

Potentiel de séquestration et de substitution du carbone par le bois dans le secteur de la construction neuve en France¹

par Florine OLLIVIER-HENRY

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. Permettant à la fois de réduire les émissions indirectes liées à la construction et d'augmenter le stock de carbone, l'intérêt porté aux produits bois s'est vu redoubler. Cet article fait un bilan de l'empreinte carbone d'un usage accru de bois dans les constructions neuves de logements français.

1 - NDLR : de l'étude complète consultable sur le site de la Chaire Économie du Climat, nous avons conservé l'introduction, la partie centrale « Le bois dans la construction et le stockage temporaire : constats et verrous méthodologiques » et la conclusion. Un encadré résume la dernière partie sur « L'impact d'un usage accru du bois dans la construction ».

<https://www.chaireeconomieduclimat.org/publications/potentiel-de-sequestration-de-carbone-par-le-bois-etude-des-constructions-neuves-dans-le-secteur-du-logement-francais/>

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 la 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 puits 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 puits 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, 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 (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, limite 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 construction 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.

Le bois dans la construction

Les caractéristiques de la forêt française, telles qu'elles ressortent du rapport 2018 de l'IGN, crédibilisent l'objectif d'une intensification de l'exploitation de cette forêt, dans le cadre d'une gestion durable, et sa capacité à fournir davantage de bois en direction de la construction².

Nous nous intéresserons maintenant au bois en tant que matériau de construction et à son impact mis en avant par des méthodes conventionnelles. Puis, nous explorerons une évaluation d'impact alternative, plus appropriée à l'étude³.

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 réchauffe-

ment 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, l'analyse de cycle de vie (ACV) est la méthode la plus connue et la plus utilisée du fait de sa légitimité normative, de son caractère multicritère et de son approche du 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.

2 - NDLR : voir le développement de ce sujet dans l'étude complète.

3 - NDLR : sous la forme d'un encadré résumé p. 343.

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 200 tC/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 DIBDIKOVA (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 comparée 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 GIEC⁴, la concentration des gaz effet de serre (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 ; SATHRE & GONZÁLEZ-GARCÍA, 2014 ; VALSTA, 2010), un résultat de 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 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.

L'effet de substitution peut également être abordé du point de vue de la gestion forestière et, dans cette optique, une gestion

4 - GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

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 ; 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 250 kgC par tonne de bois réutilisée, et le changement d'utilisation des terres, valorisant le bois en matériau, peut sauver jusqu'à 1 tC 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. 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.

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 der-

nier 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'étalement les émissions dues au cycle de vie du système. Elle est à bien dissocier avec l'horizon de temps.

Le calcul dynamique met largement en avant 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.

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 clima-

Statique ou dynamique ?

	Approche statique	Approche dynamique
Description	Année d'émission non considérée	Temporalité des émissions : une émission plus tardive a plus d'impact
Avantages	Alignée avec des normes existantes	Valorise le stockage temporaire de carbone et donc les matériaux biosourcés
Inconvénients	Pas de prise en compte des bénéfices du stockage temporaire	Résultats plus complexes à interpréter Minimise l'impact du renouvellement Minimise les bénéfices de la fin de vie
Le RE2020 va intégrer l'évaluation dynamique mais la méthode de calcul n'a pas été actée.		

tique, 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.

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.

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.

Le bois dans la construction, un atout pour la neutralité Carbone

Les produits bois sont donc des leviers potentiels pour l'atteinte des objectifs de neutralité carbone, notamment dans le secteur du bâtiment. 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

Impact d'un usage accru du bois dans la construction

L'étude de Florine Ollivier-Henry se poursuit par la mesure de la différence d'impact des émissions de GES entre une construction en bois et une construction en béton, représentatives du parc actuel (individuel et collectif).

Elle s'est appuyée sur plusieurs études ayant procédé à une analyse de cycle de vie de bâtiments existants ou fictifs, essentiellement en bois ou comparant des structures en bois et en béton. En prenant en compte le stockage temporaire de carbone par le bois à l'aide d'une approche dynamique du calcul du potentiel de réchauffement climatique, les résultats calculés à un horizon de 100 ans sont très favorables au bois.

