

Matériaux biosourcés pour le bâtiment : notions d'équilibres et indicateurs de réchauffement climatique.

Thibaut LECOMPTE

Univ. Bretagne-Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, Lorient, France

RESUME

Du fait de leur contenu carbone, les matériaux biosourcés pour le bâtiment sont *a priori* de bons candidats pour lutter contre le réchauffement climatique. Cet article propose un bilan des enjeux autour de la substitution des matériaux conventionnels par des matériaux biosourcés. Pour juger du potentiel réel d'atténuation du réchauffement climatique lié à cette substitution, il faut s'intéresser aux équilibres en place : équilibre du marché de la construction, de l'utilisation des sols, des gaz à effet de serre qui séjournent dans la basse atmosphère et de l'énergie consommée dans les bâtiments. Un état des lieux de ces équilibres en place est proposé, suivi d'une étude de cas afin de bien comprendre les enjeux liés à l'usage des matériaux biosourcés, ainsi qu'au choix des indicateurs de réchauffement climatique.

Mots-clefs Atténuation du réchauffement climatique, matériaux biosourcés, bâtiment, approche dynamique

I. INTRODUCTION

Pour répondre à la problématique du réchauffement climatique induit par l'activité humaine, les pouvoirs publics Français et Européens se sont engagés, notamment depuis le protocole de Kyoto (1997) à limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) liées à leurs activités. Dans le secteur du bâtiment en France, ceci s'est traduit par l'application de réglementations thermiques successives (RT 2000, RT 2005, RT 2012) ayant pour principal objectif la limitation de la consommation des logements neufs. Dans la continuité de cette démarche, la RE2020, nouvelle réglementation en vigueur depuis le 1^{er} janvier 2022, marque une rupture. Elle impose une démarche d'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et des seuils d'émissions de GES à ne pas dépasser, à la fois pour l'usage du bâtiment et pour sa construction, maintenance et fin de vie. Dans ce cadre, les matériaux biosourcés pour le bâtiment sont théoriquement de très bons candidats. Pour la structure, il s'agit essentiellement du bois d'œuvre. Pour l'isolation thermique et acoustique, il existe sur le marché actuel des matériaux biosourcés sous forme de rouleaux ou de panneaux (laines végétales, fibres et laines de bois), en vrac (ouate de cellulose), sous forme de granulats (chènevotte de chanvre, anas de lin, miscanthus, résidus de bois, moelle de tournesol) ou en botte (paille de céréale). Ils peuvent être disposés directement en vrac, ou associés à d'autres matériaux (ciment, chaux, polymères synthétiques). Ces matériaux ont des densités, des chaleurs spécifiques et des conductivités thermiques très variables. Leur performance thermique, acoustique et environnementale est donc elle aussi très variable.

Lutter contre le réchauffement climatique revient à s'interroger sur l'équilibre des Gaz à Effet de Serre (GES) en place dans l'atmosphère. Ajouter des GES accroît le réchauffement climatique, séquestrer des GES l'atténue. Il faut donc non seulement réduire nos émissions, mais aussi parvenir à séquestrer la part résiduelle des GES déjà émis pendant le XX^e siècle et le début du XXI^e siècle. Pour bien évaluer l'intérêt de prélever du carbone atmosphérique, il faut donc bien connaître les GES en place, leur pouvoir de rayonnement et leur cinétique de dissolution. De plus, la séquestration de GES dans le bâti ne doit pas faire oublier la nécessité de limiter au maximum les émissions liées à l'usage. Il faut donc que les solutions à base de matériaux biosourcés aient une performance thermique suffisante et ne nous affranchisse pas d'appliquer les concepts bioclimatiques de bon sens, qui optimisent les apports gratuits d'énergie (ex : énergie solaire par les vitrages) ou limitent les déperditions (ex : compacité du bâti).

Le respect de l'équilibre de l'utilisation des sols est aussi essentiel, afin d'éviter des effets rebond qui pourraient découler d'une tension trop forte sur les forêts ou d'un changement d'affectation des terres pour développer des agromatériaux à la place de forêts existantes. Enfin, d'un point de vue plus macro-économique, il est intéressant de faire un état des lieux du marché actuel de la construction en France, afin de pouvoir estimer le potentiel réel de séquestration carbone lié à une massification de l'usage des biosourcés dans le bâtiment, et donc à une substitution des matériaux conventionnels, émetteurs de GES.

La seconde partie présente une étude de cas, qui permet de comprendre d'une part l'apport d'une solution biosourcée dans l'atténuation du dérèglement climatique, et d'autre part l'enjeu lié au choix de l'indicateur permettant de mesurer cet impact.

Cet article reprend notamment des extraits d'un chapitre écrit pour les Techniques de l'Ingénieur (Lecompte, 2019) et d'un article publié dans « Building and environment » (Zieger, 2020)

II. NOTIONS D'EQUILIBRES

A. Equilibre énergétique

Quand on estime les impacts liés au secteur du bâtiment, on ajoute généralement les impacts liés à l'usage et ceux liés à la construction elle-même. Les impacts d'usage sont souvent mesurés à partir de la consommation conventionnelle d'énergie primaire (Cep dans les RT et RE). Il faut noter que depuis 1974 et le premier choc pétrolier, les pouvoirs publics français et européens se sont quasiment exclusivement focalisés sur la maîtrise de l'énergie d'usage, afin dans un premier temps de limiter la dépendance énergétique vis-à-vis des ressources fossiles, puis à partir du sommet de Rio (1992) de limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) liées aux activités humaines. La RE2020 est la première à s'intéresser au choix des matériaux de construction directement d'un point de vue environnemental. Cependant une première source de réflexion doit être de préserver à la fois une certaine performance des parois et un bon usage du bioclimatisme afin d'une part de limiter la consommation d'énergie des bâtiments, et d'autre part d'optimiser l'apport d'énergie « gratuite » : la meilleure énergie est avant tout celle qui n'est pas consommée. De ce point de vue il faut, en phase de conception, privilégier les bâtiments compacts, bien orientés, bien isolés et aux équipements performants (ouvrants, VMC, système de chauffage, ECS).

Pour illustrer l'influence de la compacité d'un logement, on peut par exemple comparer deux bâtiments d'une même surface habitable de 100 m². L'un est réalisé sur deux étages de 50 m², et l'autre est de plein pied, en forme de L (Fig. 1). Le premier a une compacité (Surface enveloppe/Volume chauffé) de 0,97 m⁻¹ et le second une compacité de 1,27 m⁻¹. Le second nécessitera, du fait de sa plus grande surface d'enveloppe, environ 40% de matériaux en plus pour sa construction et théoriquement environ 30% de besoin en chauffage supplémentaire.

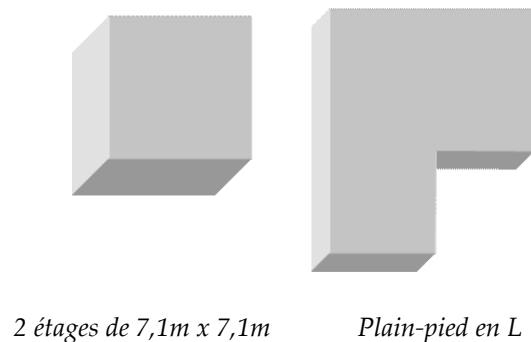


Figure 1 - Deux emprises au sol possibles pour une surface habitable de 100 m²

Pour illustrer l'influence de l'orientation et de la technologie des vitrages, nous avons réalisé l'étude thermique du premier bâtiment de la Fig. 1 à l'aide du logiciel PHPP 9.6V2. Nous avons choisi des parois semi lourdes (140 Wh.K⁻¹.m²), à isolation répartie, ayant une résistance thermique R=7m²K/W, une dalle de plancher bas sur terre-plein, une surface vitrée de 20m², une VMC double flux (efficacité de l'échangeur de 60%) avec un renouvellement d'air de 120 m³/h. Le tableau 1 présente les résultats du besoin en chauffage en fonction de l'orientation des vitrages et de leur qualité, pour deux climats différents en France (Lorient et Strasbourg).

