



HAL
open science

La rénovation bas carbone en France. Calculs carbone, législation, technique, économie, usages et patrimoine : panorama d'un milieu en pleine mutation

Céline Prenez

► To cite this version:

Céline Prenez. La rénovation bas carbone en France. Calculs carbone, législation, technique, économie, usages et patrimoine : panorama d'un milieu en pleine mutation. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04438324

HAL Id: dumas-04438324

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04438324v1>

Submitted on 5 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright

Céline Prenez

La rénovation bas carbone en France

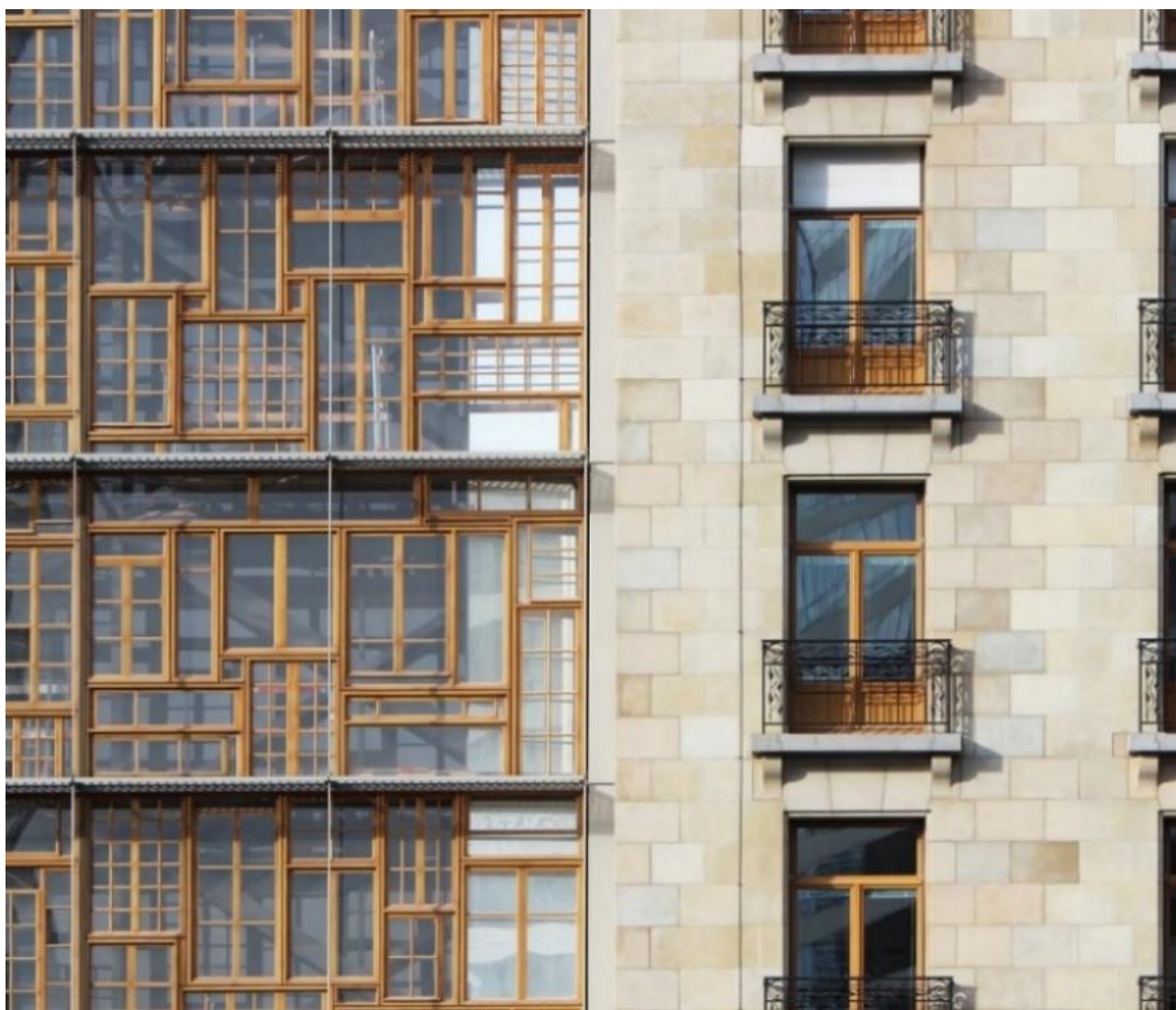
Calculs carbone, législation, technique, économie, usages
et patrimoine : panorama d'un milieu en pleine mutation

Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Voie d'approfondissement bâtiment

Année 2022-2023



Présidente du jury : *Myriam Bahrar*

Tuteur : *Guillaume Cousin*

Expert : *Bertrand Goyard*

Organisme d'accueil

Artelia Transitions et Performances

Environnementales



ENTPE
L'école de l'aménagement durable des territoires

ARTELIA

Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Prenez		
Prénom	Céline		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	Artelia Transition et Performances Environnementales, Saint-Ouen		
Nom du Tuteur	Guillaume Cousin		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	La rénovation bas carbone en France - Calculs carbonés, législation, technique, économie, usages et patrimoine : panorama d'un milieu en pleine mutation		
Titre (anglais)	Low-carbon renovation in France - Carbon calculations, legislation, techniques, economics, uses and heritage: a panorama of a fast-changing field.		
Résumé (français)	<p>Afin d'atteindre l'objectif Zéro Carbone en 2050, la rénovation est un levier majeur en France. Contrairement à la construction neuve, la rénovation n'est pas soumise à un seuil maximal d'impact carbone par la réglementation environnementale RE2020. Cependant, plusieurs méthodes d'Analyse de Cycle de Vie permettent de calculer l'impact carbone d'une rénovation. Au-delà de ces évaluations chiffrées, la rénovation bas carbone s'appuie sur deux grandes tendances : consommer moins et consommer mieux. Mais le secteur fait face à des défis constructifs significatifs : technique, sécurité incendie, économie, assurances, accessibilité, etc. La prise en compte du patrimoine, de l'environnement et du bas carbone dans la rénovation constitue un chantier sur le long cours, mais représente un enjeu majeur pour le bâtiment d'aujourd'hui et de demain.</p>		
Résumé (anglais)	<p>Renovation is a major way of achieving zero-carbon objective by 2050 in France. Unlike new construction, renovation is not subject to a maximum carbon impact threshold under the RE2020 environmental regulations. However, several Life Cycle Assessment methods can be used to calculate the carbon impact of renovation. Beyond these quantified assessments, low-carbon renovation is based on two major trends: consuming less and consuming better. But the sector is also faced with significant construction challenges: technical, fire safety, economic, insurance, accessibility ... Taking account of heritage, the environment and low-carbon considerations in renovation is a long-term project but represents a major challenge for the building industry of today and tomorrow.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Rénovation, Bas-carbone, Analyse de Cycle de vie, Impact Carbone, Patrimoine		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Renovation, Low-carbon, Life Cycle analysis, Carbon Footprint, Heritage		
Termes géo-graphique (français)	France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	128	0	107

Déclaration de travail personnel

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement Artelia Transition et Performance Environnementales (TPE pour les intimes) pour leur accueil, leur pédagogie et leur bonne humeur tout au long des six mois que j'ai passés dans l'équipe. L'aventure a été enrichissante à tout point de vue pour moi, autant humainement que professionnellement.

Je remercie particulièrement mon tuteur de stage, Guillaume, qui m'a fait découvrir de nombreuses facettes du métier et m'a accompagnée de ses bons conseils tout au long de mon stage et en dehors. Merci pour ton sourire permanent, ta transmission de compétences techniques et ton soutien moral.

Merci aussi aux personnes d'Artelia qui ont pris le temps de répondre à mes nombreuses questions sur le carbone, le réemploi, la rénovation ou la résilience. Je pense notamment à Adèle, Alice, Antoine, Cécile, Christophe, Guillaume, Julie, Kévin, Léa, Lillan, Maria, Matthieu et Vincent.

Mes pensées se tournent également vers mes fidèles relecteurs, Denis, Ghislaine, Solène et Théo, qui m'ont soutenue tout au long de ces sept années d'études.

Enfin, merci à l'ENSAL et l'ENTPE qui m'ont formée et éveillée à de nombreux sujets, et qui m'ont avant tout transmis la passion de l'architecture et de l'environnement.

Avant-propos

En sept années d'études, j'ai toujours été intriguée par la notion d'écologie dans le bâtiment. Entre greenwashing et faits avérés scientifiquement, je trouve qu'il est parfois dur de discerner le « vert(ueux) » du reste. En réalité, qu'est-ce que c'est que construire « écolo » ? Mettre en œuvre un bardage en bois provenant de l'autre bout de l'Europe et une toiture végétalisée sur un immeuble de 15 étages, est-ce réellement vertueux ? Toutes ces questions que je me posais durant mes années d'étude d'architecture me semblaient avoir des réponses assez intuitives, mais difficiles à démontrer devant des discours bien rôdés d'industriels du ciment par exemple, prônant la localité de leurs produits et leurs efforts.

Mes études d'ingénierie et mon expérience au sein d'Artelia Transitions et Performances Environnementales m'ont aidée à transformer ces intuitions en faits scientifiques, notamment via les Analyses de Cycle de Vie. Evaluer les impacts carbone permet d'objectiver les faits, et de comparer par exemple deux bâtiments sur la base de leurs émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, il serait réducteur d'ignorer d'autres indicateurs et il ne faut pas laisser au second plan d'autres impacts tels que l'eau, les déchets, la pollution... Toujours est-il que l'impact carbone offre un indicateur chiffré pour évaluer des pratiques et des produits, et savoir s'ils participent à augmenter le réchauffement climatique, ou au contraire stockent du carbone pour en diminuer l'ampleur.

Les thématiques de rénovation, réhabilitation (du « re- » en général) me paraissent être un axe essentiel de lutte contre le changement climatique dans le bâtiment. Pourtant, ces pratiques sont encore loin d'être une priorité dans le secteur du bâtiment et l'impact carbone de la rénovation n'est pas réglementé pour le moment. Sur ce sujet, certaines questions éveillent particulièrement ma curiosité : Quel est l'état des lieux actuel de la rénovation bas carbone en France ? Et quel est son devenir ? J'espère que ce mémoire participera à donner quelques éléments de réponse, à vulgariser et mettre en lumière certaines pratiques existantes sur la rénovation bas-carbone.

Glossaire

ACV : Analyse de Cycle de Vie

AMO : Assistance à Maîtrise d'Ouvrage

BBCA : Bâtiment Bas Carbone

BET : Bureau d'Etudes Techniques

CFA : Courant Faible

CFO : Courant Fort

CLT : Cross Laminated Timber

CTA : Centrale de Traitement d'Air

CVC : Chauffage Ventilation Climatisation

DH : Degré-Heure d'Inconfort

DVE : Durée de Vie Estimée

DVR : Durée de Vie de Référence

DED : Données Environnementales par Défaut

E+C- : Énergie Positive - Réduction Carbone

ERP : Etablissement Recevant du Public

FDES : Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire

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

LCA : Life Cycle Assessment

ICU : Îlot de Chaleur Urbain

IGH : Immeuble de Grand Hauteur

PEP : Profil Environnementaux Produits

PER : Période d'Étude de Référence

PRG : Pouvoir de Réchauffement Global

PV : Photovoltaïque

MOA : Maîtrise d'Ouvrage

MOE : Maîtrise d'Œuvre

RE2020 : Réglementation Environnementale 2020

RT : Réglementation Thermique

SDP : Surface de Plancher

SEAE : Système d'Extinction Automatique à Eau

SHAB : Surface Habitable

Sref : Surface de Référence

STD : Simulation Thermique Dynamique

SU : Surface Utile

UF : Unité Fonctionnelle

VRD : Voirie et Réseaux Divers

ZAN : Zéro Artificialisation Nette

Lexique

Bioclimatisme : discipline de l'architecture dont l'objectif est de tirer parti des conditions d'un site et de son environnement : son climat, sa géographie et sa géomorphologie

Biosourcé : issu du vivant, faune ou flore (pour un matériau notamment)

Carboné : (jargon) émetteur de gaz à effet de serre, dont du dioxyde de carbone. Utilisé par les modélisateurs d'ACV pour parler de produits, matériaux ou équipements.

Clinker : Constituant du ciment obtenu par calcination d'un mélange d'acide silicique d'alumine, d'oxyde de fer et de chaux.

Géosourcé : (matériau) issu de ressources d'origine minérale, tels que la terre crue ou la pierre sèche

Green washing : ou « éco-blanchiment », « verdissage » en français est une méthode de marketing consistant à communiquer auprès du public en utilisant l'argument écologique de manière trompeuse pour améliorer son image.

Ilot de Chaleur Urbain : Les îlots de chaleur urbains sont des élévations localisées des températures, particulièrement des températures maximales diurnes et nocturnes, enregistrées en milieu urbain par rapport aux zones rurales ou forestières voisines ou par rapport aux températures moyennes régionales.

Infrastructure : dans un bâtiment, désigne la partie de la structure située au-dessus du niveau du terrain fini

Modénature : (se dit d'éléments de façade) profil d'un ensemble de moulures dont les reliefs créent des jeux d'ombres et de lumière.

Passif : (se dit d'un bâtiment) : Le concept du bâtiment passif est que la chaleur dégagée à l'intérieur de la construction (êtres vivants, appareils électriques) et celle apportée par l'extérieur (ensoleillement) suffisent à répondre aux besoins de chauffage.

Passoire thermique : (jargon) se dit d'un bâtiment, souvent un logement, mal isolé et consommant beaucoup d'énergie pour être chauffé – correspond aux étiquettes les F et G des DPE.

Superstructure : dans un bâtiment, désigne la partie de la structure située au-dessus du niveau du terrain fini

Renouvelable : qui peut être renouvelé, provenant de sources naturelles qui ne s'épuisent pas (marée, soleil, vent)

Vernaculaire : (pour une construction) : du pays, autochtone, domestique, indigène, construction réalisée « traditionnellement » par les habitants d'un territoire

Table des matières

Introduction	9
Problématique	10
Méthodologie	10
Chapitre 1.	11
Bas-carbone & rénovation... petites définitions et grandes stratégies	11
Un peu de vocabulaire pour commencer	11
La transition écologique, kezako ?	11
Pourquoi parle-t-on de Bas Carbone ?	13
Et la (Ré)novation dans tout ça ?	14
Un soupçon de législatif pour continuer	16
De l'énergie au carbone, plusieurs décennies de lois	16
Le climat et le bas carbone, problématiques mondiales et stratégies françaises	21
Chapitre 2.	27
Au cœur de l'ACV, dans les rouages de la réglementation	27
L'Analyse de Cycle de Vie en France	28
Le B.A. BA de l'ACV	28
L'ACV dynamique, c'est de la dynamite	30
Le mystérieux Module D, et autres étapes de vie d'un produit	33
Compter le carbone, un art complexe	37
Un périmètre temporel : la durée de vie	37
Un périmètre spatial : la surface de référence	38
Un périmètre fonctionnel : l'occupant, le grand oublié ?	40
Chapitre 3.	45
Le casse-tête du calcul carbone en rénovation	45
Différentes méthodes, différentes philosophies	46
Méthode BBCA Rénovation - la plus simple	46
Méthode HQE-GBC - l'intermédiaire	49
Méthode Quartier Energie Carbone - le niveau expert.....	50
Résumé	52
Et en pratique ? Etude comparative des méthodes	53
Fabrication des études : données de l'existant et du projet	54
Paramètres clés des méthodes : analyses de sensibilité	55
Comparaison d'ACV en rénovation : premières conclusions	63

Chapitre 4.	65
Haro sur le carbone ! Les leviers de la rénovation bas carbone en France	65
Consommer moins.....	66
Sobriété énergétique.....	66
Frugalité.....	67
Recyclage	68
Réutilisation.....	69
Réemploi	70
Consommer mieux	72
Décarboner en théorie	72
Décarboner en pratique	75
Chapitre 5	81
Rénover bas carbone, facile non ?.....	81
L'argent ne fait pas le bonheur, mais il fait les choix de projet	81
Les finances des filières	82
Les logiques de marché.....	83
L'équation coût-carbone	83
L'assurabilité et la technique, d'épineuses questions pour l'écologie ?	87
La sécurité incendie.....	87
Techniques courantes et assurabilité	89
L'usage et l'habitant : le cœur du sujet	92
Le confort, intemporel désir	92
L'accessibilité, pour un bâtiment plus équitable	96
L'acceptabilité du (re), blocages psychologiques et inertie sociétale	98
Chapitre 6.	100
Au-delà du carbone	100
L'exigence de l'existant	100
Le patrimoine très ancien : avant le XVIIIème	100
Le patrimoine ancien : du XVIIIème à la 2 ^{ème} Guerre Mondiale	101
Le bâtiment plus récent : modernisme, postmodernisme etc.....	104
L'environnement	107
Energie.....	108
Matières premières	110
Eau.....	113
Biodiversité.....	114
Conclusion	117

Introduction

« C'est pas bientôt fini ?

