électricité, elle permet d'éviter de consommer une énergie fossile (ex : gaz naturel pour le chauffage). Un crédit d'*Empreinte carbone* est donc accordé.

Dans le cas de la structure classique, les plus gros contributeurs sont le crédit d'impact lié au recyclage de l'acier d'armature et le crédit d'impact lié au recyclage de gravier de toiture. Cependant, ces crédits sont en partie compensés par les impacts liés à la consommation

¹⁴ Les filières d'élimination de chacun des matériaux ont été définies d'après le Guide des déchets de Chantier (Edition Novembre 2018) publié par l'État de Genève.

d'énergie pour le concassage du béton, suivi des impacts liés à l'incinération de l'isolation polystyrène.

3.6.4. Analyse par élément structurel des étages – Empreinte carbone

Dans un premier temps, il est intéressant de comprendre quels sont les éléments structurels qui contribuent le plus à l'*Empreinte carbone*, mais également qui contribuent le plus à la différence d'impact entre les typologies. L'analyse porte sur les éléments structurels d'un étage moyen, les éléments sous-sol, rez-de-chaussée et toiture étant présentés dans la section suivante.

Les résultats sont présentés dans la Figure 3-10.

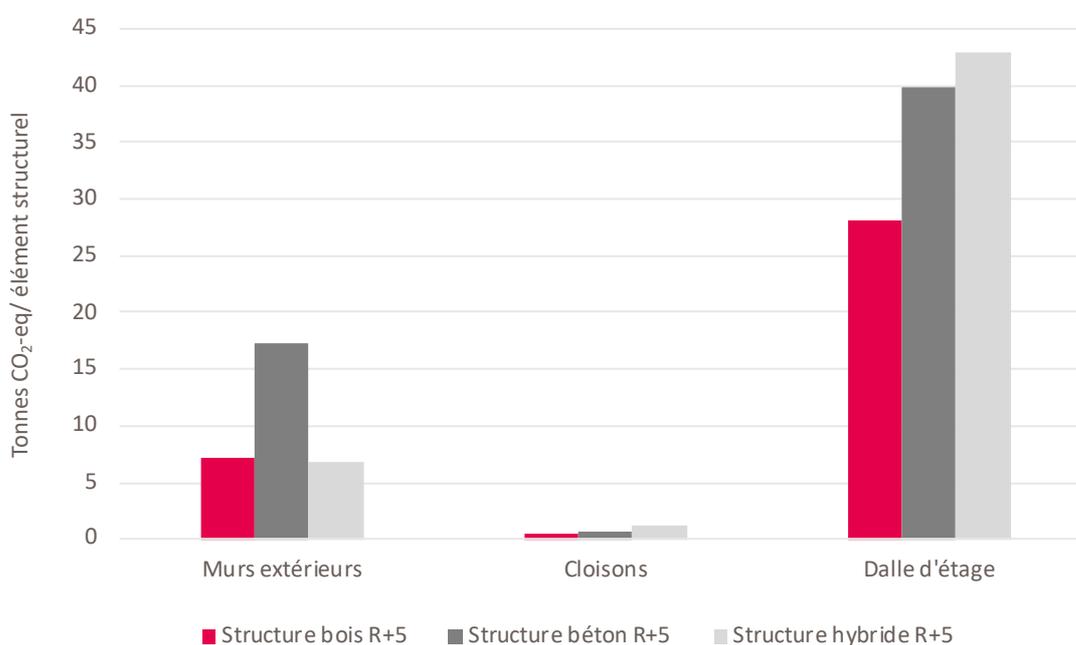


Figure 3-10: Comparaison de l'empreinte carbone des éléments structurels d'un étage moyen pour chacune des trois typologies.

L'analyse montre que l'élément le plus contributeur est la dalle d'étage. La dalle du scénario bois est constituée d'éléments en bois (caisson bois et panneaux OSB), l'isolation étant réalisée en partie par un vide d'air et une couche de gravier, et d'une fine couche de laine de verre, et la chape est une chape anhydrite. Dans le cas du scénario classique, la dalle est constituée de béton armé, avec une isolation polystyrène et laine de verre et recouverte d'une chape en ciment. Les différences s'expliquent en premier lieu par la grande quantité de béton armé du scénario classique remplacé par des éléments en bois (avec ferrure et visserie) dans le scénario bois, puis du type d'isolation, et enfin le type de chape. Une analyse détaillée par matériau est proposée dans la section 3.6.7.3. La dalle du scénario classique représente de

plus forts impacts en raison de la présence de béton armé, et de grandes quantités de connecteurs en acier pour soutenir le poids important de la dalle bois/béton.

Le deuxième élément le plus contributeur est l'enveloppe extérieure. L'enveloppe extérieure du scénario en bois est constituée de panneaux en bois avec une isolation en fibre de bois, celle du scénario classique étant en éléments de maçonnerie (briques terre cuite) avec une isolation polystyrène. Les différences s'expliquent en premier lieu par le type de cloisonnement extérieur (briques terres cuites ou panneaux de bois), puis par le type d'isolation. Le scénario mixte présente les mêmes caractéristiques architecturales que le scénario bois.

Cette analyse montre qu'il est possible d'adopter des matériaux plus écologiques (bois, chape anhydrite) seulement pour certains éléments structurels, en priorisant d'abord les efforts sur la dalle, puis sur l'enveloppe extérieure, puis en dernier lieu les cloisons intérieures.

3.6.5. Production de la structure – Empreinte carbone des différents niveaux

La comparaison de l'empreinte carbone des différents niveaux de la structure est présentée dans la Figure 3-11 pour la déclinaison R+5.

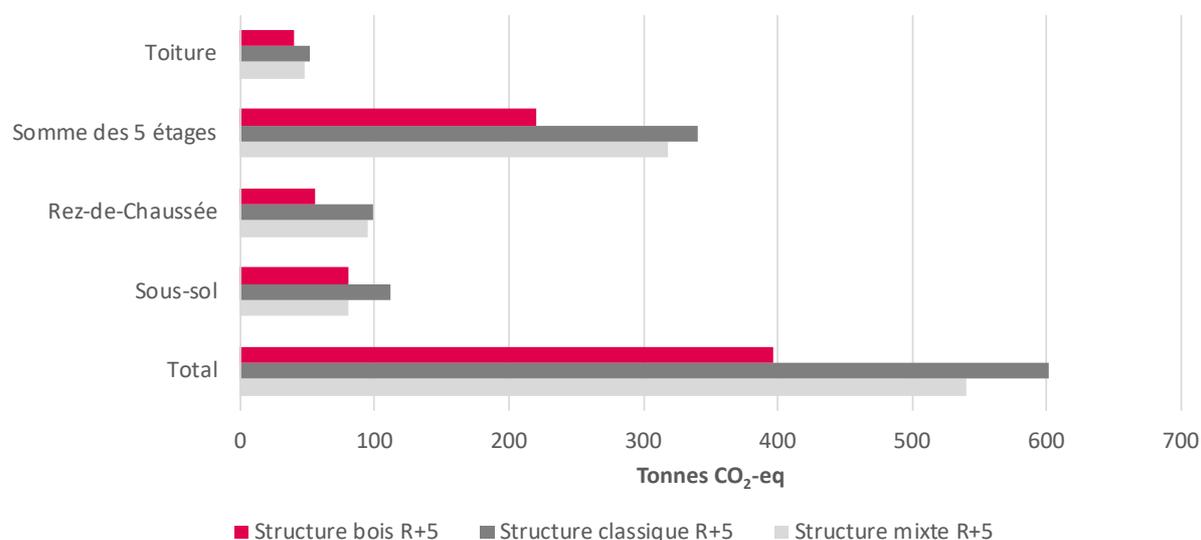


Figure 3-11: Production de la structure R+5 : empreinte carbone des différents niveaux.

- Le scénario bois présente une empreinte carbone largement inférieure aux deux autres scénarios ;
- Le sous-sol est le même pour les scénarios bois et mixte et présente des impacts inférieurs au sous-sol du scénario classique, qui doit être surdimensionné afin de supporter le plus fort poids de la structure;

- Le rez-de-chaussée est un élément fortement contributeur, car il doit pouvoir porter le poids des étages et représente donc aussi une grande quantité de béton et d'armature pour les scénarios classique et mixte;
- Les étages sont moins contributeurs que les autres éléments car ce sont des éléments légers.

3.6.6. Production de la structure - Évolution des résultats pour les déclinaisons R+2, R+5 et R+8

Lorsque l'on augmente le nombre d'étages de R+2 à R+8, la différence se creuse entre le scénario bois et le scénario classique, en raison de la légèreté de la structure. Le scénario mixte se différencie également mieux du scénario classique. Ceci est principalement lié aux éléments suivants:

- Le sous-sol : si le sous-sol reste est identique pour les trois typologies dans le cas du R+2, il ne reste identique que pour les scénarios bois et mixte dans le cas du R+5, alors que son impact augmente pour le scénario classique (plus grande quantité de béton et d'armature nécessaire). De même, dans le cas de la déclinaison R+8, le sous-sol de la typologie bois reste identique à celui du R+2, mais l'impact est plus important pour les scénarios classique et mixte ;
- Les étages : pour le bâtiment classique, la quantité d'armature des étages inférieurs doit augmenter afin de supporter le poids des étages supérieurs (augmentation de la quantité d'armature dans les poteaux bétons afin de supporter la charge supplémentaire des étages), augmentant également l'impact des étages, alors que la composition des étages du scénario bois et mixte est très similaire à celle du bâtiment R+2 (seulement les ferrures et visserie augmentent légèrement) ;
- La toiture : la toiture reste la même pour chacune des typologies quel que soit le nombre d'étages du bâtiment.

Conclusion générale : plus on augmente le nombre de niveaux, plus le scénario bois et le scénario mixte deviennent intéressants par rapport au scénario classique. Cela est lié en grande partie à la légèreté de la structure bois, qui permet de garder des éléments porteurs de plus faible dimensionnement que dans le cas des structures classiques plus lourdes.

3.6.7. Contribution des matériaux aux différents éléments - Empreinte carbone

L'analyse détaillée par élément est présentée pour le scénario R+5. Les conclusions portant sur la contribution de chaque matériau à l'empreinte carbone des différents éléments sont très similaires pour les scénarios R+2, R+5 et R+8.

3.6.7.1. Sous-sol

La Figure 3-12 présente la contribution des différents matériaux à l’empreinte carbone du sous-sol du bâtiment R+5.

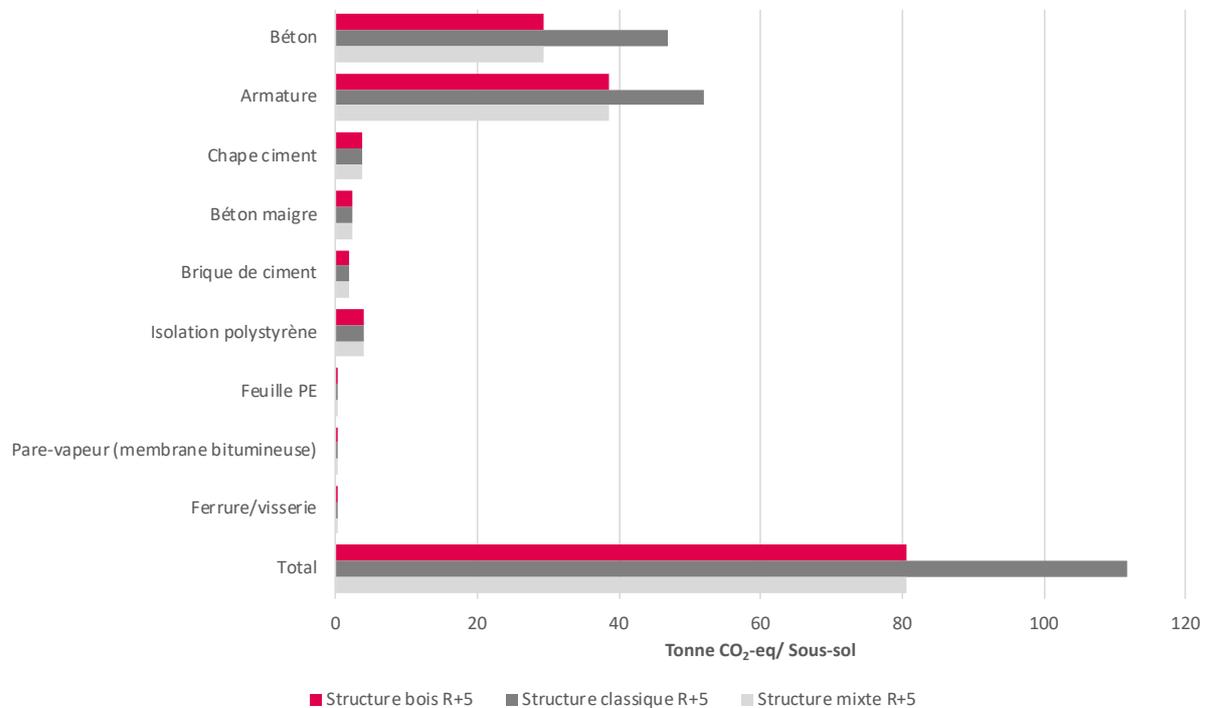


Figure 3-12: Sous-sol R+5: empreinte carbone des différents matériaux du sous-sol pour les trois typologies.

Les principaux contributeurs à l’empreinte carbone du sous-sol sont l’armature et le béton. Les différences entre le scénario classique et les deux autres structures plus légères est lié à la plus grande quantité de béton et d’armature utilisés pour supporter le poids plus important de la structure classique.

3.6.7.2. Rez-de-chaussée

La Figure 3-13 présente la contribution des différents matériaux à l’empreinte carbone du rez-de-chaussée du bâtiment R+5.

