

INFORMATION ET DÉBATS

POTENTIEL DE SEQUESTRATION DE CARBONE PAR LE BOIS : ETUDE DES CONSTRUCTIONS NEUVES DANS LE SECTEUR DU LOGEMENT FRANÇAIS

Florine OLLIVIER-HENRY¹

Du bâtiment passif au bâtiment bas carbone, le contexte climatique et les récentes avancées technologiques ont modifié nos critères de choix dans le secteur du bâtiment, amenant les impacts environnementaux au-devant de la scène des critères indispensables aux structures innovantes. La conception de celles-ci ne peut plus se restreindre à la réduction de la consommation d'énergie, elle doit également tenir compte du choix des matériaux de construction. Permettant à la fois de réduire les émissions indirectes liées à la construction et d'augmenter le stock de carbone vivant, l'intérêt porté aux produits bois s'est vu redoubler. Après un diagnostic du rôle du bois dans la construction et une focale sur le cas français, nous proposons dans cet article un bilan de l'empreinte carbone d'un usage accru de bois dans les constructions neuves de logements français. Nous mettons à la fois en évidence l'intérêt du stockage temporaire de carbone permis par les produits bois et les enjeux soulevés par une telle incitation, en termes de gestion forestière, de traitement de fin de vie et de comptabilisation de la contribution du carbone biogénique. Les effets positifs de la substitution de matériaux par des produits bois n'est plus à prouver. L'effet de séquestration, réel atout des matériaux biosourcés, est au contraire souvent négligé et nécessite l'intégration d'une approche dynamique au calcul de l'indicateur de réchauffement climatique.

¹ Chaire Economie du Climat, Paris

L'auteur tient à remercier Philippe Delacote (INRA, Chaire Economie du Climat) pour ses apports, Marc Baudry (Université Paris-Nanterre, Chaire Economie du Climat) pour sa relecture attentive et enfin Yann Leroy (CentraleSupélec), Koji Negishi (LISBP, Université de Toulouse, CSTB), Bertrand Laratte (ENSAM) et Hélène Genin (BBCA) pour les réflexions qu'ils ont suscitées. Les erreurs qui subsisteraient restent bien sûr sous la seule responsabilité de l'auteur.

MOTS-CLÉS

Bâtiment

Bois

Stockage temporaire

Carbone biogénique

ACV dynamique

Introduction

Dans un contexte où le changement climatique s'accélère, définir et adopter des scénarios de transition devient indispensable. Le secteur du bâtiment compte pour 26% des émissions directes en France et celui de la construction pour 7% en 2016 (ADEME, 2019) soit, au total, un tiers des émissions nationales. La frontière entre le secteur de la construction et ceux de l'industrie et des transports est poreuse et la part des émissions indirectes peut atteindre 20% (BBCA, 2019). D'autre part, le rapport spécial du GIEC de 2018 mentionne qu'il est probable que l'augmentation de la température moyenne atmosphérique atteigne les 1,5° entre 2030 et 2052 si les tendances actuelles se prolongent. Compte-tenu des longues durées de vie des bâtiments, il est d'autant plus justifié de mener dès à présent une politique bas carbone pour les constructions neuves si l'on veut respecter les objectifs de neutralité carbone fixés à 2050 (SNBC, 2018).

Le secteur du bâtiment a dans ce contexte été sujet à des politiques d'efficacité énergétique et soumis à des normes – actuellement la RT 2012 – qui ont permis la réduction des émissions directes (CITEPA, 2019). Avec la normalisation de l'évaluation des impacts environnementaux, notamment par la réalisation d'une analyse de cycle de vie (ACV), il a été possible de répartir la contribution de ces émissions selon la phase du cycle de vie du bâtiment (études citées par Negishi et al. (2018)). La phase d'utilisation a souvent la plus grande contribution mais dépend du mix énergétique, des conditions climatiques et des matériaux considérés (Gustavsson & Sathre, 2010; Kellenberger & Althaus, 2009; Ochsendorf et al., 2011; Tae et al., 2011; Takano et al., 2015). D'après l'étude HQE performance de l'association BBCA, la part de la construction compte pour 60% des émissions contre 40% pour l'exploitation (BBCA, 2019). En vue d'une production et d'une utilisation de l'énergie de plus en plus efficace, l'impact associé à la phase d'utilisation va diminuer en importance relativement aux autres phases du cycle de vie (Gustavsson, Joelsson, & Sathre, 2010). Nässén et al. (2007) mettent d'ailleurs en avant une sous-estimation répétée des phases de production et notamment du transport associé. Ceci est principalement dû à un manque de données qui dévalue davantage la phase de production par rapport à la phase d'utilisation. Dans un objectif de neutralité carbone du secteur, une attention forte doit être portée aux émissions indirectes (SNBC, 2018). Dans cette optique, la loi Elan 2018 a intégré la capacité de stockage de carbone des matériaux et une nouvelle norme, la RE 2020, est en cours de rédaction. Elle vise à limiter les émissions des constructions neuves et à normaliser le stockage de carbone à l'échelle du bâtiment (ADEME, 2019).

L'atténuation du changement climatique nécessite à la fois un développement des puits de carbone et une réduction des émissions dans l'atmosphère (IPCC, 2014b; Smyth et al., 2017). En ce sens, le bois joue un rôle unique. D'une part, le bois est intrinsèquement composé de carbone à hauteur de 50% en moyenne (Wang et al., 2013). La production de ces composés carbonés se fait dans un premier temps par la production de glucose par photosynthèse grâce à l'énergie solaire et l'absorption du CO₂ de l'air (Lecompte, 2019). La vie et croissance des plantes est donc un processus qui séquestre du carbone. De par ce constat, l'usage du bois associé à une croissance continue des arbres permet d'augmenter la capacité de stockage de carbone de l'ensemble forestier et donc de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). La forêt, contenant 80% du carbone terrestre hors sol, est en effet un pilier du cycle global du carbone (Dixon, 1994) et les produits bois ont été ajoutés à la comptabilisation du puit de carbone global (IPCC, 2014a). D'autre part, le bois peut être utilisé en substitution à d'autres éléments plus émetteurs, notamment le bois-énergie à la place d'énergies fossiles ou le bois en tant que matériau à la place de matériaux générant davantage d'émissions tout au long de leur cycle de vie. Le bois est donc un vecteur de réduction des émissions en plus d'être un puit de carbone.

La question de la contribution des produits bois à l'atténuation du changement climatique a été largement étudiée et discutée (Geng, Yang, Chen, & Hong, 2017). Le GIEC a conclu que la production d'un taux durable de produits bois ou de bois énergie originaires de forêts gérées durablement aura les bénéfices les plus importants pour l'atténuation du changement climatique sur le long terme (IPCC, 2007). Le nombre de produits bois, et donc le stock de carbone associé, augmente à l'échelle internationale (Pingoud et al., 2003, et Winjum et al., 1998, cités par Geng et al., 2017) et l'évolution est plus incertaine à l'échelle nationale mais avec une tendance à l'augmentation (Geng et al., 2017). Néanmoins, les bénéfices de l'usage de produits bois sont plus importants lorsqu'ils se substituent à des énergies fossiles ou à des matériaux employant des énergies fossiles (Roger Sathre & O'Connor, 2010) et l'efficacité du stockage temporaire dans les produits dépend fortement de sa fin de vie et du type de forêt (Geng et al., 2017; Smyth et al., 2017).

Outre l'emploi de matériaux issus de la sylviculture, les bâtiments « verts », dits biosourcés, peuvent également être constitués de matériaux issus de l'agriculture comme les plantes à fibres (lin ou chanvre) ou les sous-produits agricoles (pailles de céréales) ou encore de matériaux biosourcés recyclés (papier, métisse) (DRIEA IF, 2016). Ces matériaux présentent un potentiel considérable en termes de performance et de réponse aux attentes du bâtiment durable mais la complexité de la filière, de par la diversité des biomasses et des technologies, limitent leur développement. D'autre part, les opportunités de recyclabilité et de valorisation restent limitées à cause d'un volume de biomasse trop faible (OID, 2019). Les matériaux issus de la sylviculture sont d'autant plus intéressants que la filière est déjà largement développée en France.

Développement des puits de carbone, réduction des émissions par substitution, les produits bois semblent être de bons candidats pour répondre à l'objectif de neutralité carbone dans le secteur du bâtiment. Pourtant, le nombre de constructions en bois reste limité. Quelle est la situation en France ? L'usage accru du bois dans les constructions neuves est-il un levier pour les objectifs nationaux de neutralité carbone ? Quelle est l'influence du stockage temporaire du carbone par le bois dans ce secteur ? Quel impact un usage accru de bois pour la construction a-t-il au niveau de la filière bois ? La présente étude aura pour objectif d'établir les caractéristiques du cas français, d'identifier les méthodes employées pour la mesure d'impact environnemental et leurs limites, puis de mesurer l'impact de réchauffement climatique d'un usage accru de bois dans les constructions neuves à l'échelle du parc de logement français. Nous aurons pour cela mesuré cet impact à l'échelle d'un bâtiment dans un premier temps. Ce travail a donc pour visée d'élargir les conclusions allouées au bâtiment à une échelle macro afin d'appuyer des politiques publiques. Il servira de première étape à la compréhension des enjeux de l'usage de bois dans la construction et à la réalisation de recherches académiques plus approfondies.

I. Le bois dans la construction et le stockage temporaire : constats et verrous méthodologiques

Utiliser davantage de bois dans une optique de séquestration de carbone nécessite en amont d'étudier la ressource, donc la forêt, et sa capacité à produire du bois. Cela nécessite également de calculer l'impact environnemental du produit bois en tant que tel puis du bâtiment entier et d'interroger les méthodes de calcul d'impact employées.

Cette première partie servira donc d'état de l'art des faits et enjeux associés au sujet de l'étude. Nous commencerons par étudier le cas de la forêt française en termes de capacité d'exploitation forestière et les contraintes qui en émanent. Puis nous nous intéresserons au bois en tant que matériau de construction et son impact mis en avant par des méthodes conventionnelles. Enfin, nous explorerons une évaluation d'impact alternative, plus appropriée à l'étude.

A. La forêt française

La lecture du rapport de l'IGN édition 2018 sur la forêt française permet d'obtenir un aperçu de ses caractéristiques et des enjeux qu'elles susciteront dans la gestion forestière (IGN, 2018).

Nous retirons trois conclusions de cet inventaire :

- la forêt française a un fort potentiel de productivité de produits bois avec un taux de prélèvement raisonnable de 54% et un volume de bois en croissance (croissance de 45% en 30ans) ;
- les prélèvements sont toutefois limités par l'accessibilité aux forêts dont le tiers sont catégorisées d'« accès difficile » et par les difficultés sous-jacentes au statut de propriété (publique ou privée) ;
- les forêts séquestrent 12% des émissions de GES chaque année (65 MtCO₂ séquestrées pour 540MtCO₂ émises) (FCBA, 2014). Cette séquestration est cependant variable sur le territoire du fait d'une diversité des contextes pédoclimatiques, du degré de maturité des peuplements et de la prépondérance des essences feuillues ou résineuses (les arbres des essences feuillues représentent 75 % du stock national de carbone alors qu'ils comptent pour 64 % du volume de tronc).

Une stratégie d'exploitation de bois intensifiée en France semble donc possible. Un rapide calcul permet d'obtenir un ordre de grandeur du stock de carbone généré par l'utilisation d'un hectare de forêt pour la fabrication de produits bois. La forêt française couvre 16,9 millions d'hectares, contient 2,7 milliards de mètres cubes de bois et 12,6 milliards tonnes de carbone (IGN, 2018), ce qui correspond en moyenne à 159,8 m³/ha et 74,6 tC/ha. L'âge médian d'exploitation de la forêt française est d'environ 60 ans. Par conséquent, l'exploitation d'un hectare de forêt française reviendra à un stock d'environ 4,6 tCO₂/an, soit l'équivalent des émissions de la production de 15MWh par une chaudière fioul¹ nécessaire au chauffage pendant une année², et permettra la fabrication, par exemple, de 53 charpentes industrielles ou encore de 80 ossatures bois de maison³, sans compter les éventuels réutilisations et recyclages possibles ensuite.