Tableau 1 - Estimation du besoin en chauffage en fonction du lieu de construction, du type et de l'orientation des vitrages, pour un bâtiment de bonne compacité, de 100 m² habitables (calculé avec le tableur PHPP 9.6V2)

Lieu de construction	Type de vitrage	Orientation des vitrages	Besoin en chauffage (critère passif : besoin < 15kWh/m ² .an) [kWh.m ² .an ⁻¹]
Lorient	Simple vitrages $U_g=5,8 \text{ W/m}^2\text{K}, f=0,87$	Tous les vitrages au sud	43 kWh/m².an
	Double vitrages $U_g=1,3 \text{ W/m}^2\text{K}, f=0,64$		10 kWh/m ² .an
	Triple vitrages certifiés passifs		9kWh/m ² .an
Strasbourg	$U_g=0,58 \text{ W/m}^2\text{K}, f=0,49$	Tous les vitrages au nord	24 kWh/m².an
		¼ des vitrages sur chaque orientation	18 kWh/m².an
		Tous les vitrages au sud	21 kWh/m².an
		Tous les vitrages au nord	33 kWh/m².an

Nous observons qu'une mauvaise orientation des vitrages peut faire plus que doubler le besoin en chauffage sur un même site. Nous observons aussi qu'à Strasbourg, une isolation avec une résistance des parois de 7m²K/W n'est pas suffisante pour répondre au critère passif de besoin en chauffage. En résumé, concevoir un bâtiment écologique devrait toujours commencer par la recherche de l'optimisation des apports « gratuits » (apports solaires par les parois vitrées

notamment) et la minimisation des déperditions, en travaillant sur la compacité du bâtiment et en choisissant des parois opaques et des vitrages performants thermiquement.

Cette performance des parois opaques se caractérise à la fois par la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique du matériau. Le tableau 2 présente des valeurs caractéristiques de matériaux biosourcés et de matériaux conventionnels. Certains matériaux biosourcés ont des valeurs de conductivité du même ordre de grandeur que les matériaux d'isolation conventionnels. Ce n'est pas le cas des mélanges « chaux-chanvre » et « terre-chanvre », qui sont plus conducteurs. Ces deux matériaux sont destinés à un usage en isolation répartie ou en correction thermique, et doivent plutôt être comparés au béton cellulaire et à la brique alvéolaire, qui ont des conductivités du même ordre, voire supérieures (cf. Tab. 2). La question de leur performance réelle, tenant compte de leur faible diffusivité thermique, de leur chaleur spécifique élevée et de leur comportement intéressant vis-à-vis de la vapeur d'eau reste une question de recherche ouverte, qui est notamment abordée dans le projet « BIP » (2020-2024), financé par l'ADEME (batiment-biosource.fr/projet-bip-filieres-biosourcees/).

Tableau 2 - Principales caractéristiques physiques de certains matériaux bio-sourcés ou conventionnels

Matériau	Conductivité λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Chaleur spécifique C_p [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	Masse volumique ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Coefficient de résistance à la vapeur d'eau μ [-]	Diffusivité thermique d [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]
Laine de chanvre Biofib'Chanvre_CAVAC® : chanvre + 9% polyester	0,040	1800	40	1,8	$5,6 \cdot 10^{-7}$
Fibres végétales Biofib'Trio_CAVAC® : coton + lin + chanvre + 9% polyester)	0,039	1800	30	<2	$7,2 \cdot 10^{-7}$
Fibres de chanvre en vrac	0,04 à 0,05	1800	40 à 55	<2	$5 \cdot 10^{-7}$
Chênevotte grossière en vrac	0,055 à 0,13	1350 à 1670	100 à 450	1 à 3	$2 \text{ à } 3 \cdot 10^{-7}$
Mélanges chaux/chanvre (CenC, 2013)	0,07 à 0,15	1500 à 1700	250 à 800	10 à 13	$1,3 \text{ à } 1,6 \cdot 10^{-7}$
Mélange terre/chanvre (Colinart, 2020)	0,06 à 0,12	900 à 1100	200 à 400	2 à 4,5	$2,7 \text{ à } 3,3 \cdot 10^{-7}$
Fibres de bois Haute Densité (Isonat®DuoProtect)	0,046	1700	180	3	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Paille de blé	0,05	900	100	<2	$5,5 \cdot 10^{-7}$
Laine de verre (ISOVER® Isolant Rouleau Mur Plus)	0,032	1030	27	<2	$11,5 \cdot 10^{-7}$
Polystyrène Expandé (KNAUF® Therm Mur Th38)	0,038	1450	14,7	30 à 70	$17,8 \cdot 10^{-7}$
Béton ordinaire	2	840	2500	70 à 150	$9,5 \cdot 10^{-7}$
Béton cellulaire	0,2 à 0,35	840	400 à 1300	4,5 à 9	$3,2 \text{ à } 6 \cdot 10^{-7}$
Brique alvéolaire	0,12 à 0,18	840	860	5 à 10	$1,7 \text{ à } 2,5 \cdot 10^{-7}$

Une autre piste de réflexion pourrait être liée au « service rendu » par un logement, et notamment son évolution au cours de ces 30 dernières années. Le gouvernement français (2019) fait état d'une baisse relativement faible de 5% des émissions de GES des secteurs résidentiel et tertiaire (consommation d'usage) entre 1990 et 2016. Cette baisse est notamment limitée par le fait que la

population française augmente et que chaque habitant occupe une plus grande surface habitable (Fig.2), malgré une énergie de moins en moins émettrice de GES et des parois de plus en plus performantes.

Les tableaux 3 et 4 donnent des ordres de grandeur d'émissions de GES pour un kWh d'énergie produite. Ces données incitent clairement au développement d'un mix énergétique renouvelable et nucléaire, et à proscrire l'utilisation du fioul et du gaz pour le chauffage des habitations. L'évolution du mix énergétique et des modes de chauffage, dépendant des politiques publiques et des évolutions technologiques, devrait être prise en compte dans les différents scénarios d'analyse de cycle de vie des constructions, de même que l'évolution des usages des habitants.

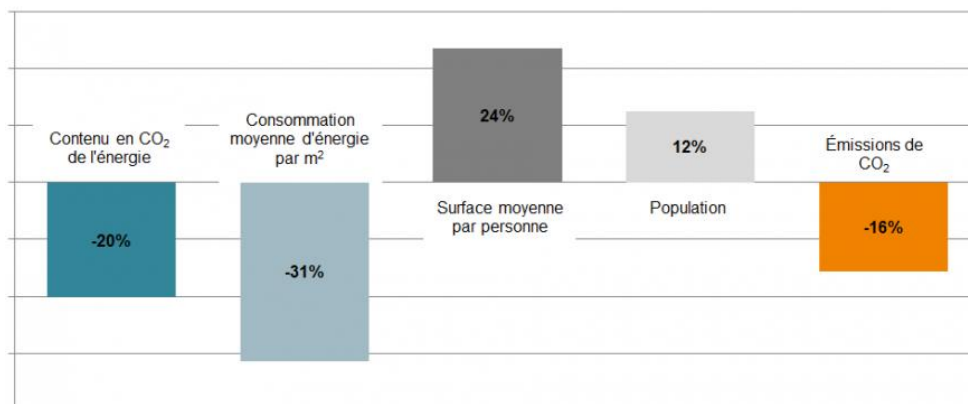


Figure 2 - Évolution de la contribution des facteurs explicatifs de l'évolution des émissions de GES liées aux consommations d'énergie dans les logements entre 1990 et 2016 (Gouvernement Français, 2019)

Tableau 3 - Emissions de GES (gCO₂eq) pour un kWh d'énergie électrique, en fonction de la source d'énergie (chiffres pour la France métropolitaine (ADEME, 2022)).

	gCO ₂ eq/kWh électrique
Nucléaire	~6
Eolien	~15
Photovoltaïque	~44
Gaz naturel	~420
Fioul	~730
Charbon	~1000

