

## Construction bas carbone : identification des éléments fortement carbonés pour faire émerger des principes de conception favorable – Application pratique à un bâtiment de santé

LANATA Francesca, BOUDAUD Clément, BELLONCLE Christophe, MICHAUD Franck

ESB, LIMBHA, Nantes, France  
francesca.lanata@esb-campus.fr

**Mots clés :** carbone intrinsèque ; bâtiment de santé ; coût économique ; allotissement

### Contexte et objectifs

De tous les indicateurs à envisager pour évaluer les impacts environnementaux, celui du carbone a aujourd'hui pris une place importante, et le terme bas carbone est actuellement clairement en vogue. Concentrer la conception et réalisation des bâtiments sur la limitation du carbone (donc monocritère) est à la fois nécessaire, mais insuffisant pour répondre à l'ampleur des enjeux des limites planétaires, dont le climat n'est qu'une composante.

La prise en compte du carbone est une tâche supplémentaire dans le processus de conception et réalisation d'un projet, elle se heurte donc à différents freins. Un sondage auprès des professionnels du secteur met en avant la multiplicité des freins, plus particulièrement l'accent sur le manque de compétences et les coûts perçus par ces temps d'études supplémentaires<sup>4</sup>.

Par ailleurs, de nombreux efforts ont été réalisés pour réduire la consommation énergétique des bâtiments et baisser la quantité d'émissions du carbone dit opérationnel. Toutefois, le carbone intrinsèque (*embodied carbon* en anglais) joue un rôle significatif et présente un impact immédiat sur le coût carbone. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV), ou des dérivés de cette méthode normalisée, permet une mesure de l'impact carbone. On notera que l'approche carbone est un focus monocritère alors que l'approche ACV considère bien d'autres critères d'impact. En France, la Règlementation Environnementale 2020 (RE2020) prévoit des seuils carbone à atteindre progressivement : le poids en équivalent carbone du bâtiment sur l'ensemble de sa durée de vie, les indicateurs IC construction et IC énergie (en kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>), évolueront respectivement de 740 à 480 de 2022 à 2031 et de 560 à 260 de 2022 à 2026.

Une première étude de De Wolf et al (2017), établie sur l'analyse de 200 bâtiments récents de différents types, montre une gamme de valeurs moyennes pour le carbone intrinsèque se situant entre 150 et 600 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> (pour des bâtiments contenant entre 200 et 1800 kg de matériaux par m<sup>2</sup>). Dans un second travail, une analyse plus large permet d'observer à la fois l'impact de la structure et du bâtiment complet sur le CO<sub>2</sub> intrinsèque, résumé ainsi :

- Il existe une variabilité importante en fonction des études quant à l'impact de la structure porteuse sur la quantité observée ;
- Les structures bois présentent à la fois la plus faible quantité et la plus faible variabilité ;
- La partie structure porteuse du bâtiment n'est pas majoritaire dans le total lorsque l'on observe un bâtiment complet.

---

<sup>4</sup>London Energy Transformation Initiative et LETI, « Climate Emergency Design Guide How new buildings can meet UK climate change targets ».

Fort de l'ensemble de ces axes de réflexion et de travail engagés, le Groupe KORIAN et l'ESB sont associés pour lancer un projet de recherche portant sur deux thèmes : un axe « Santé & Bien-Être » et un axe « **Bâtiment bas carbone** », **objet de cet article, afin d'identifier les leviers permettant d'avancer sur la valorisation du bois dans les immeubles de santé.**

La construction d'établissements de santé a un impact significatif sur l'environnement notamment en termes d'utilisation de matériaux et de consommation d'énergie. Par conséquent, la construction durable de tels bâtiments impose l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement pouvant être recyclés et ayant une faible énergie intrinsèque et un faible impact sur l'environnement (Kumari et Kumar 2020). Ces bâtiments exigent également une conception en lien avec le particularisme de ses usagers. Des recherches ont montré que l'environnement intérieur pouvait réduire le niveau de stress, qui est particulièrement élevé chez les occupants des bâtiments médicalisés. Le bois, utilisé pour les constructions écologiques, constitue un élément important de la biophilie (Zhang et al 2016). Par conséquent, l'utilisation du bois dans la construction, concomitante à une conception spécifique, peut contribuer à réduire le stress des occupants et à améliorer les indicateurs de soutenabilité des bâtiments médicalisés (Katradyova et al 2019, Lipovac et Burnard 2020).

