

# De la réalité du système Terre à l'ACV d'un bâtiment, le choix des frontières du système et de la responsabilité des acteurs

Guillaume Habert<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Chaire de construction durable, ETH Zurich, Suisse*

**RESUME** En observant l'ensemble des flux de matière et de carbone à l'échelle du globe, il semble que les émissions humaines sont faibles mais très clairement linéaires. Une circularisation des flux de matières traversant notre système socio-technique associé à une activation des flux naturels biologiques et géologiques peut permettre de construire des bâtiments neutres pour le climat au moment de leur construction. Cependant, ceci est difficile d'appliquer une approche ACV puisque toute définition d'un système un peu plus petit que le système Terre en lui-même, pose des difficultés méthodologiques. A l'échelle du bâtiment, doit on prendre en compte le potentiel de stockage d'un arbre planté plus de 60 ans avant la construction ou ne considérer que les changements effectués lors de l'année du projet ? De même pour la fin de vie, comment s'assurer que le scénario choisi sera effectivement celui effectués dans 50 ou 60 ans ? Cette difficulté de coupure de la frontière du système temporel peut être résolu en considérant dans le cycle de vie d'un bâtiment le module C de l'objet présent sur le site de construction avant le projet de construction. Ceci veut dire, considérer dans l'ACV d'un nouveau bâtiment, la démolition du précédent. Ceci permettra en effet d'aligner les intérêts des différents acteurs et d'encourager une augmentation globale du carbone contenu dans le stock bâti.

**Mots-clefs** Bâtiment, ACV, frontières du système

## I. INTRODUCTION

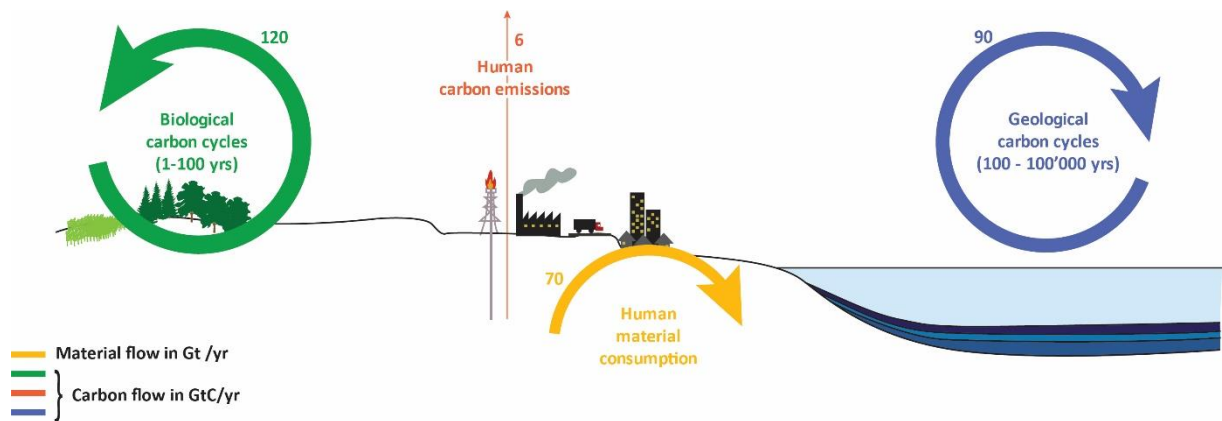
Tout au long de l'histoire, l'humanité a été confrontée à des contraintes environnementales aux niveaux local et régional, certaines sociétés faisant face à ces défis plus efficacement que d'autres (Diamond, 2005). L'humanité a su s'adapter. On pourrait même affirmer que c'est contre l'adversité que se manifeste la véritable innovation. L'espèce humaine est la seule à s'être adaptée à des environnements très différents en un court laps de temps. Sapiens a été capable de s'adapter aux températures polaires froides du pôle Nord, aux endroits tropicaux de l'Indonésie et au haut plateau des Andes en moins de 10 000 ans, ce qui est considérablement court dans la chronologie géologique (Harari, 2015).