Mes forêts sont en train de brûler partout, mes coraux sont en train de crever, mes lacs s'assèchent, beaucoup de mes habitants veulent fuir leur pays... Pour préserver ce qui peut l'être, vous avez 30 ans pour diviser les émissions de gaz à effet de serre par 3.

Vous pouvez aussi attendre que tout devienne invivable »¹

Alors que la Terre a vécu cet été son jour le plus chaud², et que de nombreux pays voient leurs records de température battus chaque année, la transition climatique est plus que jamais un sujet brûlant.

En France, l'État est actuellement poursuivi pour **Inaction Climatique** par la commune de Grande-Synthe dans le Nord, qui s'estime particulièrement menacée par les conséquences du dérèglement climatique. Le Conseil d'État n'a de cesse de lui imposer des ultimatums pour obtenir une clarification de sa stratégie afin d'« infléchir la courbe des émissions de gaz à effet de serre ».³

Les actions des acteurs privés français ne sont guère plus reluisantes. À l'heure où les entreprises du CAC40 promettent le "zéro carbone en 2050", Total Energie continue d'investir à 75% dans des projets liés au gaz ou au pétrole. Bien que depuis 10 ans, la loi française exige des grandes entreprises un bilan carbone obligatoire, près de 65 % des 4970 organisations concernées ne l'avaient toujours pas fait en 2021. Début 2023, certaines très grandes entreprises, comme Eiffage, n'ont toujours pas communiqué leur bilan carbone à l'ADEME.⁴

Le secteur du bâtiment est à la traîne : il représente 43% des consommations énergétiques annuelles françaises et est également responsable de 23 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) français. **Entre 2015 et 2018, le seul secteur du bâtiment français a émis environ 118 millions de tonnes de CO2 équivalent dans l'atmosphère.**⁵ Pour réduire ces émissions, la rénovation constitue théoriquement une action clé, mais il est aujourd'hui difficile de calculer l'impact carbone d'un projet rénové.

¹ Christophe Blain et Jean-Marc Jancovici, *Le monde sans fin* (Paris: Dargaud, 2021).

² « Record. Le 4 juillet 2023, la Terre a vécu son jour le plus chaud », *Courrier international*, 5 juillet 2023, <https://www.courrierinternational.com/article/record-le-4-juillet-2023-la-terre-a-vecu-son-jour-le-plus-chaud>.

³ Audrey Garric et Stéphane Mandard, « "Inaction climatique" : le Conseil d'Etat lance un nouvel ultimatum au gouvernement », *Le Monde*, 10 mai 2023, https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/05/10/inaction-climatique-le-conseil-d-etat-ne-relache-pas-la-pression-sur-le-gouvernement_6172792_3244.html.

⁴ Adrien Sénecat, « L'échec du bilan carbone "obligatoire", symbole du mépris des enjeux climatiques », *Le Monde*, 24 mars 2023, https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/03/24/l-echec-du-bilan-carbone-obligatoire-symbole-du-mepri-des-enjeux-climatiques_6166785_4355770.html.

⁵ Ministère de la Transition écologique (MTE), « Stratégie Nationale Bas Carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone », mars 2020.

Problématique

A travers la Réglementation Environnementale 2020, la France rend **obligatoire l'évaluation de l'impact carbone des bâtiments neufs**. Mais qu'en est-il des bâtiments **réhabilités** ? Pour le moment, leurs émissions de gaz à effet de serre ne sont pas réglementées et ne devraient pas l'être avant quelques années. Certes, la rénovation est en moyenne moins émettrice de gaz à effet de serre que le neuf, mais elle est loin d'atteindre « Zéro Emission nette » comme l'entend la Stratégie Nationale Bas Carbone pour son horizon 2050. La rénovation est un élément clé pour permettre d'atteindre les objectifs zéro carbone en 2050.

Toutefois, le secteur du bâtiment en France est encore loin des attendus : **en 2050, 70 % du parc pourrait être constitué d'immeubles construits avant 2012**, ne répondant donc pas aux exigences de la RT2012 et probablement plus aux exigences de confort qui seront en vigueur.⁶ **Leur rénovation est nécessaire, mais à quel coût en termes d'émissions carbone ?** Comment peut-on calculer ces coûts « carbonés » associés alors que la réglementation ne l'oblige pas à l'heure actuelle ? Et enfin quels sont les contraintes et les opportunités pour favoriser la rénovation bas-carbone en France ? Ces questionnements nous mènent à la problématique suivante :

Comment développer la rénovation bas carbone en France ?

Méthodologie

Pour répondre à cette problématique, nous entrerons dans le sujet en réfléchissant tout d'abord à ce que signifient « bas carbone » et rénovation en France, ainsi qu'aux principales réglementations associées à cette thématique. Puis, nous évoquerons la réglementation française phare en termes de carbone, la RE2020, en exposant ses grandes méthodes associées et ses limites. Sa principale limite étant que la rénovation n'est pas incluse dans son périmètre, nous étudierons ensuite différents moyens de calculer l'impact carbone de la rénovation. Cette partie abordera mes recherches et comparaisons personnelles entre différentes méthodes de calcul. Puis, nous chercherons à déterminer les leviers et freins au déploiement de la rénovation bas carbone en France sous un angle plus qualitatif, avant de conclure sur la place des émissions carbone dans la rénovation, et sur d'autres thématiques à ne pas occulter.

Le sujet de la rénovation bas carbone me paraissant important à partager, un effort particulier de vulgarisation a été réalisé dans ce mémoire. Les principales sources utilisées dans cette étude seront des actes juridiques et réglementaires, des rapports d'organismes spécialisés dans le bâtiment ou le climat (CEREMA, CSTB, ADEME, GIEC, etc.), des articles de presse (Le Monde, etc.), des entretiens et données de Artelia Transitions et Performances Environnementales, et des données de la base INIES.

⁶ Ministère de la Transition écologique (MTE).

Chapitre 1.

Bas-carbone & rénovation... petites définitions et grandes stratégies

Un peu de vocabulaire pour commencer

Le bas carbone, la transition écologique et la rénovation, c'est aussi beaucoup de jargon.

La notion de Bas Carbone est un concept qui se place dans le vaste champ lexical de la transition écologique, aux côtés de nombreux autres termes comme : la résilience, la low tech, la biodiversité, l'économie circulaire, etc. La rénovation englobe également de nombreux concepts qu'il est bon d'aborder avant la suite du propos.

Afin que tous les lecteurs aient le même niveau de connaissance avant de se plonger dans ce document, je vous propose de balayer rapidement de grandes notions connexes qui seront abordées ici.

La transition écologique, kezako ?

Transition écologique

La **transition écologique** est « le passage, à l'échelle d'une société, à des modes d'habiter et des systèmes productifs plus durables. »⁷ Cela sous-entend un changement de modèle, pour aller vers une meilleure cohabitation entre tous les êtres vivants, humains et non humains. Cette notion propose de renouveler nos façons de consommer, de produire, de travailler, de vivre ensemble afin de répondre aux grands enjeux environnementaux, ceux du changement climatique, de la rareté des ressources, de la perte accélérée de la biodiversité et de la multiplication des risques sanitaires environnementaux. La transition écologique évoque en filigrane le besoin de changer le paradigme vécu durant l'**Anthropocène** (c'est-à-dire « l'époque de l'histoire de la Terre au cours de laquelle les activités humaines ont un impact significatif et global sur le système planétaire »⁸).

Deux grands courants se détachent au sein de la transition écologique. La **modernisation écologique** considère qu'il est possible de continuer à développer et consommer autant voire plus, si l'on oriente l'innovation technique vers la préservation de la biodiversité et une économie moins carbonée. La **transition sociale-écologique** est plus radicale et transversale et propose de « repenser le bien-être dans le cadre offert par les écosystèmes, en préservant les relations d'interdépendance au vivant », sans distinguer nécessairement ce qui serait humain et culturel de ce qui est naturel.⁹

⁷ Alexis Gonin, « Transition écologique », Terme, Géoconfluences (École normale supérieure de Lyon, mai 2021), ISSN : 2492-7775, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/transition-ecologique>.

⁸ « Anthropocène », Terme, Géoconfluences (École normale supérieure de Lyon, juin 2022), ISSN : 2492-7775, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/anthropocene>.

⁹ Gonin, « Transition écologique ».

Biodiversité

La **biodiversité**, est un terme développé en 1987 par le biologiste américain Wilson. C'est le tissu vivant de notre planète : « La biodiversité regroupe la diversité des formes du vivant, végétales et animales, y compris dans ses manifestations non répertoriées par la science. »¹⁰ Cela recouvre l'ensemble des milieux naturels et des formes de vie (plantes, animaux, champignons, bactéries, etc.) et leurs interactions. Elle comprend trois niveaux interdépendants :

- La diversité des milieux de vie à toutes les échelles : des océans, prairies, forêts... au contenu des cellules (pensons aux parasites qui peuvent y vivre) en passant par la mare du fond de son jardin, ou les espaces végétalisés en ville ;
- La diversité des espèces (y compris l'espèce humaine) qui vivent dans ces milieux ;
- La diversité génétique des individus au sein de chaque espèce : autrement dit, nous sommes tous différents.¹¹

Il est couramment reconnu que la biodiversité mondiale est en danger : 75% des milieux terrestres et 40% des écosystèmes marins sont fortement dégradés. Le rythme de disparition est 100 à 1000 fois supérieur au taux naturel d'extinction, il est désormais question d'une **sixième extinction de masse des espèces**.¹²

Résilience

La **résilience** est définie comme la capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'un peuplement, d'une population, etc. à retrouver un fonctionnement normal après avoir connu des perturbations importantes du fait d'un ou plusieurs facteurs de l'environnement. La résilience considère qu'un dommage n'est pas la cause d'une relation entre aléa et vulnérabilité, mais plutôt d'un ensemble de facteurs en interaction. En ce sens, la résilience évoque des capacités d'adaptation face à un dommage, plutôt qu'un retour à un état initial. La notion de résilience fait toutefois encore débat : certains chercheurs y voient de la manipulation idéologique d'inspiration néolibérale.¹³ Il est certain que la résilience évoque l'adaptation à des événements rudes, mais cette résilience a des limites lorsqu'un point de non-retour est franchi.

Low tech

La **low-tech** peut être décrite non pas comme « une absence de technologie, mais le recours en priorité à des techniques pertinentes, adaptées, non polluantes ni gaspilleuses, comme des appareils faciles à réparer, à recycler et à réemployer »¹⁴ Le low-tech se traduit en français par « basse technologie », et s'oppose donc sémantiquement au concept de high-tech.

¹⁰ « Biodiversité », Terme, Géoconfluences (École normale supérieure de Lyon, avril 2023), ISSN : 2492-7775, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/biodiversite>.

¹¹ Ministères Écologie Énergie Territoires, « Qu'est-ce que la biodiversité ? », consulté le 11 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-informations-cles>.

¹² Ministères Écologie Énergie Territoires.

¹³ « Résilience », Terme, Géoconfluences (École normale supérieure de Lyon, avril 2023), ISSN : 2492-7775, <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/resilience>.

¹⁴ Philippe Madec, Dominique Gauzin-Müller, et Alain Bornarel, « Manifeste pour une Frugalité heureuse et créative dans l'architecture et l'aménagement des territoires urbains et ruraux », Frugalité heureuse & créative, 18 janvier 2018, <https://frugalite.org/ressources-2/les-publications/4-engagements-30-principes/>.

La low-tech s'inscrit donc dans une réflexion sur la technologie pour développer une innovation utile, accessible et durable. Trois critères sont constitutifs d'une technologie low tech :

- L'**utilité** : répondre aux besoins essentiels, comme l'énergie, l'alimentation, l'accès à l'eau ou la santé ;
- L'**accessibilité** : être abordable et appropriable par le plus grand nombre (physiquement, intellectuellement, économiquement, etc.)
- La **durabilité** : optimiser les impacts tant écologiques que sociaux ou sociétaux à toutes les étapes du cycle de vie.¹⁵

Le Manifeste du Low tech Lab, appuie le concept de « sobriété » dans la low tech, et notamment la nécessité de réduire nos diverses consommations (énergétique, matérielle, transport etc). La low-tech pourrait donc se traduire concrètement par **la mise en place de technologies simples, peu onéreuses, accessibles à tous et facilement réparables, faisant appel à des moyens courants et localement disponibles** (dont la réutilisation ou le recyclage d'objets et/ou de matériaux usuels).¹⁶

Economie circulaire

L'**économie circulaire** fonctionne selon le principe d'un cercle vertueux. Elle repose sur trois grands axes : mieux produire avec moins de ressources, puis consommer de manière plus responsable et enfin recycler efficacement pour pouvoir réinjecter les ressources dans la fabrication de nouveaux biens et services.¹⁷ Au sein du bâtiment, cette thématique commence de plus en plus à être abordée, que ce soit à travers la gestion des déchets, la rénovation ou le réemploi.

Pourquoi parle-t-on de Bas Carbone ?

La notion de Bas Carbone est en lien direct avec le réchauffement climatique induit par les Émissions de Gaz à Effet de Serre (GES).

En application depuis 2005, le **protocole de Kyoto** signé en 1997 a pour objectif de réduire les émissions de Gaz à Effet de Serre mondiales de 6 gaz principaux :

- Le dioxyde de carbone (CO₂) ;
- Le méthane (CH₄) ;
- L'oxyde nitreux (N₂O) ;
- L'hydrofluorocarbure (HFCs) ;
- L'hydrocarbure perfluoré (PFCs) ;
- L'hexafluorure de soufre (SF₆)¹⁸

¹⁵ Low tech Lab, « Qu'est-ce que la low-tech ? », consulté le 11 septembre 2023, <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>.

¹⁶ Low tech Lab, « Le manifeste du Low-tech Lab : pour un avenir low-tech ! », mai 2019, <https://lowtechlab.org/fr/actualites-blog/le-manifeste-du-low-tech-lab>.