### **Matériau et méthode**

La littérature définit, indépendamment du type d'usage du bâtiment collectif, l'existence de carbone « hotspots » qui représenteraient 80% du carbone intrinsèque : fondations, structure des murs, toitures. Les services sont souvent omis alors qu'ils représentent une part non négligeable du carbone associé au cycle de vie du bâtiment. Une approche Pareto liant hotspots carbone et coûts associés, et prenant en considération structure porteuse, murs extérieurs et services permet de considérer plus de 70% des coûts économiques.

Les coûts carbone opérationnel et intrinsèque évoluent de façon antagonique. Les efforts des dernières décennies sur l'isolation thermique conduisent à une réduction du coût carbone opérationnel, mais généralement à une augmentation "instantanée et effective" du coût carbone intrinsèque, donc des émissions dès le début du cycle de vie du bâtiment.

La méthode de recherche de bonnes pratiques pour la conception de bâtiments bas carbone est présentée Figure 1. La méthode proposée consiste à s'adosser à la littérature pour l'appliquer à l'évaluation de bâtiments réels, puis à modéliser les bâtiments réels pour valider et affiner l'évaluation. Ensuite, l'évaluation de variantes doit permettre de valider des préconisations.

Plusieurs maisons de retraite médicalisées ont été identifiées pour observer la relation entre coût économique et coût carbone. La répartition des espaces et le nombre de niveaux sont comparables (Tab. 1). Le principe constructif le plus utilisé est le béton, avec un remplissage en briques sur deux bâtiments. Les revêtements de toiture et de façades sont multiples, ainsi que les systèmes de chauffage. Les menuiseries extérieures sont pour la plupart en aluminium. L'isolation est principalement réalisée en laine minérale.

On trouve dans la littérature (De Wolf 2017, De Wolf 2018), une synthèse d'études de cas sur 36 bâtiments (collectif de tous types), qui chiffre une moyenne du coût économique (€/m<sup>2</sup>) et du coût environnemental (kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>) pour différents lots. Cela permet d'identifier les lots les plus importants en termes de coût et d'établir les différents ratios économique et carbone entre les différents lots de construction. Des valeurs moyennes de CO<sub>2</sub> intrinsèque en équivalent kg/m<sup>2</sup> ont été évaluées. Une analyse Pareto montre l'importance de certains lots par rapport à d'autres, comme le lot Services et le lot Superstructure. Le premier comprend les éléments d'installations sanitaires et d'eau, systèmes CVC, installations électriques... Le second comprend les éléments de murs ou poteaux porteurs, les planchers et les charpentes/toitures.

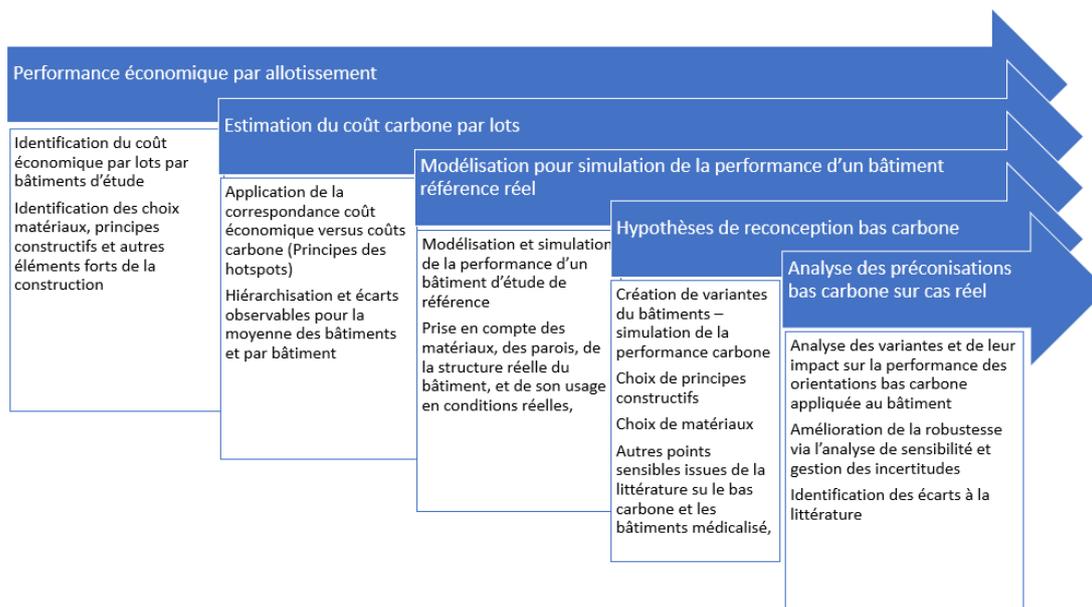


Fig. 1 : Methodologie globale d'analyse de la performance carbone potentiel de batiment type