La gestion forestière est en fait au cœur des enjeux de séquestration carbone. Werner et al. (2010) présentent différents scénarios de gestion des forêts et leur impact sur le stock de carbone total. Ils envisagent des scénarios avec une production maximale, avec un impact carbone minimal ou avec un stock de carbone forestier maximal. Ils montrent que le scénario de maximisation du stock de carbone forestier a un effet beaucoup plus efficace à court terme mais pas à long terme, à cause de la limitation de la capacité forestière. Ce scénario présente par ailleurs des risques vis-à-vis des aléas climatiques qui vont avoir tendance à s'accroître dans les décennies à venir et toucher davantage de forêt (IPCC, 2007). Werner et al. mettent également en avant l'effet sur le marché de tels scénarios, qui seront soumis à des évolutions de la demande et du prix. Ils mettent donc en évidence la nécessité de la mise en place de politiques de gestion de ces conséquences (notamment via des quotas de bois dans certains secteurs). Bourque et al. (2007) proposent une méthodologie permettant de choisir la gestion forestière la plus optimisée selon la séquestration de carbone, le revenu du gestionnaire forestier et la durabilité de la pratique (surface productive restant au moins égale).

¹ Bilan Carbone® ADEME / FCBA

² Environ 50kWh/jour de chauffage, très variable

³ Calculs effectués avec les fiches FDES et la surface moyenne d'une maison française (INSEE, 2016)

Cependant, si seul l'impact de réchauffement climatique est pris en compte, d'autres conséquences néfastes pour l'équilibre du système forestier peuvent survenir, notamment la perte de biodiversité. En Europe, la gestion forestière durable doit respecter six critères définis lors de la conférence d'Helsinki (1993) (IFN, 2011) :

- conservation et amélioration des ressources forestières (maintien des capacités de production) ;
- maintien de la santé des forêts, de leur bon état sanitaire ;
- satisfaction de la fonction de production (bois et produits non ligneux) ;
- respect de la biodiversité dans les écosystèmes forestiers ;
- protection du sol et des eaux ;
- fournitures des diverses « aménités », telles que l'accueil du public ou la qualité du paysage ; conditions socio-économiques.

C'est un fait : 40% des espèces dans le monde ont couru à leur perte à cause de gestions agricoles intensives, notamment la monoculture et les pesticides (Isbell et al., 2017). Il ne faudrait donc pas que les politiques d'atténuation et d'adaptation au changement climatique encouragent ce dommage.

Felton et al. (2016) étudient sept stratégies de d'atténuation et d'adaptation au changement climatique et leurs impacts sur la biodiversité. Ils recensent trois objectifs à valider pour maintenir la biodiversité (critères spatio-temporels, composition des espèces et structure des forêts) et classent les sept stratégies en fonction de ces trois objectifs. La Figure 1 schématise les résultats qu'ils ont obtenus. Les trois stratégies ressortant comme les plus favorables sont la conversion de forêts de résineux en espèces feuillues, l'augmentation des temps de rotation des forêts et la maintenance de la canopée forestière passant par une diversité des âges des arbres composant la forêt.

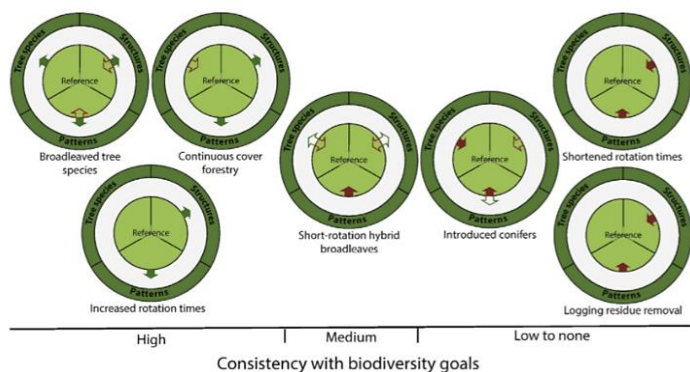


Figure 1 Synergie entre stratégies d'atténuation de réchauffement climatique et préservation de la biodiversité (Felton et al., 2016)

Isbell et al. (2017) montrent qu'en outre, la diversité peut avoir des bénéfices sur la production. Le mélange et les rotations offrent davantage de biomasse à récolter que les monocultures. Il recense les études prouvant que les associations et la richesse en nombre d'espèces augmentent le rendement des cultures. Ceci est également vérifié pour le bois. La diversité permet également de stabiliser le rendement de par une meilleure résistance aux changements et aléas climatiques. Elle entraîne de plus une diversité des pollinisateurs et une réduction des mauvaises herbes et parasites. En effet, la diversité réduit l'espace laissé aux plantes nuisibles et attire davantage de pollinisateurs différents alors qu'au contraire, la culture d'une seule plante provoque de grosses concentrations de ressources qui bénéficient à d'autres plantes mais aussi aux parasites. Enfin, une diversité de plantes permet une amélioration du recyclage des nutriments. Les enjeux de ces pratiques résident dans les investissements financiers nécessaires et dans la difficulté de l'établissement et la maintenance d'associations favorables à la fois à la production et à d'autres services rendus aux écosystèmes.

B. Le bois et la construction

Le bois semble pouvoir jouer un rôle important dans l'atteinte de la neutralité carbone du secteur du bâtiment. Voyons ce qu'il en est dans la littérature et quels sont les éléments clés à retenir de l'analyse d'impact dans le bâtiment et du bois en tant que matériau de construction. Nous nous intéresserons notamment à l'indicateur de réchauffement climatique ou *potentiel de réchauffement global* qui prend en compte les émissions des gaz à effet de serre - dont le CO₂ fait partie - et le stockage de carbone.

Analyse de cycle de vie et secteur du bâtiment

Pour caractériser l'impact environnemental d'un produit ou d'un système, diverses méthodes existent : Material Flow Analysis, Substance Flow Analysis, Input-Output Analysis, Empreinte Carbone, Analyse de Cycle de Vie... La méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) est la plus connue et la plus utilisée du fait de sa légitimité normative, de son caractère multicritère et de son approche cycle de vie - de la production des matériaux à la fin de vie du système - (Laratte, 2013).

L'ACV est particulièrement répandue dans le secteur du bâtiment mais complexe du fait de l'importante quantité de données à collecter, de la longue durée de vie et donc des nombreuses hypothèses à fournir. Gustavsson et Sathre (2010) pointent deux éléments cruciaux de l'ACV appliquée au bâtiment : la définition d'une unité fonctionnelle claire et le choix précis des frontières du système en termes d'activité, de temps et d'espace. Il vaut mieux comparer les matériaux selon leur fonction mais il en existe de nombreuses (acoustique, isolation, humidité, charge...). Pour le bâtiment complet, utiliser les m² ou m³ semble adéquat mais ne suffit pas à distinguer le nombre d'étages ou le nombre de personnes y vivant. A travers leur revue d'ACV dans le secteur du bâtiment, Cabeza et al. (2014) montrent la diversité des choix de cadres possibles et la complexité de comparaison résultante. De nombreuses approximations sont réalisées pour les phases de construction et d'usage à cause du manque de données et des frontières tangibles de l'analyse et des scénarios (Takano et al., 2015).

A travers leur approche dynamique, Negishi et al. (2018) insistent notamment sur la variation de paramètres clés du bâtiment tout au long du cycle de vie (conditions climatiques, occupation du bâtiment et mode de vie des habitants, mix électrique et avancées technologiques) qui impacte les résultats finaux de l'étude et justifie la prise en compte de la dimension temporelle de ces paramètres. Gustavsson et Sathre (2006) évoquaient déjà la variabilité de tels paramètres et l'incertitude induite dans les résultats de l'ACV.

L'ACV de bâtiment produit donc des analyses difficilement comparables et relativement incertaines.

Carbone biogénique

Le carbone biogénique est le carbone composant les matériaux biosourcés comme le bois. Sa prise en compte n'est pas conventionnée dans l'ACV et le bilan carbone de la biomasse est donc pris comme neutre. Pourtant, des études montrent que son impact n'est pas négligeable. Les travaux de Cherubini et al. (2011) ont permis d'établir un indicateur propre au carbone biogénique, permettant de mesurer le potentiel de réchauffement climatique de la biomasse et du stockage temporaire. La prise en compte de la séquestration de carbone par le bois est cependant complexe car non constante et dépendante de l'espèce considérée. La croissance d'un arbre n'est pas un processus linéaire, elle est faible au début, croît puis redevient faible à la fin lorsque la forêt atteint sa maturité. Les vieilles forêts atteignent même un équilibre, ce qui signifie que, passé un certain âge, la forêt n'absorbe plus de carbone additionnel. Une forêt à maturité a une capacité d'environ 200tC/ha. Ce chiffre dépend de la

région, et il est supérieur dans les zones boréales (IPCC, 2001). Liu et al. (2017) complètent les travaux de Cherubini et étudient l'influence du carbone biogénique sur les potentiels de réchauffement calculés dans différentes ACV de produits bois. Selon le scénario envisagé (incinération ou usage en produits bois par exemple), le bilan neutre entraîne une sous-estimation ou une surestimation de l'impact.

Produits bois

Le bois est un matériau favorable pour le potentiel de réchauffement climatique. Hill et Dibdiakova (2016) proposent une comparaison de produits bois et d'autres matériaux montrant l'avantage d'un point de vue climatique du bois sur le cycle de vie du produit. La synthèse de la littérature effectuée par Werner et Richter (2007) permet d'obtenir une vue d'ensemble de l'ACV du bois dans la construction comparé à des matériaux conventionnels. Il en ressort que les produits bois ont un profil environnemental, pour plusieurs impacts environnementaux, favorable comparé aux autres produits mais néanmoins plus critiques sur l'impact de toxicologie à cause du traitement du bois. Les impacts résultants des ACV des bâtiments sont en général dus aux produits hors bois. Les résultats sont par ailleurs très dépendants du choix de scénario de fin de vie. Plus récemment, dans la perspective d'une incitation à l'usage du bois, Pajchrowski et al. (2014) comparent quatre maisons respectivement en bois ou en béton et traditionnelles ou passives. Ce travail confirme l'intérêt du bois dans une perspective de réduction des impacts environnementaux et souligne que cet effet ne vient pas que du bilan neutre intrinsèque au bois, mais aussi de la réduction des émissions dans les autres phases (transport *via* un poids plus léger, construction sur site *via* un temps de construction plus court et démolition *via* une demande en énergie moins intensive). Werner et al. (2006) mettaient déjà en avant l'impact de l'augmentation de l'usage du bois dans les bâtiments (produits structurels et d'intérieur) lors de l'étude d'un usage accru du bois en Suisse. Ils montrent que l'augmentation des puits de carbone par le bois ne doit pas être surestimée, que l'effet est plutôt bas et qu'au contraire, l'effet de substitution en matériaux et en énergie est efficace. Il est cependant nécessaire d'éviter une surconsommation du stock de bois forestier, notamment la récolte des résidus de bois dans les forêts causant la décroissance des puits de carbone des forêts et des sols.

D'après le GIEC, la concentration des GES dans l'atmosphère a augmenté de 40% depuis le début de l'ère industrielle, principalement à cause des émissions dues aux énergies fossiles et à la déforestation (IPCC, 2013). L'effet de la substitution est primordial. Plusieurs études révèlent l'intérêt de la substitution de matériaux utilisant davantage d'énergie fossile par des produits bois (Eriksson et al., 2007; Gustavsson, Pingoud, & Sathre, 2006; Manriquez, 2006; R. Sathre & González-García, 2014; Valsta, 2010), un résultat illustré en Figure 2. Gustavsson et al. (2006) montrent, à l'échelle d'une construction, qu'il est plus efficace d'utiliser le bois pour remplacer des matériaux bétonnés plutôt que d'en faire directement du bois-énergie. En effet, leur étude compare un scénario où le bois des forêts non coupées pour la construction des bâtiments en béton est laissé neutre

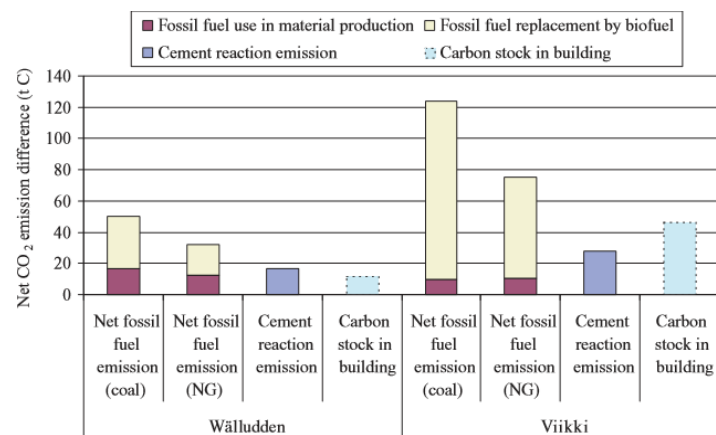


Figure 2 : Différence d'émissions nettes de CO₂ entre un bâtiment en bois et un en béton, effet de la substitution (Gustavsson, 2006)

avec un scénario où ce même bois est récolté pour fabriquer du bois-énergie. Les différences obtenues des émissions restent en faveur de la construction en bois donc d'un bois coupé et valorisé en produit bois. Suter, Steubing, et Hellweg (2017) offrent une étude d'impact de la substitution de matériaux non biosourcés par des produits bois. Ils commencent par la modélisation de la filière bois suisse et attribuent à chaque matériau non biosourcé la part de substitution possible. Les résultats tiennent compte de plusieurs impacts (pas seulement de l'indicateur de réchauffement climatique) et mettent en évidence l'intérêt d'une utilisation en cascade des produits bois (utiliser le bois plusieurs fois pour des usages moins exigeants en qualité de bois). Une vigilance est néanmoins requise vis-à-vis de l'indicateur d'émission de particules et vis-à-vis de certains types de produit bois (panneaux de particules notamment). Ils mettent également en évidence l'intérêt d'un système prenant en compte tout le cycle de vie, permettant d'optimiser l'usage du bois.