¹⁷ « L'économie circulaire », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 13 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire>.

¹⁸ « Le protocole de Kyoto et la réduction des émissions de gaz à effet de serre », Assemblée Nationale, consulté le 1 août 2023, https://www.assemblee-nationale.fr/12/controle/delat/dates_cles/protocole_kyoto.asp.

Tous ces gaz contribuent au réchauffement climatique, mais tous n'ont pas le même impact. Pour comparer ces impacts, le GIEC a créé l'indicateur **Potentiel (ou pouvoir) de Réchauffement Global** (PRG ou Global Warming Potentials, GWP en anglais). Le calcul se base entre autres sur des indicateurs comme l'efficacité radiative du gaz dans le temps ou sa dégradation en fonction du temps.

Le CO₂ est considéré comme ayant un Potentiel de Réchauffement Global de 1, et le PRG des autres gaz est calculé à partir de celui du CO₂. L'unité du PRG est donc l'équivalent CO₂. Le PRG d'un gaz est toujours calculé par rapport à une durée (20 ans, 100 ans, etc.) car il est très dépendant de la durée de vie ("lifetime") dudit gaz. Le PRG permet *in fine* de convertir les tonnes d'émissions de GES en tonnes équivalentes de CO₂.¹⁹

Table 7.15 | Emissions metrics for selected species: global warming potential (GWP), global temperature-change potential (GTP). All values include carbon cycle responses as described in Section 7.6.1.3. Combined GTPs (CGTPs) are shown only for species with a lifetime less than 20 years (Section 7.6.1.4). Note CGTP has units of years and is applied to a change in emissions rate rather than a change in emissions amount. The radiative efficiencies are as described in Section 7.3.2 and include tropospheric adjustments where assessed to be non-zero in Section 7.6.1.1. The climate response function is from Supplementary Material 7.SM.5.2. Uncertainty calculations are presented in Supplementary Tables 7.SM.8 to 7.SM.13. Chemical effects of CH₄ and N₂O are included (Section 7.6.1.3). Contributions from stratospheric ozone depletion to halogenated species metrics are not included. Supplementary Table 7.SM.7 presents the full table.

Species	Lifetime (Years)	Radiative Efficiency (W m ⁻² ppb ⁻¹)	GWP-20	GWP-100	GWP-500	GTP-50	GTP-100	CGTP-50 (years)	CGTP-100 (years)
CO ₂	Multiple	1.33 ± 0.16 × 10 ⁻⁵	1.	1.000	1.000	1.000	1.000		
CH ₄ -fossil	11.8 ± 1.8	5.7 ± 1.4 × 10 ⁻⁴	82.5 ± 25.8	29.8 ± 11	10.0 ± 3.8	13.2 ± 6.1	7.5 ± 2.9	2823 ± 1060	3531 ± 1385
CH ₄ -non fossil	11.8 ± 1.8	5.7 ± 1.4 × 10 ⁻⁴	79.7 ± 25.8	27.0 ± 11	7.2 ± 3.8	10.4 ± 6.1	4.7 ± 2.9	2675 ± 1057	3228 ± 1364
N ₂ O	109 ± 10	2.8 ± 1.1 × 10 ⁻³	273 ± 118	273 ± 130	130 ± 64	290 ± 140	233 ± 110		
HFC-32	5.4 ± 1.1	1.1 ± 0.2 × 10 ⁻¹	2693 ± 842	771 ± 292	220 ± 87	181 ± 83	142 ± 51	78,175 ± 29,402	92,888 ± 36,534
HFC-134a	14.0 ± 2.8	1.67 ± 0.32 × 10 ⁻¹	4144 ± 1160	1526 ± 577	436 ± 173	733 ± 410	306 ± 119	146,670 ± 53,318	181,408 ± 71,365
CFC-11	52.0 ± 10.4	2.91 ± 0.65 × 10 ⁻¹	8321 ± 2419	6226 ± 2297	2093 ± 865	6351 ± 2342	3536 ± 1511		
PFC-14	50,000	9.89 ± 0.19 × 10 ⁻²	5301 ± 1395	7380 ± 2430	10,587 ± 3692	7660 ± 2464	9055 ± 3128		

Figure 1 - Potentiel de Réchauffement Global de l'Atmosphère des principaux gaz à effet de serre (source : 6ème rapport du GIEC)

D'après le tableau ci-dessus, la majorité des gaz à effet de serre les plus impactants contiennent des atomes de carbone. Ceci explique que l'on parle à l'heure actuelle de "décarbonation" ou de "bas carbone" : ces termes font référence à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui contiennent en majorité du carbone. **Le bas carbone évoque donc des moyens de réduire les émissions de gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique.**

Et la (Ré)novation dans tout ça ?

Le secteur du bâtiment étant l'un des plus gros émetteurs de GES dans le monde, il est nécessaire de trouver des solutions pour diminuer ses émissions. La rénovation est reconnue comme l'un des leviers pour ce faire.

Pour poursuivre notre première approche de définition, je propose donc au lecteur de considérer les notions de (re-), -stauraton, -conversion, -cyclage, etc. dans le bâtiment.

Le préfixe (re-) est une constante de nombreux termes du bâtiment lié à la transition écologique. Le dictionnaire de l'Académie Française le définit d'ailleurs de la manière suivante :

¹⁹ Intergovernmental Panel On Climate Change, « Chapter 7. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity », in *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1^{re} éd. (Cambridge University Press, 2023), 923-1054, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

R(E)-, RÉ-

Étymologie : Tiré du préfixe latin *red*, *re*, de même sens.

Élément de composition qui entre dans la formation de nombreux mots, principalement des verbes et leurs dérivés. Il marque la répétition ou la reprise, comme dans *Redire*, *Refaire*, *Recommencer*. Il peut aussi indiquer le retour dans un lieu ou le retour à un état antérieur, comme dans *Rentrer*, *Raccommoder*, le mouvement en arrière, comme dans *Reculer*, et l'action en sens contraire, comme dans *Repousser*, *Rejeter*. Il peut enfin avoir un sens augmentatif, comme dans *Renforcer*, *Rétrécir*, « rendre plus fort, plus étroit », ou une valeur intensive, comme dans *Ressentir*.²⁰

Réhabilitation

La réhabilitation est l'action de réhabiliter, qui tire ses origines du latin "habilitare", "rendre apte". Réhabiliter signifie donc "Remettre en état un bâtiment, notamment en le mettant en conformité avec les normes en vigueur en matière de sécurité, d'isolation, de confort, etc"²¹ La réhabilitation consiste ainsi en des travaux ne remettant pas à neuf un bâtiment, mais le remettant plutôt aux attendus de confort et sécurité des habitants. Le terme réhabilitation évoque des travaux potentiellement moins impactants sur l'existant que la rénovation.

Restauration

Le mot "restauration" est emprunté du latin "restauratio", "renouvellement", lui-même dérivé de *restaurare*, « rebâtir, réparer ». La restauration consiste en la "remise en état d'un ouvrage, d'une œuvre ayant subi des dommages, des dégradations." Plus spécifiquement en architecture, la restauration peut correspondre à toutes les "actions de conservation et de mise en valeur des caractéristiques esthétiques et historiques d'un monument, d'un ouvrage d'art."²² Dans le domaine du bâtiment, la restauration immobilière évoque aussi des « travaux de remise en état, de modernisation ou de démolition d'un immeuble ou d'un ensemble d'immeubles. »

Rénovation

Le terme "rénovation" est donc tiré du préfixe *re-* et de *novus*, "neuf, nouveau" et signifie la "remise à neuf de ce qui est endommagé, dégradé". Par analogie, on parle également de rénovation d'une prairie, "traitement qui consiste à détruire entièrement sa végétation avant de ressemer."²³ La rénovation, dans son processus de faire du neuf à partir du vieux, peut donc impliquer certaines destructions de l'existant ou modifications profondes. Les termes "rénovation" ou "rénovés" sont parfois utilisés de manière abusive, puisque "réhabilitation" ou "restauration" conviendraient mieux.

Mais puisqu'à l'heure actuelle le terme rénovation est utilisé couramment pour englober tous ces processus, c'est sous ce terme, entendu de manière globale, que ce mémoire est construit. Lorsque nous parlerons de

²⁰ « Définition : r(e)-, ré- » (Dictionnaire de l'Académie française), consulté le 1 août 2023, <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R0685>.

²¹ « Définition : réhabiliter ». Dictionnaire de l'Académie française. Consulté le 1 août 2023. <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R1382>.

²² « Définition : restauration ». Dictionnaire de l'Académie française. Consulté le 1 août 2023. <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R2152>.

²³ « Définition : rénovation ». Dictionnaire de l'Académie française. Consulté le 1 août 2023. <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R1761>.

rénovation, la réhabilitation et la restauration seront donc comprises dans ce terme implicitement afin de favoriser une compréhension plus aisée. Cependant, le terme réhabilitation serait dans l'absolu plus adapté. Par ailleurs, si à l'heure actuelle la rénovation évoque plutôt le concept de rénovation thermique auprès du grand public, nous traiterons ici de tout type de rénovation.

Un soupçon de législatif pour continuer

De l'énergie au carbone, plusieurs décennies de lois

L'énergie : de l'or noir aux toits blancs, 50 ans de RT

« Eteins les lumières, c'est pas Versailles ici ! »

Quel français n'a jamais entendu cette phrase ? Ce dicton populaire traverse les décennies depuis des temps immémoriaux. Enfin, immémoriaux ... pas vraiment. Avant le premier choc pétrolier en 1974, le mot sobriété énergétique ne semblait pas faire partie du langage courant, l'économie d'énergie était une vague notion, et l'isolation thermique un concept encore lointain.

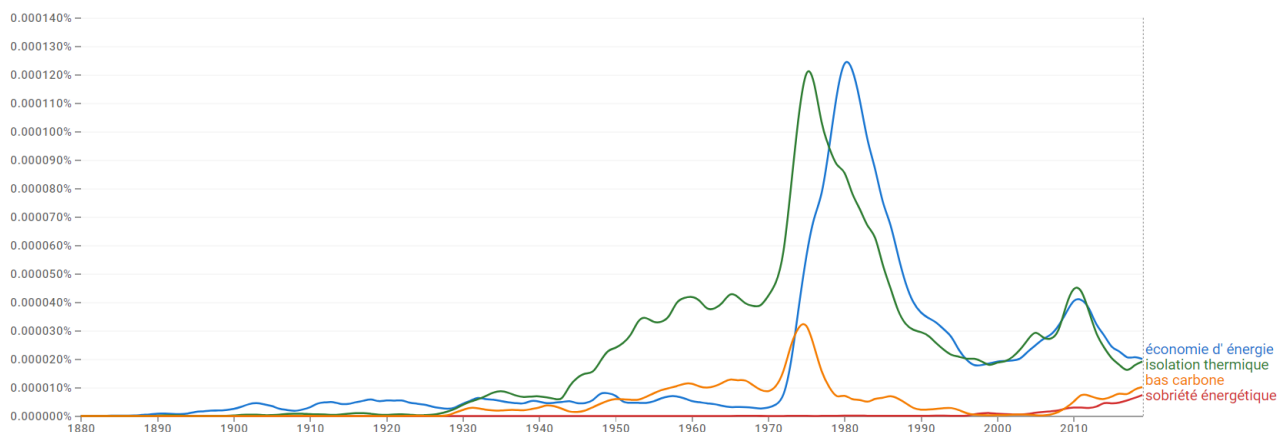


Figure 2 - Occurrences de différents termes liés à la rénovation thermique dans la littérature de la base de données Google Books (source : Google Books Ngram Viewer)

Conséquence du premier choc pétrolier, le prix de l'énergie monte en flèche à partir de **1974** et la question de l'énergie consommée dans le chauffage commence à se poser : c'est le début des **premières réglementations thermiques (RT) en France**. Au fur et à mesure de la montée du prix des énergies fossiles, la législation s'attaquera à des problématiques de plus en plus variées : chauffage, eaux chaudes sanitaires, ventilation, éclairage, refroidissement ...

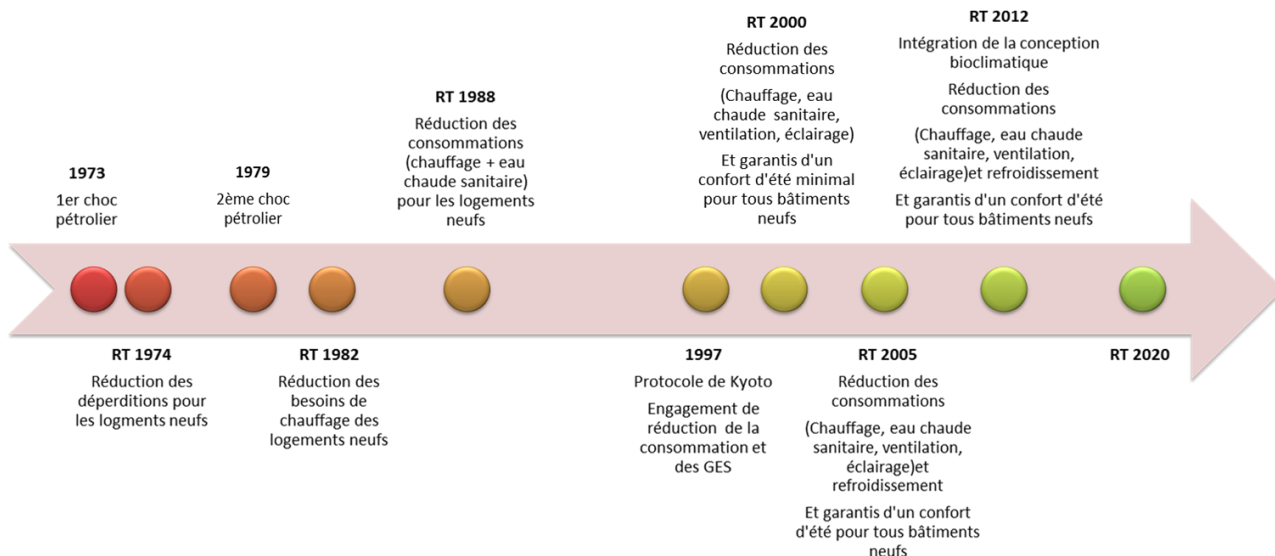


Figure 3 - De l'énergie au carbone, la législation en action (source : <http://www.betcsharel.com/evolution-de-la-rt.html>)

Les premières réglementations ont débuté dans un but avant tout économique : le prix de l'énergie devenait difficile à assumer pour continuer d'assurer des températures **confortables en hiver**. Mais d'autres problématiques se sont ajoutées au fur et à mesure des années, comme la problématique majeure **du confort d'été**, accentuée par le réchauffement climatique et le phénomène d'îlots de Chaleur Urbain. Pour répondre aux besoins de frais, de nouveaux équipements techniques peuvent être nécessaires ou une meilleure conception bioclimatique des bâtiments, mettant en place de la ventilation naturelle, des teintes plus claires, des occultations extérieures, etc. La réponse de la France face à ces problématiques s'est traduite en 7 réglementations thermiques (si l'on inclue la RE2020) et quelques autres mesures pour les compléter.

Energie et rénovation : mesures majeures

Le Diagnostic de Performance Energétique (DPE)

Le DPE est à une passoire thermique ce que le nutriscore est à la malbouffe.