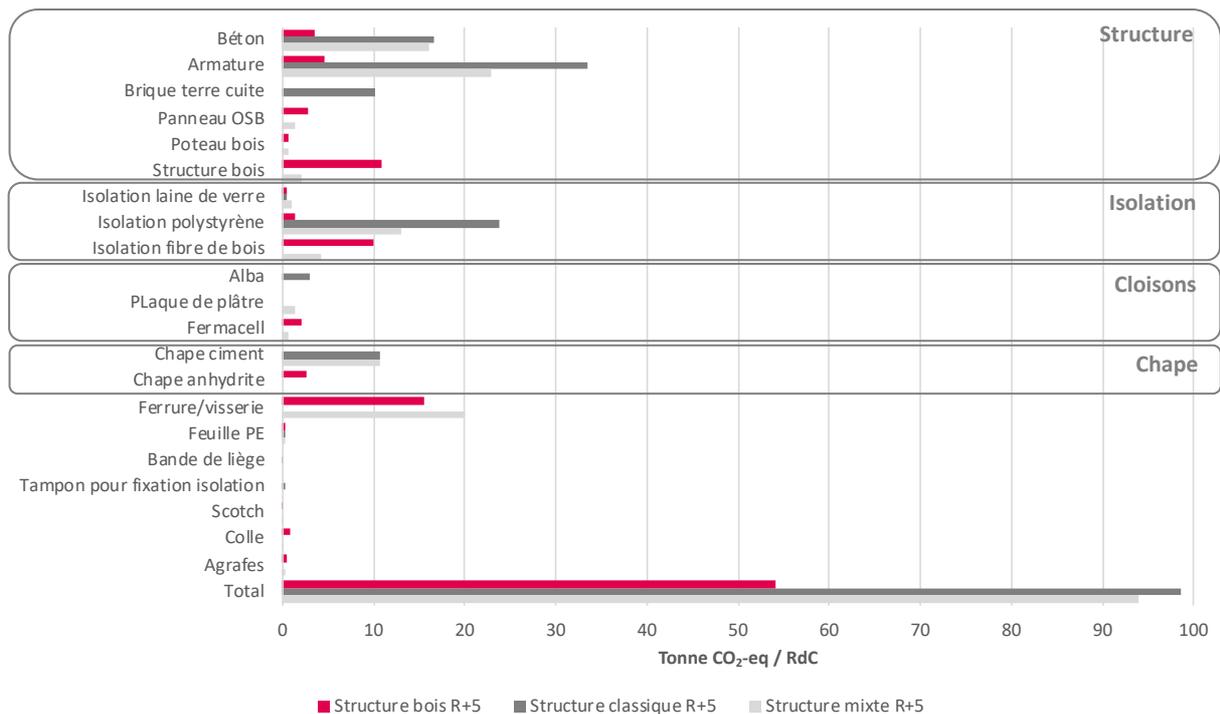


Figure 3-13: Rez-de-chaussée R+5: empreinte carbone des différents matériaux du rez-de-chaussée pour les trois typologies.

Les différences entre le scénario bois et le scénario classique viennent des éléments suivants :

- Principaux éléments porteurs et murs extérieurs: dans le cas du scénario classique, le béton, l'armature et les briques en terre cuite représentent une empreinte carbone plus de quatre fois supérieure aux éléments porteurs du scénario bois (panneaux OSB, poteaux bois et structure bois) ;
- Isolation : l'isolation du scénario bois, essentiellement réalisée à l'aide de fibre de bois représente la moitié de l'empreinte carbone de l'isolation polystyrène utilisée dans le scénario classique ;
- Chape : la chape anhydrite a une empreinte carbone quatre fois plus faible que la chape ciment utilisée dans le scénario classique;
- En revanche, la ferrure et visserie (notamment les connecteurs en acier) du scénario bois représentent un important contributeur à l'empreinte carbone.

Le rez-de-chaussée du scénario mixte montre peu de différence avec le rez-de-chaussée du scénario classique :

- La diminution de l'empreinte carbone du scénario mixte liée à la plus faible quantité d'armature (bâtiment plus léger) et à l'isolation mixte fibre de bois/polystyrène est compensée par la grande quantité de ferrure et visserie utilisée ;
- La quantité de ferrure et visserie est plus importante pour le scénario mixte que pour le scénario bois car les poteaux bois sont remplacés par des montants métalliques, mais aussi parce-que le scénario mixte nécessite des connecteurs supplémentaires

pour lier la dalle béton et la dalle bois et une liaison plancher/poteau plus conséquente afin de supporter le poids supplémentaire du béton.

3.6.7.3. Étages

La Figure 3-14 présente la contribution des différents matériaux à l’empreinte carbone des cinq étages du bâtiment R+5.

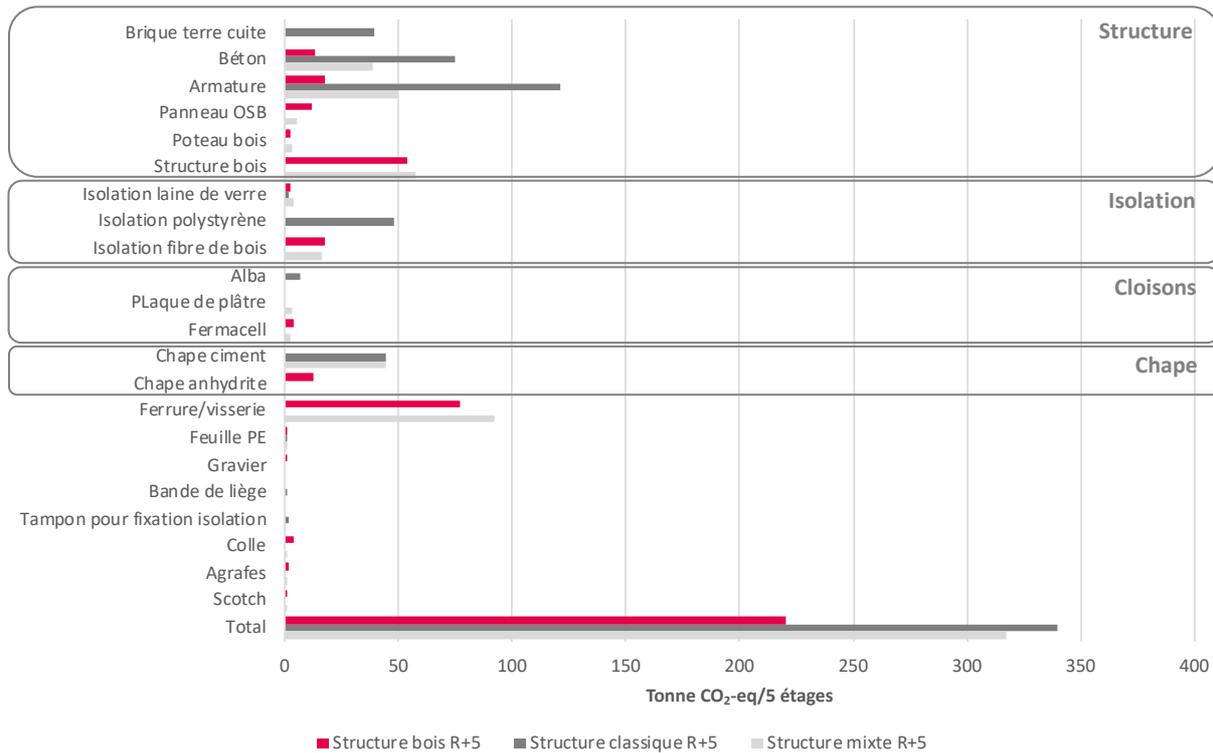


Figure 3-14: Étages R+5: empreinte carbone des différents matériaux des étages pour les trois typologies.

Les différences entre les étages du scénario bois et les étages du scénario classique sont liées aux mêmes éléments que dans le cas du rez-de-chaussée, c’est à dire aux principaux éléments porteurs et murs extérieurs, à l’isolation, et à la chape.

Les étages du scénario mixte montre peu de différence avec les étages du scénario classique : comme pour le rez-de-chaussée, la diminution de l’empreinte carbone du scénario mixte liée à la plus faible quantité d’armature mais aussi de béton (bâtiment plus léger) et à l’isolation mixte fibre de bois/polystyrène est compensée par la grande quantité de ferrure et visserie utilisée.

3.6.7.4. Toiture

La Figure 3-15 présente la contribution des différents matériaux à l’empreinte carbone de la toiture (même toiture pour les 3 types bâtiment R+2, R+5 et R+8).

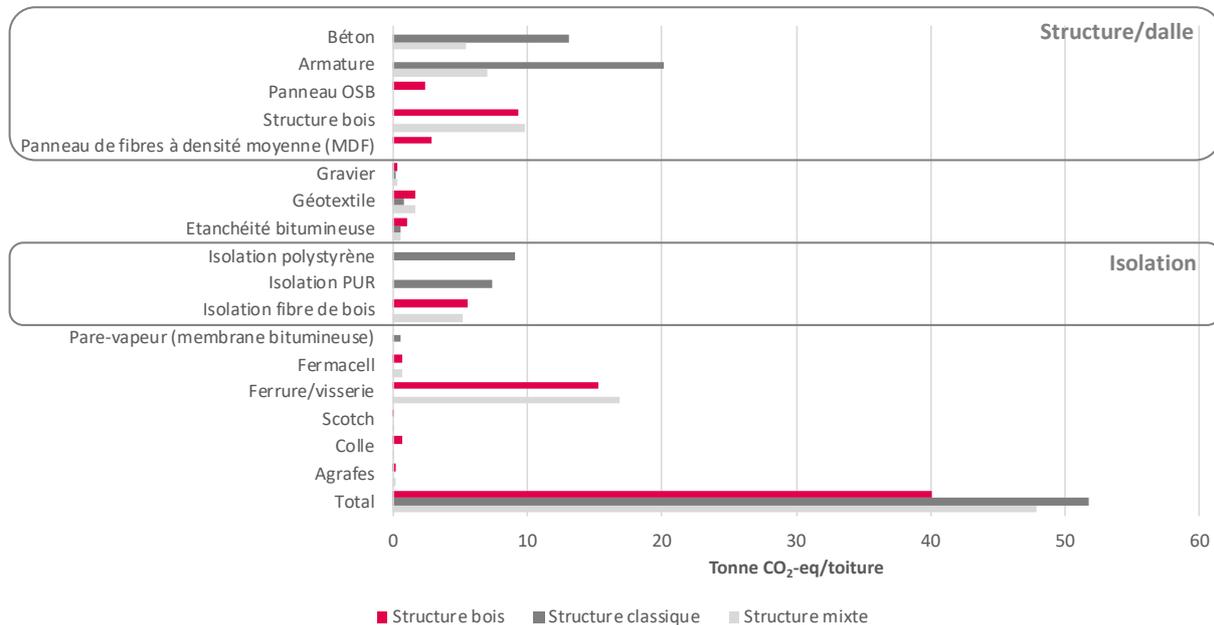


Figure 3-15: Toiture R+5: empreinte carbone des différents matériaux de la toiture pour les trois typologies.

Les différences entre le scénario bois et le scénario classique viennent des éléments suivants :

- Dalle: dans le cas du scénario classique, le béton et l’armature représentent une empreinte carbone plus 2.3 fois supérieure à la dalle du scénario bois (panneaux OSB, structure bois et panneaux MDF) ;
- Isolation : l’isolation du scénario bois, essentiellement réalisée à l’aide de fibre de bois mais aussi au vide d’air représente le tiers de l’empreinte carbone de l’isolation polystyrène et polyuréthane utilisée dans le scénario classique ;
- Comme pour les autres éléments, la ferrure et visserie du scénario bois représentent un important contributeur à l’empreinte carbone.

La toiture du scénario mixte montre peu de différence d’impact avec la toiture du scénario classique. En effet, la diminution de l’empreinte carbone du scénario mixte liée à la plus faible quantité de béton et d’armature utilisée, et à l’isolation en fibre de bois au lieu d’une isolation polystyrène est en partie compensée par la grande quantité de ferrure et visserie utilisée.

3.6.8. Façades et fenêtres – Impact environnemental, contribution à l’empreinte carbone de la production de la structure

Comme expliqué plus haut, le type de façade et de fenêtres peut être choisi indépendamment de la typologie de bâtiment (bois, classique, mixte). La Figure 3-16 présente la comparaison de l’empreinte carbone des trois types de façades et des deux types de fenêtre, et leur

contribution à l’empreinte carbone de chacune des typologies R+5 – le choix de façade et fenêtre par typologie ayant été fait de manière arbitraire.

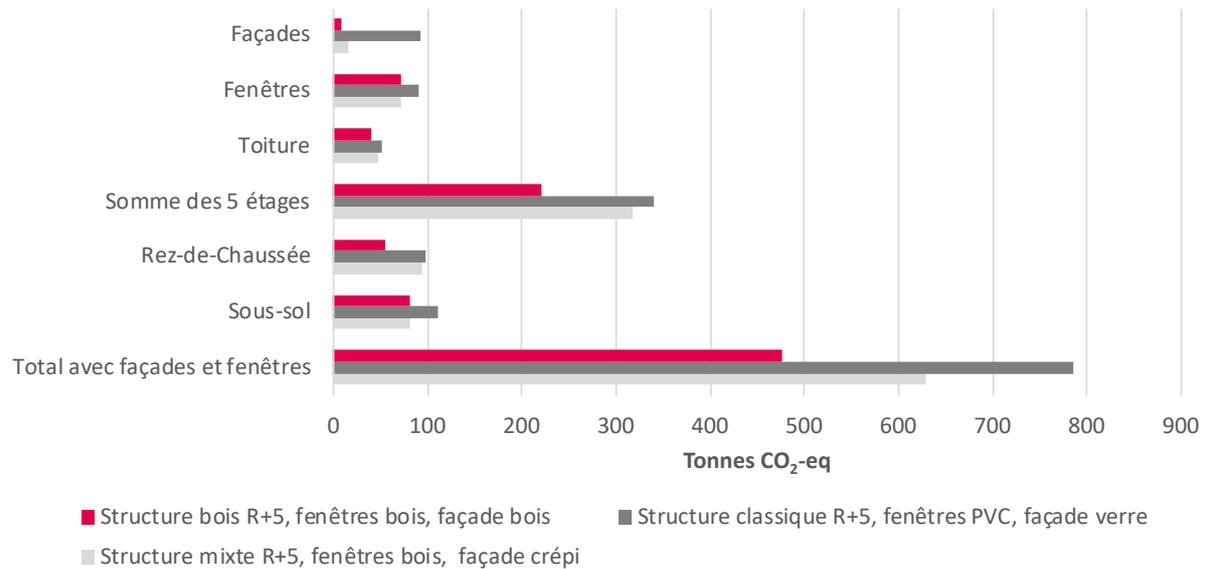


Figure 3-16: Contribution des façades et fenêtres à l’empreinte carbone totale des bâtiments R+5.