L'effet de substitution peut également être abordé du point de vue de la gestion forestière et, dans cette optique, une gestion forestière intensive permet une substitution de produits accrue et un impact favorable sur les stocks de carbone biogénique (Eriksson et al., 2007; Manriquez, 2006; Valsta, 2010). Les travaux de Manriquez montrent que le gain est presque d'un facteur 2 sur le long terme pour des rotations de récolte courtes.

Cependant, les bénéfices de l'usage de produits bois est dépendant de son traitement en fin de vie. La fin de vie est en effet une phase extrêmement importante dans le cycle de vie de la construction (Vitale et al., 2017) et du bois puisque le stockage temporaire réalisé tout au long de sa durée de vie n'aura un intérêt que si la fin de vie n'annule pas tout.

La fin de vie du bois et l'utilisation en cascade a été largement questionnée à travers la littérature (Hossain & Poon, 2018; Lippke & Puettmann, 2013; Mehr et al., 2018; Roger Sathre & Gustavsson, 2006; Sikkema, Junginger, McFarlane, & Faaij, 2013). Gustavsson et al. (2006) s'intéressent au bilan énergétique et carbone de différents scénarios de fin de vie d'une tonne de bois. Leur étude compare l'utilisation de ce bois retransformé à l'utilisation d'un bois neuf ou d'un substitut non biosourcé. Pour le bois valorisé, plusieurs cas de gestion sont envisagés : il est directement brûlé avec une forêt exploitée ou réutilisé puis brûlé en laissant la forêt croître. Finalement, ils montrent que l'utilisation en cascade du bois est très avantageuse, notamment lorsque le bois des forêts est utilisé en tant que matériau : la substitution du bois-énergie peut sauver jusqu'à 250kgC par tonne de bois réutilisée et le changement d'utilisation des terres, valorisant le bois en matériau, peut sauver jusqu'à 1tC par tonne de bois réutilisée, conclusion soutenue par Mehr et al. (2018). Le dernier scénario dépend cependant du potentiel de croissance de la forêt (espèce considérée) et du type de produit fabriqué. Au contraire, Hossain et Poon (2018) montrent l'intérêt de la valorisation en énergie comparé à de l'enfouissement ou à un recyclage du bois pour fabriquer des panneaux de particules de béton ou de polymère : la valorisation en bois-énergie sauve plus de 1t de CO₂eq par tonne de bois recyclée comparé à moins de 100kgCO₂eq pour les deux autres solutions. La discussion autour des meilleurs scénarios de fin de vie est complexe, très dépendante du cas d'étude et des possibilités envisagées. Geng et al. (2017) proposent une revue des effets sur les GES des produits bois et du bois-énergie et des méthodes d'évaluation associées. Pour le bois énergie, le temps requis pour obtenir une réduction nette dépend de la source de biomasse (résidus de récolte, bois vivant etc) et de la source fossile remplacée. Pour les produits bois, ce temps reste inconnu et les méthodes d'évaluation sont encore à explorer. Ils affirment également que, pour bien évaluer les effets des GES, le bilan carbone des produits bois et du bois-énergie doit être intégré à un bilan carbone forestier, afin de bien délimiter les frontières et de comprendre les stocks et les flux engagés.

C. La dimension temporelle dans l'analyse d'impact

Nous avons vu que l'effet de substitution des produits bois est prédominant par rapport à l'effet du stockage temporaire de carbone. Cependant, le stockage temporaire implique une dimension temporelle qui n'est pas prise en compte dans les méthodes d'analyse d'impact et notamment pas dans les calculs des indicateurs de l'ACV conventionnel, ce qui peut fausser les résultats.

Outre le stockage temporaire du bois, le secteur du bâtiment, avec sa longue durée de vie et la variabilité des nombreux paramètres qui le définissent, appelle également à l'utilisation de l'aspect dynamique : c'est tout l'enjeu de l'ACV sur une telle durée de vie.

Une approche dynamique de l'ACV consiste à prendre en compte la temporalité à la fois dans l'inventaire et dans l'évaluation des impacts environnementaux. Il n'y a en effet pas de raison que le calcul des indicateurs comme il est fait conventionnellement coïncide avec la réalité physique de la série d'impacts instantanés. L'aspect temporel est alors incontournable pour évaluer au plus juste les impacts environnementaux (Laratte, 2013). Par exemple, pour le cas du carbone biogénique, l'ACV conventionnel considère que celui-ci est négligeable dans l'hypothèse où tout relargage de carbone biogénique d'un produit est compensé par la croissance de la plante qui remplace la matière utilisée pour ce produit. Mais ce raisonnement néglige le stockage temporaire de carbone et l'effet d'une émission retardée (Lecompte, 2019). L'impact ne sera d'ailleurs pas le même si le carbone est considéré comme stocké dans la biosphère puis réémis en fin de vie ou si à l'inverse, il est considéré émis puis restocké progressivement par la croissance de la biosphère ou encore s'il est neutre puis stocké progressivement par la croissance de la biosphère dans le cas d'une forêt mature gérée durablement.

Evaluation dynamique

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur le calcul d'un potentiel dynamique de changement climatique (Kendall, 2012; Kirkinen, 2010; Levasseur, Lesage et al., 2012). Les travaux sur l'inclusion d'une dimension temporelle dans le calcul des autres indicateurs restent très peu répandus.

Dans le cas de l'indicateur de changement climatique, deux temporalités sont à distinguer, aussi importantes l'une que l'autre pour les décideurs (Levasseur et al., 2011) :

- L'horizon de temps : période pendant laquelle l'indicateur est calculé. Il est conventionnellement fixé à 100 ans. Des temps courts ne mettront pas en perspective la différence entre stockage permanent et temporaire et au contraire, des temps longs ne mettront pas en avant l'impact du système étudié dans les premières années. Les décideurs doivent comprendre cet aspect et s'interroger sur l'horizon choisi quand un calcul est réalisé. Ce temps est également choisi dans l'approche statique.
- Le délai entre les différentes émissions concernant le système analysé : le laps de temps considéré entre chacune des émissions provoquées tout au long du cycle de vie du système. Il est caractéristique de l'approche dynamique des calculs des indicateurs.

Il est important de rappeler que, dans le cas d'une approche dynamique du calcul des indicateurs, la valeur de l'impact d'une émission sera nulle si elle est émise après l'horizon de temps choisi (Kendall, 2012). Ce dernier a donc une influence non négligeable, d'où l'importance de comparer différents horizons de temps pour chaque étude.

Une troisième temporalité s'ajoutera à l'étude dans le cas d'une analyse de cycle de vie : la durée de vie du système étudié, du bâtiment par exemple. Il s'agit de la durée pendant laquelle s'étalent les émissions dues au cycle de vie du système. Elle est à bien dissocier avec l'horizon de temps.

Les calculs des indicateurs de réchauffement climatique statique et dynamique sont proposés dans l'Encadré 1 ci-dessous.

Inventaire dynamique

Pour ce qui est de l'inventaire, l'enjeu de l'aspect dynamique consiste à intégrer la variation des paramètres clés du système au cours de sa durée de vie dans le relevé de données. Quelques études ont tenté de mesurer ou intégrer ces variations (Collinge, 2011; Frijia, Guhathakurta, & Williams, 2012; Negishi et al., 2018).

Les études dynamiques existantes ne sont que partielles, en général focalisées sur un seul indicateur et sur une partie de l'inventaire. Par ailleurs, elles ne prennent souvent pas le cycle de vie complet en compte (Laratte, 2013). Negishi et al. (2018) proposent pour la première fois une approche regroupant à la fois inventaire et évaluation de l'impact dynamique. Cependant celle-ci ne traite que trois impacts (changement climatique, toxicité pour l'humain et écotoxicité) et la méthode est encore en développement. La diversité des études dynamiques renvoie également à l'absence de normalisation de la méthode.

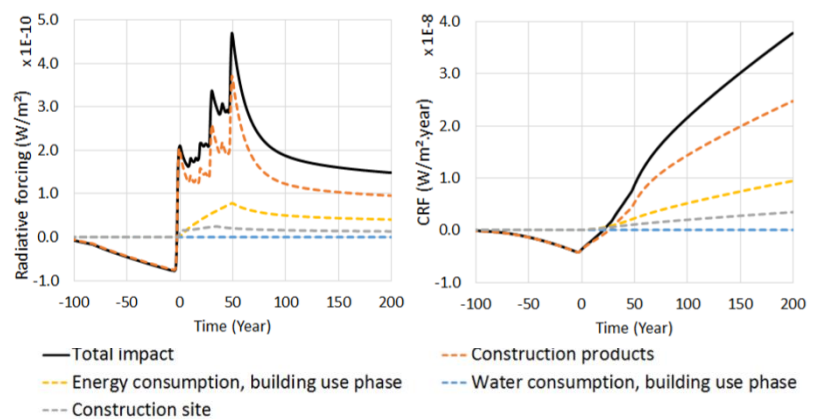


Figure 3 : Résultats de forçages radiatifs instantané et cumulé d'un bâtiment avec une approche entièrement dynamique (Negishi, 2019)

Dans une volonté de questionner les challenges méthodologiques liées à l'ACV, Fouquet et al. (2015) tentent d'évaluer la pertinence de comptabiliser le carbone biogénique, d'utiliser une approche dynamique et enfin de modéliser des inventaires de cycle de vie prospectifs. Ils questionnent notamment l'intérêt particulier porté à la phase d'utilisation, connue comme la plus impactante avec la méthode statique. Le déplacement d'impact de l'approche dynamique peut en effet entraîner une réorganisation dans la contribution des différentes phases. Ce n'est finalement pas le cas (résultat également vérifié par les travaux de Laratte, 2013) mais une analyse plus précise sera nécessaire dans l'interprétation des résultats, afin de procéder à une prise de décision plus juste. Enfin, les scénarios prospectifs nécessitent une analyse de sensibilité car il est très incertain de prévoir l'évolution des paramètres à une échelle de 100 ans.

Encadré 1 : Indicateur de réchauffement climatique statique et dynamique

Fouquet et al. (2015) et Lecompte (2019) utilisent dans leurs études l'approche de Levasseur afin de caractériser l'impact de réchauffement dynamique de structures en bois ou en béton, respectivement pour la construction complète ou pour la paroi extérieure seulement. Ils comparent ces résultats aux calculs statiques réalisés dans une ACV conventionnelle. Le potentiel de réchauffement global (PRG) est le paramètre utilisé dans l'ACV pour caractériser l'impact de réchauffement climatique. Il exprime la valeur de forçage radiatif cumulé dû à l'émission d'une unité de masse de GES au temps zéro, pour un horizon de temps donné HT. Le GIEC définit le PRG absolu et le PRG relatif (respectivement AGWP et GWP en anglais), le PRG relatif étant calculé par rapport à une valeur équivalente de CO₂. L'équation (1) donne son expression :

$$PRG_{GES}^{HT} = \frac{PRG_ABSOLU_{GES}^{HT}}{PRG_ABSOLU_{CO2}^{HT}} = \frac{a_{GES} \int_0^{HT} C_{GES}(t) dt}{a_{CO2} \int_0^{HT} C_{CO2}(t) dt} \quad (1)$$

Avec a_{GES} l'efficacité radiative instantanée du gaz et C_{GES} sa charge atmosphérique.