Pour une maison individuelle, les impacts de réchauffement climatique en kgCO₂e/m² sont de 20 pour la construction bois et 319 pour le béton avec une analyse statique soit un gain de 300 kgCO₂e/m². Avec l'approche dynamique, ils varient de -80 (la construction est alors un puits de carbone) à 210 pour le béton, soit un gain identique. Pour les immeubles, la différence est encore plus importante avec un gain de l'ordre de 500 kgCO₂-équivalent par m², car la proportion de bois est supérieure. Un autre élément est à souligner : respectivement pour 50% pour les maisons en béton et pour 80% pour les immeubles en béton, l'impact carbone est dû à l'étape de production-construction, donc sensible dans les premières années du cycle de vie.

Ces résultats ont permis de dimensionner l'effet sur le parc de logement français. L'étude d'un usage accru de bois pour les constructions neuves du parc de logement français montre l'intérêt du stockage permis par ce matériau. Dans le cas où la part de bois de construction est triplée d'ici à 2050 (de 6 à 18%), et d'une croissance du parc de logement de 1% par an, on obtient une réduction de l'impact carbone d'au moins 11% de l'impact actuel du secteur.

sectorielle du logement en France en tenant compte de l'aspect dynamique.

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 de carbone par le 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 séquestration 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 du potentiel de stockage avec une approche statique du calcul d'impact de réchauffement climatique, donc sans tenir compte de l'effet de temporalité sur les émissions induites et séquestrées.

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 regénééré. 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 (Fiche de déclaration environnementale et sanitaire) 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 et lointaines. 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.

La question de l'horizon est de fait au cœur de la discussion. Pour rappel, utiliser une approche statique ou dynamique à un horizon de temps infini est équivalent. C'est bien parce que notre temps d'action est limité que le choix d'un horizon de temps fini est pertinent. L'utilisation d'un horizon de temps de 100 ans est déjà lointain mais se révèle un entre-deux entre l'échelle de temps de la vie humaine et l'échelle de temps climatique. L'approche dynamique se présente ainsi comme un outil permettant de favoriser le stockage de carbone précoce et de long terme et de retarder les émissions de GES et ainsi agir plus rapidement à l'atténuation du changement climatique.

F.O.-H.

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)
- 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_Section-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.
- DRIEA Ile de France (2016). Le label «Bâtiment 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_bio-source_2016.pdf
- 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
- 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
- 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.forepol.2017.08.007
- Gustavsson, L., Joelson, 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
- 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
- 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/GOF_C-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.).
- 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
- 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.
- 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., & 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
- 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.ecologiquesolidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
- 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
- Valsta, K. P. J. P. L. (2010). Assessing the Integrated Climatic Impacts of Forestry and Wood Products. *SILVA FENNICA*, 44(1), 155-175.
- 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:10.1063/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

Résumé

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 focalisation 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.

Summary

Sequestration potential and the substitution of carbon by wood in the construction industry for new buildings in France

From passive buildings to low-carbon buildings, the context of global climate change and recent technological developments have modified the design selection criteria in the construction sector, bringing environmental impact to the fore among the most essential criteria for innovative building. The conception of sustainable buildings cannot be restricted to a low energy consumption, it must also take into account the choice of construction materials. Wood products first of all make it to reduce indirect emissions induced by the construction phase and, secondly, to increase the biogenic carbon stock. Interest in their use has therefore strengthened. After an assessment of the role of wood in construction, focusing on the French case, this article offers a carbon assessment of an increased use of wood in the French housing sector. We underline simultaneously the interest of the temporary storage of carbon offered by wood products and the challenges raised by such an incentive for forestry management, for end of life treatment and for the accounting of biogenic carbon contribution. The benefits from wood-products substitution are widely acknowledged. In contrast, the sequestration effect, a real advantage of biobased materials, is often neglected and requires the integration of a dynamic approach in the calculation of the climate change indicator.