La façade en verre est le type de parement présentant les impacts les plus importants pour tous les indicateurs. Ceci est lié à la fois aux parois en verre, mais également à la structure en acier sur laquelle sont fixées ces parois. La façade en bois est plus performante que la façade en crépi en raison de l’utilisation d’un matériau bio-sourcé et renouvelable alors que la façade en crépi est réalisée à l’aide de matériaux issus du pétrole.

De la même façon, les fenêtres en bois représentent un meilleur score que les fenêtres en PVC en raison de l’utilisation de bois à la place d’un matériau fossile.

Il est intéressant de constater que les fenêtres représentent un important contributeur à l’empreinte carbone totale d’un bâtiment. Ceci est également lié à leur durée de vie (30 ans), nécessitant un remplacement complet à la demi-vie du bâtiment. Les façades représentent quant à elles un contributeur moins important, sauf dans le cas de la façade en verre.

Cette analyse montre que le choix du type de façade, et dans une moindre mesure, le choix du type de fenêtres, représentent également des paramètres importants à prendre en compte pour la performance environnementale de la construction d’un bâtiment.

3.6.9. Production de la structure – Analyse comparative multi-indicateurs

La comparaison des scénarios de production de l’ensemble de la structure (excluant les façades et fenêtres, présentées dans la section 3.6.8) est présentée dans la Figure 3-17 pour le bâtiment R+5. Les résultats pour les déclinaisons R+2 et R+8 sont présentés dans la section 5.1.

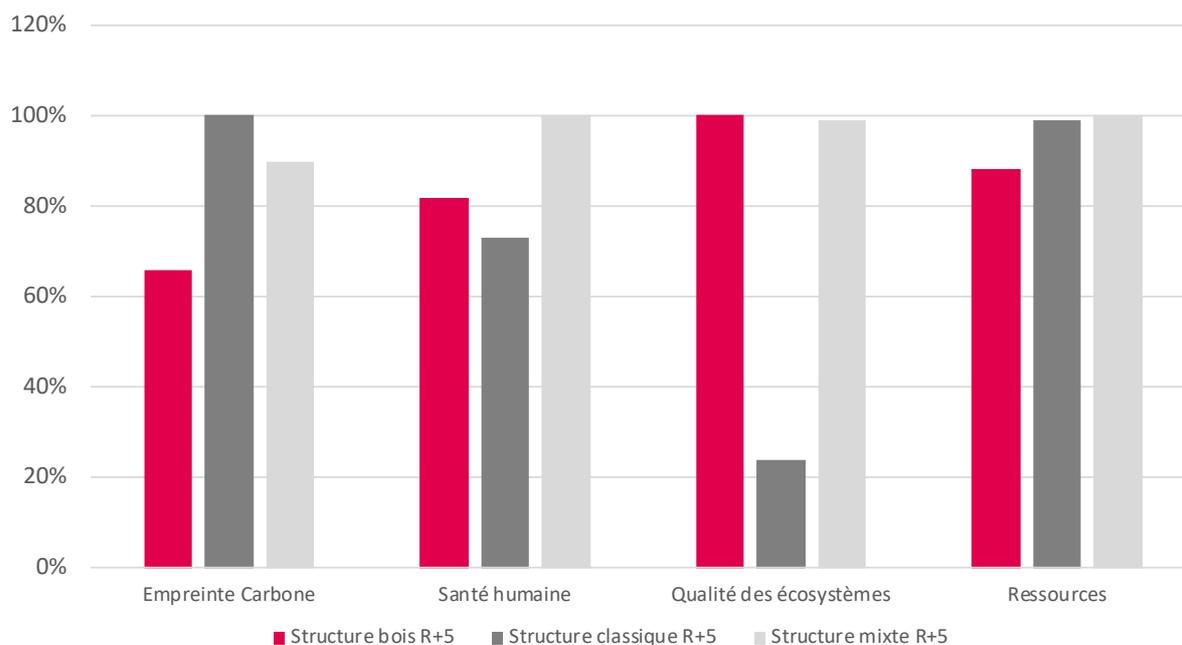


Figure 3-17: Analyse comparative des impacts environnementaux de la production de la structure d'un bâtiment R+5 pour les différentes typologies de bâtiment. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'impact environnemental maximal pour chaque indicateur.

- Le scénario bois représente de plus faibles impacts environnementaux que les deux autres scénarios pour les indicateurs *Empreinte carbone* et *Ressources*, de façon significative ;
 - Les différences de l'*Empreinte Carbone* sont principalement liées aux plus grandes quantités de béton et d'armature utilisées dans le scénario classique, puis au type d'isolation (polystyrène du scénario classique et mixte VS fibre de bois pour le scénario bois et mixte) ;
 - Les différences de l'impact sur les *Ressources* sont liées également aux plus grandes quantités de béton et d'armature du scénario classique, mais sont compensées en partie par l'impact des ferrures et visseries utilisées dans les scénarios bois et mixte.
- Les scénarios bois et mixte représentent des impacts plus importants que le scénario classique pour l'indicateur *Écosystèmes*, en raison de l'utilisation du bois à la place d'autres matériaux (béton, métal). En effet, l'impact sur la qualité des écosystèmes est lié principalement à l'occupation du sol par les forêts, et la production de bois demande une plus grande surface par volume de matériau produit que le béton et le métal. Cette analyse est effectuée pour une exploitation forestière européenne moyenne, et ne tient pas compte des conditions particulières de l'exploitation forestière alimentant le marché genevois. Des différences significatives dépendent du mode de gestion, par exemple des forêts gérées durablement (label FSC, ou autre), mais sont difficilement quantifiables à ce stade ;

- Le scénario bois représente un score similaire au scénario classique pour l'indicateur *Santé humaine*, et inférieur au score du scénario mixte. Cependant, il est difficile de conclure que l'écart observé représente un impact différent, en raison de l'incertitude de cet indicateur. L'impact indirect sur la santé humaine est lié principalement à la production des éléments en acier : l'armature du béton, et les ferrures et visserie. Ces dernières étant réalisées en acier inoxydable, les impacts sont plus importants par kilogramme de matériau que l'acier d'armature, ce qui explique le score plus important du scénario mixte (qui combine acier d'armature et ferrures et visserie).

Qualité des écosystèmes : impact indirects du changement climatique

L'indicateur *Qualité des écosystèmes* représente les impacts sur la biodiversité liés notamment à l'occupation du sol par toute forme d'exploitation, et aux émissions de substances nocives pour les écosystèmes. Dans la présente étude, le scénario bois présente un impact plus important que le scénario classique en raison de la plus grande surface de sol nécessaire pour fabriquer un élément en bois qu'un élément en béton.

Cependant, certaines méthodes de quantification des impacts permettent d'évaluer l'impact du changement climatique sur la santé des écosystèmes. En appliquant cette méthodologie, on constate que les écarts entre les scénarios sont nettement atténués (voir

Figure 3-18), d'autant plus si on considère le PRG Bio. De plus, si l'on prend en compte le fait que l'exploitation de la forêt en Suisse est basée sur des critères de durabilité que l'ACV ne permet pas d'évaluer, il est probable que l'écart entre les scénarios diminue encore pour devenir non significatif.

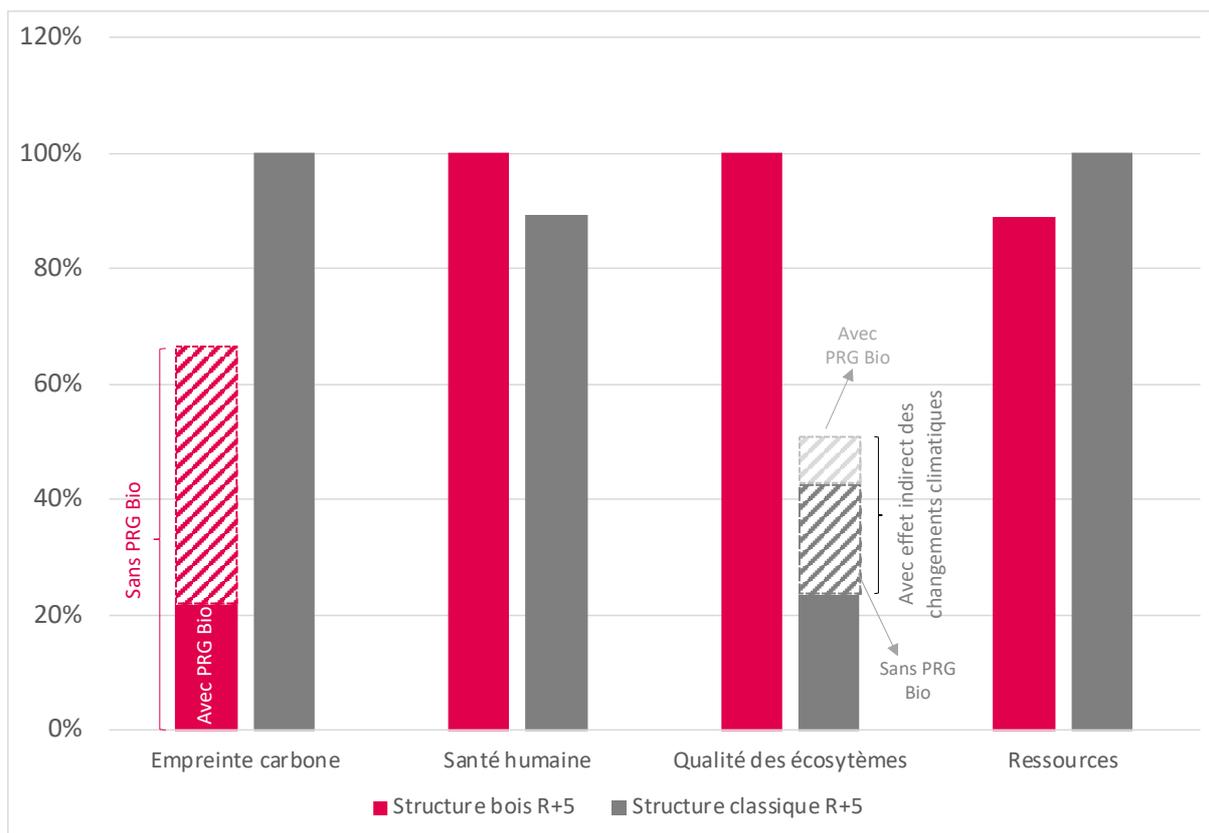


Figure 3-18: Influence de la quantification des impacts du changement climatique sur la qualité des écosystèmes sur les résultats comparatifs présentés en Figure 3.17, avec ou sans PRG Bio.

Santé humaine : impact directs et impacts indirects

Comme indiqué en section 2.2, l'indicateur *Santé humaine* proposé dans la présente étude représente les impacts indirects sur la santé humaine liés aux émissions qui ont lieu tout au long de la chaîne de valeur du bâtiment, et non les impacts sur la santé humaine liés aux émissions directes pendant la phase de fabrication, ni aux émissions nocives pendant l'utilisation du bâtiment ou du mobilier.

S'il est difficile de mettre en place des solutions concrètes pour diminuer les impacts indirects sur la santé humaine, en revanche des bonnes pratiques peuvent être prises pour diminuer les impacts directs lors des phases de construction puis d'utilisation (gestion du chantier, choix des matériaux de construction). Par exemple, il est possible d'éviter que les matériaux ne dégagent des substances nocives longtemps après la construction, notamment pour les matériaux dérivés du bois, les peintures ou encore les revêtements de sols.

L'application des recommandations du volet ECO développé par l'association Minergie permet notamment de garantir une bonne qualité de l'air intérieur. Ce label prévoit à la fois des critères d'exclusion et un thème spécifique au climat intérieur. De son côté, Lignum a

publié des fiches techniques permettant de garantir une qualité de l'air intérieur élevée dans les constructions en bois.

Nous conseillons donc à l'État de Genève de fixer des règles supplémentaires concernant cet aspect dans le contexte de construction de bâtiments publics.

3.7. Conclusion

Lorsque l'on considère l'empreinte carbone, le scénario bois représente une bien meilleure performance environnementale que le scénario classique.

Cette conclusion est largement renforcée lorsque l'on prend en compte les bénéfices climatiques liés au stockage de carbone dans le bois pendant toute la durée de vie du bâtiment. Cette conclusion est également renforcée lorsque l'on prend en compte la fin de vie du bâtiment, en raison notamment de la récupération d'énergie lors de l'incinération des panneaux de bois en fin de vie.

Le scénario bois reste le meilleur scénario même lorsque l'on considère la capture théorique maximale de CO₂ atmosphérique par le béton lors de la phase d'utilisation du bâtiment et en fin de vie par le phénomène de carbonatation.

La meilleure performance climatique du scénario bois s'explique en premier lieu par l'utilisation du bois au lieu de béton armé pour les principaux éléments porteurs (dalle, poteaux et enveloppe extérieure), et également par la légèreté de la structure qui permet de diminuer largement les quantités de béton et d'armature utilisés dans les éléments inférieurs (sous-sol et rez-de-chaussée). L'isolation en fibre de bois plutôt qu'en polystyrène joue également un rôle important, ainsi que le type de chape sur les dalles d'étages (chape anhydrite au lieu d'une chape classique en ciment).

Il est intéressant de voir que le scénario mixte conçu dans le cadre de cette étude ne représente finalement pas un scénario optimum pour une diminution partielle des impacts, notamment en raison des dalles mixtes béton/bois, qui nécessitent une grande quantité de ferrures et visserie afin de supporter le poids d'une telle dalle. L'analyse du scénario mixte et l'analyse par élément structurel et par matériau permettent de définir quels sont les éléments qui peuvent être utilisés en priorité pour diminuer les impacts d'un bâtiment classique : les dalles d'étage (structure complètement bois au lieu de structure bois/béton, chape anhydrite), puis la structure de l'enveloppe extérieure (poteaux bois et murs extérieurs en panneaux de bois au lieu de briques en terre cuite), l'isolation, et dans une moindre mesure les cloisons intérieures.

Plus on augmente le nombre d'étages, plus le scénario bois devient intéressant par rapport au scénario classique. Cela est lié en grande partie à la légèreté de la structure bois, qui permet

de garder des éléments porteurs de plus faible dimensionnement que dans le cas de la structure classique plus lourde.