Dans les temps historiques, cette question de l'adaptation ou de l'effondrement de la société a été soulevée par de nombreux penseurs (Diamond, 2005). Malthus, économiste britannique de la fin du XIXe siècle, prédit une famine massive chez les Européens si la croissance démographique n'est pas plafonnée. Alors que Condorcet, un philosophe et mathématicien français, à la même époque comptait sur le génie de l'humanité pour surmonter de telles difficultés (Avery, 2014). Condorcet a eu raison avec l'arrivée de la révolution industrielle et la mécanisation des pratiques agricoles. Dans les années 70, Boserup, une économiste danoise, a conceptualisé cette notion en défendant l'idée que les humains ont besoin de l'adversité pour être forcés à des changements. L'innovation ne se produit que dans l'adversité et face à de grands défis (Boserup, 1981).

Il est presque inconcevable d'imaginer un défi plus important que celui de notre époque. Nous devons stopper nos émissions de gaz à effet de serre dans les 20 prochaines années tout en permettant à la moitié de l'humanité de construire les villes et les infrastructures dont elle a besoin pour assurer un niveau de développement suffisant. Comment faire ?

## II. SYSTÈME TERRE

Il est intéressant de remarquer que les flux de matériaux, de polluants et d'énergie qui sont transférés par le système socio-technique des activités humaines font également partie d'un système naturel plus vaste. Il y a près de 10 milliards d'années, le système Terre-atmosphère-océan existait et sera encore là bien après la disparition de l'espèce humaine. Comme toutes les espèces, elles croissent, prospèrent et disparaissent. Même les montagnes se forment, grandissent et finissent par disparaître. C'est l'ordre normal de la nature. Cependant, tous ces processus n'apparaissent pas au même rythme. Les cycles des montagnes, de la naissance à l'érosion et à la disparition, sont de l'ordre de centaines de millions d'années (Vanderhaeghe and Teyssier, 2001; de Saint-Blanquat *et al.*, 2006), l'espérance de vie des espèces sur Terre est de l'ordre du million d'années (Mace, 1998), et chaque société humaine ne survit guère plus de 1000 ans (Diamond, 2005). Enfin les individus, qu'ils soient végétaux ou animaux, ont une espérance de vie encore plus courte. Un chêne peut durer plus de 500 ans, tandis qu'un éphémère ne vivra sur cette planète que quelques heures. Tous ces processus, de la vie et de la mort des montagnes aux individus, impliquent des flux d'énergie et de matériaux. D'énormes quantités de matériaux sont comprimées et déplacées pour créer une montagne, de petites quantités de carbone, d'azote et d'oxygène sont temporairement assemblées pour former un animal vivant. En tant que société humaine, pouvons-nous détourner certains de ces flux pour améliorer les conditions de vie sur la planète ? L'architecte américain Buckminster Fuller avait coutume de dire "Ne combattez pas les forces, utilisez-les". Je dirais que nous devons avoir la même approche avec les flux : "Ne combattons pas les flux, utilisons-les". Le graphique suivant est représentation schématique de ces flux. La taille des flèches représentent l'importance de chaque flux.



**FIGURE 1.** Représentation schématique des flux de matière et de carbone à l'échelle de la planète. Les flux annuels de CO<sub>2</sub> sont exprimés en gigatonne de carbone, alors que les flux de matière sont exprimés en gigatonne.

### 2.1. La consommation humaine de matière

Le cycle de la matière doit être fermé. Notre production de matériaux est actuellement linéaire avec environ 70 Gt de matériaux extraits chaque année et la même quantité mise en décharge. Nous extrayons les matières premières, les transformons (généralement en brûlant une grande quantité d'énergie fossile) et les mettons en décharge à la fin de leur utilisation. Il est évident que nous devons développer une approche plus circulaire. Nous pouvons reconsidérer les flux de matériaux dans les villes et montrer que les déchets de construction et de démolition sont déjà partiellement recyclés. Cependant, très peu de choses sont faites actuellement pour les matériaux d'excavation qui représentent deux tiers des déchets. Chaque chantier de construction nécessite l'excavation d'une grande quantité de matériaux qui sont directement mis en décharge. Fermer cette boucle est possible grâce à des initiatives comme Cycle terre à Paris, BC materials à Bruxelles, ou Terrabloc à Genève.