Tableau 4 - Emissions de GES (gCO₂eq) pour un kWhPCI de chauffage, en fonction de la source d'énergie (chiffres pour la France métropolitaine (ADEME, 2022)).

	gCO ₂ eq/kWhPCI
Bûches et Granulés bois	~30
Gaz Naturel	~230
Fioul	~320

B. Équilibre des gaz à effet de serre (GES) entre les puits terrestres et la basse atmosphère

Deux paramètres distinguent un gaz à effet de serre d'un autre : son efficacité radiative instantanée et sa cinétique de dissolution. L'efficacité radiative instantanée '*a_{GES}*' correspond au

forçage radiatif, c'est-à-dire la puissance de chauffage supplémentaire à la surface terrestre créée par une augmentation d'un kg du GES considéré dans l'atmosphère [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}$]. Elle dépend à la fois de l'absorptivité du gaz (sa capacité à absorber les ondes de chaleur et à les réémettre vers la surface terrestre) et de sa concentration dans l'atmosphère. La cinétique de dissolution est quant à elle caractérisée par l'évolution de la fraction massique atmosphérique résiduelle C à un instant t , suivant une émission de gaz au temps zéro (impulsion). En effet, chaque gaz émis dans l'atmosphère va interagir avec l'ensemble de l'écosystème planétaire (arbres, plantes annuelles, sols, océans, glaces, atmosphère) et se dissoudre, totalement ou partiellement, avec une cinétique qui lui est propre. La Figure 3 présente la cinétique de dissolution de trois gaz à effet de serre sur une période de 200 ans après l'impulsion, d'après les travaux du GIEC (IPCC,2014).

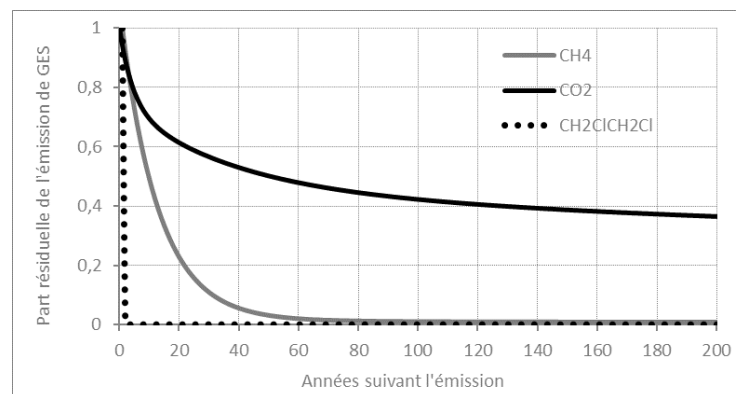


Figure 3 - Cinétique de dissolution de trois gaz à effet de serre (CH_4 : méthane ; CO_2 : dioxyde de carbone ; $\text{CH}_2\text{ClCH}_2\text{Cl}$: dichloroéthane).

Il est à noter que ces cinétiques dépendent de la nature du gaz, mais aussi de l'état d'équilibre de l'écosystème terrestre. C'est pourquoi le GIEC révisé régulièrement les lois cinétiques et les valeurs de forçage radiatif de l'ensemble des GES connus, en fonction de leur concentration mesurée dans l'atmosphère. On remarque aussi que certains gaz ont une vitesse de dissolution très élevée et que le CO_2 émis ne se dissout jamais totalement. Ce que l'on appelle « potentiel de réchauffement global » (PRG) est le paramètre conventionnellement utilisé pour l'impact de réchauffement climatique dans les démarches d'analyse de cycle de vie. C'est un paramètre qui 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 forçage radiatif cumulé pour un horizon de temps donné correspond à l'intégrale du forçage radiatif instantané : $a_{GES} \int_0^{HT} C_{GES}(t) dt$. Il représente l'énergie calorifique supplémentaire due à l'émission dans l'atmosphère d'un kg de GES supplémentaire à l'instant 0 [$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{kg}^{-1}$]

Le PRG d'un gaz est donc dépendant de son efficacité radiative instantanée a_{GES} et de sa charge atmosphérique $C_{GES}(t)$, mais aussi de l'horizon de temps HT choisi pour le calculer. Le GIEC distingue le PRG absolu et le PRG relatif. Généralement, lorsque l'on parle de PRG d'un GES, il est calculé en relatif par rapport à une valeur équivalente de CO_2 . L'Equation (1) donne l'expression mathématique de ce PRG relatif :

$$(1) \text{PRG}_{GES}^{HT} = \frac{\text{PRG}_{ABSOLU}_{GES}^{HT}}{\text{PRG}_{ABSOLU}_{\text{CO}_2}^{HT}} = \frac{a_{GES} \int_0^{HT} C_{GES}(t) dt}{a_{\text{CO}_2} \int_0^{HT} C_{\text{CO}_2}(t) dt}$$

On voit donc que le temps et le choix de l'horizon d'étude sont importants dans la démarche

d'estimation du réchauffement climatique induit. Le GIEC présente des résultats avec des horizons de temps de 20, 100 et 500 ans. La convention actuelle est l'utilisation d'un horizon de temps de 100 ans. Ainsi, l'impact « réchauffement climatique » dans la majorité des ACV est mesuré en kgCO_2eq , correspondant au PRG relatif à 100 ans d'une masse donnée de gaz à effet de serre :

$$(2) \text{Impact}_{\text{réchauffement climatique}} = M_{\text{GES}} * \text{PRG}_{\text{GES}}^{100} \text{ [kg CO}_{2\text{eq}}]$$

Avec M_{GES} la masse de gaz émise, en kg, au temps zéro. L'horizon de temps de 100 ans est arbitraire, et rien n'empêcherait de calculer l'impact réchauffement climatique sur un horizon de temps différent, ou via un autre critère que le PRG.

Tableau 5 - Contenu carbone et estimation du CO_2 séquestré en fonction de la nature des matériaux biosourcés (Lecompte 2019)

Matériau biosourcé	Proportion massique de carbone à l'état sec (Valeur proposée à partir des données de la littérature) C%	Masse de CO_2 prélevé dans l'atmosphère par kg de bois [kg CO_2]		
		Etat sec	12% de teneur en eau	20% de teneur en eau
Paille de blé	44%	1,61	1,44	1,34
Fibres de chanvre et de lin				
Chênevotte de chanvre, anas de lin, miscanthus	47%	1,72	1,54	1,44
Bois feuillu	48%	1,76	1,57	1,47
Bois résineux	50%	1,83	1,63	1,53

L'intérêt principal de l'usage des matériaux biosourcés dans le bâtiment est leur contenu carbone. En effet, les végétaux représentent un potentiel de séquestration du CO_2 contenu dans la basse atmosphère. Lors de sa croissance par photosynthèse une plante capte du CO_2 dans l'atmosphère et de l'eau dans les sols afin de créer du glucose, qu'elle transforme ensuite en polymères naturels. La plante capte donc du CO_2 , conserve le carbone (C) et rejette du dioxygène (O_2), qui n'est pas un gaz à effet de serre. On peut donc estimer le CO_2 séquestré dans chaque matériau biosourcé, à partir de son contenu carbone –Tab.5. On voit dans le Tableau 5 qu'un matériau biosourcé ayant 12% de teneur en eau séquestre au minimum 1,44kg de CO_2 par kg.