Lorsque l'on élargit l'analyse aux autres indicateurs environnementaux, les incertitudes diverses ne permettent de conclure de façon significative que pour l'indicateur Qualité des écosystèmes (biodiversité). Il apparaît que les impacts sur les écosystèmes sont plus élevés pour la construction en bois que pour la construction classique, même si la prise en compte des effets indirects du réchauffement climatique sur les écosystèmes amoindrit cette constatation. En effet, l'exploitation d'une forêt n'est pas sans effet sur l'écosystème forestier par rapport à une forêt laissée à l'état naturel. En ce sens, le bois et les autres agro-matériaux doivent être considérés comme des ressources à préserver et à utiliser judicieusement. Une utilisation en cascade, en premier lieu sous forme de ressources matière, puis seulement sous forme énergétique, est optimale. Par ailleurs, l'utilisation de bois provenant de forêts gérées durablement (par exemple : label FSC) devrait être imposée dans les constructions en bois de l'État de Genève. Une étude complémentaire pourrait être réalisée pour quantifier les différences d'impacts selon le mode d'exploitation forestière. Cependant, les changements climatiques induits par les émissions de gaz à effet de serre ont également des conséquences sur l'ensemble des écosystèmes terrestres et aquatiques. Malgré les incertitudes scientifiques en vigueur, les économies de CO₂-eq de la solution bois viennent surcompenser les impacts sur la biodiversité de l'exploitation des forêts, en particulier si elles sont gérées durablement.

Il est important de noter également que s'il est difficile de conclure pour l'impact indirect sur la santé humaine, en revanche il est important de mettre en place des actions afin de limiter l'impact direct sur la santé humaine lors de la construction et l'utilisation du bâtiment. Une bonne gestion du chantier permettra de limiter les émissions directes pendant la phase de construction et le choix judicieux de matériaux intérieurs permettra d'éviter les émissions néfastes à l'intérieur du bâtiment pendant toute la durée de vie de celui-ci.

Il est important de noter que les résultats de cette analyse ne sont applicables qu'au périmètre de l'étude, et ne sont pas applicables dans un autre contexte géographique.

4. Mobilier

4.1. Périmètre de l'étude

L'objet de mobilier modélisé est une table de bureau. L'unité fonctionnelle, à savoir l'objet d'étude, est la suivante :

« Fournir une surface de travail de 120 cm par 60 cm, durant une année, dans le Canton de Genève ».

4.2. Étapes du cycle de vie considérées

La présente étude est une analyse **comparative** complète de type « **berceau à la tombe** » avec les caractéristiques suivantes :

- Excluant **les étapes identiques** des scénarios 1, 2 et 3;
- Comprenant chacune des étapes du cycle de vie d'un bureau de l'extraction des matières premières jusqu'à la gestion du produit en fin de vie.

La Figure 4-1 présente les frontières du système pour les différents scénarios.

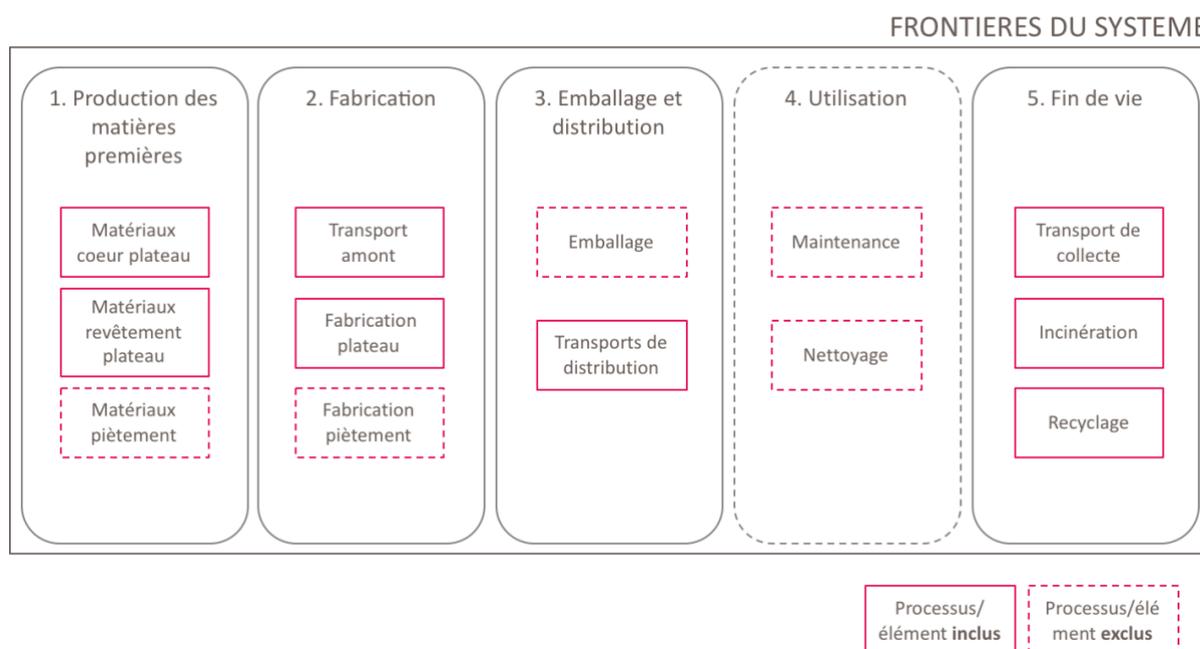


Figure 4-1: Frontières du système: étapes et sous-étapes du cycle de vie incluses et exclues de l'analyse

Les étapes **exclus** des frontières du système sont:

- Les pieds et système de fixation, car ils sont considérés identiques pour les trois scénarios :
- Les emballages, également considérés similaires pour les trois scénarios ;
- Les éléments de la phase d'utilisation, à savoir la maintenance et le nettoyage, car ils sont considérés négligeables par rapport aux autres étapes du cycle de vie.

4.3. Description générale des scénarios

Trois scénarios ont été modélisés, correspondant chacun à un matériau pour le plateau de la table du bureau. Les pieds et le système de fixation, considérés identiques dans chaque scénario, sont exclus du système analysé.

- **Scénario bois.** Le modèle considère un plateau lamellé-collé¹⁵ de bois d'épicéa, essence la plus répandue en Suisse (39% des arbres¹⁶ et 44 % du volume de bois de l'ensemble des arbres des forêts en Suisse¹⁷). Le bois est poncé mais aucune couche de finition telle que du vernis ou de l'huile n'a été ajouté au modèle.
- **Scénario MDF laqué PUR.** Les panneaux en MDF (Medium Density Fiberboard, de densité 750 kg/m³) sont recouvert d'une laque de polyuréthane (PUR).
- **Scénario métal, finition peinture époxy.** Des plaques d'acier recouvert d'une résine époxy insèrent un cœur constitué en panneau de particules. L'acier est l'un des deux métaux les plus couramment utilisés pour le mobilier design avec l'aluminium¹⁸.

¹⁵ Aujourd'hui, il est rare de réaliser un élément mobilier en bois massif, c'est à dire réalisé en une seule pièce de bois issue de la masse de l'arbre. Pour cette raison, il est considéré que le plateau est fabriqué en « lamellé-collé » (planches de bois collées les unes aux autres), solution la plus proche du bois massif sur le plan mécanique et esthétique (Source : <https://www.miroko.fr/2019/02/20/cest-quoi-le-bois-massif-bois-naturel/>)

¹⁶ Source : Site internet de « Bois Suisse », liste des essences de bois en Suisse disponible ici : <https://www.holz-bois-legno.ch/fr/vivre-avec-le-bois/la-foret-suisse/essences-de-bois-suisse>

¹⁷ Chantal Guggenbühl et Jonas Lichtenhahn, *L'économie forestière en Suisse : Statistique de poche 2016*, vol. 830-1600, Neuchâtel, Office fédéral de la statistique, coll. « Agriculture et sylviculture » (n° 07), 2016, 7 p. Disponible ici : <https://www.bfs.admin.ch/bfsstatic/dam/assets/1686300/master>

¹⁸ Xavier Hosch, Jacques Henaut, Olivier Hamon, *Dessin de construction du meuble - Tome 1 : Dessin d'ameublement, assemblages et matériaux (Technologie des métiers du bois - Menuiserie, ébénisterie, agencement)* et Site Internet de Famous Design <https://www.famous-design.com/blog/tout-savoir-sur-les-materiaux-de-nos-meubles-design/utilisation-des-metiaux-dans-le-mobilier-design/>

La durée de vie de chaque scénario a été fixée à 15 ans¹⁹. Si cette hypothèse s'avère imprécise pour l'un ou l'autre scénario, le lecteur pourra aisément adapter les résultats, représentés pour une année d'utilisation.

4.4. Données et hypothèses

	BOIS	MDF, LAQUÉ POLYURÉTHANE (PUR)	MÉTAL, FINITION PEINTURE ÉPOXY
MATÉRIAU PLATEAU	Epicéa, lamellé collé	Medium density fiber board (MDF), laqué, finition vernis polyuréthane	Cœur en panneau de particules, recouvert de plaques d'acier, peinture époxy
DIMENSIONS		L120 x H3 x P60 cm	
VOLUME		0.0216 m ³	
MASSE	13.3 kg	16.2 kg	19.9 kg
TYPE DE COLLE	Principalement résine mélamine formaldéhyde (+ résine phénolique et résine polyuréthane)	Résine urée formaldéhyde	Résine urée formaldéhyde + mélamine formaldéhyde (représente 4% de la quantité de urée formaldéhyde)
QUANTITÉ DE COLLE	0.2 kg	2.1 kg	1.1 kg
QUANTITÉ DE MÉTAL	-	-	5.8 kg (plaques de 0.5 mm d'épaisseur)
COUCHE DE FINITION	-	0.19 kg de résine polyuréthane (application de 120 g/m ²)	de résine époxy

¹⁹ Cette valeur est issue du PCR (Product Category Rules) de Environdec International donnant les règles pour établir une Déclaration Environnementale du Mobilier (EPD International (2012). Product Category Rules (PCR) Furniture, except sears and mattresses, version 2.1, dated 2019-08-03).

LIEU DE FABRICATION	GE (CH)	EU	EU
DISTANCE DE DISTRIBUTION	100 km	1000 km	1000 km
TRAITEMENT DE FIN DE VIE	Incinération	Incinération	Recyclage de l'acier Incinération du panneau de particules
EFFICACITÉ DE RÉCUPÉRATION D'ÉNERGIE DE L'INCINÉRATION	Pouvoir Calorifique Inférieur des panneaux de bois : 15 MJ/kg Rendement thermique : 60% ²⁰ Rendement électrique : 14% ²⁰		

4.5. Résultats

4.5.1. Analyse comparative du mobilier en bois avec d'autres scénarios – Empreinte carbone

La présente la comparaison de l'Empreinte carbone totale du scénario bois et de celle des scénarios « MDF laqué PUR » et « métal finition peinture époxy ».

²⁰ Source : Prévission de l'efficacité énergétique de l'usine Cheneviers IV, prévue en 2023

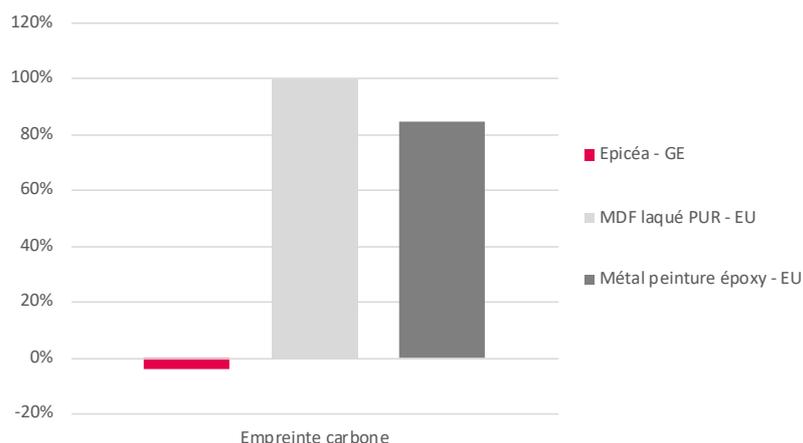


Figure 4-2: Analyse comparative de l'Empreinte carbone du cycle de vie d'un plateau bureau pour les différents scénarios. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'Empreinte carbone maximale.

De manière générale, nous pouvons voir que le scénario bois représente de plus faibles impacts environnementaux que les deux autres scénarios, pour tous les indicateurs, de façon significative.

La valeur négative du scénario bois s'explique de la façon suivante. En fin de vie, les plateaux sont incinérés à l'usine de valorisation et de traitement des déchets (UVTD) des Cheneviers IV. L'énergie d'incinération est utilisée pour alimenter le réseau de chauffage à distance et pour produire de l'électricité. Comme cette énergie est produite à partir d'une ressource renouvelable et qu'elle permet d'éviter de consommer une énergie fossile (ex : gaz naturel pour le chauffage), un crédit est accordé. Comme ce crédit est supérieur aux émissions des autres étapes du cycle de vie (production, transport, etc.), la valeur totale est négative.

4.5.2. Comparaison du mobilier en bois avec d'autres scénarios : contribution des étapes du cycle de vie

La Figure 4-3 présente le détail des contributions des différentes étapes du cycle de vie (Production et fabrication, Distribution et Fin de vie) à l'Empreinte carbone totale de chaque scénario.