### 2.2. Flux de carbone biologique et géologique

Pour ce qui concerne les flux de carbone, il est important de remarquer que les émissions liées aux activités humaines sont très faibles (6 Gt) en comparaison des émissions biogénique (120 Gt) ou géologiques (90 Gt). Cependant l'immense différence est que les flux naturels sont organisés en cycle (en boucle) alors que les émissions humaines sont affreusement linéaires et contribuent donc à 100% au réchauffement climatique observé actuellement. Pour atteindre les objectifs du GIEC, la construction doit devenir neutre en carbone au cours des 20 prochaines années. Pour cela la première priorité est de réduire les émissions liées aux activités humaines en développant des matériaux à faible contribution en carbone fossile. Cependant, j'aimerais élargir radicalement le champ du cycle du carbone pour y inclure non seulement les activités humaines mais aussi la boucle plus large des flux biologiques et géologiques. Si l'activité humaine est clairement la cause du changement climatique, la boucle plus large des cycles du carbone pourrait nous permettre

d'en atténuer les conséquences. L'intégration du carbone dans l'environnement bâti est une solution réalisable qui évite les périls et les incertitudes de la géo-ingénierie.

Naturellement, le carbone est absorbé et ensuite libéré par la biosphère, à un rythme allant de quelques mois à quelques siècles. Pour réduire les émissions de carbone, l'environnement bâti peut être utilisé pour ralentir le flux des gaz libérés par la biosphère. Cela peut se faire en stockant temporairement le carbone dans des matériaux pendant une période plus longue que celle où ils resteraient habituellement dans le réservoir de la biosphère. Cela nous permet, en tant que société, de gagner du temps. Ce temps, s'il est utilisé à bon escient, pourrait permettre une transition vers une société à émissions nulles.

Une approche similaire peut être appliquée aux flux géologiques, qui capturent et stockent généralement le carbone par l'altération des roches et la sédimentation (Dessert *et al.*, 2003). Ces flux se produisent à l'échelle du temps géologique, c'est-à-dire de la dizaine de milliers au million d'années. La question ici est à l'opposé de celle posée par les émissions de la biosphère. Si nous devons ralentir les flux biogéniques, nous devons accélérer les flux géologiques afin de capturer plus de carbone plus rapidement. L'environnement bâti peut nous permettre d'accélérer l'altération des roches et stocker définitivement le CO<sub>2</sub> de manière beaucoup plus rapide que ne le fait actuellement la nature. Là encore, il s'agit de gagner du temps.

En conclusion, l'objectif est donc de pouvoir fermer les boucles matérielles dans les villes et d'utiliser l'environnement bâti pour détourner les flux naturels afin de stocker le CO<sub>2</sub> et d'accompagner la transition vers des constructions à zéro émission. Pour ce faire, nous devons développer des matériaux qui atteignent ces performances environnementales tout en étant rentables et socialement acceptés afin de pénétrer massivement et rapidement le marché.

### 2.3. *Un bâtiment neutre pour le climat en jouant avec les flux*

Imaginons un bâtiment neutre pour le climat au moment de sa construction.

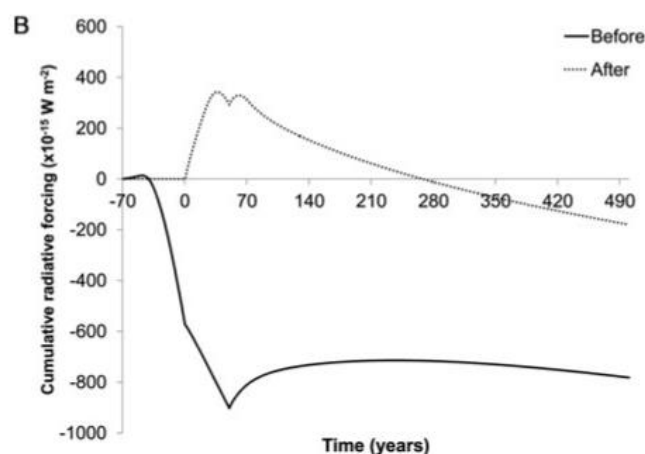
- Il doit contenir le moins de matériaux qui contribuent fortement au réchauffement climatique, comme les fenêtres par exemple.
- Il utilise ensuite des bétons optimisés contenant du ciment à haute teneur en addition minérale. Ceci permet de diminuer les émissions du béton et réduire ainsi les émissions liées à l'activité humaine. Pour mémoire, le béton représente 50% des émissions lors de la construction d'une maison. Cependant, ce béton bas carbone permet aussi d'avoir des bétons qui carbonatent plus rapidement. Rappelons ici, que la carbonation ne pose un problème de durabilité, si et seulement si, le béton carbonaté est exposé à de très forts taux d'humidité afin d'initier la corrosion. Ceci n'arrive jamais si la structure en béton se trouve à l'intérieur du bâtiment, protégée par une façade. Ainsi, il est possible d'avoir une structure en béton qui émet deux fois moins de CO<sub>2</sub> que ce qui est fait actuellement (Habert *et al.*, 2020) et qui va recarbonater et donc réabsorber le CO<sub>2</sub> émit deux fois plus vite (Soja *et al.*, 2018).
- Enfin, ce bâtiment a en façade des isolants biosourcés qui ont piégé du carbone et peuvent ainsi compenser les émissions résiduelles des fenêtres et du béton. Nos travaux montrent