La figure 4, issue de (Berndes, 2016) illustre bien la différence entre le cycle de carbone d'un matériau biosourcé et celui d'un matériau d'origine fossile (pour l'énergie) ou issu du sous-sol (ex : chaux et ciment qui émettent directement du CO_2 par calcination du calcaire- CaCO_3 - lors de leur fabrication). Il est impératif de distinguer le flux « à sens unique » de carbone des gisements souterrains vers l'atmosphère et la circulation du carbone entre la biosphère et l'atmosphère. La biomasse fait partie d'un cycle naturel de croissance et de décomposition. Les combustibles fossiles resteraient dans le sol s'ils n'étaient pas extraits par l'homme. En revanche, à l'état naturel, presque tout le carbone de la biomasse ligneuse finira par se décomposer ou s'oxyder, et le carbone sera recyclé dans l'atmosphère d'où il provient. Ainsi, utiliser et stocker des matériaux issus de la biomasse dans les bâtiments constitue un stock potentiel supplémentaire de carbone, qui pendant toute la vie en œuvre du bâtiment, ne sera pas dans l'atmosphère. Ce stockage temporaire de carbone doit donc contribuer à l'atténuation du réchauffement climatique. En revanche, toute utilisation de carbone issu des gisements souterrains correspond à une libération

supplémentaire de carbone, qui y était stocké depuis plusieurs centaines de milliers d'années. La fabrication, l'acheminement et l'adjuvantation d'un matériau biosourcé pour le bâtiment implique donc aussi des émissions de gaz à effet de serre fossiles et géogéniques. Ils peuvent aussi être associés à des matériaux synthétiques (polymères ou minéraux) émetteurs de GES. Le tableau 6 présente le bilan GES jusqu'en phase chantier, pour différents matériaux de construction à base de chanvre (Lecompte 2022). Comme on peut le voir, certains matériaux biosourcés associés à des liants minéraux sont globalement « émetteurs ». Afin que la séquestration de CO₂ soit effective, il faudrait privilégier au maximum les produits bio-sourcés locaux, les moins transformés et sans adjuvants ou associés à des adjuvants à faible impact, comme par exemple la terre crue.

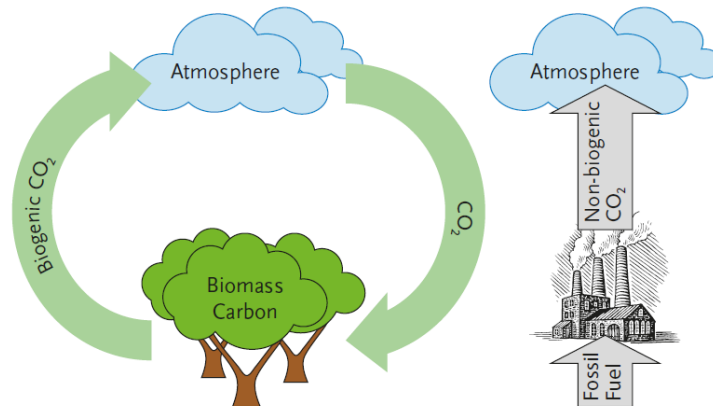


Figure 4 - Distinction entre le flux carbone des gisements souterrains vers l'atmosphère et la circulation du carbone entre la biosphère et l'atmosphère : la biomasse fait partie d'un cycle naturel de croissance et de décomposition alors que les combustibles fossiles resteraient dans le sol s'ils n'étaient pas extraits par l'homme (Berndes 2016)

La dernière colonne du tableau 6 présente le bilan carbone pour une paroi ayant une résistance thermique de 7 m²K/W. Cette valeur de résistance est celle qui est généralement préconisée comme valeur minimale pour des parois verticales de bâtiments passifs. Les données de cette colonne amènent à un paradoxe : le meilleur bilan en termes de séquestration carbone serait obtenu avec un mélange terre-chanvre, disposé sur une paroi de 63 cm d'épaisseur. D'une part, on ne sait pas mettre en œuvre une telle épaisseur et d'autre part cela signifierait que plus on utilise de matière et plus le bilan écologique serait favorable. Ce serait oublier tous les autres impacts induits, comme la pollution de l'air, l'utilisation d'énergie non renouvelable ou l'acidification des sols. Le meilleur matériau reste celui qui n'est pas utilisé, ou dit autrement : dont la quantité est optimisée. C'est ce qu'illustre la figure 5 : nous voyons que certains matériaux bio-sourcés d'isolation sont les plus impactants en termes de besoin en énergie non renouvelable, de pollution et d'eutrophisation. L'eutrophisation, la pollution de l'eau et l'acidification des sols sont notamment liées à l'utilisation de fertilisants et de produits de traitement lors de la culture des matériaux agro-sourcés. Dans le cas de la fibre de bois, la fabrication des panneaux par broyage, séchage, compression et adjuvantation présente un bilan énergétique relativement élevé.

Par ailleurs, afin que le stockage de carbone dans les bâtiments soit effectif, et fasse que les villes deviennent de réels puits de carbone supplémentaires, il faut s'assurer que l'exploitation des sols agricoles et des forêts suive une démarche de développement durable, à savoir que leur exploitation permette *a minima* de préserver le même stock de carbone dans les champs, les prairies et les forêts que le ferait un cycle naturel.

Tableau 6 - Estimation des GES émis (+) ou séquestrés (-) (phases fabrication et construction), pour différents types de matériaux à base de chanvre (Lecompte 2022)

	Composition (en masse)	Bilan GES pour un kg de matériau : kgCO ₂ eq-GES émis~ kgCO ₂ -séquestré [kgCO ₂ eq]	Masse volumique après mise en œuvre [kg/m ³]	Conductivité [W/mK]	Bilan GES pour 30 cm d'épaisseur sur 1m ² de paroi [kgCO ₂ eq]	Bilan GES pour un m ² de paroi de résistance thermique R=7m ² K/W [kgCO ₂ eq]	Epaisseur pour R=7m ² K/W [cm]
Isolation en laine de chanvre (CAVAC, 2021)	92% fibres de chanvre 8% polyester	-0,5	40	0,04	-6	-6,4	28
Fibre de chanvre en vrac	100% fibres de chanvre	-1,35	50	0,045	-20,25	-21,3	31,5
Béton de chanvre « construire en chanvre » pour banchage (CenC, 2021)	73% Liant 27% chènevotte	0,14	400	0,09	15,5	32,6	63
Mélange Chaux/chanvre pour banchage (Lecompte, 2017)	63% Tradical PF70 (liant) 37% Chènevotte	-0,11	400	0,085	-13,2	-26,2	59,5
Mélange Chaux / chanvre pour projection (Lecompte, 2017)	62% Chaux hydraulique 38% Chènevotte	-0,26	350	0,075	-27,3	-47,8	52,5
Mélange terre/ chanvre (Colinart 2021)	66% terre 34% chènevotte	-0,51	350	0,09	-53,6	-112,6	63
Chènevotte en vrac	100% chènevotte	-1,5	150	0,055	-67,5	-86,6	38,5

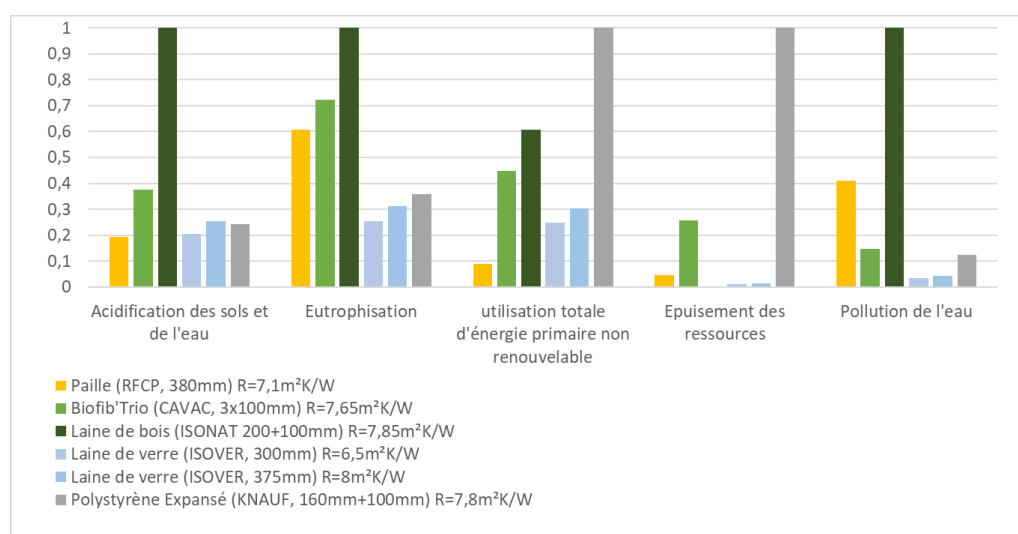


Figure 5 - Comparaison de plusieurs matériaux d'isolation vis-à-vis d'autres impacts environnementaux que le réchauffement climatique, à partir de données FDES de la base INIES (<https://www.base-inies.fr/>, consultée en novembre 2021)