L'impact de réchauffement climatique sera ensuite calculé grâce à la masse de gaz émise en kg au temps zéro et exprimé en kgCO₂e (2) :

$$E_{réchauffement\ climatique} = M_{GES} * PRG_{GES}^{100} \quad (2)$$

L'efficacité radiative des GES est en réalité variable car elle dépend de la concentration du gaz dans l'atmosphère : elle décroît lorsque la concentration du gaz augmente dans l'atmosphère. Le PRG du méthane par exemple a augmenté entre 2001 et 2013 et celui du protoxyde d'azote a au contraire diminué. Ces valeurs sont régulièrement mises à jour par le GIEC.

Dans une approche dynamique, le PRG absolu dépend du temps et est recalculé à chaque instant. Levasseur et al. (2012) considèrent des pas de temps d'une année et définissent le potentiel de réchauffement global dynamique instantané $GW I_{inst}$ en W/m² (3) :

$$GW I_{inst}(t) = \sum_{i=0}^t g(i) * DCF(t - i) \quad (3)$$

Avec $DCF(t) = a_{GES} \int_{t-1}^t C_{GES}(\tau) d\tau$ le facteur de caractérisation de réchauffement climatique dynamique en W/m²/kg et $g(t)$ l'inventaire dynamique en kg. Par exemple, pour déterminer l'impact de l'année 100 il faudra caractériser les émissions de l'année 99 avec un DCF calculé sur un an, les émissions de l'année 98 avec un DCF calculé sur deux ans etc.

On aura donc le potentiel de réchauffement global dynamique cumulé $GW I_{cum}(t)$, équivalent au PRG absolu en statique (4) :

$$GW I_{cum}(t) = \sum_{i=0}^t GW I_{inst}(i) \quad (4)$$

Le potentiel de réchauffement dynamique relatif sera égal à (5) :

$$GW I_{rel}(t) = \frac{GW I_{cum}(t)}{PRG_ABSOLU_{CO2}^t} \quad (5)$$

Le calcul dynamique met largement en avant dans les deux études l'effet de stockage de carbone par le bois. On y observe également l'effet d'un horizon de temps différent : à court terme, les écarts seront forts et s'atténuent sur le long terme.

Dans ses deuxièmes travaux, Negishi et al. (2019) appliquent leur méthode d'analyse entièrement dynamique à un bâtiment existant. Ils mettent en avant l'impossibilité de comparer les approches statique et dynamique et l'impertinence de ne présenter qu'un horizon de temps pour l'approche dynamique. L'intérêt de cette dernière réside en effet dans l'évolution des impacts et l'influence des paquets d'émissions additionnels à chaque pas de temps. Elle sera donc naturellement plus précise et son interprétation sera d'autant plus complexe.

Pour conclure cette première partie, nous avons vu que le volume exploité de la forêt française avait une capacité de croissance et que les produits bois sont des leviers potentiels pour l'atteinte des objectifs de neutralité carbone, notamment dans le secteur du bâtiment. Par ailleurs, l'évaluation de ce potentiel reste encore vague et nécessite une approche dynamique. Nous tenterons donc dans une deuxième partie de mesurer l'impact de réchauffement climatique d'un usage accru de bois dans la construction à l'échelle sectorielle du logement en France en tenant compte de l'aspect dynamique.

II. Usage accru de bois dans le secteur du logement français

L'objectif de cette partie est d'obtenir l'impact sur le stock de carbone d'un usage accru de bois dans la construction. Un usage accru de bois passe a priori par une augmentation des constructions en bois sur le territoire. Nous nous intéresserons donc ici à l'effet sur les émissions de GES de l'augmentation de la part de constructions en bois dans les constructions neuves. Nous raisonnerons en moyenne, c'est-à-dire que nous prendrons la différence d'impact à l'échelle d'un bâtiment puis nous extrapolerons ce résultat au parc de logements français. Il est donc nécessaire de mesurer au préalable la différence d'impact, et donc les émissions évitées et le carbone stocké, lorsque l'on procède à une construction en bois par rapport à une construction conventionnelle.

A. Différence d'impact de réchauffement climatique entre construction en bois et construction en béton

Quel est l'impact au niveau des émissions de GES que génère la construction d'un bâtiment en bois par rapport à un bâtiment conventionnel, en France ? C'est à cette question que nous tenterons de répondre dans ce paragraphe, en mettant en avant le stockage temporaire du bois par une approche dynamique du calcul du potentiel de réchauffement climatique.

Nous avons ainsi imaginé des bâtiments représentatifs des logements français et distingué les logements collectifs et logements individuels, la structure étant très différente. Nous sommes également partis du constat que les logements neufs conventionnels étaient majoritairement en béton (UNICEM, 2014). Nous comparerons donc des constructions en bois et en béton pour les deux types de logements, individuel et collectif. Nous nous sommes appuyés sur plusieurs études ayant procédé à une analyse de cycle de vie de bâtiments existants ou fictifs, essentiellement en bois (Gustavsson et al., 2010) ou comparant des structures en bois et en béton (ECONOBOIS, 2015; Fouquet et al., 2015; Gustavsson et al., 2006; Kellenberger & Althaus, 2009; Pajchrowski et al., 2014; Sibiude et al., 2016). Ces travaux serviront de base à notre étude notamment dans la méthode envisagée, les choix de bâtiments et les résultats proposés. La comparaison se fera sur la base de la méthode d'ACV.

Elaboration des bâtiments représentatifs

Comme évoqué ci-dessus, la structure de quatre bâtiments a été élaborée afin de représenter au mieux le cas français. Pour commencer, la surface habitable a été choisie égale à la surface moyenne estimée en 2018. Nous avons pour cela extrapolé les valeurs de surface de logements de l'INSEE (cf Annexe A). De plus, nous considérons qu'un changement de pratique dans la construction passe par un changement de la structure des bâtiments mais nous nous sommes interrogés sur la part des éléments structurels par rapport aux autres éléments du bâtiment. Nous avons vu dans la littérature que, même si le reste des matériaux (menuiseries, finitions, équipement énergétique et autres installations) n'est pas négligeable pour une ACV complète d'un bâtiment, ceux-ci ne représentent pas la plus grosse part de l'impact de la construction et sont indépendants de la structure initiale du bâtiment (Heinonen et al., 2016; Hoxha et al., 2017; Kellenberger & Althaus, 2009). Nous avons donc pris en compte l'ensemble des éléments composant le bâtiment (murs, toiture, planchers, plafonds) mais, comme il s'agit d'une comparaison entre des constructions en bois et en béton, les travaux de menuiserie (portes et fenêtres), des éléments intérieurs comme les escaliers, les installations techniques ou encore les finitions (joints, fixations, peinture...) seront considérés comme identiques. L'annexe B présente un récapitulatif détaillé de la composition des quatre différentes constructions.

Il faut noter que le bâtiment est un bien complexe et qu'une fonction est souvent remplie par plusieurs éléments et inversement, ce qui signifie que le changement d'un matériau peut impacter plusieurs caractéristiques dans le bâtiment comme l'isolation phonique, thermique ou encore la protection anti-feu (R. Sathre & González-García, 2014). Nous avons tenté de prendre en considération ces éléments mais rappelons que l'étude est centrée sur l'impact d'un changement de pratique de construction. De nombreuses autres études comme citées précédemment s'intéressent aux éléments et caractéristiques d'une construction de façon plus approfondie et aux différents impacts, autre que le changement climatique.

Méthode d'évaluation de l'impact de changement climatique

Afin de comparer les différentes structures, l'étude emploie la méthode d'Analyse de Cycle de Vie. Nous avons donc défini une unité fonctionnelle formulée comme suit : structure d'un bâtiment complet d'une surface SHAB de 114m² pour un logement individuel ou composé d'appartements de surface SHAB de 62m² pour un logement collectif sur une durée de 100 ans. L'immeuble est arbitrairement composé de trois étages et de quatre appartements par étage.

Comme vu dans la littérature, il est difficile de concevoir des bâtiments réellement comparables. Afin d'obtenir une comparaison technique des bâtiments, nous avons respecté une équivalence thermique par le biais de résistances thermiques équivalentes pour les différents murs, sols et parois, ce qui justifie l'intégration des isolants et des parois intérieurs à notre étude. Cela justifie également la négligence de la phase d'usage énergétique du bâtiment, considérée comme identique dans les deux structures.

Pour l'inventaire des données d'impact de réchauffement climatique, nous nous sommes référés à des fiches FDES (Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire). Une FDES est un document normalisé qui présente les résultats de l'ACV d'un produit. Il présente également des informations sanitaires dans la perspective du calcul de la performance environnementale et sanitaire du bâtiment pour son éco-conception. Ces fiches sont renseignées par des fabricants et se trouvent dans la base de données INIES, allouée aux impacts environnementaux et sanitaires du secteur du bâtiment. Elles peuvent être collectives et rassemblent alors les données de plusieurs produits répondant aux mêmes fonctions.

Le développement d'un outil de calcul sous la forme d'un tableau a permis d'intégrer tous les éléments de la structure des différents bâtiments et de les associer à l'impact en kgCO₂-équivalent fourni par les FDES. Celui-ci est, selon la norme d'ACV, réparti dans les différentes phases de cycle de vie (Figure 4). Les fiches FDES suivent la méthode d'évaluation de l'impact employée dans l'ACV. Celle-ci est donc statique. Dans le souci d'obtenir un impact de réchauffement climatique dynamique, les émissions ont été systématiquement réparties annuellement sur la durée de vie du bâtiment et des pondérateurs ont été ajoutés à l'outil de calcul, permettant le calcul dynamique à des horizons de temps choisis, 100 et 500 ans en l'occurrence (GE3, 2019). Pour obtenir l'évolution complète des impacts dynamiques en fonction du temps, l'outil de calcul dynCO₂⁴ développé par Levasseur est utilisé. Pour rappel, la durée de vie du bâtiment est à différencier de l'horizon de temps choisi pour calculer l'indicateur de réchauffement climatique (cf partie I.C.).

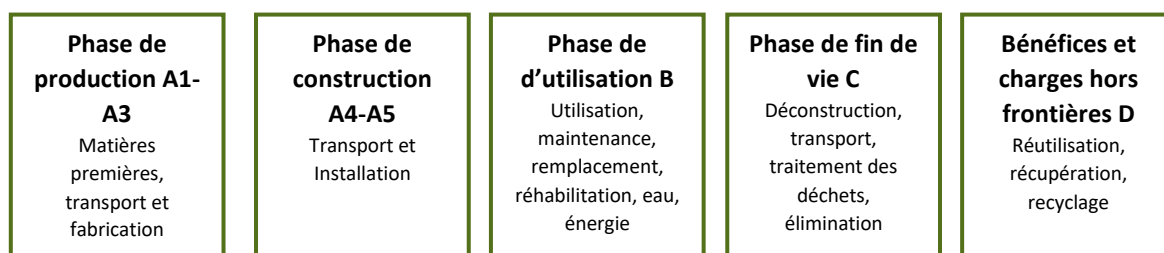


Figure 4 : Les phases du cycle de vie

Le carbone biogénique est comptabilisé de façon volontaire dans les FDES, en tant que carbone stocké à la production de bois et réémis à la fin de vie, mais cette information n'est pas soumise à une norme. L'effet de stockage est donc pris en compte dans les fiches FDES utilisant une approche statique. Les gains ne sont pas dus au stockage lui-même mais à la différence entre le stockage du carbone dans la repousse des arbres et les émissions du cycle de vie du bâtiment. Ils sont par conséquent sous-estimé par rapport à une approche dynamique. Pour le calcul dynamique, le carbone biogénique est comptabilisé de façon linéaire, c'est-à-dire que le stockage de carbone est réparti uniformément entre le début et la fin de vie du produit.

Différents paramètres sont définis, notamment la durée de vie du bâtiment, ou durée de référence de l'étude, et la surface SHAB. Cela permettra de mener une étude de sensibilité du résultat d'impact par rapport à ces paramètres.

Encadré 2 : Hypothèses à retenir

- Conception des éléments structurels des bâtiments uniquement
- Equivalence thermique entre bâtiments bois et béton
- Durée de vie des bâtiments de 100 ans
- Surface de 114m² pour les maisons, 62m² pour les appartements
- Immeuble composé de 3 étages et 4 appartements par étage
- Résultats exprimés en kgCO₂-équivalent, basés sur le bilan des fiches FDES

Résultats et sensibilité

Les résultats des impacts de réchauffement climatique statiques et dynamiques calculés à un horizon de 100 ans sont présentés Figure 5. Le choix de l'horizon de temps de 100 ans est utilisé conventionnellement pour l'indicateur de réchauffement climatique et imposé par la norme de l'ACV.