qu'une façade de 70cm de bottes de paille dans un immeuble collectif permet de compenser la structure en béton et les fenêtres et de former ainsi un bâtiment neutre pour le climat qui reste économiquement compétitif (Carcassi *et al.*, 2021).

### III. SYSTÈME BÂTIMENT

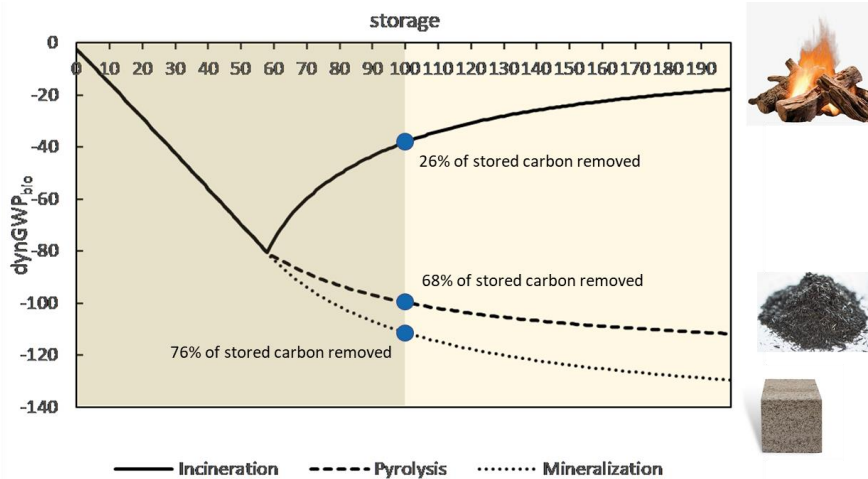
Mais comment intégrer ces approches systémiques lorsque l'on ne s'intéresse qu'à un bâtiment au cours de son cycle de vie. Quand commence d'ailleurs le cycle de vie d'un bâtiment ? Au moment où on le construit ou au moment où quelqu'un a planté un arbre qui 60 ans plus tard sera utilisé pour construire ce bâtiment ? La question des frontières du système est omniprésente dans la discussion sur le calcul d'impact. Frontière spatiale entre industrie, l'une produisant un sous-produit utilisé par l'autre pour produire un nouveau produit à moindre frais économique et environnementaux, ou frontière temporelle entre celui ou celle qui plante un arbre, ceux qui construisent la maison et ceux qui la démolissent. Qui est responsable de quoi ?

Les études ont montré que si l'on considère une ACV dynamique le choix d'intégrer dans la frontière l'arbre avant la construction (et commencer ainsi avec un potentiel de carbone stocké) ou de l'intégrer après la construction en considérant le nouvel arbre que l'on plante a des résultats très différents sur l'ACV (Levasseur *et al.*, 2013).



**FIGURE 2.** Effet cumulé du forçage radiatif selon que l'on considère une croissance avant ou après le début du système considéré (Levasseur *et al.*, 2013)

De même les incertitudes sur la fin de vie du bâtiment vont drastiquement changer les résultats. À la différence des questions de frontières du système au début du cycle de vie du bâtiment qui sont de l'ordre de question philosophique que l'on peut imaginer trancher à un moment donné, les incertitudes sur la fin de vie ne sont pas résolubles, car par définition incontrôlables. Ci-dessous par exemple l'effet sur le potentiel de réchauffement climatique d'un matériau biosourcé avec la méthode d'ACV dynamique selon les hypothèses de fin de vie, brûlé lors de la démolition du bâtiment, ou pyrolysé pour produire des biochars ou minéralisé comme dans le chaux chanvre. Des résultats similaires seraient obtenus avec d'autres méthodes de calcul d'ACV.