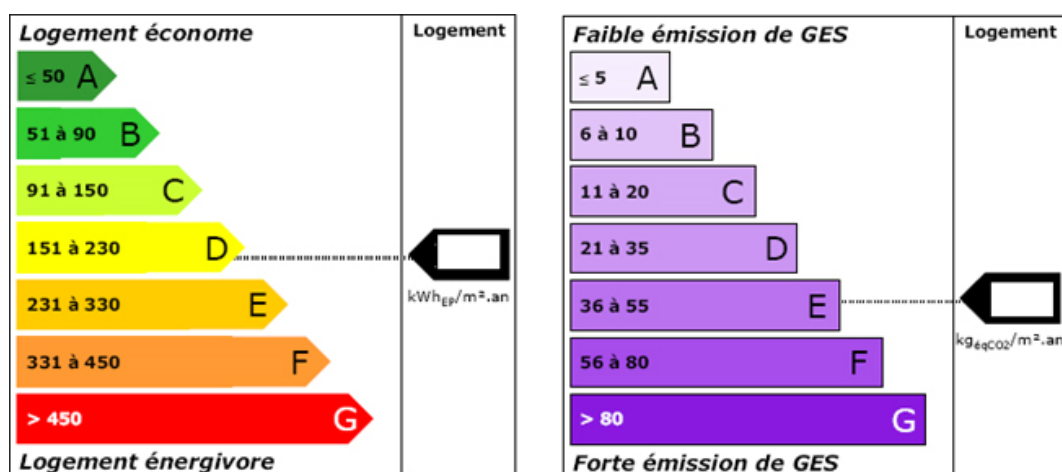


Figure 4 - Exemple d'étiquette DPE pour un logement (source : <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2698-diagnostic-performance-energetique-dpe.html>)

Créé en 2006 et réformé depuis, le Diagnostic de Performance Energétique (DPE) évalue la **performance énergétique et climatique** d'un bâtiment de **G à A**, en se basant sur sa consommation d'énergie et son impact

en termes d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Depuis 2021, le DPE n'est plus simplement informatif mais est opposable, et obligatoire pour procéder à la vente d'un bâtiment.²⁴

Le DPE permet notamment de détecter les logements qui sont des « passoires énergétiques ». Avec la loi Climat et Résilience, **la location des passoires thermiques devient progressivement interdite**, obligeant les propriétaires à effectuer des travaux de rénovation pour pouvoir louer à nouveau leur bien. Et il faut dire que cette incitation à la rénovation thermique pour économie d'énergie est bien nécessaire : **le parc de logements en France a consommé environ 40 millions de tonnes équivalent pétrole d'énergie (Mtep) en 2020.**



Figure 5 - Interdiction progressive de location en fonction des étiquettes DPE des logements (source : <https://scala-patrimoine.fr/2022/12/21/loi-climat-vers-une-interdiction-a-la-location-des-logements-energivores/>)

L'obligation d'isolation en rénovation

Depuis 2017, il est obligatoire en France d'engager des travaux d'isolation thermique lorsque des travaux importants de rénovation sont prévus, que ce soit pour des habitations individuelles, des immeubles d'habitation collectif, des bureaux, des commerces, des bâtiments d'enseignement ou des hôtels.²⁵ Plus précisément, des travaux entraînent l'obligation d'isolation thermique sur les zones concernées si :

- Le bâtiment fait l'objet de travaux de ravalement importants portant sur des **parois** de locaux chauffés donnant sur l'extérieur et constituées en surface à plus de 50 %, hors ouvertures, de **terre cuite, de béton, de ciment ou de métal** ;
- Le bâtiment fait l'objet de travaux importants de **réfection de toiture**, le maître d'ouvrage réalise des travaux d'isolation thermique de la toiture ou du plancher haut du dernier niveau occupé ou chauffé²⁶ ;
- Une **pièce de plus de 5m²** fait l'objet d'un aménagement pour la rendre **habitable**.²⁷

²⁴ « Diagnostic de performance énergétique - DPE », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 7 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>.

²⁵ « Article L173-1 », Code de la construction et de l'habitation §, consulté le 8 septembre 2023, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000041569859.

²⁶ « Section 2 : Dispositions applicables en cas de travaux importants de ravalement ou de réfection de toiture (Articles R173-4 à R173-7) - Légifrance », Code de la construction et de l'habitation §, consulté le 8 septembre 2023,

https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074096/LEGISCTA000043819419.

²⁷ « Article R173-8 », Code de la construction et de l'habitation §, consulté le 8 septembre 2023, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043819431.

Ces travaux ne sont pas soumis à l'obligation d'isolation dans les cas suivants :

- « Risque de **dégradation du bâti** lié à l'isolant attesté par un professionnel du bâtiment ;
- Risque de **non-conformité** des travaux avec des **servitudes** : Charge imposée à une propriété au profit d'une autre propriété (par exemple, un droit de passage) ou des règles relatives au droit des sols (hauteur ou emprise au sol par exemple) ou à l'aspect des façades ou à leur implantation ;
- Modification de l'état des parties extérieures ou des éléments d'architecture et de décoration en contradiction avec les règles prévues par **les sites patrimoniaux remarquables** : Villes, villages ou quartiers dont la conservation, la restauration, la réhabilitation ou la mise en valeur présente, au point de vue historique, architectural, archéologique, artistique ou paysager, un intérêt public classés ;
- Bâtiment ayant obtenu le **label Architecture contemporaine remarquable** ». ²⁸

Bien que cette obligation existe, les sanctions pour non-respect sont assez faibles : 1 500 euros pour les personnes physiques et à 7 500 euros pour les personnes morales après un an de relance et deux mises en demeure. ²⁹ En outre, les moyens humains pour vérifier la bonne application de cette obligation ne sont probablement pas légions.

Le décret tertiaire

Les bâtiments tertiaires en France représentent **970 millions de mètres carrés**, ayant consommé près de **20 millions de tonnes équivalent pétrole d'énergie** en 2020, dont 50% d'électricité. ³⁰

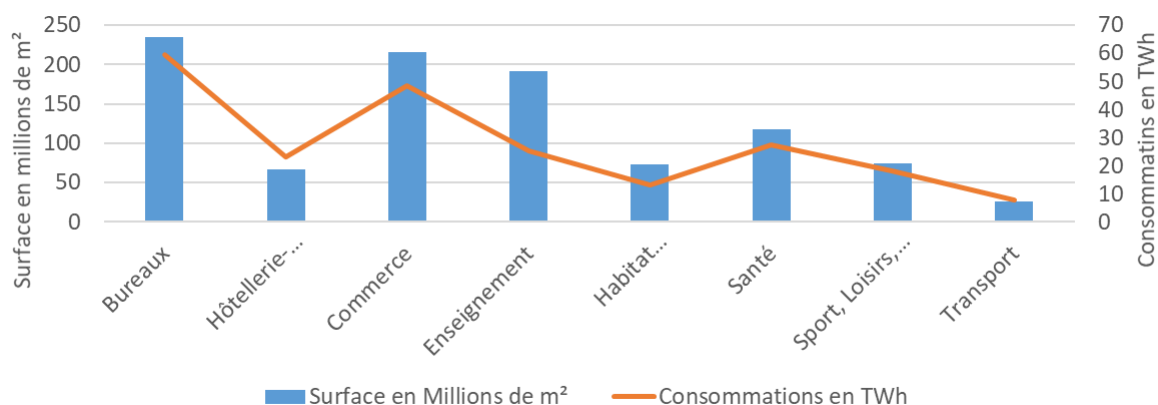


Figure 6 - Répartition du parc tertiaire par activité (source : Artelia)

La loi ELAN (Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique) de 2018 a engendré de nombreuses mesures, dont le Décret Tertiaire décrit dans son article 175. L'obligation **Eco Energie Tertiaire**, issue de ce décret, entre en vigueur en 2019. Elle impose aux bâtiments tertiaires une **réduction progressive de leur consommation d'énergie** au fur et à mesure des années : -40% en 2030, 50% en 2040, jusqu'à atteindre **-60% d'énergie consommée en 2050** par rapport à 2020. Les bâtiments concernés sont tous ceux du secteur

²⁸ « Rénovation : dans quels cas doit-on entreprendre des travaux d'isolation thermique ? », consulté le 7 septembre 2023, <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F33682>.

²⁹ « Chapitre V : Règles en matière énergétique (Articles R185-1 à R185-2) », Code la construction et de l'habitation §, consulté le 8 septembre 2023, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074096/LEGISCTA000043819583?dateVersion=08%2F09%2F2023&nomCode=bbVnEQ%3D%3D&page=1&query=L.+183-2+%C3%A0+L.+183-10&searchField=ALL&tab_selection=code&typeRecherche=date&anchor=LEGIARTI000043819585#LEGIARTI000043819585.

³⁰ ADEME, « Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 », novembre 2018.

tertiaire : de bureaux, services publics, enseignement, médico-social, justice, commerces, etc. La réglementation Eco Énergie Tertiaire les oblige à reporter chaque année leur consommation d'énergie via la plateforme OPERAT, afin de mesurer leur progression vers les objectifs du décret tertiaire.³¹

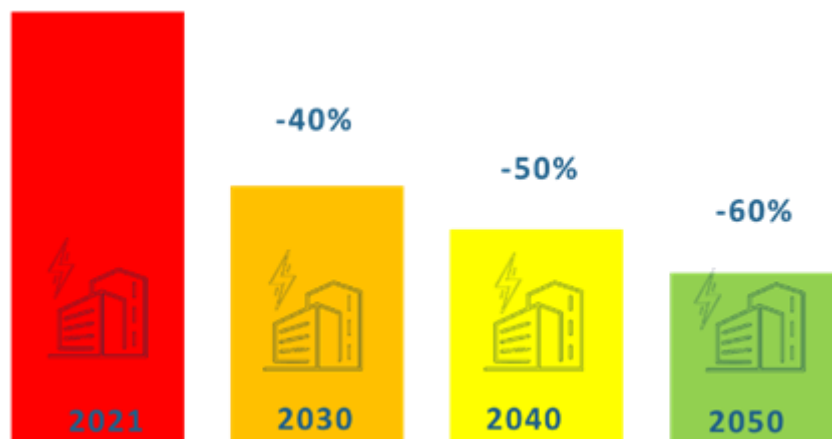


Figure 7 - Histogramme des obligations de réduction des consommations du décret tertiaire (source : Artelia)

Le Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des territoires préconise plusieurs mesures pour parvenir à atteindre ces seuils :

- « Amélioration de la performance énergétique du bâtiment via des travaux sur son **enveloppe** : isolation, menuiserie, protection solaire, etc.
- Installation d'**équipements performants** (chauffage, eau chaude, éclairage, etc.) et de dispositifs de contrôle et de gestion active de ces équipements.
- **Optimisation de l'exploitation** des équipements : contrat d'exploitation avec objectif de résultat, suivi de la gestion active des équipements, etc.
- Adaptation des **locaux à un usage économe en énergie** : adaptation de l'éclairage au poste de travail, extinction automatique de l'éclairage et des postes après fermeture, etc.
- Incitation des occupants à adopter un **comportement écoresponsable** : réduction du stockage de données informatiques, extinction des équipements, etc. »³²

Si l'énergie utilisée dans le bâtiment est une problématique de premier ordre, les **émissions de gaz à effet de serre** produites par le secteur du bâtiment ont un impact direct sur l'environnement, le réchauffement climatique et la santé humaine. Ainsi, à partir des années 2010 commencent timidement à apparaître des législations françaises autour de la notion de climat et de carbone.

³¹ « Éco Énergie Tertiaire (EET) », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 8 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/eco-energie-tertiaire-eet>.

³² « Éco Énergie Tertiaire (EET) ».

Le climat et le bas carbone, problématiques mondiales et stratégies françaises

Le GIEC

Pour se rappeler l'urgence et l'importance de réduire les émissions de gaz à effet de serre, il est toujours bon de citer quelques chiffres du GIEC.

Le 6ème rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat offre quelques rappels et faits importants pour se plonger dans ces notions de **réchauffement climatique anthropique** et de Gaz à Effet de Serre :

“ Les activités humaines, principalement par le biais des émissions de gaz à effet de serre, ont sans équivoque provoqué le réchauffement de la planète, la température à la surface du globe atteignant 1,1°C au-dessus de 1850-1900 en 2011-2020. (...)

Les émissions anthropiques nettes mondiales de GES ont été estimées à 59±6,6 GtCO₂-eq⁹ en 2019, soit environ 12 % (6,5 GtCO₂-eq) de plus qu'en 2010 et 54 % (21 GtCO₂-eq) de plus qu'en 1990. La part et la croissance les plus importantes des émissions brutes de GES concernent le CO₂ issu de la combustion des combustibles fossiles et des procédés industriels (CO₂-FFI), suivi du méthane, tandis que la croissance relative la plus élevée concerne les gaz fluorés (F-gaz), qui partaient de niveaux faibles en 1990.

En 2019, environ 79 % des émissions mondiales de GES provenaient des secteurs de l'énergie, de l'industrie, des transports et des bâtiments, et 22 % de l'agriculture, de la sylviculture et des autres utilisations des terres (AFOLU). “³³

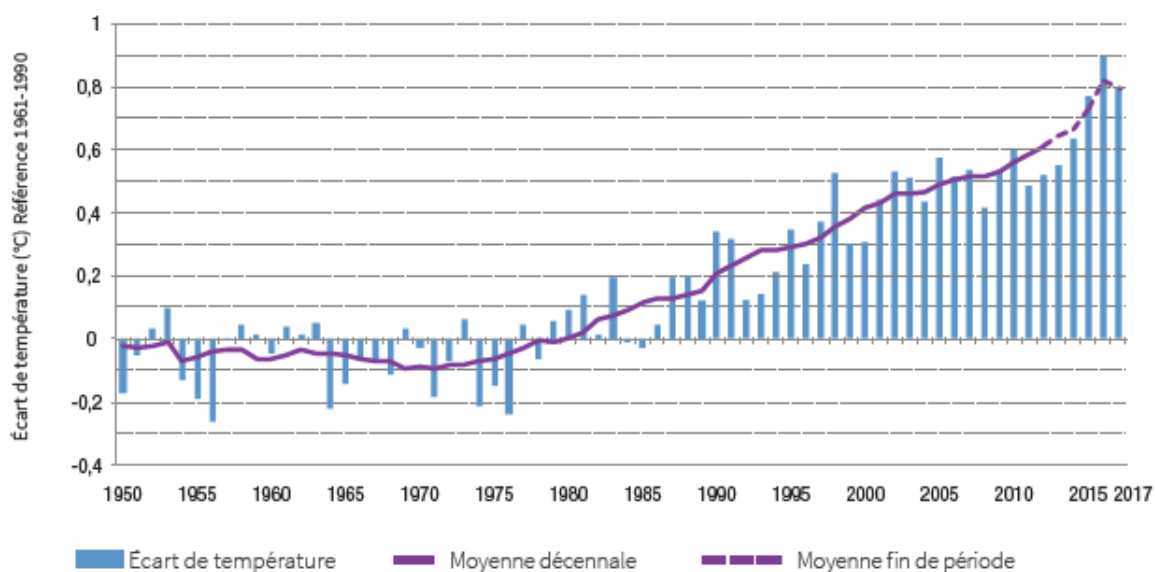


Figure 8 - Évolution de la température moyenne dans le Monde (source : NASE – GISS – août 2018 via Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 de l'ADEME)

³³ Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, José Romero, et al. « IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. » First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 juillet 2023. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