⁴ <http://www.ciraig.org/fr/dynco2.php>

Nous avons également calculé l'impact dynamique relatif pour un horizon de temps de 100 ans afin de pouvoir comparer les résultats. L'évolution complète de l'impact dynamique selon l'horizon choisi est proposée en Annexe C. Avec la prise en compte du stockage de carbone et l'emploi majoritaire de produits boisés dans les structures des constructions en bois, nous obtenons des résultats largement favorables aux constructions bois. L'écart d'autant plus important entre les logements collectifs est dû à la plus grande proportion de produits boisés dans l'immeuble en bois par rapport à la maison, notamment via les solives des étages (qui stockent donc plus de carbone) et au contraire, une moins grande proportion de bois dans l'immeuble en béton (dalle de béton et toiture). La répartition des contributions de chaque catégorie de matériaux disponible en Annexe D confirme ce résultat. Nous observons de plus que dans les deux types de construction, les imperméabilisants ont une forte contribution. Au contraire, pour l'isolant et l'ossature, la différence de contribution entre les deux structures est marquante. Comme nous nous intéressons à la différence de contribution, c'est ces éléments – isolant et ossature - qui joueront un rôle dimensionnant dans l'étude, et notamment leur incertitude. Enfin, un autre élément est à souligner : respectivement 50% et 80% de l'impact carbone des maisons et immeubles en béton est dû à l'étape de production-construction, donc dans les premières années du cycle de vie.

D'autre part, nous observons une différence essentielle entre approche statique et dynamique : les constructions en bois sont émettrices nettes ou puits de carbone nets (Figure 5) à un horizon de temps équivalent de 100 ans. Il faut regarder le bilan dynamique à un horizon beaucoup plus lointain pour qu'il devienne positif (cf Annexe C) et pour que l'effet de toutes les émissions soit comptabilisé. Le gain d'impact entre construction en bois et en béton est également plus important avec l'approche dynamique pour l'immeuble, où la proportion de bois est supérieure.

Impacts de réchauffement climatique en kgCO ₂ e /m ² calculés à un horizon de temps de 100 ans	Statique		Dynamique	
	Bois	Béton	Bois	Béton
Maison	20	319	-80	210
Immeuble	1,6	456	-71	417

Figure 5 : Impacts de réchauffement climatique statiques et dynamiques en kgCO₂e/m² selon le type de construction

L'analyse de sensibilité montre une grande sensibilité à la durée de vie du bâtiment et une sensibilité relativement forte à la surface habitable (plus de détails dans l'Encadré 3 ci-dessous). Pour ce qui concerne la surface, le gain du bois par rapport au béton est moins important pour des grandes surfaces. Il y a en effet moins de matière à produire en proportion et donc un impact davantage amorti pour les produits bétonnés. Ces résultats mettent en évidence que l'utilisation d'échantillons de surface par rapport à une approche par la moyenne serait plus appropriée pour décrire l'impact d'une augmentation de constructions en bois à une échelle macro.

La variation des résultats avec la durée de vie n'est pas linéaire car elle dépend de la durée de vie de chaque produit composant le bâtiment. Le calcul se fait par bloc : on « investit » dans un matériau pour toute sa durée de vie lorsqu'on décide de le produire. Pour les produits bétonnés, cet investissement est plus élevé, du fait d'un fort impact à la production. La construction en béton gagne donc en efficacité par rapport au bois sur des durées de vie plus élevées. Par ailleurs, imaginer une durée de vie du bâtiment supérieure à la durée de vie des éléments porteurs n'a pas vraiment de sens. La durée de vie du bâtiment est un choix dimensionnant pour les résultats. Ce choix doit être effectué de façon à représenter au mieux la durée de vie des éléments structuraux. Ces résultats montrent l'intérêt d'une étude plus approfondie sur la sensibilité à la durée de vie, et notamment à la durée de vie des produits.

Dans les deux analyses, les variations observées en fonction de la méthode utilisée – statique ou dynamique avec un horizon de temps de 100 ou 500 ans – révèlent la manière dont la répartition des émissions s’est faite, changeant l’impact final. Le choix de l’horizon de temps affecte tout autant les résultats que le choix de la durée de vie du bâtiment comme montré par les Annexes C et D et par l’étude de Marie-Lise Pannier (2016). Ce choix dépend en fait de la visée recherchée. Un impact à un horizon supérieur à 100 ans ne paraît pas pertinent pour une aide à la décision de stratégies de politiques publiques.

Encadré 3 : Etude de sensibilité à la durée de vie et à la surface de la maison

La Figure 6 ci-dessous présente les différences d’impacts de réchauffement climatique entre la construction d’une maison bois et la construction d’une maison en béton. L’impact est exprimé par unité (année ou m²) et est relatif au cas de référence, c’est-à-dire au cas d’une maison de 114m² et d’une durée de vie de 100 ans. Plusieurs méthodes de calcul de l’indicateur de réchauffement climatique sont utilisées : l’approche statique à horizon de temps 100 ans, l’approche dynamique à horizon 100 et 500 ans. Une différence plus importante de l’impact révèle donc un intérêt plus fort pour les produits bois (gain en impact évité plus élevé).

Le saut observé pour des durées de vie supérieures à 100 ans s’explique par un investissement en impact de réchauffement climatique très important pour seulement 20 ou 40 ans. En effet, les matériaux porteurs ont souvent une durée de vie de 100 ans dans les fiches FDES. Leur renouvellement occasionne une grosse part de l’impact total, d’autant plus pour les produits bétonnés que les produits bois.

Utiliser une approche dynamique à horizon 100 ans met en évidence l’impact des premières années et nie presque les impacts proches de 100 ans, puisqu’en cumulé ces derniers n’ont que peu d’influence. La différence de résultats selon la méthode employée est révélatrice de la répartition des émissions proposées, en plus de l’effet du stockage temporaire.

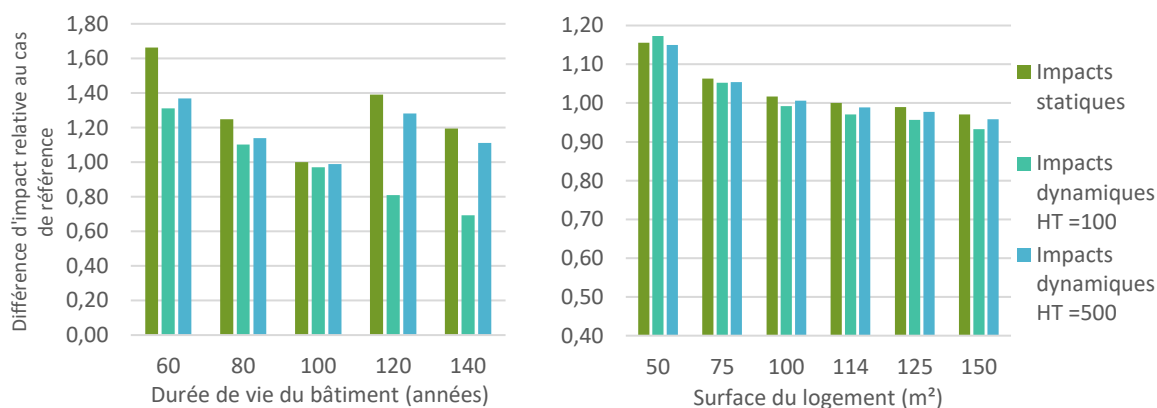


Figure 6 : Sensibilité de la différence d'impact à la durée de vie de l'ACV (gauche) et à la surface (droite) et influence de la méthode de calcul d'impact

B. Bilan à l’échelle du parc de logements français

Malgré les limites évoquées de la réalisation d’une étude moyennée du parc de logements à l’échelle d’un pays et la difficulté de choix déterminants comme la durée de vie du bâtiment, nous allons dans cette partie tenter de donner un ordre de grandeur de l’intérêt d’un changement de pratique dans les constructions sur le territoire français en perspective d’une neutralité carbone en utilisant les

hypothèses de la partie précédente. Pour cela, nous établirons des scénarios avec et sans incitation au bois.

Contexte français

L'analyse du parc de logement français a permis d'établir les conclusions suivantes :

- Le parc résidentiel croît de 1% par an en moyenne et se renouvelle de 0,7% par an (INSEE, 2019)
- La part de logement collectif est de 44% et celle de logement individuel de 56% (INSEE, 2019)
- Le non-résidentiel représente 24 millions de m² construits en 2012 contre 34 millions pour le résidentiel (ADEME) soit 41% de la surface construite contre 59%
- Les constructions en bois représentent 5,8% du marché actuellement (CEB, 2017)
- La SNBC prévoit de tripler la part de bois d'ici à 2050 (SNBC, 2018)

Nous avons également observé que les émissions des sous-secteurs de l'industrie manufacturière qui nous concernent étaient en baisse depuis les années 2000 (CITEPA, 2019), malgré la croissance du parc (cf Annexe E)⁵. Ceci n'est pas dû à une baisse d'activité puisque les chiffres de l'INSEE montrent que malgré un ralentissement de croissance, la production du secteur de la construction continue de se développer. La baisse des émissions s'explique donc par des paramètres extérieurs comme par exemple l'amélioration des processus de production, l'optimisation de la logistique ou encore l'évolution du mix énergétique. Attention, nous étudions les émissions françaises mais les émissions dues à la production peuvent être délocalisées (produits importés). En ce qui concerne le ciment, l'essentiel est produit en France et les importations proviennent des pays limitrophes (INSEE, 2018).

Nous avons ainsi établi trois scénarios pour le secteur de la construction, présentés Figure 7, basés sur trois paramètres : le nombre de logements, les émissions du secteur de la construction et le taux de bois dans la construction en 2050. Nous nous intéressons au parc résidentiel seulement et, pour le troisième scénario, nous supposons une évolution linéaire du taux de bois jusqu'à sa valeur finale en 2050.

Paramètres	Scénario REF	Scénario Décroissance_émissions	Scénario Décroissance_émissions_18%
Logements	+ 1%/an	+ 1%/an	+ 1%/an
Emissions du secteur de la construction	Pas de variation	- 1,4%/an	- 1,4%/an
Taux de bois	5,8%	5,8%	18%

Figure 7 : Scénarios envisagés pour le secteur du bâtiment

Résultats

La partie gauche de la Figure 8 présente l'évolution de l'impact de réchauffement climatique dû aux constructions neuves pour les deux derniers scénarios, avec une approche statique. Le scénario de référence, ne prenant pas en compte la réduction des émissions du secteur de la construction, diverge logiquement, ce qui n'est a priori pas réaliste compte-tenu des émissions observées jusqu'alors. Il n'est donc pas présenté sur la figure. La partie droite de la Figure 8 propose un focus sur la différence des

⁵ La décroissance moyenne observée depuis 1990 est de 1,4% par an. Les sous-secteurs inclus comprennent la construction, les matériaux de construction, les biens d'équipement et matériel de transports et la métallurgie des matériaux ferreux.

impacts entre les deux autres scénarios avec une différenciation entre CO₂ évité ou CO₂ stocké. Nous observons d'une part que la part de stockage est élevée : plus de l'équivalent de 2,1Mt de CO₂ sont stockées en 2050, soit 11% de l'impact initial. D'autre part, la décroissance des émissions due à la production de matériaux et à la construction est telle que, en 2050, l'impact évité diminue. Cela signifie que, en 2050, les émissions des constructions en béton diminuent suffisamment pour se rapprocher des émissions dues à la fin de vie du bois. Le bénéfice d'usage de bois ne réside donc plus que dans les bénéfices du stockage temporaire.

Nous discernons trois points importants dans ces résultats. Premièrement, l'intérêt du stockage : s'il y a une grande réduction des émissions du secteur de la construction, le stockage est la propriété du bois qui peut compenser des émissions, en plus d'être peu émissif. Deuxièmement, la sensibilité forte au paramètre de décroissance des émissions : la modélisation choisie est optimiste et simpliste et sous-estime le gain apporté par l'accroissement des constructions en bois en CO₂ évité. Une sensibilité qui est également liée à l'incertitude sur la contribution des éléments structurels (Annexe D). Enfin, l'importance des scénarios de fin de vie du bois qui dimensionnent la part du CO₂ évité, sous-estimée ici. En effet, ces scénarios sont pris comme fixes dans notre étude, dépendants des FDES de chaque produit, mais nous pouvons imaginer que ceux-ci vont évoluer d'ici 2050, dans une logique d'économie circulaire ou suite à une incitation au bois-énergie par exemple. Cela ne concerne que les émissions préalablement stockées par le bois, puisque les autres émissions sont soumises, dans notre étude, au paramètre de décroissance des émissions, et altère donc directement le potentiel d'impact évité.