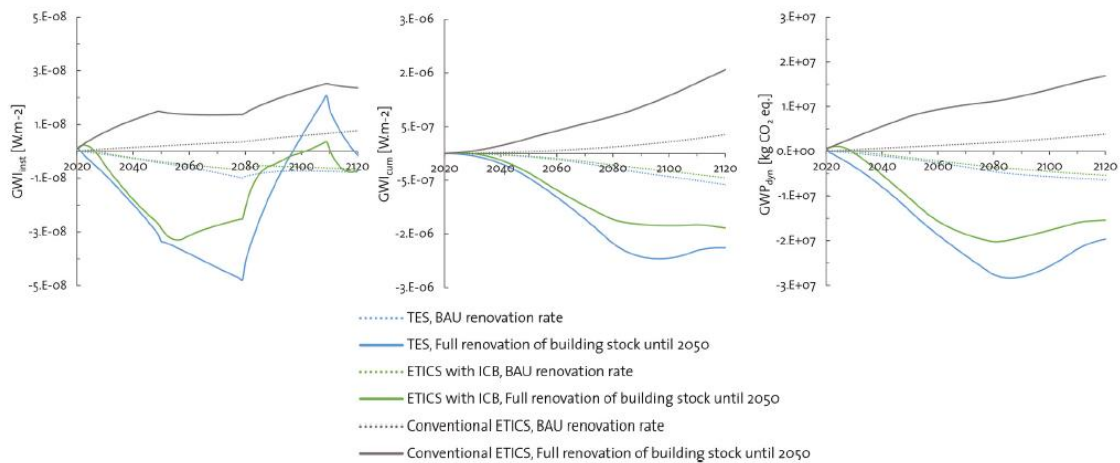
**FIGURE 3. Pouvoir de réchauffement climatique avec la méthode d'ACV dynamique selon les hypothèses de fin de vie**

En conclusion, à l'échelle planétaire, il semble possible d'imaginer des bâtiments neutres pour le climat tant l'ampleur des flux naturels est gigantesque au regard de nos activités. Ainsi il semble possible d'utiliser ses flux pour produire des bâtiments neutres pour le climat. Pourtant, à l'échelle d'un bâtiment la sensibilité sur les frontières du système rend tout calcul soumis à de telles incertitudes qu'il est difficile d'être convaincu de la validité d'un système constructif par rapport à un autre.