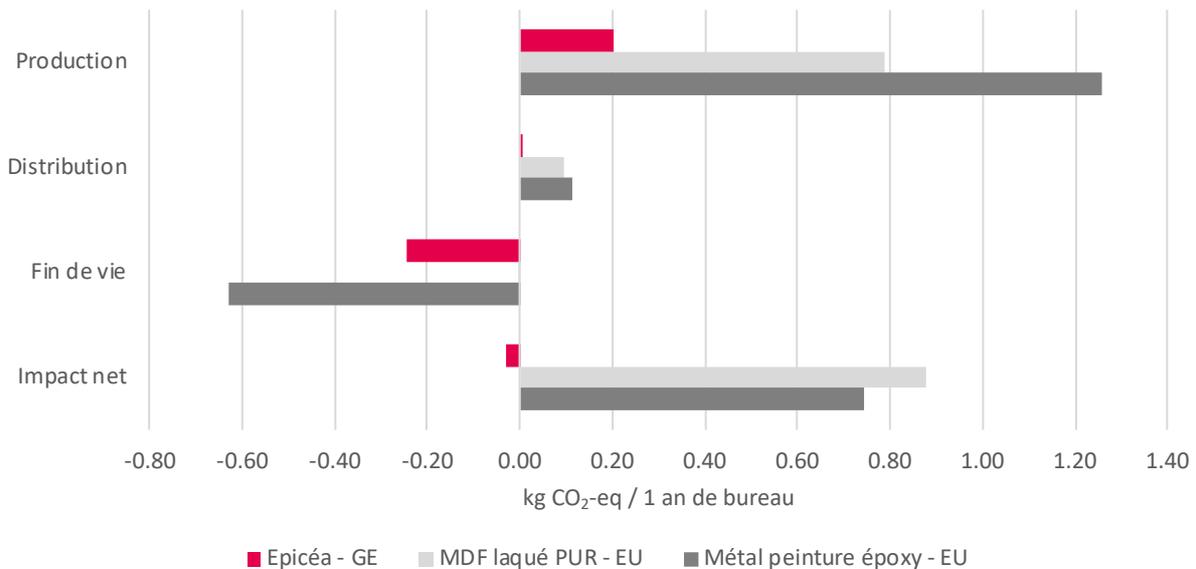


Figure 4-3: Empreinte carbone : impact des étapes du cycle de vie d'un plateau de bureau des différents scénarios.

La différence entre le scénario bois et les deux autres s'explique en premier lieu par l'Empreinte carbone de la phase de production des matières premières et fabrication.

- L'impact plus important du scénario MDF est lié à la plus grande quantité de colle utilisée pour la réalisation du plateau (10 fois supérieure à celle utilisée dans le scénario bois), ainsi qu'à une consommation plus importante d'énergie (en particulier d'électricité) pour la fabrication du panneau MDF ;
- L'impact plus important du scénario métal est lié à la production de l'acier, matériau représentant des impacts environnementaux très élevés, ainsi qu'à la plus grande quantité de colle utilisée pour le cœur du plateau constitué de panneau de particules (5 fois supérieure à celle utilisée dans le scénario bois).

La différence est ensuite liée à l'Empreinte carbone de la fin de vie. Celle-ci représente une contribution négative, c'est à dire un crédit d'impact pour tous les scénarios.

- Le scénario métal est le scénario pour lequel les bénéfices de fin de vie sont les plus importants, en raison du recyclage de l'acier. En effet, le recyclage de l'acier permet d'éviter de produire de l'acier à partir de matières premières primaires, représentant un crédit d'impact. Ce crédit d'impact étant largement supérieur aux impacts du procédé de recyclage, on obtient un bénéfice environnemental important ;
- La fin de vie du scénario bois représente également un crédit d'impact important, en raison de la valorisation énergétique de l'incinération du plateau, qui permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles pour la production de chaleur et d'électricité (voir section 4.5.1) ;
- Dans le cas du scénario MDF, le panneau de fibres contient une plus grande proportion de colle que le scénario bois. Une grande partie des émissions dans l'air lors de

l'incinération du panneau MDF en fin de vie est liée à l'incinération de la colle, qui annule les bénéfices liés à la récupération d'énergie.

La distribution représente une plus faible contribution à l'Empreinte carbone totale des différents scénarios mais représente une différence significative entre les scénarios. Les impacts plus importants des scénarios MDF et métal sont liés à la plus grande distance de distribution parcourue (1000 km contre 100 km pour le scénario bois), et dans une moindre mesure au poids plus important des plateaux par rapport à celui du plateau du scénario bois.

Dans le cas du scénario bois, la contribution de la fin de vie est supérieure à la somme des contributions de la production et fabrication et de la distribution, menant à un impact net négatif, soit un bénéfice environnemental.

4.5.3. Analyse comparative du mobilier en bois avec d'autres scénarios – Multi-indicateurs

La Figure 4-4 présente les impacts environnementaux globaux du scénario bois comparé aux scénarios « MDF laqué PUR » et « métal finition peinture époxy ».

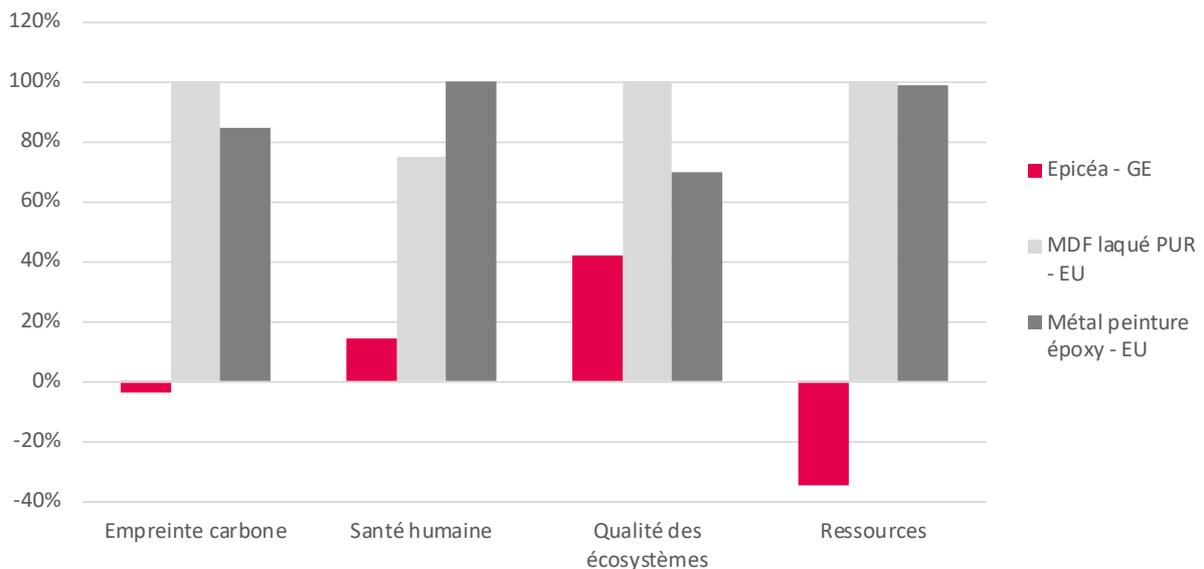


Figure 4-4: Analyse comparative des impacts environnementaux du cycle de vie d'un plateau de bureau pour les différents scénarios. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'impact environnemental maximal.

De manière générale, nous pouvons voir que le scénario bois représente de plus faibles impacts environnementaux que les deux autres scénarios, pour tous les indicateurs, de façon significative.

Comme pour l'indicateur *Empreinte carbone*, les valeurs négatives du scénario bois pour l'indicateur *Ressources* s'expliquent par la valorisation énergétique de l'incinération du plateau

en fin de vie, qui représente un bénéfice supérieur aux impacts lors de la phase de production et de distribution.

Pour les autres scénarios, les crédits de fin de vie, et notamment du recyclage de l'acier pour le scénario métal, ne viennent pas complètement compenser les impacts de la production et de la distribution de ces matériaux non-renouvelables (métal, plastique, colle).

4.5.4. Analyses de scénarios

4.5.4.1. Scénario bois – Emploi d'une couche de vernis supplémentaire (au lieu de bois brut)

Ce scénario consiste à évaluer les impacts du scénario bois si celui-ci est recouvert d'une couche de vernis au lieu d'être simplement en bois brut.

Les impacts du scénario bois augmentent lorsque l'on ajoute une couche de vernis (et les bénéfices diminuent pour les indicateurs *Empreinte carbone* et *Ressources*).

Les conclusions sur la comparaison avec les deux autres scénarios restent cependant inchangées : le bois reste le meilleur scénario, même avec une couche de vernis (voir **Error! Reference source not found.**).

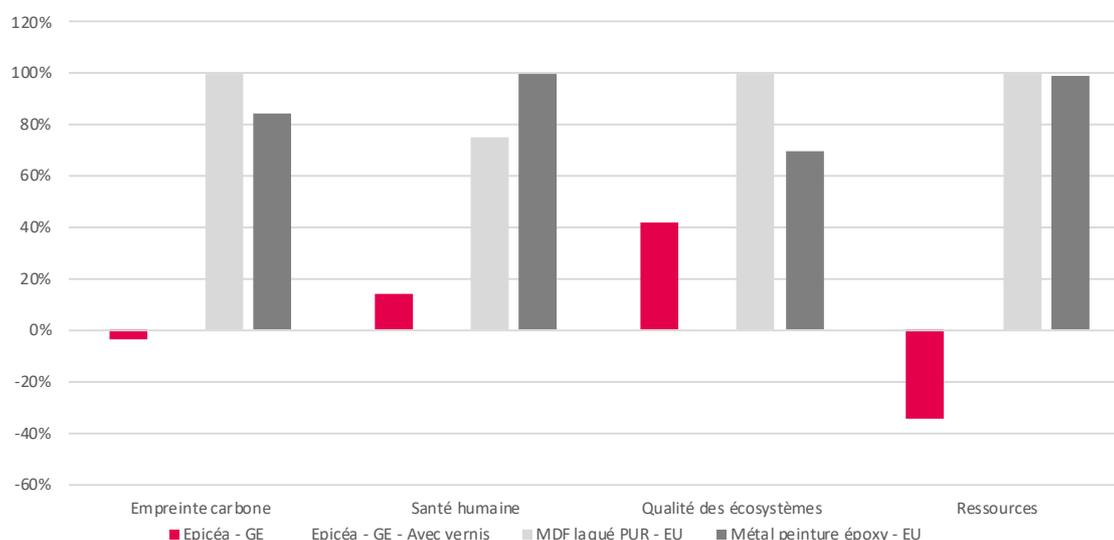


Figure 4-5 : Analyse d'un scénario « Bois + couche de vernis » : comparaison des impacts environnementaux avec les différents scénarios. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'impact environnemental maximal.

4.5.4.2. Influence de l'effet climatique du stockage de carbone dans le bois

L'objectif de cette analyse est d'évaluer l'effet climatique du stockage de carbone dans les éléments en bois, c'est à dire de voir l'évolution des résultats de l'indicateur *Empreinte*

carbone. Chacun des trois scénarios étant constitués entièrement ou en partie d'éléments en bois (bois massif pour le scénario bois, panneau MDF, et cœur en panneau de particules pour le scénario métal), l'effet climatique du stockage de carbone est analysé pour les trois scénarios. Les résultats sont présentés dans la Figure 4-6.

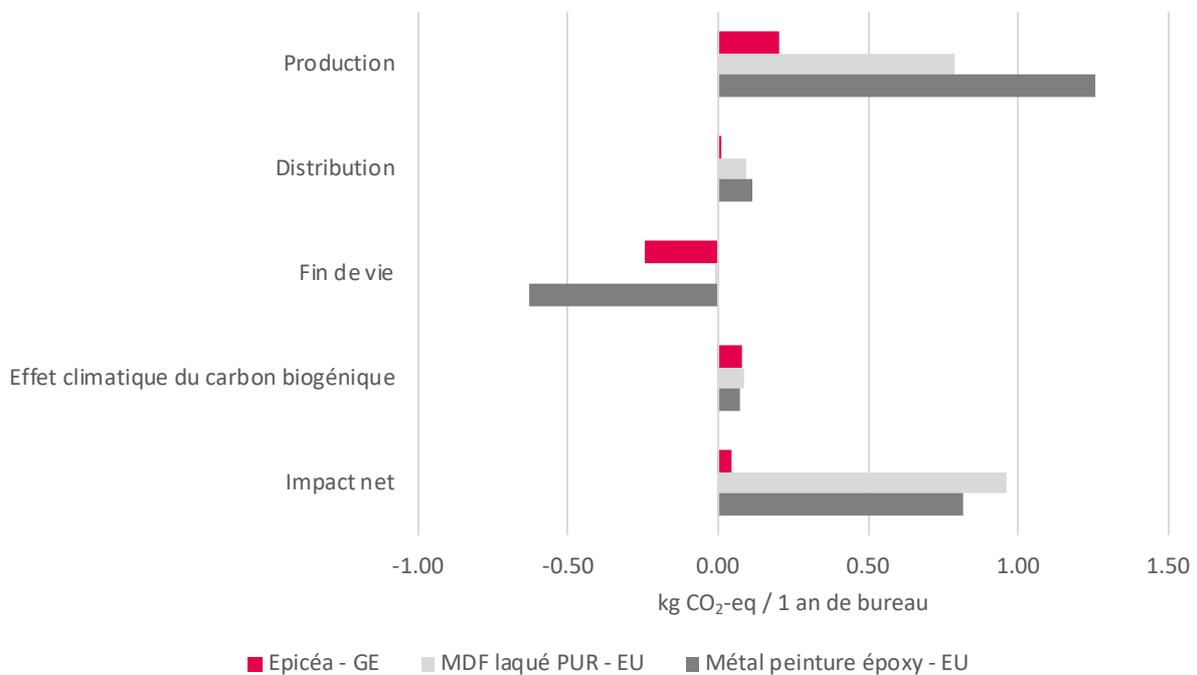


Figure 4-6: Contribution du stockage de carbone biogénique dans le mobilier sur l'ensemble du cycle de vie.

Dans le cas du mobilier, l'effet du stockage de carbone biogénique représente un impact climatique. En effet, la durée de vie du mobilier (15 ans) est bien inférieure à la période de rotation des arbres utilisés (40 ans).

Au vu du temps de croissance d'une forêt, on considère qu'un produit forestier doit vivre au moins la moitié de la durée de rotation de l'exploitation pour atteindre la neutralité climatique. En-dessous de ce ratio, le produit (s'il est incinéré) relâche son carbone trop tôt pour engendrer un bénéfice et engendre alors un impact.

En considérant l'effet climatique du stockage de carbone, le scénario du mobilier en bois représente un impact net au lieu d'un bénéfice : les bénéfices de fin de vie ne sont plus suffisants pour compenser les impacts liés aux autres étapes du cycle de vie et au stockage trop court de carbone.

Cependant, les conclusions restent inchangées : le scénario bois reste de loin le scénario le plus performant pour l'Empreinte carbone.