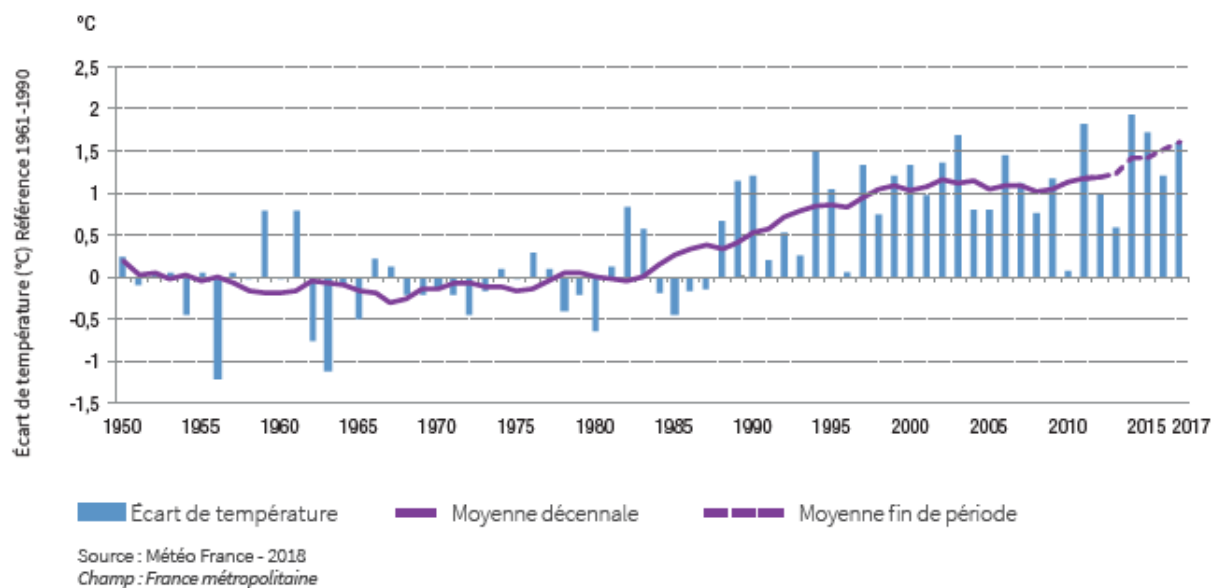


Figure 9 - Évolution de la température moyenne en France (source : NASE – GISS – août 2018 via Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 de l'ADEME)

Les politiques, réglementations et incitations à la réduction des émissions de GES sont de plus en plus nombreuses. Mais **la courbe d'émission de GES ne s'inverse pas**, au contraire. En 2019, les améliorations de l'intensité énergétique du PIB et de l'intensité carbonique de l'énergie ont été inférieures aux augmentations des émissions de GES dans le monde. La cause principale est l'augmentation des activités anthropiques dans le monde : industries, approvisionnement en énergie, transports, agriculture et bâtiments principalement. Face à ces émissions de Gaz à Effet de Serre un fait s'impose : **la température moyenne augmente dans le Monde et en France.**

Une Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) en France

« **Notre maison brûle et nous regardons ailleurs.** »³⁴

Face à ce constat de réchauffement climatique et à tout ce qu'il engendre - perte de biodiversité, épidémies³⁵, baisse de la qualité de l'air, catastrophes climatiques etc.... - la France a développé une **Stratégie Nationale du Bas Carbone (SNBC)** adoptée en 2015 et révisée en 2019. Cette feuille de route décrit les orientations et objectifs de réductions des émissions de gaz à effet de serre en France pour « mettre en œuvre la transition vers une économie bas-carbone dans tous les secteurs d'activités ». Pour cela, elle crée des **budgets carbonés** par secteur et par gaz, dont les seuils sont diminués tous les quatre ans.

En 2019, une évaluation du premier budget carbone a été conduite pour les années 2015 à 2018. Cependant, les résultats ne sont pas concluants : **la France ne réalise pas ses objectifs** avec un dépassement de 4 Mt CO₂eq en 2015, 14 millions en 2016, 28 millions en 2017 et 19 millions en 2018. Au total, le dépassement équivaut à 65 MtCO₂eq supplémentaires, auxquelles s'additionnent les 441 MtCO₂eq du budget carbone, pour un total de **506 millions de tonnes de CO₂ équivalent émises par la France entre 2015 et 2018.** Sur cette

³⁴ Jacques Chirac, IV^{ème} sommet de la Terre, 2002.

³⁵ « Changements environnementaux : vers de nouveaux risques pandémiques - Sanofi France », consulté le 17 septembre 2023, <https://www.sanofi.fr/fr/labsante/degradation-de-l-environnement-et-du-climat-vers-de-nouveaux-risques-pandemiques>.

période, le dépassement est de 15% par rapport au budget carbone prévisionnel du SNBC. Pour tenir les objectifs de neutralité carbone en 2050, le rythme de la décarbonation doit passer à -6% de 2019 à 2050 (contre -1,4% effectifs entre 2005 et 2017).³⁶

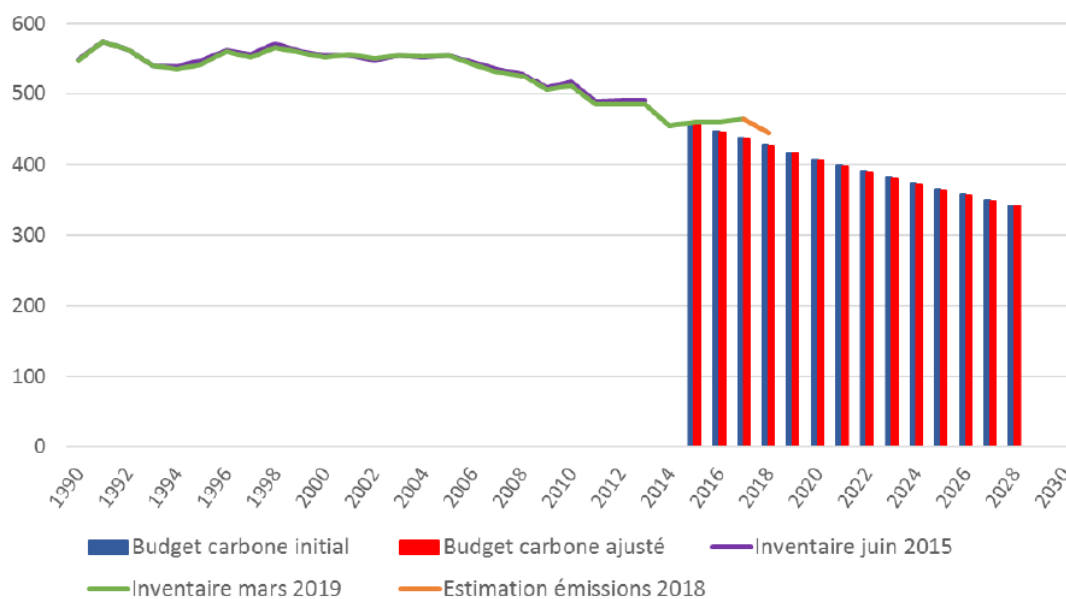


Figure 10 - Emissions historiques et budgets carbonés en MtCO₂eq (source : inventaire CCNUCC, format Kyoto, soumissions du 15 mars 2019 et 29 juin 2015, budgets carbone adoptés en 2015 et budgets carbone ajustés provisoirement en 2019)

Plusieurs causes expliquent ce dépassement, mais certains secteurs se détachent par leurs résultats moins performants que prévus, notamment le transport et le bâtiment (+41 et +39Mt CO₂eq cumulés entre 2015 et 2018). Concernant le secteur du bâtiment, ce dépassement serait "principalement imputable aux **rénovations dont le rythme et l'ampleur sont insuffisants**".³⁷ En effet, le gros des émissions carbone des bâtiments français est dû à leur consommation d'**énergie, souvent d'origine fossile** et donc très carbonée.³⁸

Pour réduire ces consommations, une des solutions est la rénovation. Cependant, dans un pays comptant **37,2 millions de logements**³⁹, rénover le parc de bâtiments dans son entièreté est un vaste chantier, particulièrement chronophage et surtout très coûteux. Le parc de logements existants possède un taux de renouvellement inférieur à 1 % par an.⁴⁰ Si le rythme de rénovation ne s'accélère pas, la France ne parviendra pas à tenir ses objectifs carbonés pour 2050. Afin de répondre à cet enjeu, de décarbonation du bâtiment, plusieurs lois ont été mises en place ces dernières années.

³⁶ Ministère de la Transition écologique (MTE), « Stratégie Nationale Bas Carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone ».

³⁷ Ministère de la Transition écologique (MTE). Stratégie Nationale Bas Carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone.pdf (2020).

³⁸ Ministère de la Transition écologique (MTE), « Stratégie Nationale Bas Carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone ».

³⁹ Datalab et Ministère de la Transition écologique (MTE), « Chiffres clés du logement - Editions 2022 », juillet 2022.

⁴⁰ PACTE (Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et de la Transition Energétique), « Analyse détaillée du parc résidentiel existant - version 2.0 », juillet 2017.

Loi Énergie - Climat

« **La route est droite mais la pente est forte.** »⁴¹

Le 8 novembre 2019, la loi énergie-climat est adoptée afin d'**œuvrer vers la neutralité carbone en 2050** exigée par la Stratégie Nationale Bas Carbone de la France. Ses 69 articles définissent des objectifs concrets à la politique énergétique et climatique de la France, articulés autour de quatre axes majeurs :

- La sortie progressive des énergies fossiles et le développement des énergies renouvelables
- La lutte contre les passoires thermiques
- L'instauration de nouveaux outils de pilotage, de gouvernance et d'évaluation de la politique climatique
- La régulation du secteur de l'électricité et du gaz.

Plusieurs actions clés sont à retenir pour le bâtiment :

- Réduction de 40 % de la consommation d'énergies fossiles entre 2012 et 2030
- Installation obligatoire de panneaux solaires pour les entrepôts et bâtiments commerciaux d'emprise au sol supérieure à 1000m²
- Sécuriser le cadre juridique de l'évaluation environnementale, notamment pour favoriser le photovoltaïque et la géothermie
- Création de l'entité juridique de communauté d'énergie renouvelable
- Interdiction progressive de location des passoires thermiques
- Création d'outils de pilotage, de gouvernance et d'évaluation de la politique climat française
- Maîtrise des prix de l'énergie.⁴²

Loi climat et résilience

Deux ans après la loi Énergie - Climat, la loi Climat et Résilience est promulguée le 24 août 2021. Tirée des travaux de la Convention citoyenne pour le climat, cette loi transversale traite notamment du bâtiment à travers plusieurs mesures :

- Gel du loyer des passoires énergétiques
- Interdiction de mettre en location les logements mal isolés (mesurés via les Diagnostics de Performance Énergétique (DPE)) : les étiquettes G à compter de 2025, les F en 2028 et les E en 2034
- Financement du reste à charge (mécanisme de financer pour régler le reste à charge des travaux de rénovation des ménages les plus modestes)
- **Zéro Artificialisation Nette** (ZAN) des sols en 2050, division par 2 du rythme d'artificialisation des sols d'ici 2030, applicable par toutes les collectivités territoriales
- Obligation d'installer des panneaux solaires ou des toits végétalisés quand on construit ou rénove lourdement de grands bâtiments (abaissement du seuil à 500m² et obligation étendue aux immeubles de bureaux de plus de 1000m² et aux parkings de plus de 500m²)⁴³

⁴¹ Jean Pierre Raffarin, 3 juillet 2002.

⁴² Ministères Écologie Énergie Territoires, « Loi énergie-climat », consulté le 1 août 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>.

⁴³ Ministères Écologie Énergie Territoires, « Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies », consulté le 1 août 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>.

À travers plusieurs mesures, cette loi encourage l'augmentation de la rénovation en France, à travers **l'interdiction à la location des passoires énergétiques** ou le **Zéro Artificialisation Nette** qui suppose la reconstruction de la ville sur la ville au lieu de l'étalement urbain.

Le Label Bas Carbone

En novembre **2018**, le Ministère de la Transition Énergétique crée, via un décret et un arrêté, le Label Bas Carbone qui vise à encourager la réduction des émissions de GES à horizon 2050 dans le cadre de la Stratégie Nationale Bas Carbone. Ce label a concerné tout d'abord l'agriculture et la sylviculture, mais il tend désormais à inclure d'autres secteurs, dont celui du bâtiment. En décembre 2022, un groupe scientifique et technique se crée ainsi pour plus prendre en compte la biodiversité et commencer à étudier le projet de méthode Herbiers de posidonie et le projet de méthode Bâtiments biosourcés.

En termes d'impacts, à la date du 31 juillet 2023, le site recensait 628 projets labellisés, 2,2 tCO₂ potentielles évitées et 148 projets financés à 100%. Pour autant, seulement **2 projets de rénovations labellisés** y étaient recensés, et **0 projets de constructions neuves**. Le Label Bas Carbone en est donc encore clairement à ses débuts en ce qui concerne les projets de bâtiment. Mais bien entendu, ce n'est pas l'outil phare français en ce qui concerne le carbone dans le bâtiment...

De E+C- à la RE2020

La Réglementation Environnementale 2020 est la grande nouveauté ... 2022.

En retard de deux ans, cette réglementation a subi un « délai censé permettre à la filière, dont les concepteurs et promoteurs, d'adapter leurs projets à venir aux nouvelles exigences ». ⁴⁴ On pourrait entendre par là que de lobbys mécontents aient demandé un peu plus de répit.

La RE2020 s'inscrit dans la continuité de la Réglementation Thermique 2012 et la remplace. Toutefois, en plus d'être une réglementation thermique, la RE2020 est également une réglementation environnementale, avec notamment des **seuils d'émissions de gaz à effet de serre** à respecter.

A l'heure actuelle, la rénovation n'est pas concernée par la RE2020. Seuls les "bâtiments et parties de bâtiments [**neufs**] à usage d'habitation, de bureaux et d'enseignement primaire ou secondaire soumis à l'article R. 111-20 du Code de la construction et de l'habitation, et à la construction de parcs de stationnement associés à ces constructions" sont concernés par la RE2020. Les autres typologies de bâtiments devraient prochainement être concernés par la réglementation, les calculs des seuils de référence sont en cours.

Pour préparer cette réglementation, la France avait créé une **expérimentation** en **2016**, intitulée **Énergie Positive, Réduction Carbone**, ou E+C- pour les intimes. Ce référentiel comptait plusieurs niveaux de performances sur deux volets différents :

- Énergie, avec un indicateur BilanBepos prenant en compte les consommations et la production d'énergie - niveaux allant de E0 à E4 ;
- Carbone, avec les indicateurs EGES et EGES PCE rapportant respectivement les émissions de gaz à effet du bâtiment (comprenant Énergie, Eau, Chantier, Produits de Construction et Équipements), et les émissions de GES des PCE plus spécifiquement - niveaux allant de C0 à C2.

⁴⁴ « Avec six mois de retard, la RE2020 va enfin démarrer... en 2022 », 18 février 2021, L'Usine Nouvelle édition, <https://www.usinenouvelle.com/article/avec-six-mois-de-retard-la-re2020-va-enfin-demarrer-en-2022.N1062519>.

Sur les bases de cette expérimentation, la RE2020 devient réglementaire en 2022. La France fait désormais partie des pays Européens ayant adopté une réglementation sur les émissions carbone dans le bâtiment : Danemark, Finlande, Norvège, Pays-Bas, Royaume Uni et Suède. La notion de bas carbone en France dans le bâtiment est désormais indissociable de cette nouvelle réglementation.⁴⁵ Le prochain chapitre s'attèlera donc à en expliquer les tenants et les aboutissants pour mieux comprendre comment la rénovation bas carbone peut être envisagée en France.