#### IV. SYSTÈME STOCK BÂTI

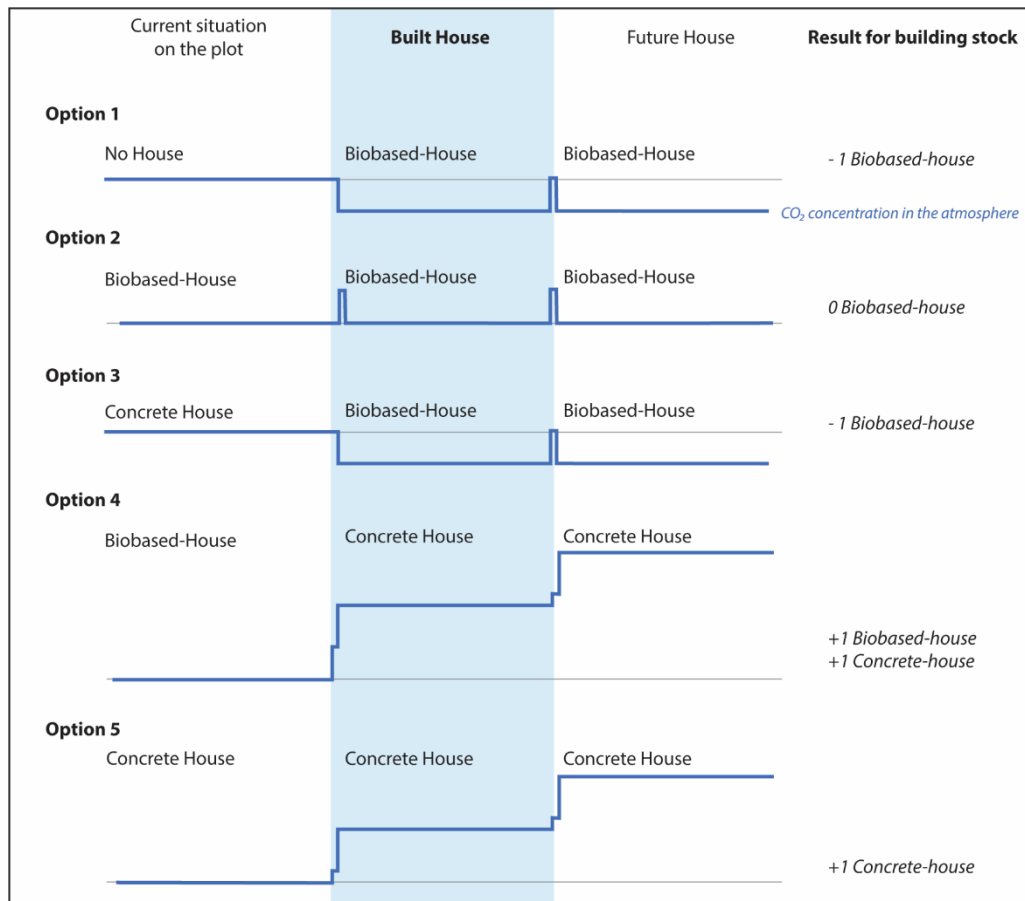
Serait-il possible d'avoir une échelle intermédiaire entre la planète et le bâtiment de manière à pouvoir opérationnaliser nos outils d'ingénierie tout en contrôlant le degré d'incertitude ? Le stock bâti me semble être l'échelle idéale. Ce stock peut être différent selon le niveau de décision politique. Un quartier, une ville, une région, mais probablement pas au-delà. En effet ce qui est le plus important pour diminuer l'impact du changement climatique est de diminuer la quantité de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Que ce CO<sub>2</sub> soit piégé dans une forêt, dans une structure en bois, dans une botte de paille ou dans un agrégat de béton recarbonaté ne change pas l'effet. De même que ce carbone soit piégé dans un bâtiment existant, ou dans un nouveau bâtiment qui se construit ne change pas l'effet, tant que la quantité de carbone stockée sur un territoire augmente. Ainsi, ce qui est le plus important est d'augmenter le stock de carbone. Ce qui veut dire, que si je construis un bâtiment en matériau biosourcé sur un site où il y a déjà un bâtiment en bois, il faudra que je prenne en compte la fin de vie de ces matériaux dans le bilan de mon nouveau bâtiment et que je m'assure que la situation après la construction du nouveau bâtiment a permis d'augmenter le stock carbone du bâti de mon territoire. Par contre la fin du bâtiment que je construis peut être considérée par le prochain propriétaire des lieux. L'étude que nous avons faite sur la rénovation d'un quartier de Lisbonne (Göswein *et al.*, 2021) montre en effet que même si à l'échelle du

bâtiment, chaque remplacement de matériau donne lieu à des émissions de CO<sub>2</sub> puis à un stockage, à l'échelle du stock, on assiste à une stabilisation et un stockage permanent d'une quantité de carbone. Les effets à l'échelle du bâtiment sont visibles sur le graphique de gauche où le forçage radiatif instantané est représenté. Au contraire l'effet à l'échelle du stock est perceptible sur les graphiques du milieu et de droite où le forçage radiatif cumulé (milieu) et le potentiel de réchauffement climatique (droite) sont indiqués. Ainsi, l'action de rénovation d'un bâtiment ne doit pas être envisagée à l'échelle du bâtiment mais pour l'intérêt collectif du territoire.



**FIGURE 4.** Forçage radiatif instantané (gauche), forçage radiatif cumulé (milieu) et potentiel de réchauffement climatique (droite) pour différents scénarios de rénovation utilisant des matériaux biosourcés (TES & ETICS) ou conventionnels (Göswein *et al.*, 2021)

Ce raisonnement n'est valable que pour le carbone et pas pour les autres polluants pour lesquels le principe du pollueur payeur doit s'appliquer. Pour le carbone, on pourrait résumer les possibilités selon la figure suivante. Il est alors intéressant de remarquer qu'il est possible d'intégrer une considération de stock bâti en ne considérant qu'un bâtiment pour peu que l'on considère le carbone existant sur le site avant la construction comme faisant parti du système. Ainsi, cela permet d'opérationnaliser une logique d'augmentation du stock de carbone au niveau du système socio-technique tout en ne regardant qu'un périmètre restreint de ce système, le bâtiment, ainsi que l'existant.



**FIGURE 5.** Représentation schématique de l'évolution du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère selon le type de construction et selon ce qui est présent sur le site de construction avant la construction.