4.6. Conclusion

Le scénario en bois d'épicéa, qu'il soit recouvert ou non d'une couche de vernis, est largement le meilleur de trois solutions analysées. Cette conclusion reste vraie même en considérant l'impact climatique de l'utilisation non renouvelable du bois (période de stockage de carbone dans le mobilier plus courte que la période de croissance de la forêt). Dans une logique d'utilisation en cascade, le bois, ressource naturelle et locale, est d'abord utilisée sous forme matière, avant de fournir de l'énergie en fin de vie.

La meilleure performance environnementale du scénario bois s'explique par l'utilisation d'une ressource carbone neutre, et dans une moindre mesure par la proximité de la ressource. Les impacts plus importants des autres scénarios sont liés à l'utilisation de matériaux non-renouvelables dont la production génère des impacts environnementaux, notamment la colle (scénario MDF) et l'acier (scénario métal).

Ces résultats sont cependant dépendants d'un certain nombre de choix méthodologiques et d'hypothèses listés ci-dessous.

- Les impacts liés à la fin de vie des différents scénarios sont dépendants de deux paramètres importants :
 - L'efficacité de la récupération d'énergie (électricité et chaleur) de l'UVTD : les valeurs utilisées dans l'étude sont les valeurs planifiées des Cheneviers IV (ouverture prévue en 2023) et sont très hautes par rapport aux valeurs moyennes des UVTDs suisses. D'autres scénarios de fin de vie sont à l'œuvre (incinération en cimenterie) ou en projet (centrale CCF à bois) pour le bois usagés genevois, mais leur bilan environnemental ne sont pas suffisamment différent de celui des Cheneviers pour modifier les résultats de l'étude.
 - Le taux de recyclage de l'acier : il est considéré que 100% de l'acier du scénario métal est recyclé. Le recyclage de l'acier représente un impact négatif (= bénéfique environnemental) important. S'il s'avère qu'une plus faible proportion de l'acier est recyclé, les impacts du scénario acier seraient encore augmentés par rapport au scénario bois. Il reste une incertitude sur l'évaluation de la performance environnementale du recyclage de l'acier, lié à la modélisation et à la base de données utilisée. Pour une évaluation plus précise de la performance environnementale de l'acier en Suisse, il faudrait procéder à une collecte de données primaires portant sur le lieu de recyclage, le type et la quantité d'électricité utilisée, la source et la quantité d'énergie pour production de chaleur, l'efficacité du procédé, etc...
- Les résultats de cette analyse ne sont applicables qu'au périmètre de l'étude, et ne sont pas applicables dans un autre contexte géographique.

5. Annexes

5.1. Construction - Résultats globaux de la production de la structure pour les trois déclinaisons

La comparaison des scénarios de production de l'ensemble de la structure (excluant les façades et fenêtres) est présentée dans la Figure 5-1 pour le bâtiment R+2, dans la Figure 5-2 pour le bâtiment R+5, et la Figure 5-3 pour le bâtiment R+8.

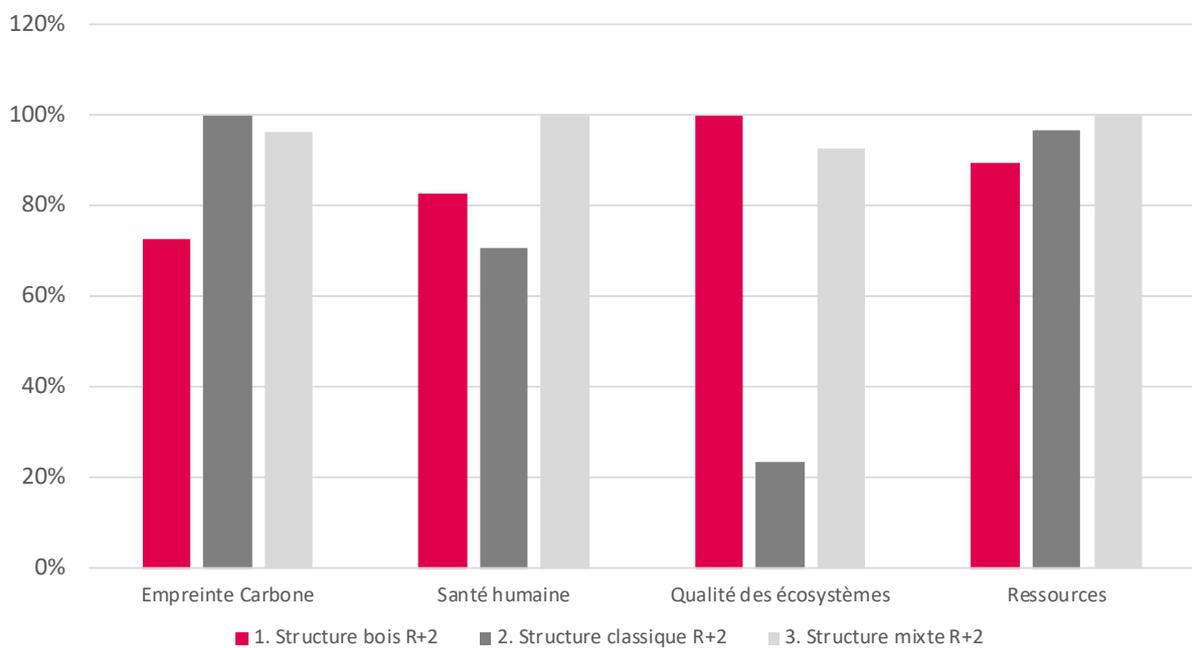


Figure 5-1: Analyse comparative des impacts environnementaux de la production de la structure d'un bâtiment R+2 pour les différents scénarios. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'impact environnemental maximal pour chaque indicateur.

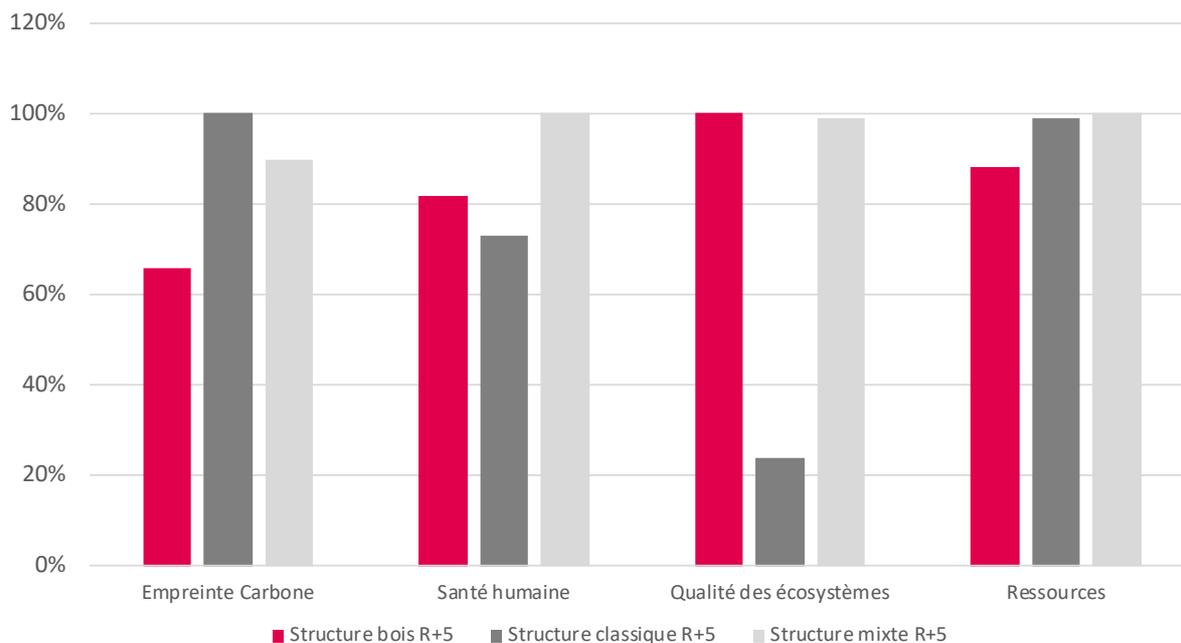


Figure 5-2: Analyse comparative des impacts environnementaux de la production de la structure d'un bâtiment R+5 pour les différents scénarios. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'impact environnemental maximal pour chaque indicateur.

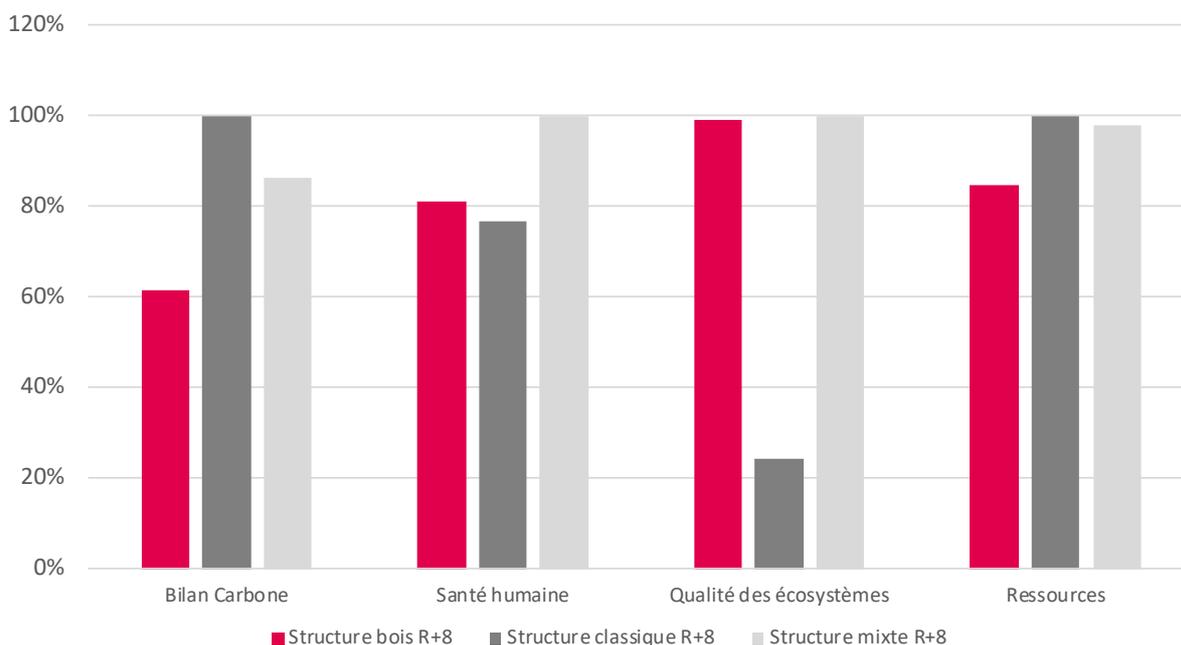


Figure 5-3: Analyse comparative des impacts environnementaux de la production de la structure d'un bâtiment R+8 pour les différents scénarios. Les résultats sont représentés de manière relative, 100% étant l'impact environnemental maximal pour chaque indicateur.

De manière générale, les mêmes tendances sont observées pour les déclinaisons R+2, R+5 et R+8 que pour la déclinaison R+2.

- Les différences de l'*Empreinte carbone* et de l'impact sur les *Ressources* augmente au fur et à mesure que l'on augmente le nombre d'étages : en effet, la structure classique devient de plus en plus lourde, nécessitant de plus en plus de béton et d'armature pour soutenir l'ensemble, alors que les structures bois et mixte restent relativement légères, avec peu de changement dans les éléments inférieurs (sous-sol, rez-de-chaussée).
- Les différences de score observées pour les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes* s'atténuent.

5.2. Construction - Production de la structure – Empreinte carbone des différents éléments pour les trois déclinaisons

La comparaison de l’empreinte carbone des différents éléments de la structure est présentée dans la Figure 3-11 pour la déclinaison R+2.

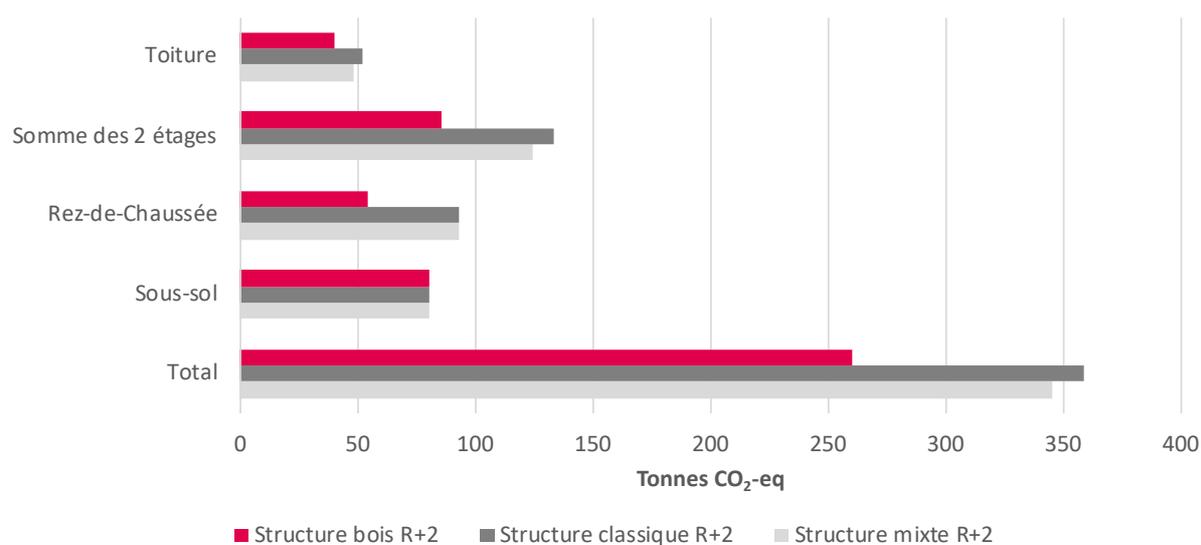


Figure 5-4: Production de la structure R+2 : empreinte carbone des différents éléments.

- Le scénario bois présente une empreinte carbone largement inférieure aux deux autres scénarios ;
- Le sous-sol est le même pour les trois bâtiments ;
- Le rez-de-chaussée est un élément fortement contributeur, car il doit pouvoir porter le poids des étages et représente donc aussi une grande quantité de béton et d’armature pour les scénarios classique et mixte;
- Les étages sont moins contributeurs que les autres éléments car ce sont des éléments légers.