C. Equilibre de l'utilisation des sols

La conversion des forêts en terres agricoles est responsable de l'émission de 3,7 milliards de tonnesCO₂eq annuellement à la surface du globe (IPCC, 2013). Ceci est dû au fait qu'une forêt représente un puits de carbone beaucoup plus élevé qu'un champ de culture ou une prairie. En France, les sols sous cultures annuelles et cultures pérennes avec sol nu (vignes, vergers, terres arables) stockent entre 32 tC/ha et 43 tC/ha alors que les sols sous prairies permanentes ou de forêt atteignent 70tC/ha. Dans le cas des forêts, il faut ajouter le carbone contenu dans la litière (env. 20 tC/ha) et le bois des arbres sur pied (env. 100tC/ha) (Arrouays, 2002). On voit bien l'enjeu lié aux équilibres entre les terres cultivées, les prairies et les forêts. Cette question avait été soulevée en 2008 au sujet de l'impact « réchauffement climatique » des bio-carburants (Searchinger, 2008 ; Fargione, 2008): le développement de bio-carburants devrait *a priori* permettre de limiter l'utilisation de carburant fossile et donc limiter le réchauffement climatique, mais si dans ce but l'affectation des sols est modifiée et que des forêts et des prairies sont détruites, alors les émissions dues au changement d'affectation des sols sont largement supérieures au gain lié à la substitution des combustibles fossiles.

Cette question d'équilibre est donc très importante, et implique lors de l'ACV d'un matériau bio-sourcé pour le bâtiment, de se demander si l'utilisation de ce matériau provoque des déséquilibres dans la répartition des cultures dans la zone géographique, corrélée à l'ouverture d'un nouveau marché potentiel ; la gestion durable des forêts et des surfaces agricoles, et leur capacité à répondre à la demande en matériaux. Actuellement les zones du globe en proie à la déforestation sont les zones tropicales (Amazonie, Afrique Equatoriale, Indonésie). En revanche, l'Europe a vu son volume de bois forestier croître au cours des 40 dernières années. On estime actuellement que les produits de sylviculture européens prélevés chaque année (bois d'œuvre, bois énergie, papier, ameublement, bois d'industrie) représentent 73% de la production annuelle de bois par les forêts (EEA 2018). Si on raisonne en termes d'équilibre, on peut donc considérer, en 2022, que le bois utilisé dans les constructions est au moins reconstitué dans les forêts européennes dès l'année qui suit la construction.

Ce raisonnement doit tout de même être pondéré, en tenant compte de plusieurs facteurs : l'essence de bois utilisée, qui peut être plus ou moins disponible, et avoir une croissance plus ou moins rapide ; la pratique sylvicole, qui peut être plus ou moins durable (coupes à blanc, monocultures, apports ou non de produits phytosanitaires dans les premières années de croissance). La question de la vitesse de croissance des arbres a été évaluée par Pittau et al. (2018). Ces auteurs ont montré que si on considérait le stockage potentiel de l'arbre dans la forêt, et donc la fin de ce stockage en cas d'utilisation en bois d'œuvre, l'analyse de cycle de vie pouvait mener à un débit de carbone. C'est pourquoi ces auteurs préconisent plutôt les plantes à croissance rapide pour le stockage de carbone dans les enveloppes des bâtiments. De même, effectuer des coupes claires sur de grandes surfaces de parcelles d'arbres du même âge limite la biodiversité, facilite l'érosion et la réémission de carbone de la litière et du sous-sol. Ce doit être un point de vigilance dans une politique de massification de l'usage du bois de structure.

Si nous considérons le marché français du bois (bois d'œuvre, bois d'industrie et bois énergie), nous constatons une augmentation de la quantité de feuillus, arbres à croissance plus lente, ces 30 dernières années et une augmentation (moins soutenue) de la quantité de résineux, arbres à croissance plus rapide (de l'ordre de 30 à 50 ans) les plus utilisés actuellement en bois d'œuvre (IFN, 2011 ; Français-Demay, 2018). En 2018, le bois d'œuvre représentait 51% du marché du bois,

contre 21% pour le bois énergie et 28% pour le bois d'industrie. 72% du bois d'œuvre était du bois résineux (FCBA 2018).

Dans le cas des plantes annuelles (blé, chanvre, lin, tournesol...), il est aisé de considérer que le stockage de carbone dans la plante aura lieu l'année précédant son utilisation en tant que matériau. Néanmoins, il faut aussi se poser la question de l'équilibre : les matériaux bio-sourcés issus de plantes annuelles actuellement utilisés dans le bâtiment en France sont principalement la paille de blé, la chènevotte de chanvre et les fibres de lin et de chanvre. Ce sont des coproduits de la culture des graines et des fibres textiles. Actuellement en Europe, la paille de blé est le plus souvent broyée sur le champ au moment de la récolte ou utilisée pour l'élevage (fumier). La chènevotte de chanvre non utilisée dans le bâtiment est quant à elle utilisée comme litière animale ou en paillis. Ces co-produits ont donc une durée de vie très limitée, de l'ordre d'une à deux années. Les disposer dans des enveloppes de bâtiment pour plusieurs dizaines d'années fait sens, d'autant plus qu'on peut leur imaginer une fin de vie identique : le temps passé en tant que matériau représente alors simplement une durée de séquestration supplémentaire. En ce qui concerne les fibres, il y a aussi plus de sens, d'un point de vue « réchauffement climatique », à les utiliser dans des bâtiments d'une durée de vie de plus de 50 ans que pour la fabrication de papier (plus de ¾ du marché (Chabaud 2012)) ou en tant que renforts dans les matériaux composites pour le nautisme ou l'automobile.

Le tableau 6 présente une estimation de la production des terres agricoles et des forêts en France. On peut notamment y voir que le potentiel actuel d'utilisation de la paille de céréales, 50,5% des terres arables, est très élevé comparé à la culture du chanvre (0,2%) ou du lin fibres (0,9%). Mais le chanvre et le lin peuvent aussi entrer dans une démarche d'introduction de cultures intermédiaires afin d'optimiser le contenu carbone des sols agricoles et leurs racines profondes en font de très bonnes têtes d'assolement.

Tableau 7 - Production par hectare de terre de différents matériaux biosourcés (sylvicoles et agricoles), en France métropolitaine

Type de matériau bio-sourcé	Quantité de matière végétale produite /(ha.an)	Quantité permanente de carbone stockée sur le champ ou dans la forêt [tonne C/ ha]	Surface utilisée en France (ha)	Sources
Bois d'arbre	Env. 5 m ³ /ha/an, soit env. 3 t/ha/an (env. 3 m ³ .ha ⁻¹ .an ⁻¹ sont prélevés)	190 tC/ha (Bois sur pied ~100 tC/ha Litière ~20 tC/ha Sol ~ 70 tC/ha)	17*10 ⁶ ha	[14, 15, 18, 27]
Chanvre	7 t/ha de paille 0,7t/ha de graines (chènevis)	41,5 tC/ha (Sol ~40 tC/ha Résidus organiques ~1,5 tC/ha)	15 000 ha (0,2% des terres arables)	[18, 24-26]
Lin fibre	7,5 t/ha de paille		80000 ha (0,9% des terres arables)	
Blé	4 à 6 t/ha de paille 7 t/ha de graines		Céréales : 9,3*10 ⁶ ha (50,5% des terres arables)	

Enfin, l'usage des matériaux biosourcés rentre dans le cadre de l'optimisation de l'usage des ressources et de la limitation des transports. L'objectif n'est pas de massifier l'usage de l'un ou l'autre des coproduits de l'agriculture pour l'ensemble de la France ou de l'Europe, mais bien d'utiliser les ressources disponibles localement. C'est par exemple l'objectif du projet INTERREG SAVASCO (2014-2020, <https://www.savasco-poctefa.eu/>), qui vise au développement de produits de constructions à base de tiges de maïs et de tournesol, entre la région Occitanie et la Catalogne.