⁴⁵ One Click LCA, « Construction carbon regulations in Europe - Review & best practises », octobre 2022.

Chapitre 2.

Au cœur de l'ACV, dans les rouages de la réglementation

« Au lieu d'attendre l'espoir, cherchez l'action. »⁴⁶

Depuis 2022, la France est dotée d'une Réglementation Environnementale, la RE2020, qui vise à l'amélioration du confort et des performances énergétiques des bâtiments **neufs**, tout en réduisant leurs émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) à travers trois grandes thématiques :

- Poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et la baisse des consommations des bâtiments neufs
- Diminuer l'impact sur le climat des bâtiments neufs en prenant en compte l'ensemble des émissions du bâtiment sur son cycle de vie
- Permettre aux occupants de vivre dans un lieu de vie et de travail adapté aux conditions climatiques futures en poursuivant l'objectif de confort en été⁴⁷

Le premier objectif, tourné autour de l'**énergie** et des consommations est évalué selon plusieurs indicateurs :

- L'indicateur des besoins bioclimatiques (**Bbio**) pour atteindre une baisse de 30 % par rapport à la RT 2012.
- La consommation des énergies primaires, ou **CEP**.
- La consommation des énergies primaires non renouvelables, ou **CEPnr**.

Le deuxième objectif traite de l'**impact environnemental** en évaluant via une Analyse de Cycle de Vie (ACV) les émissions de GES liées à :

- La consommation d'énergie (**ICénergie**)
- La construction, c'est-à-dire des matériaux (**Icomposant**), du chantier (**Ichantier**), de la consommation d'eau (**Iceau**) et de la parcelle (**Icparcèle**).

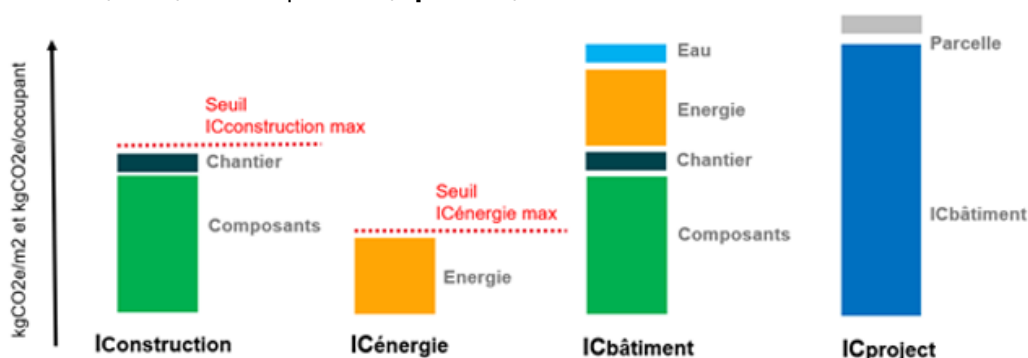


Figure 11 - Indicateurs Carbone de la RE2020 (source : Artelia)

⁴⁶ Greta Thunberg, 2019.

⁴⁷ « Réglementation environnementale RE2020 », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 2 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>.

Le troisième objectif se concentre sur les conditions de vie et de climat dans le futur, et notamment le **confort d'été**. L'indicateur retenu est le **degré heure (DH) d'inconfort**, c'est-à-dire le niveau d'inconfort perçu par les occupants sur l'ensemble de la saison chaude.

La RE2020 est bien entendu une avancée considérable **vers des bâtiments moins « carbonés », moins énergivore et plus résilients**. Mais elle ne traite pour le moment que de bâtiments neufs, et seulement certaines typologies.

Dans cette étude, nous traiterons avant tout de la notion d'impact environnemental, que la RE2020 développe en calculs via une méthode d'**Analyse de Cycle de Vie (ACV)**.

L'Analyse de Cycle de Vie en France

Le B.A. BA de l'ACV

La RE2020 a **placé le calcul des émissions de gaz à effet de serre au cœur de la loi**. Cependant compter le carbone (c'est-à-dire le dioxyde de carbone (CO₂) ou autre gaz à effet de serre rapporté à son Pouvoir de Réchauffement Global (PRG)) est une science en développement avec des subtilités de méthodes.

La norme ISO 14044 définit dans de nombreux pays ce qu'est une Analyse de Cycle de Vie (Life Cycle Assessment ou LCA en anglais) :

« L'ACV traite les aspects environnementaux et les impacts environnementaux potentiels (par exemple l'utilisation des ressources et les conséquences environnementales des émissions) tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'acquisition des matières premières à sa production, son utilisation, son traitement en fin de vie, son recyclage et sa mise au rebut (à savoir, du berceau à la tombe). »⁴⁸

Une étude assez proche de l'ACV est l'étude d'Inventaire du Cycle de Vie (ICV), qui couvre ces premières phases mais pas celles d'évaluation de l'impact et d'interprétation. Quant au Bilan Carbone, ou Bilan de Gaz à Effet de Serre, il couvre toutes ces phases, mais n'évaluent pas les mêmes impacts que l'ACV : il se concentre seulement sur les émissions de gaz à effet de serre, alors que **l'ACV étudie également l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification des sols et de l'eau, l'épuisement des ressources abiotiques, la pollution de l'eau et de l'air, l'utilisation d'énergie, de combustibles, d'eau douce** etc.

La Norme ISO distingue quatre phases différentes pour réaliser une étude d'ACV :

- La phase de définition des objectifs et du champ de l'étude
- La phase d'inventaire
- La phase d'évaluation de l'impact
- La phase d'interprétation

La première phase définit les hypothèses de l'étude, notamment son **périmètre** et son **unité fonctionnelle**. Nous reparlerons par la suite des hypothèses de la RE2020. En RE2020, la deuxième phase établit **une liste des**

⁴⁸ « ISO 14044 : Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices », consulté le 2 septembre 2023, <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:fr>.

différents Produits de Construction et Equipements (PCE) présents dans le bâtiment, ainsi que leur quantité. La troisième phase, évalue l'impact de la manière suivante en RE2020 :

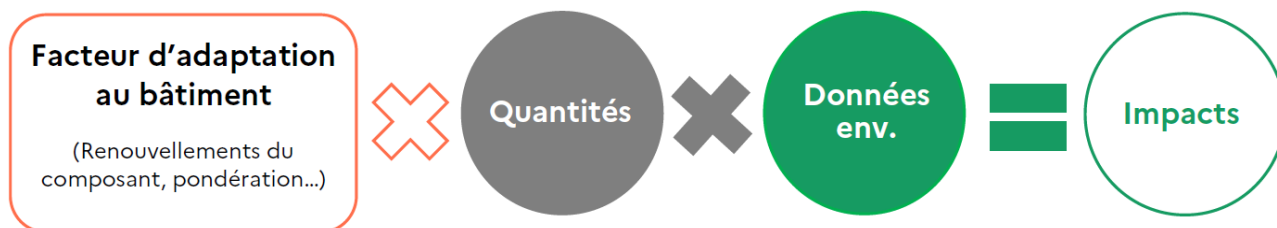


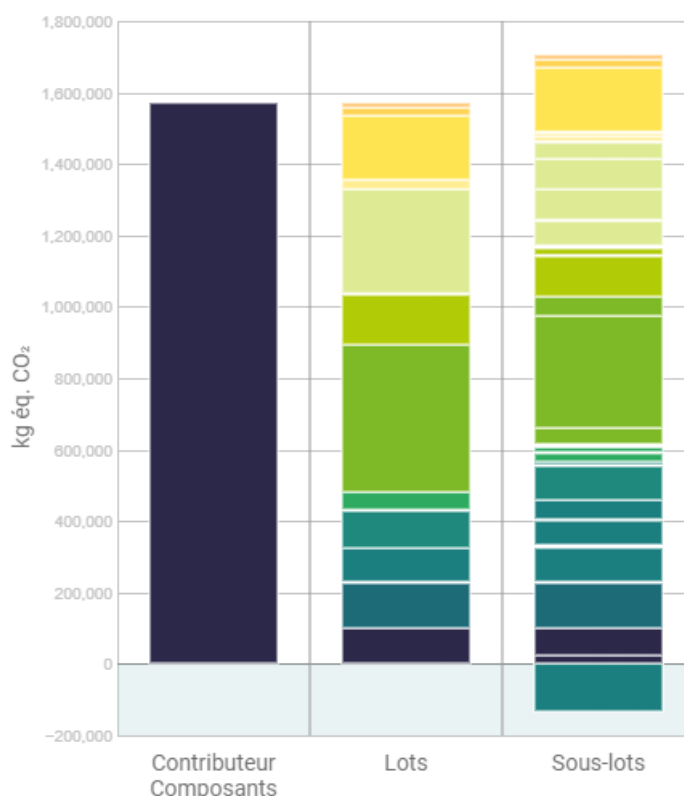
Figure 12 - Principe de calcul d'une contribution aux impacts en RE2020 (source : guide RE2020 du MTE et du CEREMA)

Les **données environnementales** utilisées pour représenter un PCE sont tirées de la **base INIES**, la base nationale des données environnementales et sanitaires de référence des produits de construction et équipement.

Enfin, la quatrième phase, la phase d'interprétation, fait notamment référence en RE2020 à la **comparaison avec des seuils** qui y sont établis. Si le projet dépasse un certain nombre de kg de CO2 équivalent émis par m² de surface de plancher, alors le projet n'est pas réglementaire et le permis de construire n'est pas accordé.

Par mesure de simplicité, les données environnementales sont généralement réparties en 13 lots, les 7 premiers étant « architecturaux » et les 6 autres étant plus « techniques » :

1. Voirie et Réseaux divers
2. Fondations et infrastructure
3. Superstructure - Maçonnerie
4. Couverture - Etanchéité - Charpente - Zinguerie
5. Cloisonnement - Doublage - Plafonds suspendus - Menuiseries intérieures
6. Façades et menuiseries extérieures
7. Revêtements des sols, murs et plafonds - Chape - Peintures - Produit de décoration
8. CVC
9. Installations sanitaires
10. Réseaux énergie - courant fort (CFO)
11. Réseaux de communication - courant faible (CFA)
12. Appareils élévateurs et autres équipements de transport intérieur
13. Equipement de production locale d'électricité



Lot	Impact [kg éq. CO ₂ /m ² Sref]	Contribution [%]
Lot 13 Equipement de production locale d'électricité	0	0
Lot 1 Voirie et Réseaux divers	65	6.5
Lot 2 Fondations et infrastructure	83	8.2
Lot 3 Superstructure - Maçonnerie	60	6
Lot 4 Couverture - Etanchéité - Charpente - Zinguerie	68	6.8
Lot 5 Cloisonnement - Doublage - Plafonds suspendus - Menuiseries intérieures	31	3.1
Lot 6 Façades et menuiseries extérieures	266	26.4
Lot 7 Revêtements des sols, murs et plafonds - Chape - Peintures - Produit de décoration	90	8.9
Lot 8 CVC	187	18.5
Lot 9 Installations sanitaires	17	1.7
Lot 10 Réseaux énergie - courant fort	115	11.4
Lot 11 Réseaux de communication - courant faible	15	1.5
Lot 12 Appareils élévateurs et autres équipements de transport intérieur	9	0.9

Figure 13 - Exemple d'ACV d'un projet de bureau de 1600m²SU - Emissions totales dynamiques de GES (source : Vizcab Explo)

Maintenant que nous avons étudié les concepts généraux de l'ACV, rentrons un peu plus dans le détail des calculs en France.

L'ACV dynamique, c'est de la dynamite⁴⁹

Pour la RE2020, la France a fait le choix, très contesté par certains lobbys du BTP, d'opter pour une Analyse de Cycle de Vie **dynamique**, par opposition à l'ACV statique qui est largement adoptée dans le reste du monde et décrite dans les normes ISO.

Pour faire simple, l'ACV statique considère que les émissions carbonées d'un produit sont toutes émises aujourd'hui, même celles liées à son exploitation et à sa fin de vie. Dans cette approche, le stockage temporaire de carbone durant la vie du produit n'est pas pris en compte. Cette méthode est celle utilisée par E+C-.

En revanche, l'ACV **dynamique** distingue les émissions carbonées en fonction du moment où elles sont émises : avec cette méthode, **plus une émission a lieu tôt, plus elle a un impact carbone élevé**. Mais pourquoi cela ?

Tout d'abord, **les Gaz à Effet de Serre, mis à part la vapeur d'eau, mettent de très nombreuses années à être évacués de l'atmosphère** une fois qu'ils sont émis. Les gaz à effet de serre peuvent être d'origine « naturelle » (vapeur d'eau et dioxyde de carbone font partie du cycle de vie des végétaux par exemple) ou

⁴⁹ Titre emprunté à Alice Delaleu, « RE2020 : l'ACV dynamique, c'est de la dynamite écologique et ... politique ! », Chroniques d'architecture, 9 février 2021, <https://chroniques-architecture.com/re2020-acv-dynamique-cest-de-la-dynamite/>.

d'origine anthropique. Le problème actuel de réchauffement climatique est lié à ces gaz produits par l'humain, rejetés dans l'atmosphère, et qui a eu pour effet de créer un « forçage radiatif » d'environ 1% du rayonnement solaire reçu. Jean-Marc Jancovici, ingénieur créateur du bilan carbone, résume ce phénomène ainsi : « Dit autrement, à travers ses émissions de gaz à effet de serre l'homme a modifié la situation « comme si » le soleil avait augmenté sa puissance d'environ 1%. »⁵⁰

A travers le graphique ci-dessous, on observe que le CO₂ ne commence à être évacué significativement qu'au bout d'une centaine d'années. Pour le CF₄, aucune diminution de son forçage radiatif résiduel n'est observée, même au bout de 1000 ans.