Tab. 1 : Informations générales sur les bâtiments sélectionnés pour l'étude approfondie

| Bâtiment | Elévation                | Surface totale (m <sup>2</sup> ) | Surface utile (m <sup>2</sup> ) | Lits |
|----------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------|
| B1       | Sous-sol, RdC + 5 étages | 5367                             | 3584                            | 91   |
| B2       | RdC + 2 étages           | 4609                             | 3357                            | 82   |
| B3       | Sous-sol, RdC + 3 étages | 8138                             | 4886                            | 102  |

### *Carbone intrinsèque des bâtiments : méthodologie rapide d'évaluation par les coûts*

Grace aux informations sur les coûts économiques des bâtiments médicalisés de référence, cette méthode permet de remonter au coût carbone. Méthodologiquement, les classes établies par la Royal Institution of Chartered Surveyors ont été préférées aux lots généralement utilisés en France. Ces « New Rules of Measurements » (NRM<sup>5</sup>) définissent jusqu'à 4 niveaux de sous classes, permettant une répartition fine des composants.

Une estimation des ratios pour les bâtiments sélectionnés a été réalisée (données économiques fournies par l'entreprise) en se focalisant sur les lots à priori les plus émetteurs en kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup>, puis en utilisant l'ensemble des données collectées sur les devis et les documents d'analyses économiques. Parfois, faute d'informations, certains coûts sont estimés ou approximatifs.

### **Résultats et discussions**

L'analyse comparée sur les bâtiments d'étude montre une adéquation entre le coût des différents lots et les ratios déterminés. Les tendances se dégageant sont en accord avec les données de la littérature (De Wolf 2017, De Wolf 2018). En effet, la répartition économique globale sur les lots représentant environ 70% du carbone (structure, fondations, murs et services) est bonne, avec un écart moyen de l'ordre de 5 à 8%. Les résultats détaillés des allotissements sont

<sup>5</sup> Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS). « RICS GUIDANCE NOTE : New rules of measurement ». (2021)

présentés par le Tableau 2 (pourcentage de chaque lot par rapport au coût total, lots classés par ordre décroissant d'importance). Le lot Fondations, qui représente à lui seul 24% du carbone, est cependant très variable (de 9 à 16% des couts) en fonction du bâtiment. Cette variabilité s'explique par la présence de sous-sols pour les bâtiments B1 et B3, ce qui n'est pas le cas du B2. Si les éléments Structure et Toiture correspondent avec un écart moyen de l'ordre de 10%, les sous-lots Etages et Murs extérieurs s'écartent anormalement des données de la littérature.

Tab. 2 : Analyse comparée des coûts carbone par allotissement sur les batiments B1 à B3 (versus données issues de la littérature) – Hiérarchisation décroissante par le coût économique moyen

| Code NRM | Allotissement        | B1 (%) | B2 (%) | B3 (%) | Coût moyen (%) | Coût moyen Litt. (%) | Ecart | Coût carbone Litt. (%) |
|----------|----------------------|--------|--------|--------|----------------|----------------------|-------|------------------------|
| 5        | Services             | 28,2   | 33,6   | 31,2   | 31,0           | 32,7                 | 5%    | 21,3                   |
| 2E       | Murs ext.            | 7,3    | 4,3    | 6,5    | 6,0            | 12,4                 | 51%   | 8,8                    |
| 2A       | Structure            | 9,5    | 10,1   | 7,0    | 8,9            | 8,0                  | -11%  | 14,7                   |
| 2F       | Menuiserie ext.      | 4,8    | 7,2    | 6,2    | 6,1            | 7,3                  | 17%   | 2,4                    |
| 2C       | Toiture              | 5,7    | 9,6    | 6,1    | 7,1            | 7,1                  | 0%    | 6,3                    |
| 1        | Fondation            | 16,4   | 9,2    | 11,8   | 12,5           | 7,0                  | -78%  | 23,6                   |
| 3B       | Sols                 | 3,2    | 3,8    | 4,2    | 3,7            | 5,8                  | 36%   | 3,8                    |
| 2B       | Etages               | 9,7    | 4,8    | 5,8    | 6,8            | 4,4                  | -54%  | 10,1                   |
| 4        | Aménagements int.    | 0,0    | 0,1    | 0,5    | 0,2            | 4,0                  | 95%   | 0,1                    |
| 2G       | Murs intérieurs      | 3,2    | 3,3    | 5,3    | 3,9            | 3,1                  | -27%  | 3,4                    |
| 3C       | Plafond ( finition ) | 1,8    | 1,0    | 3,7    | 2,2            | 2,9                  | 25%   | 2,8                    |
| 3A       | Murs ( finition )    | 2,4    | 2,8    | 3,2    | 2,8            | 2,6                  | -8%   | 1,4                    |
| 2H       | Portes int.          | 3,5    | 4,0    | 3,1    | 3,5            | 2,4                  | -47%  | 0,2                    |
| 2D       | Escaliers            | 1,2    | 0,8    | 0,5    | 0,8            | 2,1                  | 60%   | 1,1                    |