De même, Ratsimbazafy et al. (2021) soulignent dans un article bibliographique sur les granulats biosourcés pour le bâtiment la grande diversité des matériaux disponibles en France, autres que la chènevotte de chanvre et la paille de blé : résidus de bois, paille et balles de riz, miscanthus, produits des tiges de maïs et de tournesol, paille de lavande, d'avoine ou de colza, pulpe de betterave. On peut aussi se tourner vers des plantes non agricoles, comme le roseau sauvage (*Phragmites Australis*) très présent dans les zones humides françaises (Honoré, 2022). Les gisements sont déjà en place, à disposition sur l'ensemble du territoire français et ne nécessitent clairement pas de changement d'affectation des sols.

D. Equilibre des marchés

L'état des lieux du marché de la construction en France nous renseigne directement sur le nouvel état d'équilibre que l'on pourrait viser par notre choix de matériaux de construction. Imaginons par exemple une massification des solutions bio-sourcées dans le secteur de la construction. Ce changement de pratique impliquerait un gain en termes de réchauffement climatique, induit par un stockage de carbone supplémentaire dans les villes. Ce gain sera effectif tant que le parc ne sera pas totalement bio-sourcé, moment qui correspondrait à un seuil de stock de carbone lié au remplacement de la totalité des bâtiments conventionnels par des bâtiments fortement bio-sourcés. Ce seuil est illustré par la figure 6. Il est donc possible en théorie d'estimer le potentiel de stockage de carbone lié à la massification de l'usage des matériaux bio-sourcés dans le secteur du bâtiment, en partant de l'état des lieux du marché de la construction dans une zone géographique donnée, à un instant t donné. Le tableau 8 donne un état des lieux du parc immobilier français aujourd'hui (données statistiques de la période 2007-2018 selon les sources). Sur le marché actuel, la part liée à la construction bois (ossatures, bois massif, structures poteau-poutre) représente 4 à 5% des logements collectifs, 9% des maisons individuelles et 20% des extensions, soit plus de 2 millions de m^2 de plancher en 2017 (environ 7% du marché (CODIFAB, 2017)). Le potentiel de progression est donc très conséquent. D'après l'INSEE (Arnold, 2016) la croissance annuelle moyenne du nombre de logements en France depuis 20 ans est de l'ordre de 1%. Le renouvellement des logements anciens est de l'ordre de 0,7% du parc résidentiel chaque année (Tab.8). Si on considère ces rythmes de croissance et de renouvellement, le parc actuel serait totalement renouvelé en 90 ans. Le seuil d'équilibre du marché est donc lointain et la marge de progression de la part de matériaux bio-sourcés très élevée : 91% des structures des logements individuels neufs ne sont pas bio-sourcées. Et sur le marché des isolants (neuf et rénovation), seulement 7% sont considérés comme bio-sourcés (50% sont des laines minérales et 40% des mousses alvéolaires -chiffres 2017).

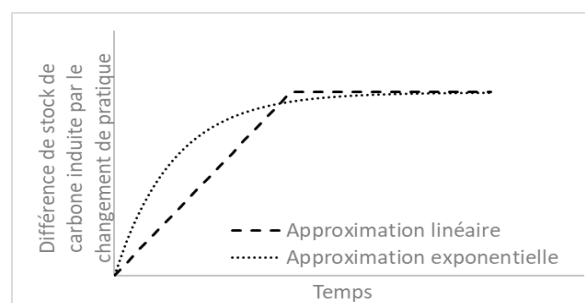


Figure 6 - Cinétique de stockage de carbone dans le cas d'un changement de pratique (ex : changement d'affectation de sols, changement de pratique agricole, substitution de matériaux conventionnels par des matériaux bio-sourcés dans les bâtiments) (IPCC, 2014 ; Arrouays, 2002).

Tableau 8 - Etat des lieux du parc immobilier français (Arnold, 2016 ; CGDD 2018 ; CGDD 2010, DHUP 2012)

Type de Construction		Nombre de bâtiments existants	Période de construction des logements existants				Surface de plancher existante [10 ⁶ m ²]	Surface de plancher construite en 2017 [10 ⁶ m ²]
			<1948	1948-1974	1974-2000	>2000		
Résidentiel (70% en surface de planchers)	Maisons individuelles	19, 33 millions (56% en nombre)	33%	22%	33%	12%	2011	33,8 (1,7% du parc)
	Logements collectifs	15, 21 millions (44% en nombre)	28%	41%	23%	8%		
Tertiaire (30% en surface de planchers)		1,46 millions	(<1960) 10%	(1960-1974) 35%	43%	12%	862	25 (2,9% du parc)
Surface moyenne des logements			75 m ²	75 m ²	82 m ²	80 m ²		
Matériaux de structures principalement utilisés dans la période			Pierre ; Brique pleine ; Pisée ; Pans de bois+ terre.	Pierre ; Brique pleine et creuse ; Parpaing	Brique pleines et creuses Parpaings			
Principaux Matériaux d'isolation			aucun		Laines minérales Mousse isolantes synthétiques (PSE, PU)			
Proportion de « passoires énergétiques » (classement F et G du diagnostic de performance énergétique)	Maisons individuelles		26%	44%	17%	2%		
	Logements collectifs		38%	30%	11%	13%		

Ce changement de pratique amène à une réflexion sur le bénéfice lié à la substitution des matériaux. En effet, le gain se situe non seulement dans la séquestration éventuelle de CO₂ de la basse atmosphère, mais aussi dans le fait de ne plus devoir produire de matériaux fortement émetteurs. Vis-à-vis d'un bilan des équilibres, on pourrait donc calculer le gain comme la différence entre l'ancienne pratique et la nouvelle pratique, c'est ce qu'on appelle le **principe de substitution**.

III. EXEMPLE D'INVENTAIRE DE GAZ A EFFET DE SERRE ET DE MESURES D'INDICATEURS DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE- COMPARAISON ENTRE MATERIAUX CONVENTIONNELS ET BIOSOURCES

Cette partie reprend les données et résultats d'un article publié dans le journal «Building and Environnement» ((Zieger, 2020), se référer à cet article pour plus de détails). Il s'agit de comparer deux types de parois. L'une est fortement biosourcée et géosourcée : paille de blé, bois, enduits terre ; l'autre est typique des constructions contemporaines (voir Tab. 8). En théorie, la première stocke temporairement du carbone biogénique tandis que la seconde est émettrice de carbone géogénique (énergies fossiles et calcination du calcaire). L'objectif de cette partie est de faire un bilan « dynamique », c'est-à-dire en tenant compte de la temporalité des émissions et séquestrations de GES, sur l'impact de dérèglement climatique lié à nos choix constructifs.

A. Présentation des deux systèmes étudiés

L'unité fonctionnelle des deux systèmes correspond à 1 m² de paroi, à la fois structurelle et isolante, d'une résistance thermique de l'ordre de 7,3 m²K/W et d'une durée de vie de 75 ans. Les deux systèmes étudiés sont décrits Fig. 7.

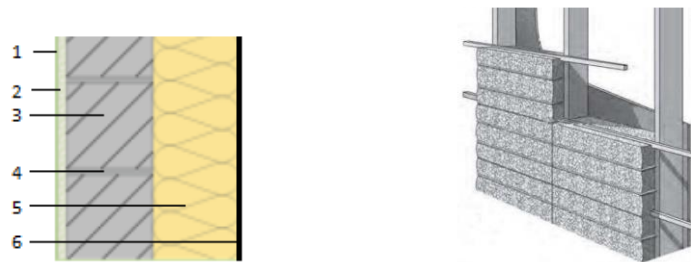


Figure 7 - A gauche : Paroi « conventionnelle » 1-Peinture extérieure ; 2-enduit extérieur à base de mortier de ciment ; 3- blocs de béton creux ; 4- joints de mortier ; 5- isolant en laine minérale ; 6-plaques de plâtre + peinture intérieure. A droite : paroi « biosourcée » (RFCP, 2018) : structure en ossature bois, ossature secondaire et remplissage isolant en botte de paille, enduit terre intérieur, enduit extérieur en mortier de chaux.