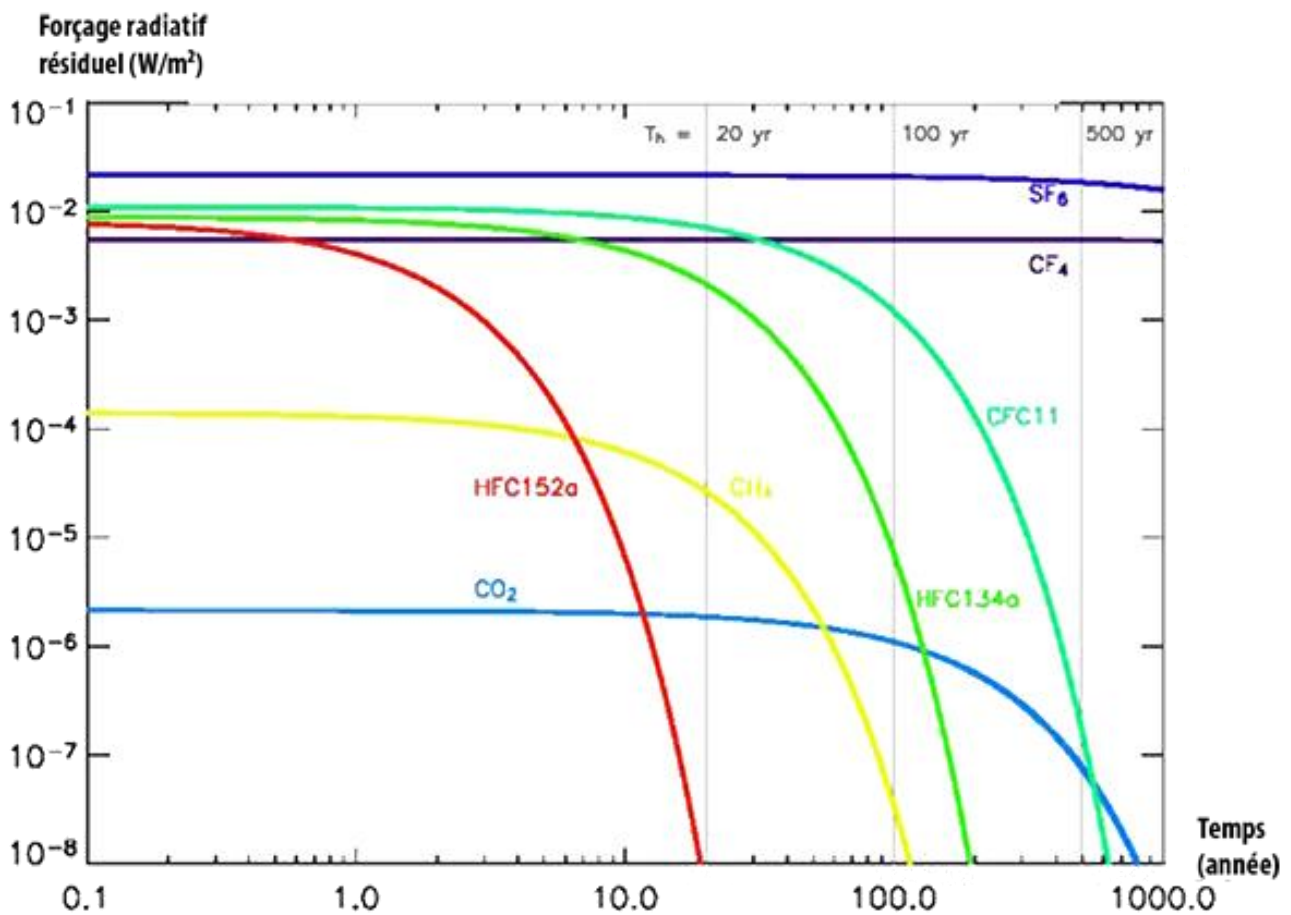


Figure 14 - Forçage radiatif résiduel, au cours du temps, et en watts par mètre carré, provenant d'une d'un million de tonnes de gaz émises à l'instant 0 (source : D. Hauglustaine, LSCE via jancovici.com)

⁵⁰ « Quels sont les gaz à effet de serre ? – Jean-Marc Jancovici », consulté le 3 septembre 2023, <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>.

Gaz	Durée de séjour approximative dans l'atmosphère
Gaz carbonique (CO ₂)	100 ans (pour l'élimination d'une grosse moitié du surplus créé)
Méthane (CH ₄)	12 ans
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	120 ans
Halocarbures (CnHalp)	jusqu'à 50.000 ans

Figure 15 - Durée de séjour approximative de GES dans l'atmosphère (source : jancovici.com)

L'ACV dynamique prend en compte de manière approchée cette cinétique de dégradation des Gaz à Effet de Serre. Pour cela, des coefficients de **pondération** sont appliqués aux émissions de GES en fonction du moment où elles ont été émises. Une émission à l'année 0 sera multipliée par un coefficient de 1. Mais une émission à l'année 50 sera multipliée par un coefficient de 0,58 (ou de 0,88 s'il s'agit de fluides frigorigènes).⁵¹

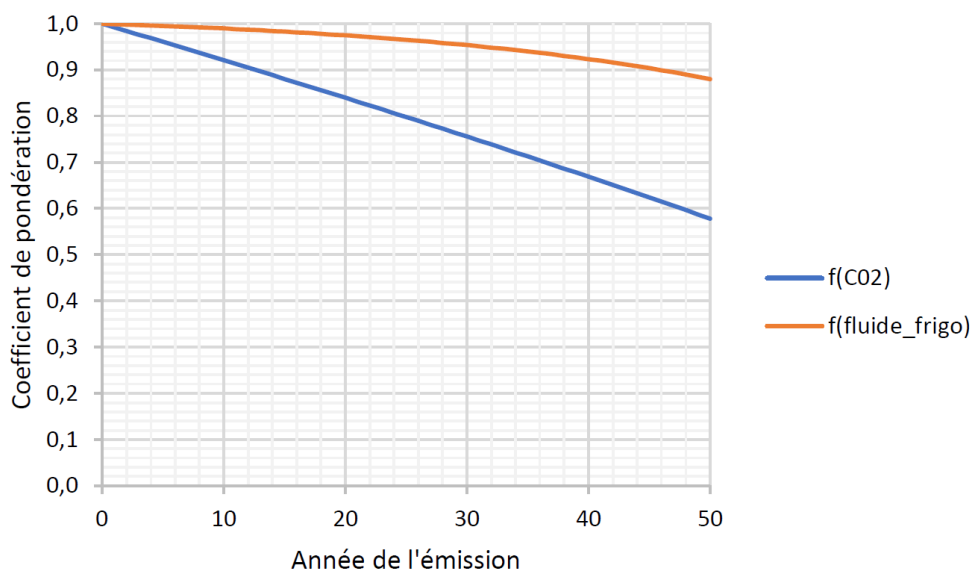


Figure 16 - Coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV en RE2020 (source : guide RE2020 du MTE et du CEREMA)

En plus de prendre en compte de manière approchée le fait que les gaz à effet de serre mettent un certain temps à se dégrader dans l'atmosphère, cette méthode permet de mettre en avant **l'urgence du changement climatique** et la **nécessité d'émettre moins de gaz à effet de serre dès aujourd'hui**.⁵² En ce sens, la RE2020 favorise grandement le stockage de carbone dans la construction. Les matériaux agissant comme **des puits de carbone** sont généralement issus du vivant. Ils stockent naturellement du carbone, et ne le relâchent que lorsqu'ils se décomposent ou sont incinérés ; ils sont donc largement favorisés par cette méthode dynamique. Non seulement ils émettent peu durant leur fabrication, mais ils permettent en outre de stocker du carbone

⁵¹ Nicolas Cabassud et al., « Guide RE2020 DHUP / Cerema » (MTE (Ministère de la Transition écologique) - (CEREMA) Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, mars 2022), https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_re_maj3_vf.pdf.

⁵² « RE 2020 : Points clés de la nouvelle réglementation environnementale », Vizcab, consulté le 2 septembre 2023, <https://vizcab.io/reglementation-environnementale-re-2020>.

pendant des années, laissant plus de temps à l'atmosphère pour évacuer les nombreux gaz à effet de serre anthropiques accumulés jusqu'alors.

Données environnementales statiques		ACV dynamique : application des coeff. de pondération	
Étapes d'ACV	kg de CO ₂ éq		kg de CO ₂ éq
Production	- 600	année 0, coeff 1 x - 600	- 600
Processus de construction	30	année 0, coeff = 1 x 30	30
Utilisation	0	année 1 à 49, coeff = 0,984 à 0,587 x 0	0
Fin de vie	700	année 50, coeff 0,578 x 700	404,6
Total cycle de vie	130		-165,4

Figure 17 - Etude d'une poutre en bois en ACV statique et dynamique (source : guide RE2020 du MTE et du CEREMA)

L'exemple ci-dessus permet de mettre en pratique ces coefficients de pondération et de constater qu'effectivement le bois de structure, matériau biosourcé stockant du carbone, est fortement valorisé en RE2020.

Le mystérieux Module D, et autres étapes de vie d'un produit

Maintenant que nous avons vu les concepts généraux et physiques qui se cachent derrière l'ACV en RE2020, découvrons plus en profondeur la manière dont fonctionnent les **fiches environnementales** qui fournissent les données nécessaires aux calculs d'ACV.

La Norme NF EN15978 décrit la méthode de calcul reposant sur l'analyse du cycle de vie (ACV) et d'autres informations environnementales quantifiées. Elle définit ainsi le découpage du cycle de vie d'un bâtiment, et par extension celui des produits et équipements le constituant :

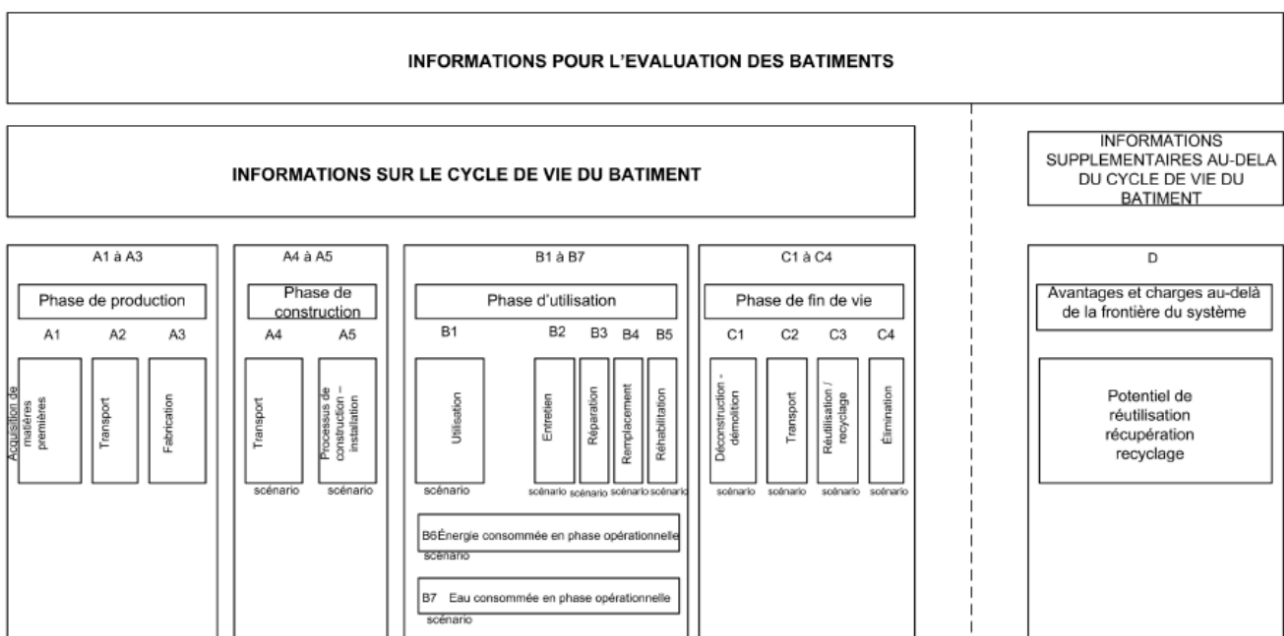


Figure 18 - Découpage par phases et modules du cycle de vie d'un bâtiment selon la norme NF EN15978

Les quatre premiers encadrés sont relativement clairs et compréhensibles :

- **Phase de production :** A1 - A3
- **Phase de construction :** A4 - A5
- **Phase d'utilisation :** B1 - B7
- **Phase de fin de vie :** C1 - C4



Figure 19 - Principe de l'ACV (source : Guide RE2020 du CEREMA et du MTE)

En règle générale, l'impact carbone schématique d'un Produit de Construction ou Equipement (PCE) au cours de sa vie aura donc le profil ci-dessous. Evidemment ce profil varie en fonction du matériau. Le module B du béton sera par exemple négatif grâce au phénomène de carbonatation (processus de vieillissement du béton où le CO₂ de l'atmosphère se dissout au contact du béton en formant un acide dans les pores du matériau

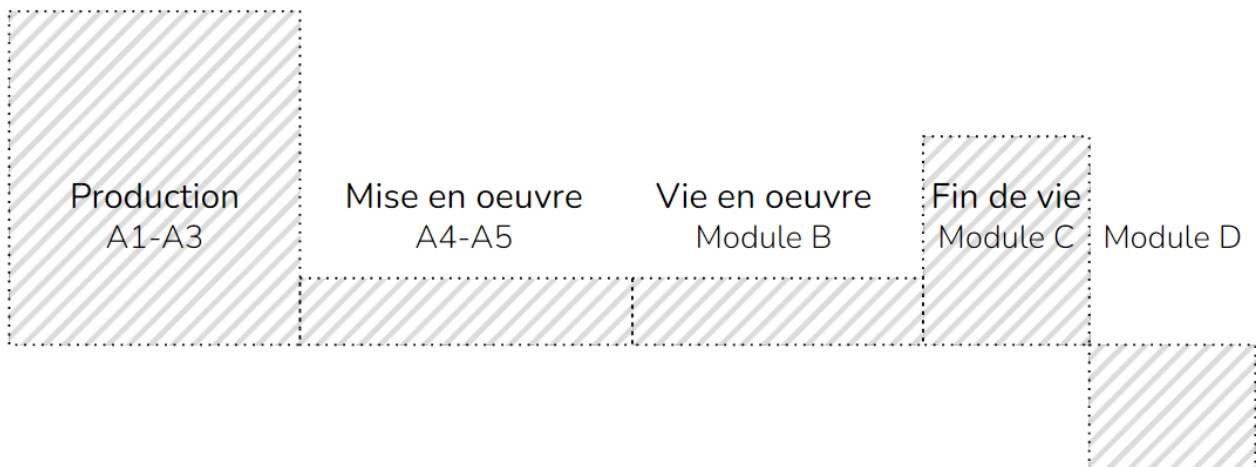


Figure 20 - Schéma de l'impact carbone d'un PCE en fonction du temps et de ses phases de vie

Mais à quoi réfère donc la cinquième et dernière phase, plus connue sous le nom de module D ? D'après la norme, cette phase correspond aux « **Avantages et charges au-delà de la frontière du système** », c'est-à-dire le potentiel de **réutilisation, récupération et recyclage**.

Poursuivons l'exemple d'un élément porteur en bois résineux de France. Pour obtenir son module D, il est nécessaire d'établir dans un premier temps les **scénarios de fin de vie du produit** et des différents matériaux utilisés pour le mettre en oeuvre (acier pour la quincaillerie par exemple) :

Paramètre	Scénario	Valeur pour le produit de référence
Broyage, tri et manutention de la totalité de l'élément porteur	Électricité broyage et tri : 0,030 kWh/kg Gasoil manutention : 0,0437 MJ/kg Déchets collectés : - Bois : 100% - Acier : 100%	Électricité broyage et tri : 14,91 kWh par UF Gasoil manutention : 21,72 MJ/UF Déchets collectés : - Bois : 495 kg par UF - Acier : 1,83kg par UF
Traitement Bois	Vers recyclage : 57,2% Vers stockage non dangereux : 17,3% Vers valorisation énergétique : 25,5%	Vers recyclage : 283 kg/UF Vers stockage non dangereux : 86 kg/UF Vers valorisation énergétique : 126 kg/UF
Traitement Acier	Vers recyclage : 95% Vers stockage non dangereux : 5%	Vers recyclage : 1,74 kg/UF Vers stockage non dangereux : 0,09 kg/UF

Figure 21 - Scénario de fin de vie pour la fiche collective "30452 - Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives...) (v.1.4)" de la base INIES, pour 1m3 de matériau

Une fois ces scénarios établis, les calculs du module D se basent sur les masses de matières recyclées composant le produit étudié, de matières valorisées énergétiquement et de matières recyclées ; sur les proportions de ces matières dans les procédés ; et sur les économies de matière/d'énergie réalisées.