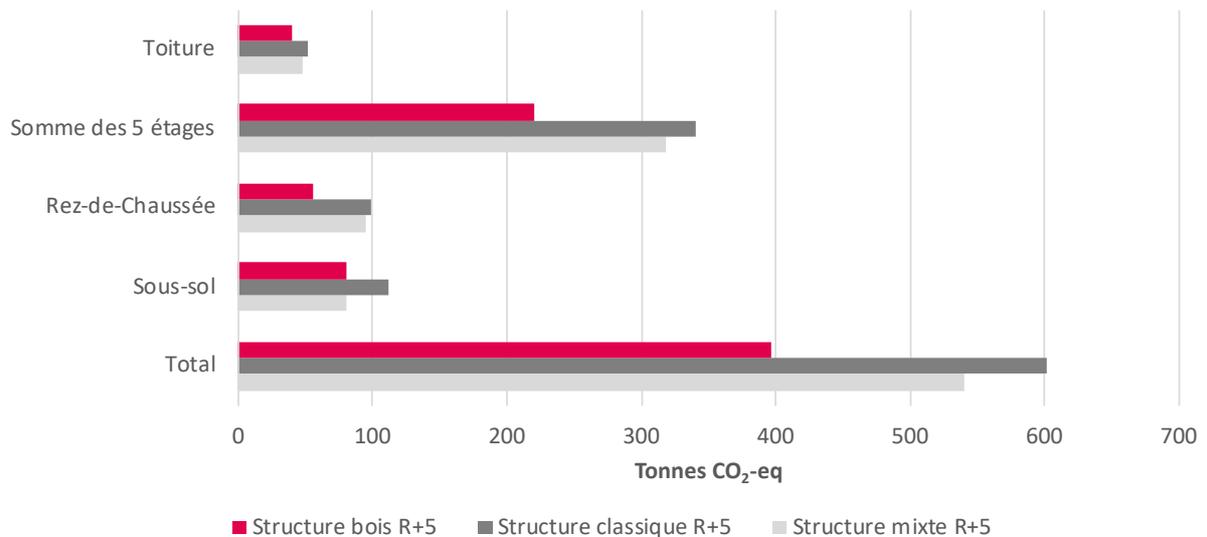


Figure 5-5: Production de la structure R+5 : empreinte carbone des différents éléments.

La différence se creuse entre le scénario bois et le scénario classique, en raison de la légèreté de la structure. Le scénario mixte se différencie également un peu mieux du scénario classique. Ceci est principalement lié aux éléments suivants :

- Le sous-sol, qui reste le même que pour la déclinaison R+2 pour les scénarios bois et mixte, alors que son impact augmente pour le scénario classique (plus grande quantité de béton et d'armature nécessaire).
- Les étages : pour le bâtiment classique, la quantité d'armature des étages inférieurs doit augmenter afin de supporter le poids des étages supérieurs, augmentant également l'impact des étages, alors que la composition des étages du scénario bois et mixte est très similaire à celle du bâtiment R+2 (seulement les ferrures et visserie augmentent légèrement).

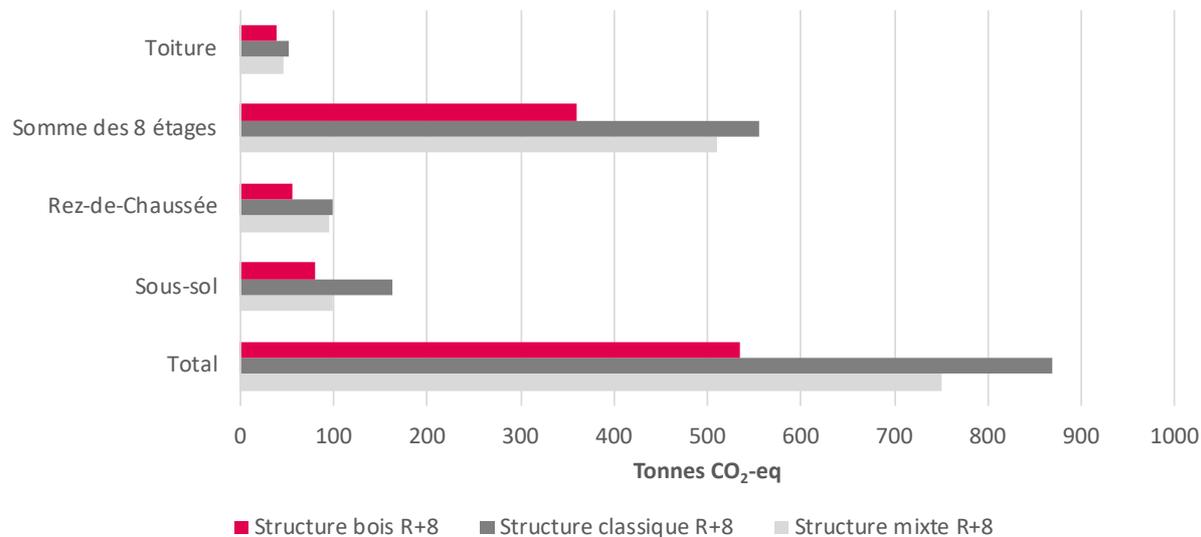


Figure 5-6: Production de la structure R+8 : empreinte carbone des différents éléments.

Pour le scénario R+8, les différences se creusent encore, pour les mêmes raisons que pour la comparaison des déclinaisons R+2 et R+5.

5.3. Mobilier - Comparaison multi-indicateurs du mobilier en bois avec d'autres scénarios : contribution des étapes du cycle de vie

La Figure 5-7 présente le détail des contributions des différentes étapes du cycle de vie (Production et fabrication, Distribution et Fin de vie) à l'impact environnemental total de chaque scénario pour l'indicateur *Ressources*, la Figure 5-8 pour l'indicateur *Santé humaine*, et la Figure 5-9 pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes*.

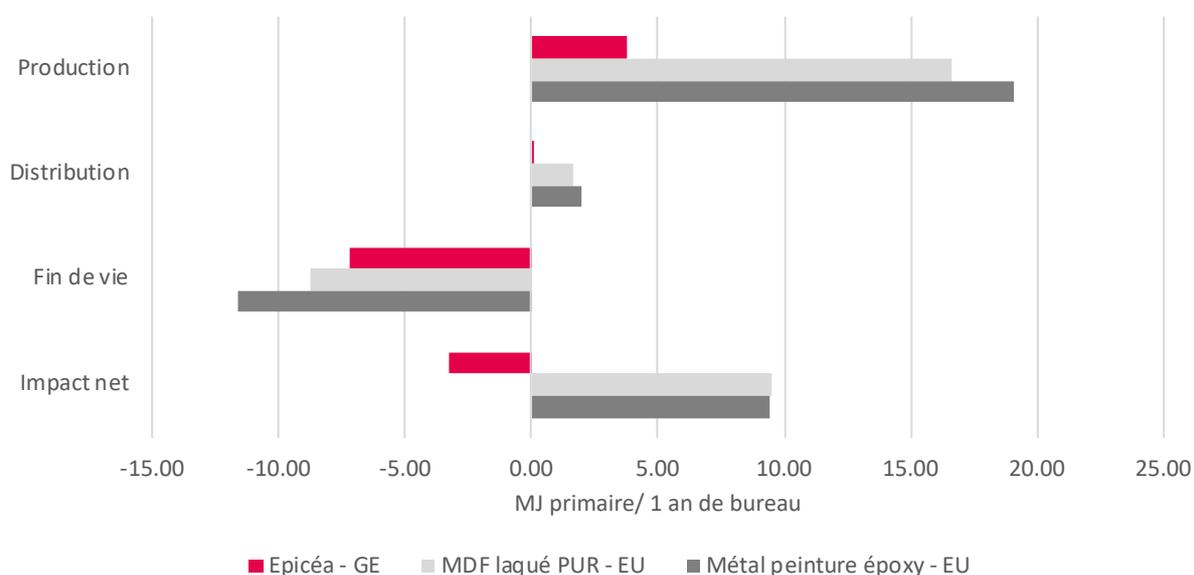


Figure 5-7: Ressources naturelles: impact des étapes du cycle de vie d'un plateau de bureau des différents scénarios.

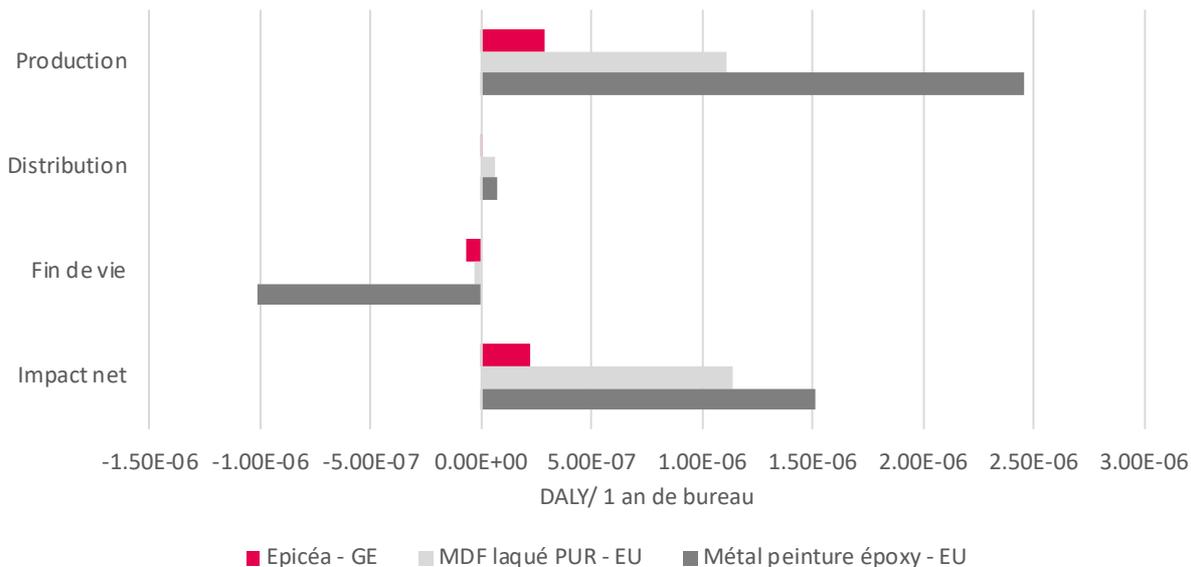


Figure 5-8: Santé humaine : impact des étapes du cycle de vie d'un plateau de bureau des différents scénarios.

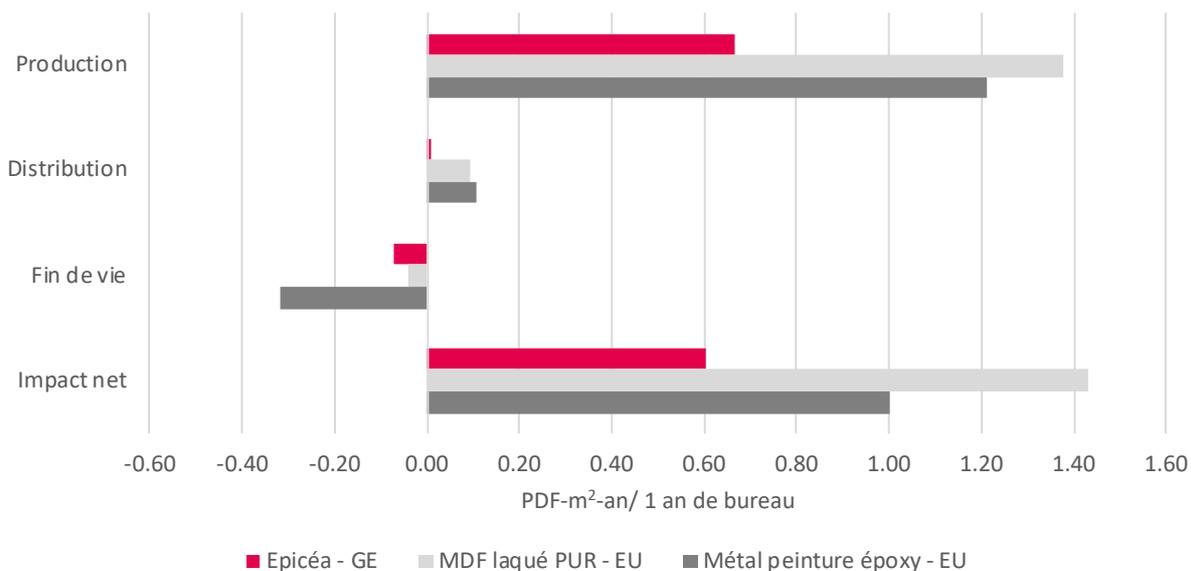


Figure 5-9: Qualité des écosystèmes : impact des étapes du cycle de vie d'un plateau de bureau des différents scénarios.

Comme pour l'indicateur Empreinte carbone, la meilleure performance environnementale du scénario bois est liée en premier lieu à la phase de production et fabrication.

- Pour l'indicateur *Santé humaine* et *Ressources*, l'impact plus important du scénario MDF est lié à la plus grande quantité de colle utilisée pour la réalisation du plateau, ainsi qu'à une consommation plus importante d'énergie (en particulier d'électricité) pour la fabrication du panneau MDF. L'impact plus important du scénario métal est lié à la production de l'acier, matériau représentant des impacts environnementaux très

élevés, ainsi qu'à la plus grande quantité de colle utilisée pour le cœur du plateau constitué de panneau de particules.

- Pour l'indicateur *Qualité des écosystèmes*, l'analyse est légèrement différente : l'impact sur la qualité des écosystèmes est lié principalement à l'occupation du sol par les forêts: l'utilisation de bois représente donc une contribution plus importante que les autres éléments pour cet indicateur, ce qui explique qu'il y ai moins de différence entre le scénario bois et les deux autres scénarios.

Le second contributeur aux différences entre les scénarios et la phase de fin de vie, qui représente une contribution négative, c'est à dire un crédit d'impact pour tous les scénarios et pour tous les indicateurs.