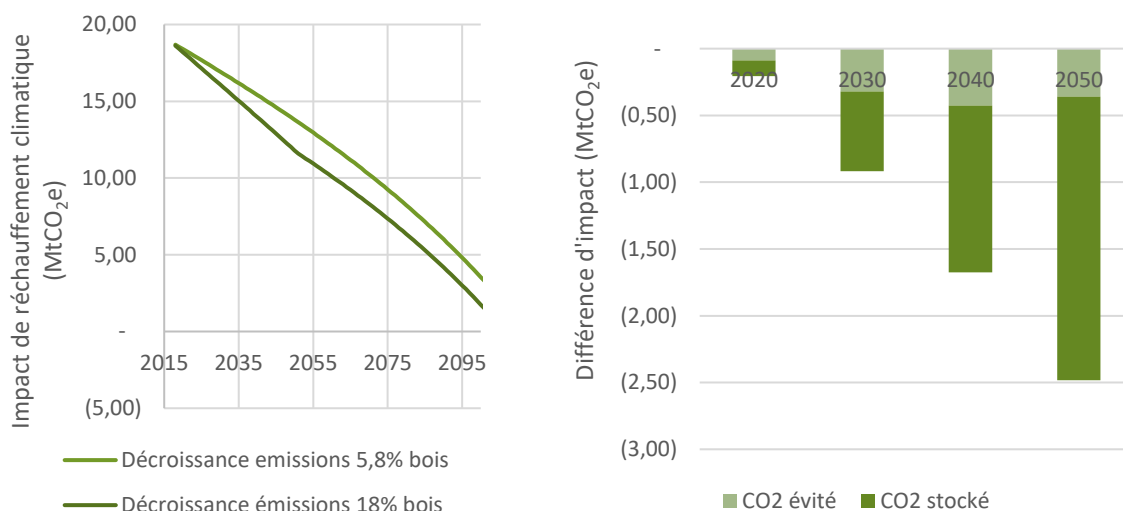


Figure 8 : Evolution de l'impact cumulé (gauche) et de la différence d'impact (droite) en MtCO₂e avec ou sans incitation au bois dans le cas d'une décroissance des émissions du secteur de la construction

Par ailleurs, un bilan dynamique a été réalisé, tenant compte de la temporalité des émissions de chaque construction. Cependant, avec la modélisation effectuée, la répartition des émissions est très variable annuellement. Cela est notamment dû au niveau de détail faible offert par les fiches FDES et aux émissions de fin de vie, comptées la dernière année de vie de chaque produit, ce qui n'est pas vrai pour les produits bois en cas de réutilisation, recyclage ou décomposition. L'impact calculé en est directement altéré. Ces résultats remettent en cause la modélisation proposée de la temporalité des émissions de fin de vie mais aussi l'utilisation de FDES. Un bilan dynamique aurait mis davantage en avant l'effet du stockage temporaire.

C. Discussion

Nous proposons ici de discuter les choix effectués dans notre étude.

Tout d'abord, la conception du bâtiment (dimensions, matériaux, structure) affecte les résultats dans la proportion de matériaux fortement émissifs qu'elle génère. L'étude s'est reposée sur une proposition de conception représentative des bâtiments français basée sur les résultats trouvés dans la littérature, choix critiquable compte-tenu de la diversité des bâtiments existants à une échelle macro. L'outil développé permet cependant la modification des paramètres structurels des bâtiments. La création de plusieurs échantillons de bâtiments aux dimensions et structures représentatives du parc de logement français pourrait compléter l'étude.

De plus, nous avons supposé une répartition proportionnelle des bâtiments collectifs et individuels et de la part de marché du bois dans la construction, définie à 5,8% ou à 18%. Cependant, la répartition entre maisons et immeubles en bois n'est certainement pas équivalente à la répartition entre maisons et immeubles tous matériaux confondus. Cette répartition est de plus vouée à évoluer, avec certainement un nombre de logements collectifs à la hausse. De plus, si une incitation au bois était mise en place, celle-ci visera peut-être davantage les logements collectifs. Dans ce cas, le gain total d'impact dû à l'incitation au bois est sous-évalué. En effet, d'après nos résultats, la proportion de bois dans les immeubles est plus élevée au m² et l'impact évité et stocké lors de la construction d'immeubles en bois par rapport à des immeubles en béton est plus important.

D'autre part, nous avons opté pour l'usage des FDES pour la collecte de données, choix réalisé par de nombreux professionnels pour la comparaison d'ACV de bâtiment. La collecte des données est ainsi simplifiée et les résultats d'ACV de chaque matériau composant le bâtiment peuvent être explicités. Cependant, ces fiches limitent la réalisation d'un bilan dynamique précis car il est impossible de remonter au détail de l'origine des émissions du bilan calculé. De plus, les fiches FDES ne tiennent pas compte de la vision à long terme de l'évolution des pratiques. Les scénarios de fin de vie ou les processus industriels sont fournis tels qu'ils sont à la date où la fiche est effectuée. Pour faire face à ces limites, il est possible d'utiliser des logiciels d'ACV spécialisés comme SimaPro associés à des bases de données plus complètes (Ecoinvent, Elodie...) et permettant de mieux répartir les émissions, connaître leur origine et tenir compte d'une évolution de certains processus au fil des ans. Un outil d'inventaire dynamique est en cours de développement : DyPLCA⁶. Cet outil permet, à partir d'une ACV conventionnelle réalisée via SimaPro, de répartir les émissions sur tout le cycle de vie et ainsi d'obtenir la différence de temporalité des émissions du système étudié.

Enfin, les modélisations effectuées dimensionnent fortement l'analyse. Le stockage de carbone biogénique a été supposé linéaire dans le temps mais il correspond en réalité à la fonction de croissance des arbres, non linéaire, et cela impacte les résultats dynamiques. Toujours concernant le cycle de vie du bois, l'enfouissement en fin de vie n'a pas été découpé dans le temps alors qu'il se réalise sur plusieurs années et impacte également les résultats dynamiques en prolongeant le stockage. Par ailleurs, les nombreuses modélisations macro concernant l'évolution du parc de logement et des émissions du secteur de la construction sont simplifiées. Afin de présenter des modélisations plus réalistes, une étude des facteurs affectant ces paramètres est nécessaire, notamment de façon non exhaustive : l'évolution de la population, la part de la rénovation, l'évolution technologique des processus de fabrication des matériaux cimentés, la logistique des transports dans la construction, le mix énergétique etc.

En parallèle d'une étude de l'influence du bois sur les stocks de carbone liés au secteur de la construction, une étude de la filière bois, et notamment de l'impact qu'aurait un usage accru de bois dans la construction sur le marché sur la répartition de la ressource forestière et sa capacité et sur l'investissement nécessaire à ce changement d'usage, permettrait de compléter les constats

⁶ <http://dyplca.pigne.org/>

scientifiques. L'INRA a commencé à étudier la question (IGN, 2017) et a développé le modèle économique FFSM (Lobianco et al. 2016) de la filière bois française décrivant les variables économiques offre-demande à partir de la description des comportements économiques des agents, et permettant ainsi de décrire les instruments de politiques publiques nécessaires pour orienter la dynamique de la filière. Complété par le détail de la filière bois dans le secteur du bâtiment, ce modèle pourrait servir de base à l'étude économique d'un usage accru de bois dans la construction.

Conclusion

L'intérêt de l'usage des produits bois dans la construction est aujourd'hui incontestable. En plus des principes de substitution d'énergie et de matériaux, le bois offre un stockage temporaire de carbone, réel levier pour les objectifs de neutralité carbone. L'étude proposée a permis de mettre en avant la propriété de stockage temporaire du bois au niveau du bâtiment mais également à l'échelle du secteur du logement. A l'échelle d'un bâtiment, les résultats obtenus confirment les résultats trouvés dans la littérature, avec un gain de 300 à 500 kgCO₂-équivalent par m² pour la construction de logements individuel et collectif respectivement. Ces résultats ont permis de dimensionner l'effet sur le parc de logement français. L'étude chiffre le potentiel de stockage par les produits bois en 2050 à hauteur de 11% de l'impact actuel du secteur dans le cas d'une incitation permettant d'obtenir 18% de matériaux en bois dans la construction. Ce résultat est par ailleurs sous-estimé car il ne tient compte que de l'approche statique du calcul d'impact de réchauffement climatique.

La comptabilité du stockage temporaire soulève néanmoins plusieurs limites, méthodologiques et politiques. Au niveau méthodologique, deux aspects sont abordés. L'étude met tout d'abord en avant la nécessité d'utiliser une approche dynamique pour une étude concernant le bois et le secteur du bâtiment, à la fois dans l'évaluation mais aussi dans l'inventaire des émissions. Sans cet aspect dynamique, l'impact de réchauffement climatique étudié est faussé et l'évolution des comportements et des pratiques niée. Les résultats de l'étude montrent notamment un impact de réchauffement climatique évité plus important lorsque la dimension temporelle est prise en compte et une forte sensibilité à l'évolution des scénarios des émissions. De plus, le choix de l'échelle nationale est discutable. Une incitation au bois correspond davantage à une question d'échelle régionale avec des critères de besoins et de ressources comme le développement du secteur du bois dans la région considérée, les matériaux à disposition et leur niveau d'émissions, le type de forêt présent et sa croissance, affectant l'effet de stockage et de substitution. D'autres impacts environnementaux comme les problèmes de toxicité sont également à prendre en compte dans le choix du matériau.

Par ailleurs, deux leviers de recherche ont été identifiés. Un premier serait l'intégration de la dynamique de la ressource forestière dans des analyses d'impact comme l'ACV. La croissance des forêts n'est en effet jamais identique et on ne peut prétendre que le tonnage prélevé sera équivalent au tonnage régénéré. Il serait ainsi judicieux de considérer les dynamiques du stock de carbone forestier et d'y intégrer le stock de produits bois. Cette approche permet de se placer dans une vision systémique : on tient compte des dynamiques des émissions et on évite des erreurs de double-comptage. La fin de vie du bois issu du bâtiment est par exemple directement liée à la fin de vie du bois exploité en forêt. Le deuxième levier de recherche concerne les scénarios de fin de vie. Ceux-ci dimensionnent largement les résultats obtenus. Or, dans notre étude, les fins de vie considérées relèvent du choix des auteurs et contrôleurs des fiches FDES et dépendent fortement de l'évolution du secteur. Or dans la perspective d'une économie circulaire ces émissions n'auront peut-être jamais lieu.

Intégrer une démarche d'ACV dynamique est louable mais complexe, d'autant plus pour les bâtiments dont le jeu de paramètres entraîne une grande incertitude sur les modélisations à long terme. Nos résultats ont montré que l'essentiel de l'impact lié aux structures des bâtiments se joue à l'étape de production-construction. Calculer un bilan sur une période de 50 à 100 ans semble discutable dans un contexte d'urgence climatique. La création du label BBCA qui emploie une méthode innovante intégrant le stockage de carbone et la déconstruction plutôt que la fin de vie est la preuve que la profession s'organise afin de valoriser le carbone vivant et d'écartier les émissions de fin de vie trop incertaines. La question de l'horizon temporel est au cœur de la discussion. De futurs travaux permettront d'allier cette approche avec un calcul dynamique afin de rester au plus proche de la réalité physique du stockage de carbone.