Le bâtiment B2 ne comprend pas de sous-sol et est en R+2, quand les deux autres bâtiments sont construits sur un sous-sol en R+3 et R+6. Le taux de compacité semble différent entre les bâtiments d'étude et devra faire l'objet d'une estimation ultérieure. Cet indicateur ne peut cependant pas expliquer totalement les écarts avec les valeurs moyennes (pas d'accès à la volumétrie des bâtiments de référence). Les autres lots présentent des écarts variables, liés probablement à des problèmes de répartition en raison du manque de détail (certains escaliers par exemple sont reliés au lot Structure), mais pour des impacts carbone faibles. L'analyse fine du lot Services n'est pas possible à ce stade en raison de la grande disparité de présentation des données dans les documents fournis (devis, analyses économiques, plans).

#### *Simulation pour valider l'adéquation coût économique – coût carbone sur cas réel*

Afin de vérifier l'applicabilité de la corrélation entre les coûts économiques et le coût carbone sur les bâtiments spécifiques, une étude complète sur un bâtiment existant a été lancée en utilisant le logiciel PLEIADES® (Fig. 2). A partir de l'ensemble des plans, des devis et retours d'expérience, un modèle géométrique 3D du bâtiment a été réalisé. Puis, dans un processus similaire à celui mis en œuvre lors d'une analyse de cycle de vie, et en intégrant la description des différents matériaux et une modélisation STD (Simulation Thermique Dynamique), le coût carbone peut être estimé. A chaque étape, la question de la qualité, de la fiabilité des données ou hypothèses se pose, ce qui conduit à travailler de façon itérative sur l'ensemble du processus. Certaines informations manquantes sur les matériaux, sur leur intégration ou leurs assemblages sont questionnées. Cela permet de mieux gérer les incertitudes ou la sensibilité de différents paramètres sur le résultat ainsi que d'introduire au fur et à mesure des données complémentaires.



Fig. 2 : Vue 3D de la modélisation complète du bâtiment B3 (réalisation sous logiciel Pléiades, avec plan 2D détaillé de chaque étage permettant une simulation STD ou ACV)

Une fois la description du bâtiment complétée (matériaux, orientation, volumes...), un calcul estimatif des indicateurs de la RE2020, et en particulier de l'indicateur Ic Construction (intrinsèque et opérationnel), est opéré. Le calcul est opérable par lot et permet une autre approche des quantités carbone mises en œuvre et, via les devis et rectificatifs associés, des coûts économiques. Une approche fine et plus robuste est donc associée avec l'approche « grande maille » liée à la littérature. Les résultats futurs de l'utilisation de ce modèle sont l'identification des options de variantes ayant un impact potentiel sur le bilan carbone, puis, après intégration des variantes (composition parois, systèmes constructifs...) au logiciel, la comparaison et l'analyse des résultats des calculs carbone, et des ratios économiques associés aux variantes. L'analyse de plusieurs variantes en fonction des observations et des besoins d'analyse de sensibilité et de gestion des incertitudes, doit conduire à des enseignements en termes de construction bas carbone pour les bâtiments.