B. Inventaire de cycle de vie et taux de renouvellement des couches de durabilité

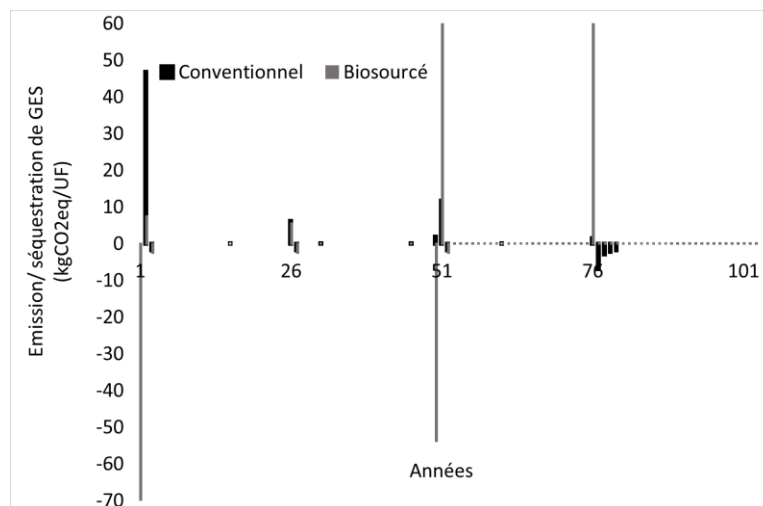


Figure 8 - Emissions/ séquestrations de GES liées aux deux types de parois proposés, en fonction du temps, pour l'unité fonctionnelle considérée.

Pour les différentes solutions, il faut prendre en compte le taux de renouvellement de certains matériaux au cours du temps. Nous avons donc estimé des durées de vie de 15 ans pour les peintures, 25 ans pour les enduits, 50 ans pour les isolants et les parements intérieurs, 75 ans pour la structure. En fin de vie le scénario pour les matériaux conventionnels et minéraux est une mise en décharge. Pour le matériau bois, le scénario reprend les chiffres de l'ADEME en 2013 : 43% recyclés, 34% incinérés et 23% enfouis en décharge. La paille est quant à elle considérée comme totalement incinérée en fin de vie. La durée de vie du bâti de 75 ans a été choisie de manière relativement arbitraire, mais tient compte des résultats de plusieurs études réalisées en Europe sur des bâtiments d'habitation (Arnold 2016, Wallhagen 2011).

La figure 8 montre les émissions et séquestrations de GES à chaque étape de la vie de ces systèmes constructifs. Ici, l'année 1 est l'année de la culture du blé. Pour la solution biosourcée, nous constatons donc une forte séquestration de CO₂ (valeur négative). L'année 2 est l'année de construction, qui se traduit par des émissions de GES, beaucoup plus élevées pour la solution conventionnelle (fabrication du béton, de la laine minérale et du plâtre) que pour la solution biosourcée. Les années 26 et 51 correspondent au changement des enduits, donc à des émissions supplémentaires. En revanche, les enduits minéraux carbonatent au cours de leur vie en œuvre, ce qui induit une séquestration de CO₂. Cette séquestration est rapide (faible épaisseur des enduits, et contact direct avec l'air extérieur) et est considérée comme totale dès l'année qui suit la pose (années 3, 27 et 52). De même, il est considéré que le béton de la solution conventionnelle, broyé finement et disposé en décharge, peut carbonater en fin de vie. Cette cinétique de carbonatation est prise en compte les années 76 à 80. Tous les 15 ans, de légères émissions sont liées à la peinture (solution conventionnelle). Enfin, pour la solution biosourcée, les isolants étant changés au bout de 51 ans, on peut voir la prise en compte du stockage de carbone dans la paille de remplacement l'année 50 et l'émission de l'incinération de la paille remplacée l'année 51.

C. Résultats

Les figures 9 donnent l'évolution de l'impact instantané et de l'impact cumulatif pour les deux solutions. On peut observer que l'impact instantané est du même ordre de grandeur en fin de vie du bâtiment pour les deux solutions, du fait du relargage lors de l'incinération de la paille. En revanche, dans le cas conventionnel, le bilan GES en début de vie correspond à une émission globale conséquente, qui reste quasiment constante au cours du temps, du fait des travaux de remplacement des peintures, des enduits et de l'isolation. Dans le cas bio-sourcé, le bilan global correspond à une séquestration, jusqu'à la fin de vie du bâtiment. Ceci fait que sur les 75 années de vie du bâtiment, cette solution accumule un « crédit climatique » : tout le carbone stocké dans le bâtiment n'est pas dans l'atmosphère, et limite le réchauffement global. En appliquant les équations de la partie II-B à l'analyse temporelle des émissions et séquestrations de GES, nous pouvons estimer un pouvoir de réchauffement global relatif à l'émission d'un kg de CO₂ la première année. Ceci revient à calculer un PRG relatif « dynamique ». Les valeurs obtenues sont données dans le tableau 9 en fonction de l'horizon de temps considéré, et comparées aux PRG « statiques ». Nous pouvons remarquer que les valeurs concernant la solution conventionnelle varient peu : l'essentiel des émissions a lieu la première année, et les séquestrations dues à la carbonatation compensent uniquement les émissions liées aux rénovations.

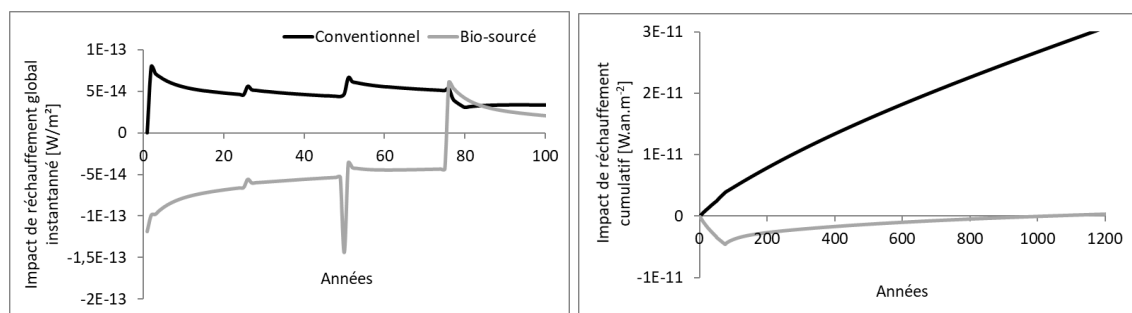


Figure 9 - Impacts de réchauffement global instantané et cumulatif pour les deux solutions. Les valeurs sont données pour l'unité fonctionnelle

En revanche, lorsqu'il s'agit des biosourcés, le calcul « statique » est pénalisant, puisqu'il ne tient pas compte du fait que le carbone est stocké en début de vie. Nous voyons qu'avec les valeurs

considérées dans cette étude, il faudra attendre 1000 ans avant que le PRG cumulé devienne positif, donc « débiteur » vis-à-vis du réchauffement climatique. Il est possible de pousser encore plus loin la réflexion, en considérant que la solution bio-sourcée va se substituer à la solution conventionnelle. Dans ce cas, c'est la différence des impacts qu'il faut considérer (Fig.10). Nous voyons que le stockage de carbone de la solution bio-sourcée, associé à un bilan carbone anthropique plus faible que pour la solution conventionnelle, conduit à un gain définitif en termes de réchauffement global. Prendre en compte le stockage temporaire, et la fin de vie réelle des matériaux permet donc de démontrer l'intérêt de favoriser l'utilisation des matériaux bio-sourcés dans le bâtiment.