## V. CONCLUSION

Nous avons montré qu'une ACV réduite à un bâtiment pose de vrais problèmes lorsque l'on considère des processus ayant impliqué un management durant plus de 50ans avant la construction du bâtiment, comme le fait que la sensibilité aux hypothèses de fin de vie rend toute comparaison entre 2 projets très délicate.

Au contraire, en incluant une approche de stock bâti, puis en l'appliquant à un seul bâtiment, il devient possible d'inciter à l'augmentation de la quantité de stockage de carbone dans la ville. Ce qui devient important est combien le stock carbone sur une parcelle donnée augmente au cours du temps et non pas si le nouveau bâtiment permet en soi de stocker du carbone.

Une possibilité serait de considérer l'impact ACV d'un bâtiment neuf en incluant la fin de vie du site où est positionné ce bâtiment. Par exemple, une formule suivant la définition des modules A,B,C des fiches de déclaration environnementales pourrait être :

$$\text{modC}_{\text{ancien bat-carbone}} + \text{modA}_{\text{nouveau bat}} + \text{modB}_{\text{nouveau bat}} + \text{modC}_{\text{nouveau bat}} - \text{sauf carbone}$$

où :



- modC<sub>ancien bat-carbone</sub> représente le contenu carbone réémis dans l’atmosphère à la fin de vie du bâtiment que l’on devrait démolir
- modA<sub>nouveau bat</sub> et modB<sub>nouveau bat</sub> représentent les module A et B du nouveau bâtiment
- modC<sub>nouveau bat - sauf carbone</sub> représente la fin de vie du nouveau bâtiment, comme cela l’est normalement mais où l’on ne considère pas les réémissions de gazs à effet de serre à la fin de vie.

Ceci permettrait à l’ACV d’être un outil de décision à l’échelle du projet de construction tout en favorisant une pensée d’intérêt général en ce qui concerne l’augmentation du carbone stocké.

## REFERENCES

- Avery, J. (2014) *Progress, Poverty and Population: Re-Reading Condorcet, Godwin, and Malthus*. Routledge. doi: 10.4324/9781315037783.
- Boserup, E. (1981) *Population and technological change: A study of long-term trends*,. University of Chicago press. doi: 10.1002/pam.4050030341.
- Carcassi, O. B. et al. (2021) ‘How can a climate-neutral building look like?’, in *International Conference on Bio-based Building Materials-ICBBM 2021*, pp. 592–597.
- Dessert, C. et al. (2003) ‘Basalt weathering laws and the impact of basalt weathering on the global carbon cycle’, *Chemical Geology*, 202(3–4), pp. 257–273. doi: 10.1016/j.chemgeo.2002.10.001.
- Diamond, J. M. (2005) *Collapse: How Societies Choose to Fail or Survive*. Penguin Books.
- Göswein, V. et al. (2021) ‘Influence of material choice, renovation rate, and electricity grid to achieve a Paris Agreement-compatible building stock: A Portuguese case study’, *Building and Environment*, 195, p. 107773. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107773.
- Habert, G. et al. (2020) ‘Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries’, *Nature Reviews Earth & Environment*. Springer Science and Business Media LLC. doi: 10.1038/s43017-020-0093-3.
- Harari, Y. N. (2015) *Sapiens: A Brief History of Humankind*. New York: Harper.
- Levasseur, A. et al. (2013) ‘Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment’, *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), pp. 117–128. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x.
- Mace, G. (1998) ‘Getting the measure of extinction.’, *People & the planet*, 7(4), p. 9. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12348876>.
- de Saint-Blanquat, M. et al. (2006) ‘Mechanisms and duration of non-tectonically assisted magma emplacement in the upper crust: The Black Mesa pluton, Henry Mountains, Utah’, *Tectonophysics*, 428(1–4), pp. 1–31. doi: 10.1016/j.tecto.2006.07.014.
- Soja, W. et al. (2018) ‘Changes of microstructure and diffusivity in blended cement pastes exposed to natural carbonation’, *MATEC Web of Conferences*. Edited by M. G. Alexander et al., 199, p. 02009. doi: 10.1051/mateconf/201819902009.
- Vanderhaeghe, O. and Teyssier, C. (2001) ‘Crustal-scale rheological transitions during late-orogenic collapse’, *Tectonophysics*, 335(1–2), pp. 211–228. doi: 10.1016/S0040-1951(01)00053-1.