Axes principaux à fort potentiel pour la conception et les variantes :

- Interroger le choix de rénover plutôt que de construire en neuf car les matériaux d'origine du bâtiment à rénover apportent une économie d'émission de GES qu'un bâtiment neuf ne peut pas rattraper.
- Utiliser des matériaux de réemploi, car considérés par la RE2020 comme à impact nul.
- Développer la frugalité des choix constructifs (limitation des volumes de matériaux par une simplification des formes - notion de compacité), ou par une optimisation (systèmes de dalles nervurées plutôt que dalles épaisses).
- Mutualiser les lots à fort impact carbone (ex intégrer les parkings à l'urbanisme du quartier).

Il faudra de plus prendre en compte les limites actuelles :

- Complexité et coûts d'études supplémentaires pour l'utilisation de matériaux de réemploi.
- Existence/incertitudes sur les données environnementales.
- Incertitude de l'impact de secteurs/activités à long terme (évolution des transports...).
- Prise en compte des impacts autre que le carbone (ACV complète, biodiversité) et des responsabilités/dépendances qui sont liées. Par exemple pour le béton, les problématiques liées au sable (raréfaction) ; pour le bois, les problématiques de protection des forêts ; pour des isolants biosourcés, les problématiques de conflit d'usage des sols agricoles.

## Conclusions et perspectives

Matériau utile pour la réduction du carbone intrinsèque des bâtiments, le bois peut également l'être dans l'intérêt psychologique et physiologique des occupants. Cependant, il est rare que le même matériau soit utilisé pour répondre à l'ensemble de ces fonctions. On trouve

régulièrement des éléments d'imitation bois (porte, sol, plafond) intégrés aux bâtiments médicalisés. Pourquoi dissocier les effets ? Il est ainsi nécessaire de questionner régulièrement les modes d'utilisation pour retrouver les synergies possibles. Ce programme doit permettre d'aboutir à une meilleure conception, une diminution des impacts environnementaux, des bâtiments plus sains.

#### *Intégration des éléments de santé et de bien-être dans les variantes bas carbone*

Les éléments bois intégrés à l'architecture représentent un gain important dans le calcul du carbone intrinsèque. C'est la raison pour laquelle un nombre croissant de bâtiments adopte ce matériau. Ce matériau de structure peut être masqué ou affiché comme un élément participant au bien-être des résidents. Les variantes bas carbone doivent permettre la valorisation du matériau selon les lieux et leur fonction. Une économie de fonction doit pouvoir également être prise en compte (absence de peinture...). L'adoption à grande échelle du bois pour les applications intérieures dans les bâtiments de santé suscite cependant des réticences. Certaines recherches ont pourtant montré que les matériaux en bois non traités ont des propriétés antimicrobiennes contre un large éventail d'agents pathogènes, et que leur nettoyage est équivalent aux autres matériaux usuels. Un programme d'impact du bois sur le développement bactérien et la qualité de l'air (aérosol microbien, particules, COV) *in-situ* est en cours pour confirmer ces effets.

#### **Remerciements**

Ce projet est un partenariat ESB, KORIAN financé dans le cadre du programme France RELANCE. Un remerciement à Madame Annabelle BILLY, initiatrice du projet chez KORIAN aujourd'hui au CHU de Limoges (Construction de Patrimoine). La modélisation 3D numérique du bâtiment d'étude a été réalisé par Daniele DA COSTA et Eunice YOUYATTE, élèves ingénieures de l'ESB.

#### **Références**

- De Wolf C, Yang F, Cox D, Charlson A, Seif Hattan A, Ochsendorf J (2017) Material Quantities and Embodied Carbon Dioxide in Structures. *Engineering Sustainability*. 169(4):150–161.
- De Wolf, Pomponi F, Moncaster A (2018) Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. *Energy and Buildings*. 140:68-80.
- Lipovac D, Burnard MD (2020) Effects of visual exposure to wood on human affective states, physiological arousal and cognitive performance: A systematic review of randomized trials. *Indoor and Built Environment*. 1420326X2092743 doi:10.1177/1420326X20927437.
- Kotradyova V, Vavrinsky E, Kalinakova B, Petro D, Jansakova K, Boles M, Svobodova H (2019) Wood and Its Impact on Humans and Environment Quality in Healthcare Facilities. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 16:3496.
- Kumari S, Kumar R (2020) Green Hospital—A Necessity and Not Option. *J. Manag. Res. Anal.* 7:46–51.
- Zhang X, Lian Z, Ding Q (2016) Investigation variance in human psychological responses to wooden indoor environments. *Building and Environment* 109:58–67.