- Comme pour l'*Empreinte carbone*, le scénario métal est le scénario pour lequel les bénéfiques de fin de vie sont les plus importants, en raison du recyclage de l'acier ;
- La fin de vie du scénario bois représente également un crédit d'impact important pour l'indicateur *Ressources naturelles* en raison de la valorisation énergétique de l'incinération du plateau ;
- Dans le cas du scénario MDF, le panneau de fibres contient une plus grande proportion de colle que le scénario bois. Une grande partie des émissions dans l'air lors de l'incinération du panneau MDF en fin de vie est liée à l'incinération de la colle, qui représente un impact important pour les indicateurs *Santé humaine* et *Qualité des écosystèmes*. Comme pour l'*Empreinte carbone*, les émissions liées à l'incinération de la colle réduit les bénéfiques liés à la récupération d'énergie.

La distribution représente une faible contribution à l'impact total des différents scénarios et pour les différents indicateurs.

Pour l'indicateur *Ressources* la contribution de la fin de vie du scénario bois est supérieure à la somme des contributions de la production et fabrication et de la distribution, menant à un impact net négatif, soit un bénéfice environnemental.

5.4. Description des indicateurs d'impact

Dans le cadre de cette étude, la méthode l'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) employée est la méthode européenne internationalement reconnue et revue par les pairs IMPACT 2002+ vQ2.2 (Jolliet et al. 2003; Humbert et al. 2012). Celle-ci propose une approche orientée à la fois vers les impacts intermédiaires et les dommages permettant d'associer tous les résultats de l'ICV à seize catégories intermédiaires et à quatre indicateurs de dommage. La Figure 5-10 montre la structure globale d'IMPACT 2002+, faisant le lien entre l'inventaire du cycle de vie et les différents indicateurs. Une flèche pleine symbolise une relation connue et modélisée quantitativement basée sur les sciences naturelles. Les relations entre les catégories intermédiaires et de dommages qui sont suspectées, mais pas modélisées de manière quantitative sont indiquées par des flèches en traitsillés.

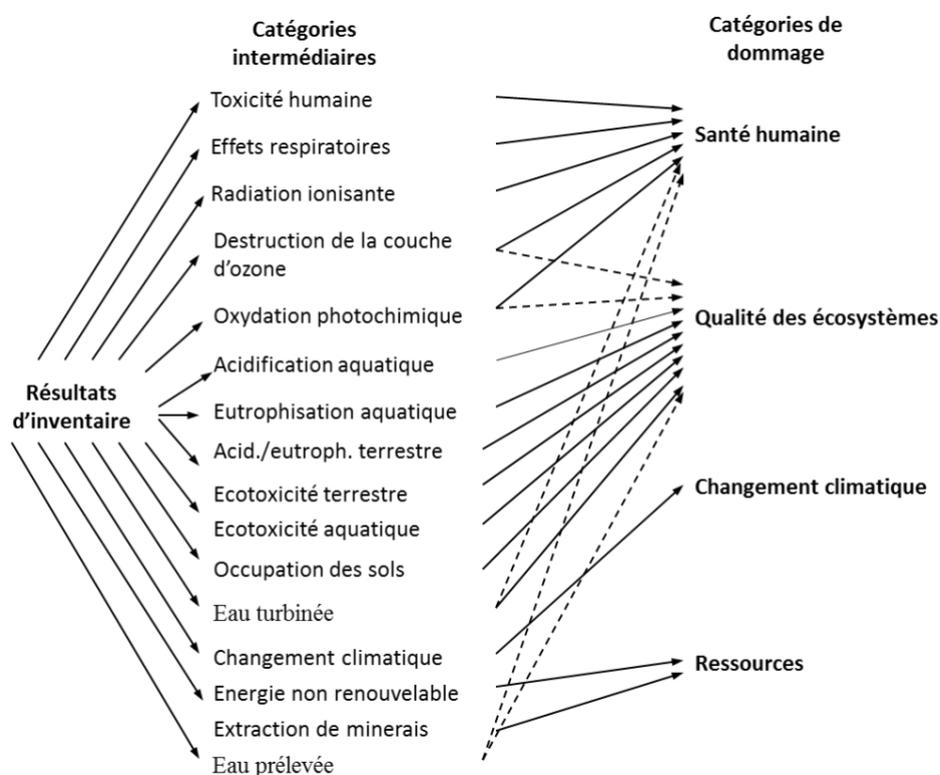


Figure 5-10: Schéma global de la méthode IMPACT 2002+ vQ2.2 (Jolliet et al. 2003 ; Humbert et al. 2012).

La liste suivante décrit de manière succincte les différentes catégories intermédiaires de la méthode IMPACT 2002+ vQ2.2.

1. Toxicité humaine : la toxicité humaine mesure les impacts sur la santé humaine associés aux impacts cancérigènes et non cancérigènes causés par des polluants émis dans l'environnement et entrant en contact avec l'humain par la respiration,

par la nourriture ou par la boisson. Les impacts cancérigènes et non cancérigènes, peuvent dans certains cas, être représentés comme deux indicateurs séparés.

2. Effets respiratoires (aussi appelé le smog d'hiver ou le "smog de Londres"): les effets respiratoires sont causés par des polluants comme les particules fines primaires ($PM_{2.5}$) et secondaires ($PM_{2.5}$ provenant des NO_x , NH_3 et SO_2 notamment). Ces polluants sont principalement émis par les industries, la production de chaleur et électricité à partir de combustibles liquides et solides et les transports (gaz d'échappement et freins). L'agriculture est aussi une source importante de NH_3 (ammoniac).
3. Radiations ionisantes: cette catégorie mesure les impacts sur la santé humaine causés par des substances émettant des radiations. Ces substances sont principalement émises par l'industrie nucléaire, mais certaines peuvent aussi être présentes de manière naturelle à des concentrations élevées (p.ex. radon).
4. Destruction de la couche d'ozone: cette catégorie mesure le potentiel de réduction de la couche d'ozone stratosphérique (O_3) et de l'augmentation des UV (rayonnement ultraviolet) atteignant la surface de la Terre. Ces UV peuvent engendrer des impacts sur la santé humaine comme les cancers de la peau et les cataractes. Des dommages sur les écosystèmes terrestres et aquatiques ont aussi lieu. Les polluants détruisant la couche d'ozone, comme les CFC (chlorofluorocarbones) sont émis par certains procédés spécifiques, et notamment par les systèmes de refroidissements.
5. Oxydation photochimique: cette catégorie mesure les effets sur la santé humaine (et éventuellement sur la croissance des plantes) provenant de la formation d'ozone troposphérique (O_3) (aussi appelé le smog d'été ou le "smog de Los Angeles"). Les polluants responsables de la formation d'ozone troposphérique comme les NO_x et les composés organiques volatils (COV) sont principalement émis par le trafic routier et les activités industrielles, ainsi que par l'industrie agricole et sylvicole.
6. Écotoxicité aquatique: cette catégorie mesure les effets sur les écosystèmes aquatiques (eaux fraîches) en termes de réduction de biodiversité causée par les émissions écotoxiques (notamment les métaux lourds) dans l'environnement.
7. Écotoxicité terrestre: cette catégorie mesure les effets sur les écosystèmes terrestres en termes de réduction de biodiversité causée par les émissions écotoxiques (notamment les métaux lourds) dans l'environnement.
8. Acidification aquatique: se réfère à la réduction des populations de poisson et autres espèces aquatiques causée par une acidification des eaux. Les substances responsables de l'acidification, comme les NO_x , le NH_3 , et le SO_x , peuvent être

émises par l'industrie lourde, la production de chaleur et d'électricité avec des combustibles liquides et solides, ainsi que par le trafic et l'agriculture.

9. Eutrophisation aquatique: se réfère à l'augmentation graduelle en nutriments des eaux, permettant une augmentation de la biomasse notamment algale, qui lorsqu'elle se dégrade consomme l'oxygène dissout dans l'eau et amène à une réduction des espèces les plus sensibles à la concentration en oxygène dissout. Ces nutriments sont principalement associés au phosphore et aux nitrates contenus dans les détergents et les engrais.
10. Acidification et nitrification terrestre: cette catégorie mesure le changement en nutriments et le niveau d'acidité dans le sol. Ceci change les conditions naturelles pour la croissance des plantes et leur compétition. Une réduction d'espèces est observée avec un excès de nutriments et une réduction dans la santé de l'écosystème terrestre. Les substances responsables de cet effet, comme les NO_x , le NH_3 , et le SO_x , peuvent être émises par l'industrie lourde, la production de chaleur et d'électricité avec des combustibles liquides et solides, ainsi que par le trafic et l'agriculture.
11. Occupation des sols: cette catégorie mesure la réduction de biodiversité causée par l'utilisation du sol. Cette catégorie est dominée par l'agriculture et la déforestation.
12. Effet de serre: cette catégorie correspond aux impacts résultant des changements du climat. Elle mesure le potentiel du réchauffement climatique des gaz à effet de serre (GES) émis dans l'atmosphère. Les principaux GES sont le CO_2 émis par la combustion des énergies fossiles ainsi que les feux de forêt, le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O), tous deux émis principalement par l'agriculture.
13. Énergie primaire non renouvelable: la consommation des ressources énergétiques fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel), ainsi que de l'uranium, extraite de la terre se mesure en énergie primaire non renouvelable (en MJ primaire). Ces ressources sont sujettes à disparition. La production électrique, de chaleur, et de combustible sont les principaux consommateurs d'énergie fossile et d'uranium.
14. Extraction de minerais: cette catégorie mesure le surplus d'énergie (en MJ) liés à l'effort additionnel nécessaire pour extraire les minéraux à partir de mines de moindre concentration. Le concept de surplus d'énergie est basé sur l'hypothèse que lorsque l'on extrait une ressource, une énergie additionnelle sera nécessaire pour extraire cette même ressource dans le futur à cause de la réduction de concentration moyenne dans les mines.
15. Eau turbinée: cette catégorie mesure la quantité d'eau turbinée pour la production d'électricité (en m^3). Les impacts sur la biodiversité associés au turbinage de l'eau

dépendent de la localisation du site de production électrique (abondance ou pénurie en eau) et du type de centrale (réservoir ou au fil de l'eau).

16. **Eau prélevée:** cette catégorie mesure l'impact potentiel associé au prélèvement d'eau (en m³). Elle prend en compte toute l'eau, qu'elle soit évaporée, consommée ou rejetée en aval, à l'exception de l'eau turbinée (c'est à dire l'eau qui sert à la génération d'hydroélectricité). Cela inclut l'eau potable, l'eau d'irrigation et l'eau pour l'industrie (y compris l'eau de refroidissement), l'eau douce et l'eau de mer. **Cette catégorie n'étant pas encore traduite au niveau des dommages, est fréquemment présentée en parallèle aux quatre indicateurs présentés ci-dessous.**

Ces seize catégories intermédiaires d'impact, à l'exception de l'eau prélevée, sont ensuite traduites au sein des quatre indicateurs de dommages suivants :

1. **Changements climatiques (dans le présent rapport, « Empreinte carbone »)** (kg CO₂-eq)

Cet indicateur est calculé sur la base du potentiel de réchauffement global (GWP) sur 100 ans de divers gaz à effet de serre tel que prescrit par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC, 2007). Les substances connues pour contribuer au réchauffement planétaire sont ajustées selon leur GWP, exprimé en kilogrammes de dioxyde de carbone (CO₂) équivalents. Parce que l'absorption et l'émission de CO₂ à partir de sources biologiques peut souvent conduire à des interprétations erronées des résultats, il n'est pas rare d'exclure ce CO₂ biogénique lors de l'évaluation des GWP. Conformément à la recommandation du *Publicly Available Standard* (PAS) 2050 pour le calcul de l'empreinte carbone, l'absorption et l'émission de CO₂ biogénique ne sont pas comptabilisées. Afin de tenir compte de l'effet de sa dégradation en CO₂, le GWP du méthane (CH₄) d'origine fossile est fixé à 27.75 kg CO₂-eq/kgCH₄, et celui du méthane d'origines biogénique ou non spécifiée est fixé à 25 kg CO₂-eq/kgCH₄.

2. **Santé humaine (DALY)**

Cette catégorie prend en compte les substances qui affectent les êtres humains de par leurs effets toxiques (cancérogènes et non cancérogènes) ou respiratoires, ou qui induisent une augmentation des radiations UV par la destruction de la couche d'ozone. L'évaluation de l'impact global sur la santé humaine est réalisée suivant l'indicateur de dommages « *Human health* » de la méthode IMPACT 2002+, dans lequel la mortalité et la morbidité induites sont combinées dans un score exprimé en DALY (*Disability-adjusted Life Years*).

3. **Qualité des écosystèmes (PDF·m²·y)**

La qualité des écosystèmes peut être compromise par le rejet de substances qui causent l'acidification ou l'eutrophisation des sols et des eaux, dont la toxicité affecte la faune, par l'occupation des terres ou encore le turbinage d'eau douce. L'évaluation de l'impact global sur la qualité des écosystèmes est réalisée suivant l'indicateur de dommages « *Ecosystems quality* » de la méthode IMPACT 2002+, quantifié en fraction d'habitats potentiellement disparus, sur une surface donnée et durant une certaine période de temps, (PDF•m2•y).

4. **Ressources (MJ)**

Cet indicateur traduit l'utilisation de ressources non renouvelables ou l'utilisation de ressources renouvelables à un rythme supérieur à celui de leur renouvellement. Plus d'importance peut être accordée à certains matériaux en fonction de leur abondance et de leur difficulté d'acquisition. L'évaluation de l'impact global sur l'épuisement des ressources a été réalisée suivant l'indicateur de dommages « *Ressources* » de la méthode IMPACT 2002+, qui combine l'utilisation d'énergie primaire de sources non renouvelables et l'extraction de minerai. L'utilisation d'énergie primaire non renouvelable inclut la consommation de ressources fossiles et nucléaires, mais exclut les sources d'énergie renouvelables à toutes les étapes du cycle de vie. L'utilisation d'énergies non renouvelables pour la production d'énergie renouvelable est cependant prise en compte. L'extraction de minerai est une estimation de la quantité additionnelle d'énergie qui serait nécessaire pour en extraire une quantité donnée supplémentaire, du fait d'une accessibilité rendue plus difficile (basé sur la méthode Eco-indicateur 99). Cet indicateur est exprimé en mégajoules (MJ).

5.5. Plans et dimensionnement d'ingénieurs

Disponible en fichiers informatiques séparés