Tableau 9 - PRG relatifs « statiques » et « dynamiques »

	Impact solution conventionnelle kgCO _{2eq} / Unité fonctionnelle	Impact solution bio-sourcée kgCO _{2eq} / Unité fonctionnelle
PRG¹⁰⁰ « statique », avec les valeurs du tableau 17	49,08	3,72
PRG¹⁰⁰ « statique », en considérant que le carbone biogénique est neutre		15,32
PRG²⁰ « dynamique »	43,2	-65,3
PRG¹⁰⁰ « dynamique »	51,5	-40,3
PRG⁵⁰⁰ « dynamique »	49,4	-4,1
PRG¹⁰⁰⁰ « dynamique »	49,2	0

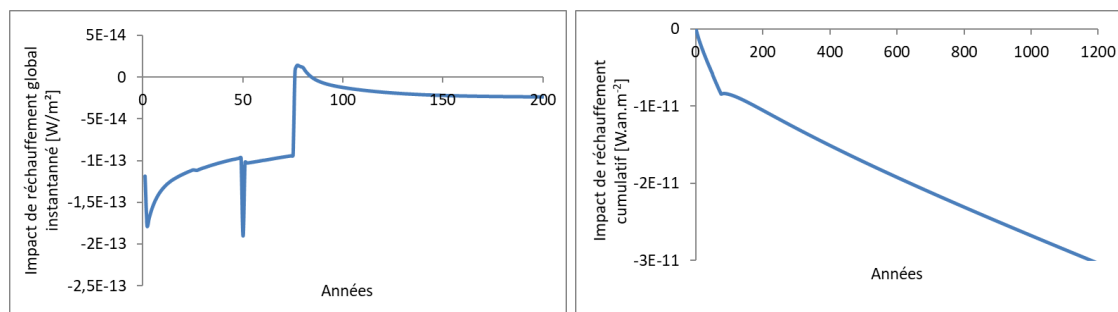


Figure 10 - Gain lié à la substitution d'une solution conventionnelle par une solution bio-sourcée (différence des impacts).

IV. CONCLUSION

Le stockage temporaire de carbone dans les bâtiments peut être pris en compte en faisant une analyse temporelle, année par année, des gaz à effet de serre émis ou séquestrés tout au long de la vie des produits et des solutions constructives. Pour cela, il faut réaliser un inventaire de cycle de vie précis, en utilisant les bases de données et les démarches habituelles d'ACV. Le remplacement de matériaux conventionnels par des matériaux bio-sourcés, et donc par un stockage temporaire de carbone biogénique fait sens en France métropolitaine, puisque le marché actuel de la construction est à plus de 90% non bio-sourcé. Un changement de pratique aura donc un effet immédiat et à long terme.

Les points de vigilance principaux à avoir concernant l'usage des biosourcés dans le bâtiment

concernent essentiellement la tension sur les forêts ; la limitation réelle des émissions de GES anthropiques par l'utilisation de filières locales, de matériaux peu transformés et peu adjuvantés ; une insertion plus poussée de ce type de matériaux dans une démarche d'économie circulaire (réemploi) ; le respect des règles de l'art pour assurer la durabilité de ces systèmes constructifs, notamment vis-à-vis du comportement à l'eau. Enfin, la mise en œuvre de matériaux plus écologiques ne doit évidemment pas se faire au détriment de la performance énergétique de l'enveloppe.

REFERENCES.

ADEME, Base Carbone, <https://bilans-ges.ademe.fr/fr/basecarbone/donnees-consulter>, consultée le 21/01/2022

Arnold C, Le parc de logement en France au premier janvier 2016, INSEE focus n°73 (2016) <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2533533#consulter>

D. Arrouays, et al., Contribution à la lutte contre l'effet de serre: Stocker du carbone dans les sols agricoles de France ?, Rapport scientifique de l'INRA (2002)

G. Berndes, et al., Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation, From Science to Policy 3, European Forest Institute, 2016

B. Berge, The ecology of building materials, Architectural press, Oxford (2009) ISBN 978-1-85617-537-1

CAVAC, FDES de la laine de chanvre, www.inies.fr, consultée le 15/10/2021

C. Chabaud (rapporteur), Les filières lin et chanvre au cœur des enjeux des matériaux biosourcés émergents, Avis du Conseil économique, social et environnemental (2012)

CODIFAB, Enquête nationale de la construction bois, Activité 2016 (2017)

T. Colinart *et al.*, Hygrothermal properties of light-earth building materials, Journal of Building Engineering (2020)

T. Colinart *et al.*, Thermal conductivity of biobased building materials measured by hot disk: possibilities and recommendation, Journal of Building Engineering (2021)

Règles professionnelles « construire en chanvre », ouvrage collectif, éditions SEBTP, 2013

Collectif « construire en Chanvre », FDES du béton de chanvre, www.inies.fr consultée le 15/10/2021

Commissariat général au développement durable, Conjoncture de l'immobilier, Résultats au quatrième trimestre 2017, Datalab Essentiel (2018) <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

Commissariat général au développement durable, Travaux d'amélioration de la performance énergétique dans les bâtiments existant (2007-2009), Marché de l'entretien des bâtiments en 2007, Etudes&Document 29 (2010) <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

Direction de l'Habitat de l'urbanisme et des paysages, Stratégie à long terme pour mobiliser les investissements dans la rénovation du parc national de bâtiments à usage résidentiel et commercial, public et privé (2012)

European Environment Agency, Forest utilization, novembre 2018

J. Fargione J, et al., Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt, *Science* 319 (2008)

FCBA Institut Technique, Memento 2018 <https://www.fcba.fr>

P. Français-Demay, Récolte de bois et production de sciage en 2017, *Agreste Chiffres et Données Agriculture* 249 (2018)

Gouvernement Français, les Emissions des gaz à effet de serre du secteur résidentiel, <https://ree.developpement-durable.gouv.fr/themes/defis-environnementaux/changement>, mise à jour du 17 juin 2019

M. Honoré, T. Lecompte, S. Pimbert, Properties of Phragmites australis for Insulating Concrete Application. *Construction Technologies and Architecture* 2022.

IF n°27: Volume de bois sur pied dans les forêts françaises : 650 millions de mètres cubes supplémentaires en un quart de siècle, *Inventaire Forestier National* (2011) www.ifn.fr

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* [Stocker, T.F., et al. (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

T. Lecompte, A. Levasseur, D. Maxime, Lime and Hemp Concrete LCA : A dynamic Approach of GHG Emissions and Capture, 2^d ICBBM, Clermont-Ferrand, 21-23 June 2017

T. Lecompte, Matériaux biosourcés pour le bâtiment et stockage temporaire de carbone, *Techniques de l'Ingénieur*, C8124, 2019.

T. Lecompte, Le chanvre dans les bâtiments : enjeux environnementaux et performances, In : E Bucolo, V Maire : *Le chanvre, matière à transitions - Design, Territoires et Ecologie*, ISBN 978-2-84314-051-8, Mars 2022

F. Pittau F, et al., Fast-growing bio-based materials as an opportunity for storing carbon in exterior walls, *Building and Environment* 129 (2018)

H.H. Ratsimbazafy, et al., A review of the Multi-Physical Characteristics of Plant Aggregates And Their Effects on th Properties of Plant-Based Concrete, *Recent Progress in Materials* (2021)

RFCP, Règles professionnelles de construction paille: remplissage isolant et support d'enduit, 3^e édition, *Le Moniteur* (2018)

T. Searchinger, *et al.*, Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change, *Science* 319 (2008)

M. Wallhagen, M. Glaumann, T. Malmqvist– Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change a case study on an office building in Sweden, *Building and Environment* 46 (10) (2011)

V. Zieger, T. Lecompte, A. Hellouin de Ménibus, Impact of GHG's temporal dynamics on the GWP assessment of building materials: A case study on biobased and non bio-based walls, *Building and Environment* (2020)