Lexique

ACV : Analyse de Cycle de Vie

AGWP : Absolute Global Warming Potential

DCF : Dynamic Caractérisation Facteur (Facteur de caractérisation dynamique)

FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GWl : Global Warming Impact

GWP : Global Warming Potential

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

RE : Réglementation Environnementale

RT : Réglementation Thermique

Annexes

A. Elaboration de la surface moyenne des logements

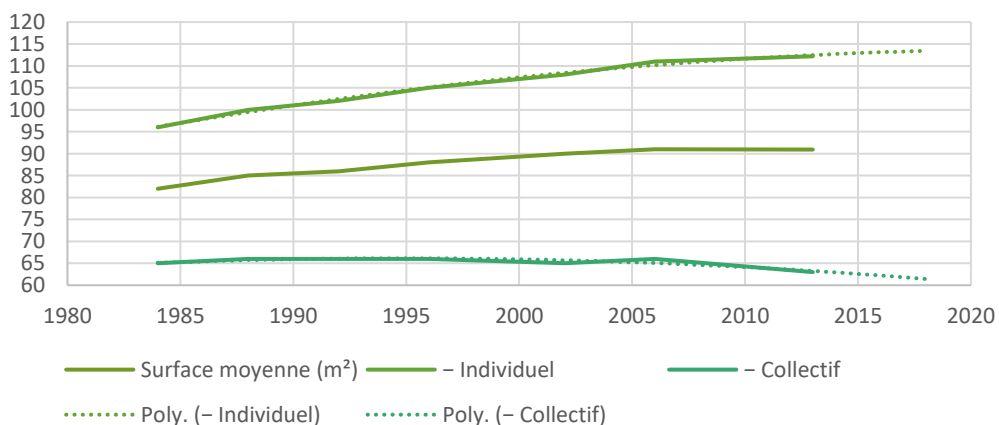


Figure 9 : Evolution de la surface moyenne des logements par type (courbes pleines) et extrapolation jusqu'en 2018 via une courbe de tendance (courbes en pointillés) (INSEE, 2016)

B. Structure des quatre bâtiments représentatifs du cas français

	Maison en bois	Maison en béton
Toiture	Revêtement de bardeaux de bois Pare-pluie de toiture Charpente industrielle Panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm	Revêtement de tuiles de terre cuite Pare-pluie de toiture Charpente industrielle Panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm
Plancher de toiture	Panneaux recouvrement OSB 18mm Isolant ouate de cellulose 18,6cm + 12cm Solive poutre I 393mm/94x94mm Dalle de plancher OSB 9mm Plaque de plâtre BA13	Chape en mortier de ciment 5cm Isolant PSE 22,5cm Poutrelle-hourdi de béton 17cm Plaque de plâtre BA13
Sol bas isolé	Solive poutre I 393mm/94x94mm Dalle de plancher OSB 9mm Isolant ouate de cellulose 18,6cm Plancher en panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm	Poutrelle-hourdi de béton 17cm Isolant PSE 15,5cm Chape en mortier de ciment 5cm Plancher en panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm
Murs extérieurs	Revêtement de lame de bois massif (bardage) 18mm et tasseau de support Voile travaillant ou pare-vent : panneaux OSB Ossature bois en épicéa 145x45mm, tous les 60cm + Isolant ouate de cellulose 14,5cm Pare-vapeur Isolant ouate de cellulose 11,5cm Plaque de plâtre BA13	Enduit cimentaire 2cm Bloc béton 20cm Pare-vapeur Isolant laine de roche 14,5cm + 8cm Plaque de plâtre BA13
Fenêtres/Portes	24% de la surface des parois à enlever	

	Immeuble en bois	Immeuble en béton
Toiture	<i>Toiture avec légère pente (15°) :</i> Revêtement de bardeaux de bois Pare-pluie de toiture Charpente industrielle Panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm	<i>Toit plat :</i> Recouvrement dalle béton 20cm Etanchéité bitumeuse (pare-pluie) Isolant PSE 10cm Pare-vapeur (feutre bitumé ou feuilles d'aluminium) Acrotère (bordure surélevée du toit) : blocs de béton en continuité des murs
Sol/plafond de toiture	Panneaux recouvrement OSB 18mm Solive poutre I 393mm/94x94mm Isolant ouate de cellulose 18,6cm + 12cm Dalle de plancher OSB 9mm Plaque de plâtre BA13	Chape en mortier de ciment 5cm Isolant PSE 17cm Dalle béton armé 18cm et armature en acier (toit plat) Plaque de plâtre BA13
Sol bas isolé	Solive poutre I 393mm/94x94mm Isolant ouate de cellulose 18,6cm	Dalle béton armé 18cm et armature acier Isolant PSE 16,5cm

	Dalle de plancher OSB 9mm Plancher en panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm	Chape en mortier de ciment 5cm Plancher en panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm
Plancher R+1 et R+2	Plaque de plâtre BA13 Solive poutre I 393mm/94x94mm Isolant ouate de cellulose 18,6cm Dalle de plancher OSB 9mm Plancher en panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm	Plaque de plâtre BA13 Dalle béton armé 18cm et armature acier Isolant PSE 17cm Chape en mortier de ciment 5cm Plancher en panneaux de contreplaqué en bois massif 18mm
Murs extérieurs	Revêtement de lame de bois massif (bardage) 18mm et tasseau de support Voile travaillant ou pare-vent : panneaux OSB Ossature bois en épicéa 145x45mm, tous les 60cm + Isolant ouate de cellulose 14,5cm Pare-vapeur Isolant ouate de cellulose 11,5cm Plaque de plâtre BA13	Enduit cimentaire 2cm Bloc béton 20cm Pare-vapeur Isolant laine de roche 22,5cm Plaque de plâtre BA13
Cloisons intérieures entre appartements	Plaque de plâtre BA 13mm Ossature bois + Isolant ouate de cellulose 14,5cm Isolant ouate de cellulose 9,5cm Plaque de plâtre BA 13mm	Plaque de plâtre BA 13mm Laine de roche 4cm Bloc béton 20cm Laine de roche 4cm Plaque de plâtre BA 13mm
Fenêtres/Portes	32% de la surface des parois à enlever	

C. Impacts dynamiques instantané et cumulé des quatre bâtiments représentatifs

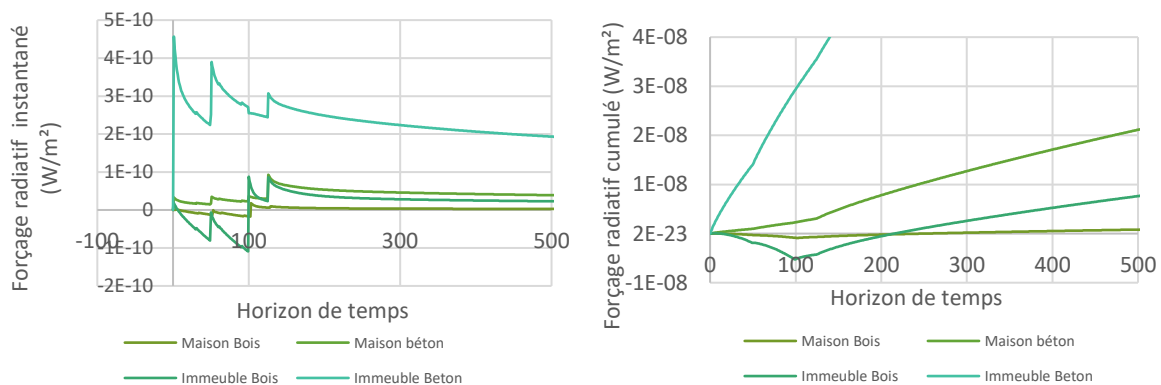


Figure 10 : Impacts dynamiques instantané (gauche) et cumulé (droite) des quatre bâtiments représentatifs

D. Répartition de la contribution des éléments de construction

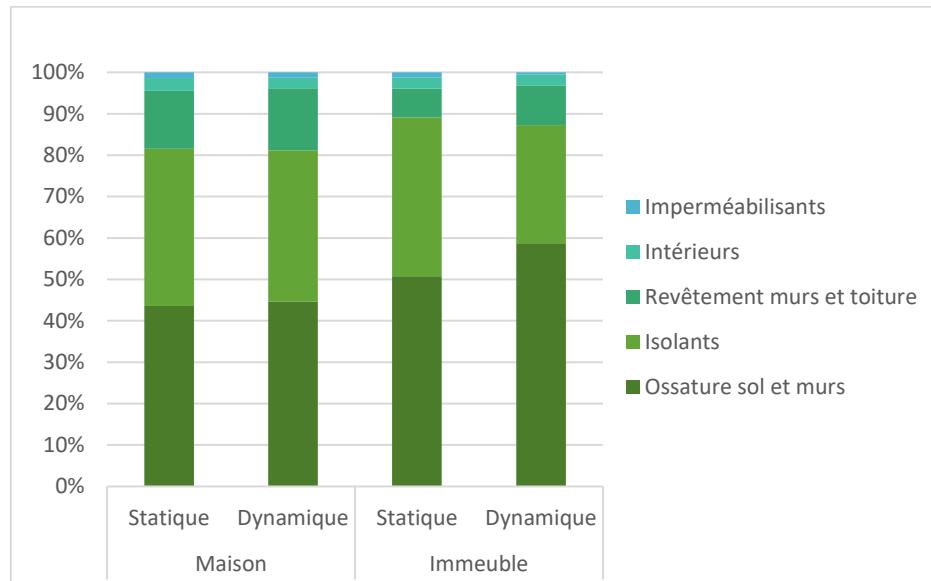


Figure 11 : Répartition des contributions des groupes de matériaux dans la différence d'impact entre construction en bois et en béton pour les méthodes d'évaluation d'impact statique et dynamique

E. Décroissance des émissions de sous-secteurs de l'industrie manufacturière

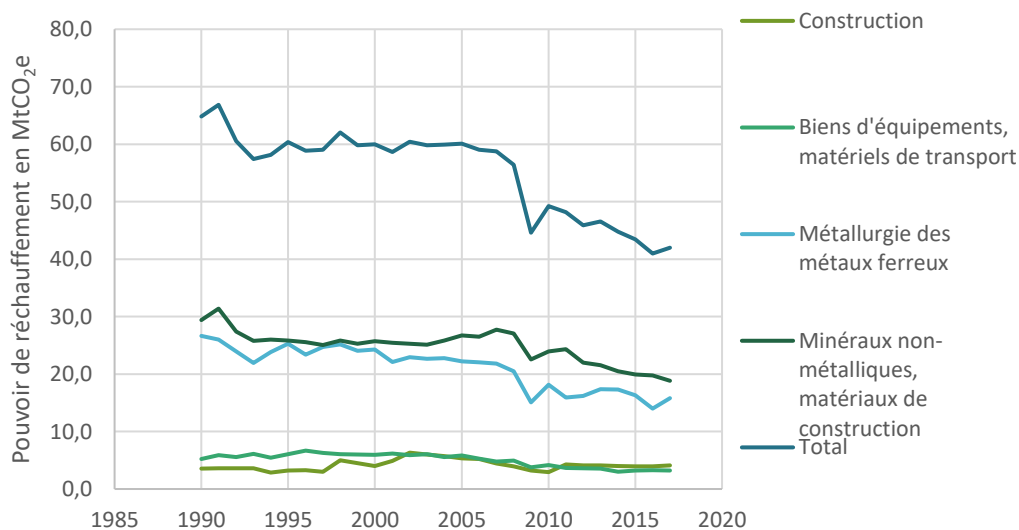


Figure 12 : Répartition des émissions de CO₂ de sous-secteurs de l'industrie manufacturière (CITEPA, 2019)

Bibliographie

- ADEME, Carbone 4. (2019). NEUTRALITÉ & BÂTIMENT : Comment les acteurs du secteur peuvent s'inscrire dans une démarche zéro émission nette. Retrieved from <http://www.carbone4.com/publication-neutralite-batiment/>
- BBCA, (2019) Présentation de l'Association pour le développement du Bâtiment Bas Carbone (BBCA)
- Bourque, C. P. A., Neilson, E. T., Gruenwald, C., Perrin, S. F., Hiltz, J. C., Blin, Y. A., Swift, D. E. (2007). Optimizing carbon sequestration in commercial forests by integrating carbon management objectives in wood supply modeling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(7), 1253-1275. doi:10.1007/s11027-006-9072-3
- Bretagne, C. E. d. (2017). [Enquête nationale de la construction bois].

- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strømman, A. H., & Hertwich, E. (2011). CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3(5), 413-426. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01102.x
- CITEPA. (2019). Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques : Bilan des émissions en France de 1990 à 2017 - Format SECTEN. Retrieved from https://www.citepa.org/images/III-1_Rapports_Inventaires/SECTEN/rapport/Citepa_Secten-2019_Rapport_Completv3.pdf
- Collinge W.O., Liao L., Xu H., Saunders C.L., Bilec M., Landis A., Jones A. & Schaefer L. (2011). Enabling dynamic life cycle assessment of buildings with wireless sensor networks. Chicago, IL, USA.
- Dixon, R. K. S., A. M.; Brown, S.; Houghton, R. A.; Trexier, M. C.; Wisniewski, J. . (1994). Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science*, 263(5144), 185-190. doi:10.1126/science.263.5144.185
- DRIEA Ile de France (2016). Le label «Bâtiment biosourcéBâtiment biosourcé» : un outil pour développer un outil pour développer l'écoconstruction en Île-de-France. Retrieved from http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Le_label_Batiment_biosource_2016.pdf
- ECONOBOIS (2015). ENECOBOIS Project : Réduction de l'impact énergétique de la filière boisconstruction grâce à l'analyse multicritère du cycle de vie.
- Eriksson, E., Gillespie, A. R., Gustavsson, L., Langvall, O., Olsson, M., Sathre, R., & Stendahl, J. (2007). Integrated carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, 37(3), 671-681. doi:10.1139/x06-257
- FCBA (2014). Carbone Forêt-Bois : Des faits et des chiffres. Retrieved from https://www.codifab.fr/sites/default/files/vademecum_carbone_foret_bois_2012.pdf
- Felton, A., Gustafsson, L., Roberge, J. M., Ranius, T., Hjältén, J., Rudolphi, J., Felton, A. M. (2016). How climate change adaptation and mitigation strategies can threaten or enhance the biodiversity of production forests: Insights from Sweden. *Biological Conservation*, 194, 11-20. doi:10.1016/j.biocon.2015.11.030
- Fouquet, M., Levasseur, A., Margni, M., Lebert, A., Lasvaux, S., Souyri, B., . . . Woloszyn, M. (2015). Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Building and Environment*, 90, 51-59. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.022
- Frijia, S., Guhathakurta, S., & Williams, E. (2012). Functional unit, technological dynamics, and scaling properties for the life cycle energy of residences. *Environ Sci Technol*, 46(3), 1782-1788. doi:10.1021/es202202q
- GE3. (2019). Préparation de la RE2020 - GE3 : Stockage temporaire du carbone - Rapport du groupe d'expertise. Retrieved from http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/ge3_stockage_temporaire_carbone_rapport_final.pdf
- Geng, A., Yang, H., Chen, J., & Hong, Y. (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics*, 85, 192-200. doi:10.1016/j.forpol.2017.08.007
- Gustavsson, L., Joelsson, A., & Sathre, R. (2010). Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. *Energy and Buildings*, 42(2), 230-242. doi:10.1016/j.enbuild.2009.08.018
- Gustavsson, L., Pingoud, K., & Sathre, R. (2006). Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(3), 667-691. doi:10.1007/s11027-006-7207-1
- Gustavsson, L., & Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, 41(7), 940-951. doi:10.1016/j.buildenv.2005.04.008

- Gustavsson, L., & Sathre, R. (2010). Energy and CO2 analysis of wood substitution in construction. *Climatic Change*, 105(1-2), 129-153. doi:10.1007/s10584-010-9876-8
- Heinonen, J., Säynäjoki, A., Junnonen, J.-M., Pöyry, A., & Junnila, S. (2016). Pre-use phase LCA of a multi-story residential building: Can greenhouse gas emissions be used as a more general environmental performance indicator? *Building and Environment*, 95, 116-125. doi:10.1016/j.buildenv.2015.09.006
- Hill, C. A. S., & Dibdiakova, J. (2016). The environmental impact of wood compared to other building materials. *International Wood Products Journal*, 7(4), 215-219. doi:10.1080/20426445.2016.1190166
- Hossain, M. U., & Poon, C. S. (2018). Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities. *Journal of Cleaner Production*, 177, 387-397. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.233
- Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., & Le Roy, R. (2017). Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *Journal of Cleaner Production*, 144, 33-47. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.068
- IFN. (2011). Les indicateurs de gestion durable des forêts françaises métropolitaines. L'IF. Retrieved from https://inventaire-forestier.ign.fr/IMG/pdf/IF_igd_web.pdf
- IGN. (2018). La forêt française : Etat des lieux et évolutions récentes.
- IGN. (2017). Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique ?
- INSEE. (2016). Les conditions de logement en 2013. Retrieved from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1287961?sommaire=1912749>
- INSEE. (2018) La production de ciments en France : une industrie très concentrée. Retrieved from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3589283>
- INSEE. (2019). Logement en 2016 - France métropolitaine. Retrieved from <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4177183?geo=METRO-1>
- IPCC. (2007). AR4 Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Chapter 5. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- IPCC. (2014a). 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Retrieved from http://www.gofcgold.wur.nl/documents/newsletter/GOFC-newsletter_no30.pdf
- IPCC. (2014b). Summary for Policymakers - Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Retrieved from <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc501476/>
- IPCC (Ed.) (2001). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis* (Cambridge University Press ed.).
- Isbell, F., Adler, P. R., Eisenhauer, N., Fornara, D., Kimmel, K., Kremen, C., Bardgett, R. (2017). Benefits of increasing plant diversity in sustainable agroecosystems. *Journal of Ecology*, 105(4), 871-879. doi:10.1111/1365-2745.12789
- Kellenberger, D., & Althaus, H.-J. (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, 44(4), 818-825. doi:10.1016/j.buildenv.2008.06.002
- Kendall, A. (2012). Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(8), 1042-1049. doi:10.1007/s11367-012-0436-5
- Kirkinen, J. (2010). Greenhouse impact assessment of some combustible fuels with a dynamic life cycle approach. (PhD Thesis). Abo akademi university,
- Laratte, B. (2013). Evaluation dynamique et cumulative des impacts environnementaux dans le cadre d'une analyse de cycle de vie. Université de Technologie de Troyes (UTT),
- Lecompte, T. (2019). Matériaux bio-sourcés pour le bâtiment et stockage temporaire de carbone

- Levasseur, A., Brandão, M., Lesage, P., Margni, M., Pennington, D., Clift, R., & Samson, R. (2011). Valuing temporary carbon storage. *Nature Climate Change*, 2(1), 6-8. doi:10.1038/nclimate1335
- Levasseur, A., Lesage, P., Margni, M., Brandão, M., & Samson, R. (2012). Assessing temporary carbon sequestration and storage projects through land use, land-use change and forestry: comparison of dynamic life cycle assessment with ton-year approaches. *Climatic Change*, 115(3-4), 759-776. doi:10.1007/s10584-012-0473-x
- Lippke, B., & Puettmann, M. E. (2013). Life-Cycle Carbon from Waste Wood Used in District Heating and Other Alternatives. *Forest Products Journal*, 63(1-2), 12-23. doi:10.13073/fpj-d-12-00093
- Liu W., Zhang Z., Xie X., Yu Z., von Gadow K., Xu J., Yang Y. (2017). Analysis of the Global Warming Potential of Biogenic CO₂ Emission in Life Cycle Assessments. *Sci Rep*, 7, 39857. doi:10.1038/srep39857
- Lobianco, A., Caurila, S., Delacote, P., & Barkaoui, A. (2016). Carbon mitigation potential of the French forest sector under threat of combined physical and market impacts due to climate change. *Journal of Forest Economics*, 23, 4-26. doi:10.1016/j.jfe.2015.12.003
- Manriquez, J. (2006). An assessment of carbon pools, storage, and wood products market substitution using life-cycle analysis results. *Wood and Fiber Science*, 37, 140-148.
- Marie-Lise Pannier, P. S., Bruno Peuportier. (2016). Identification de paramètres incertains influents en analyse de cycle de vie des bâtiments. Paper presented at the Conférence IBPSA France, Marne-la-Vallée.
- Mehr, J., Vadenbo, C., Steubing, B., & Hellweg, S. (2018). Environmentally optimal wood use in Switzerland—Investigating the relevance of material cascades. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 181-191. doi:10.1016/j.resconrec.2017.12.026
- Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A., & Nyman, M. (2007). Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input–output analysis. *Energy*, 32(9), 1593-1602. doi:10.1016/j.energy.2007.01.002
- Negishi, K., Lebert, A., Almeida, D., Chevalier, J., & Tiruta-Barna, L. (2019). Evaluating climate change pathways through a building’s lifecycle based on Dynamic Life Cycle Assessment. *Building and Environment*, 164, 106377. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106377
- Negishi, K., Tiruta-Barna, L., Schiopu, N., Lebert, A., & Chevalier, J. (2018). An operational methodology for applying dynamic Life Cycle Assessment to buildings. *Building and Environment*, 144, 611-621. doi:10.1016/j.buildenv.2018.09.005
- Ochsendorf, J., Keith N. L., Brown D., Durschlag, H., Hsu S. L. Love A., Santero N., Swei O., Webb A., Wildnauer, M. (2011) *Methods, Impacts, and Opportunities in the Concrete Building Life Cycle*. MIT Concrete Sustainability Hub. URI : <http://hdl.handle.net/1721.1/105108>
- OID (2019). Décryptage : les matériaux biosourcés et le réemploi. Retrieved from https://www.o-immobilierdurable.fr/hc_ressources/materiaux_biosources_reemploi/
- Pajchrowski, G., Noskowiak, A., Lewandowska, A., & Strykowski, W. (2014). Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. *Construction and Building Materials*, 52, 428-436. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.11.066
- Sathre, R., & González-García, S. (2014). Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. In *Eco-efficient Construction and Building Materials* (pp. 311-337).
- Sathre, R., & Gustavsson, L. (2006). Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 47(4), 332-355. doi:10.1016/j.resconrec.2005.12.008
- Sathre, R., & O’Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13(2), 104-114. doi:10.1016/j.envsci.2009.12.005
- Sibiude G., Vesson. M. & Chevalier. J. (2016). Etudes de sensibilité et paramétriques de l’ACV bâtiment.
- Sikkema, R., Junginger, M., McFarlane, P., & Faaij, A. (2013). The GHG contribution of the cascaded use of harvested wood products in comparison with the use of wood for energy—A case study on

- available forest resources in Canada. *Environmental Science & Policy*, 31, 96-108. doi:10.1016/j.envsci.2013.03.007
- Smyth, C., Rampley, G., Lemprière, T. C., Schwab, O., & Kurz, W. A. (2017). Estimating product and energy substitution benefits in national-scale mitigation analyses for Canada. *GCB Bioenergy*, 9(6), 1071-1084. doi:10.1111/gcbb.12389
- SNBC. (2018). *Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone - Ministère de la transition écologique et solidaire*. Retrieved from <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
- Suter, F., Steubing, B., & Hellweg, S. (2017). Life Cycle Impacts and Benefits of Wood along the Value Chain: The Case of Switzerland. *Journal of Industrial Ecology*, 21(4), 874-886. doi:10.1111/jiec.12486
- Tae, S., Baek, C., & Shin, S. (2011). Life cycle CO₂ evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3), 253–260. doi:10.1016/j.eiar.2010.07.002
- Takano, A., Hafner, A., Linkosalmi, L., Ott, S., Hughes, M., & Winter, S. (2015). Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 73(3), 299-312. doi:10.1007/s00107-015-0890-4
- UNICEM. (2014). *Statistiques*.
- Valsta, K. P. J. P. L. (2010). Assessing the Integrated Climatic Impacts of Forestry and Wood Products. *SILVA FENNICA*, 44(1), 155–175.
- Vitale, P., Arena, N., Di Gregorio, F., & Arena, U. (2017). Life cycle assessment of the end-of-life phase of a residential building. *Waste Manag*, 60, 311-321. doi:10.1016/j.wasman.2016.10.002
- Wang, X., Padgett, J. M., Powell, J. S., & Barlaz, M. A. (2013). Decomposition of forest products buried in landfills. *Waste Manag*, 33(11), 2267-2276. doi:10.1016/j.wasman.2013.07.009
- Werner, F., & Richter, K. (2007). Wooden building products in comparative LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7), 470-479. doi:10.1065/lca2007.04.317
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., & Richter, K. (2006). Greenhouse Gas Dynamics of an Increased Use of Wood in Buildings in Switzerland. *Climatic Change*, 74(1-3), 319-347. doi:10.1007/s10584-006-0427-2
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Thürig, E., & Kaufmann, E. (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: a model-based assessment. *Environmental Science & Policy*, 13(1), 72-85. doi:10.1016/j.envsci.2009.10.004

INFORMATION ET DÉBATS

DERNIERES PARUTIONS

- Les risques financiers climatiques** **N°61**
Jérôme DEYRIS
- Couverture du risque météorologique en agriculture : les leçons du cas français** **N°60**
Marielle BRUNETTE, Philippe DELACOTE, Richard KOENIG,
Camille TEVENART
- Le gaz renouvelable : état des lieux et perspectives économiques de la filière française** **N°59**
Côme BILLARD
- Le brevet, un bon indicateur de l'innovation ? Le cas de l'éolien terrestre en Allemagne** **N°58**
Valentin LIGNAU
- Une évaluation quantifiée de la « taxe carbone » française** **N°57**
Stéphane GLORIAN
- La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique** **N°56**
Christian de PERTHUIS, Boris SOLIER
- Prix interne du carbone : pourquoi et comment ?** **N°55**
Raphaël OLIVIER
- Impact de la production de bois-énergie sur les pratiques sylvicoles en région Provence-Alpes-Côte d'Azur** **N°54**
Pauline CASTAING

Directeur des publications Information et Débats : Marc Baudry

Les opinions exprimées dans ces documents par les auteurs nommés sont
uniquement la responsabilité de ces auteurs.
Ils assument l'entière responsabilité de toute erreur ou omission.

La Chaire Économie du Climat est une initiative de l'Université Paris Dauphine, de la
CDC, de Total et d'EDF, sous l'égide de la Fondation Institut Europlace de Finance.