- Pour l'acier recyclé :
 - Bénéfice acier recyclé fin de vie : $M_{sval} * R * (IS_{sval} - IV_{sval})$
 - IS_{sval} : Transport vers recyclage et refonte (aciérie avec four électrique)
 - IV_{sval} : Production de fonte primaire
 - Bénéfice acier recyclé entrant : $- MS * (IS - IV)$
 - IS : Production et approvisionnement de ferraille
 - IV : Production de fonte primaire
- Pour le bois recyclé :
 - Bénéfice bois recyclé fin de vie : $M_{sval} * R * (IS_{sval} - IV_{sval})$
 - IS_{sval} : Transport vers recyclage (fabricant de panneau)
 - IV_{sval} : Production et approvisionnement de bois d'industrie
 - Bénéfice bois recyclé entrant : *nul puisqu'aucun bois recyclé entrant*
- Pour le bois stocké non dangereux :
 - Bénéfice valorisation énergétique : $MS_{sval} (IS_{sval} - IV_{sval} * PCIS_{sval} * RE_{sval})$
 - IS_{sval} : Production de chaleur à partir du stock
 - IV_{sval} : Production de chaleur substituée (charbon, gaz, fioul)
- Pour le bois valorisé énergétiquement :
 - Bénéfice valorisation énergétique : $MS_{sval} (IS_{sval} - IV_{sval} * PCIS_{sval} * RE_{sval})$
 - IS_{sval} : Production de chaleur à partir du stock
 - IV_{sval} : Production de chaleur substituée (charbon, gaz, fioul)

Figure 22 - Calcul du module D pour la fiche collective "30452 - Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives...) (v.1.4)" de la base INIES, pour 1m3 de matériau

En E+C-, le module D était multiplié par un facteur 1/3 dans le calcul d'impact carbone. **Mais en RE2020, le module D gagne de la place dans les calculs.** Il est en effet dynamiquement comptabilisé dans l'indicateur **Ic composants** comme toutes les étapes de vie d'un Produit de Construction ou Equipement : il est additionné aux impacts des autres phases, et est lui aussi multiplié par un coefficient de pondération lié à l'année d'émission des GES.

Pour conclure, l'ACV en RE2020 balaie de nombreuses thématiques environnementales : production de déchets, utilisation d'eau douce, utilisation d'énergie renouvelable ou non, formation d'ozone photochimique, eutrophisation, pollution de l'eau et de l'air, acidification des sols et de l'eau ... **Mais la seule thématique qui possède des seuils réglementaires à l'heure actuelle est la contribution au réchauffement climatique.**











 Réchauffement climatique en kg eq. CO ₂ /UF	A1-A3 - Étape de production 			A1 - Approvisionnement en matières premières	-6,95E+02							
	A2 - Transport			A4 - Transport	1,26E+01							
	A3 - Fabrication			A5 - Processus de construction-installation	1,59E+01							
 Appauvrissement de la couche d'ozone en kg eq. CFC 11 /UF				B1 - Utilisation	0,00E+00							
				B2 - Maintenance	0,00E+00							
 Acidification des sols et de l'eau en kg eq. SO ₂ /UF				B3 - Réparation	0,00E+00							
				B4 - Remplacement	0,00E+00							
 Eutrophication en kg eq. PO ₄ ³⁻ /UF				B5 - Réhabilitation	0,00E+00							
				B6 - Utilisation de l'énergie	0,00E+00							
 Formation d'ozone photochimique en kg eq. Éthène /UF				B7 - Utilisation de l'eau	0,00E+00							
				C1 - Démolition-déconstruction	1,57E+01							
 Épuisement des ressources abiotiques – éléments en kg eq. Sb /UF				C2 - Transport	2,40E+00							
				C3 - Traitement des déchets	6,73E+02							
 Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles en MJ PCI /UF				C4 - Élimination des déchets	4,49E+01							
				D - Bénéfices et charges au-delà des frontières du système	-1,14E+02							
 Pollution de l'air en m ³ /UF												
 Pollution de l'eau en m ³ /UF												

Figure 23 – Extrait de l'ACV de la fiche collective "30452 - Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives...) (v.1.4)" de la base INIES, pour 1m³ de matériau

Compter le carbone, un art complexe

L'unité fonctionnelle d'un bâtiment permet de rapporter les calculs d'Analyse de Cycle de Vie à des données concrètes, et de pouvoir comparer les ACV de différents bâtiments. Les seuils de la RE2020 sont exprimés en **kgCO₂e./m²Sr_{éf}/50 ans**. Derrière cette unité fonctionnelle indigeste, se fixent des hypothèses spatiales, fonctionnelles et temporelles que nous allons étudier ici.

«La norme ISO 14044 définit la frontière du système comme l'ensemble de critères qui spécifient quels processus élémentaires font partie du système de produits P (ISO, 2006). (...) La frontière d'évaluation d'une opération d'aménagement peut être interprétée comme la somme de trois périmètres de premier plan :

- Un périmètre spatial : Le périmètre spatial définit sur quelle emprise géographique les activités doivent être prises en compte ;
- Un périmètre fonctionnel : Le périmètre fonctionnel définit les contributeurs à prendre en compte dans l'évaluation de l'opération d'aménagement. Il peut s'agir de produits (produits de construction, ouvrage, etc.) ou de services (exemple : consommation d'énergie). La description des frontières fonctionnelles de l'étude est donc établie comme la liste des contributeurs à inclure.
- Un périmètre temporel : Le périmètre temporel définit la durée pendant laquelle les activités du territoire doivent être prises en compte dans l'évaluation. »⁵³

Un périmètre temporel : la durée de vie

Le temps c'est de l'argent ... et du carbone amorti.

Le périmètre temporel est de première importance dans tout calcul d'ACV. En effet, les émissions de GES d'un temple romain de 2000 ans et d'une maison pavillonnaire du XXI^{ème} siècle qui sera détruite au bout de 40 ans ne sont pas du tout amorties de la même manière. Dans le premier cas, même si les émissions initiales sont plus importantes, le bâtiment continuera d'être utilisé pendant 2000 ans, rendant cet « investissement en carbone initial » bien plus acceptable. En revanche, pour un bâtiment détruit très rapidement, même si les émissions de GES étaient hypothétiquement plus faibles, le fait qu'il ne soit utilisé durant peu d'années ne permettrait pas « d'amortir autant » les émissions carbonées initiales. La **durée d'utilisation future supposée d'un bâtiment** est donc primordiale pour calculer son poids carbone le plus justement possible.

Cependant, la RE2020 a choisi de définir la Période d'Etude de Référence (PER), c'est-à-dire la durée de vie du bâtiment, de manière uniforme : **50 ans pour tous les bâtiments**, ou 2 si la construction est provisoire.⁵⁴ Cela signifie que dans ses études d'ACV, on considère que le bâtiment est construit l'année 0, et déposé 50 ans plus tard, bien que dans les faits, les bâtiments en France aient en majorité plus de 50 ans. Cette méthode permet de mettre toutes les études sur un pied d'égalité offrant des comparaisons, et surtout de ne pas avoir de débat au moment des études sur la durée de vie prévisionnelle du bâtiment, qui peut de toute façon varier. Le choix arbitraire de cette période de référence uniforme ne reflète pas nécessairement la réalité, et a des impacts sur les courbes de pondération des effets des émissions de gaz à effet de serre.

⁵³ CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et al., « Méthode Quartier Energie Carbone », septembre 2022.

⁵⁴ Cabassud et al., « Guide RE2020 DHUP / Cerema ».

Sur un autre sujet, le bâtiment n'est pas le seul à avoir une durée de vie fixée : les produits de constructions et équipements (PCE) ont également une durée de vie fixée. Ainsi une Peinture A aura par exemple une durée de vie de 10 ans, et l'impact carbone de sa fiche INIES devra donc être multiplié par un coefficient de remplacement de 5 pour l'ACV. Une peinture B avec une durée de vie de 7 ans verra son impact carbone unitaire multiplié par 7,1 pour l'ACV sur 50 ans. Mais une fois encore, **ces données temporelles sont hypothétiques et théoriques**, et il est possible que dans la réalité d'usage, la peinture soit changée 10 fois en 50 ans, ou 1 fois.

Un périmètre spatial : la surface de référence

« **On ne compare pas des choux et des carottes !** »

L'ACV en RE2020 rapporte l'impact carbone de la construction au mètre carré afin de pouvoir comparer les bâtiments entre eux.

Pour vérifier si le bâtiment étudié passe les seuils, le poids carbone total n'est pas étudié tel quel. Il est en effet rapporté à ce que l'on pourrait considérer comme l'unité fonctionnelle du bâtiment : **sa surface**. Les seuils sont donc calculés par rapport à cette surface de référence (Sref).

Si en E+C- cette surface était la Surface de Plancher (SDP), en RE2020 cette surface de référence est devenue la **surface habitable (SHAB)** pour les projets résidentiels, et de la **surface utile (SU)**, pour les projets tertiaires. Ce choix coïncide avec les enjeux du milieu de la construction et de son économie, qui évalue les prix sur la base du m²SHAB.

L'article R111-22 du Code de l'urbanisme définit la SDP de la manière suivante :

« La surface de plancher de la construction est égale à la somme des surfaces de plancher de chaque niveau clos et couvert, calculée à partir du nu intérieur des façades après déduction :

- 1° Des surfaces correspondant à l'épaisseur des murs entourant les embrasures des portes et fenêtres donnant sur l'extérieur ;
- 2° Des vides et des trémies afférentes aux escaliers et ascenseurs ;
- 3° Des surfaces de plancher d'une hauteur sous plafond inférieure ou égale à 1,80 mètre ;
- 4° Des surfaces de plancher aménagées en vue du stationnement des véhicules motorisés ou non, y compris les rampes d'accès et les aires de manœuvres ;
- 5° Des surfaces de plancher des combles non aménageables pour l'habitation ou pour des activités à caractère professionnel, artisanal, industriel ou commercial ;
- 6° Des surfaces de plancher des locaux techniques nécessaires au fonctionnement d'un groupe de bâtiments ou d'un immeuble autre qu'une maison individuelle au sens de l'article L. 231-1 du code de la construction et de l'habitation, y compris les locaux de stockage des déchets ;
- 7° Des surfaces de plancher des caves ou des celliers, annexes à des logements, dès lors que ces locaux sont desservis uniquement par une partie commune ;
- 8° D'une surface égale à 10 % des surfaces de plancher affectées à l'habitation telles qu'elles résultent le cas échéant de l'application des alinéas précédents, dès lors que les logements sont desservis par des parties communes intérieures. »⁵⁵

⁵⁵ « Article R111-22 », Code de l'Urbanisme §, consulté le 24 juillet 2023, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000031721274/.

Et l'article R156-1 du Code de l'Urbanisme définit la SHAB comme :

« La surface habitable d'un logement est la surface de plancher construite, après déduction des surfaces occupées par les murs, cloisons, marches et cages d'escaliers, gaines, embrasures de portes et de fenêtres. »⁵⁶

La SHAB est toujours inférieure à la SDP. Sur un même projet, dans un même mode d'ACV (dynamique par exemple), un Indicateur Carbone Construction (Icconstruction) rapporté à une SHAB sera donc toujours supérieur à une SDP, puisque le périmètre et les éléments pris en compte restent les mêmes. Sur le point de la surface de référence, la RE2020 est donc plus sévère que le référentiel E+C-.

Pour les autres bâtiments que les logements, la surface de référence de la RE2020 est la surface utile (SU), définie de la manière suivante :

« La surface utile d'un bâtiment ou d'une partie de bâtiment au sens du présent arrêté, est la surface de plancher construite des locaux soumis à la réglementation environnementale qui, en utilisation normale, sont chauffés à une température supérieure à 12°C ou refroidis à une température inférieure à 30°C, après déduction des :

- Surfaces occupées par les murs, y compris l'isolation
- Cloisons fixes prévues aux plans,
- Poteaux
- Marches et cages d'escaliers
- Gaines
- Embrassements de portes et de fenêtres
- Partie des locaux d'une hauteur inférieure à 1,80m
- Parties du niveau inférieur servant d'emprise à un escalier, à une rampe d'accès ou les parties du niveau inférieur auquel s'arrêtent les trémies des ascenseurs, des monte-charges, des gaines et des conduits de fumée ou de ventilation
- Locaux techniques exclusivement affectés au fonctionnement général du bâtiment et à occupation passagère »⁵⁷

Dans la continuité de ces subtilités de calcul de surface, on notera que **certains espaces ne sont pas pris en compte dans la Surface de référence bien qu'ils contribuent à une qualité de vie certaine.**

Ainsi, les **balcons, terrasses et toitures accessibles** ne sont pas comptés dans la surface de référence, alors que leur poids carbone est bien compté dans la construction du projet. Ces espaces sont de plus souvent composés de matériaux fortement carbonés comme du béton, du métal, du substrat, des revêtements et isolants non biosourcés pour des raisons de structure et de sécurité incendie.

Pour autant, bien que le poids carbone des **espaces extérieurs** soit important, leurs **bénéfices sont nombreux, mais difficilement quantifiables, et encore moins calculables.** Les espaces extérieurs permettent d'augmenter la qualité de vie dans les logements : la période covid l'a bien souligné, les ménages

⁵⁶ Légifrance, « Article R156-1 », Code de l'Urbanisme §, consulté le 24 juillet 2023, <https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000043819221/2021-07-01/#LEGIARTI000043819221>.

⁵⁷ « Annexe 1 - RE2020 », Code de la Construction et de l'habitation § (2021).

recherchent de plus en plus un espace extérieur dans leur logement.⁵⁸ La qualité de vie au travail est également un sujet majeur amélioré par la présence d'espaces extérieurs accessibles. Bien que le milieu du tertiaire connaisse des difficultés à la suite du covid, la dynamique des nouveaux ensembles de bureaux qui sortent de terre prennent en compte le besoin d'espaces extérieurs en créant des terrasses, balcons et espaces verts accessibles aux travailleurs.⁵⁹ S'ils sont plantés, ces espaces favorisent une plus grande biodiversité, retiennent les eaux de pluie et participent à la réduction du phénomène d'Îlot de Chaleur Urbain (ICU).

De même, certains **espaces communs**, nécessaires au bon fonctionnement des bâtiments et participant à la transition écologique à leur manière, ne sont pas pris en compte dans la surface de référence. Ainsi, les locaux vélos, encourageant des moyens de transport moins carbonés, ne sont pas comptabilisés dans la SHAB, de même que les locaux déchets, qui développent pourtant le tri sélectif et le compostage éventuellement. Pour autant, leur poids carbone est bien pris en compte, sans que leurs **bénéfices potentiels en termes de gain carbone** ne puissent être pris en compte.

Enfin, certains équipements tels que les **ascenseurs**, ne sont pas comptés dans la surface habitable non plus et pèsent un poids carbone certain, notamment dans les projets de plus petite envergure ou ce n'est pas forcément obligatoire. Sur ces projets, la présence d'un ascenseur permet parfois l'**accessibilité** des personnes à mobilité réduite, mais est fortement pénalisée en termes bilan carbone.

En résumé, prendre comme unité fonctionnelle la surface utile ou la surface habitable d'un bâtiment permet de se rattacher aux enjeux économiques du marché, mais alourdit le bilan carbone des bâtiments avec de grands espaces extérieurs ou partagés.

Un périmètre fonctionnel : l'occupant, le grand oublié ?

La surface n'est pas nécessairement l'indicateur idéal pour calculer le bilan carbone d'un bâtiment et surtout comparer les bilans des bâtiments entre eux. Pour déterminer l'**unité fonctionnelle d'un bâtiment**, nous nous baserons ici sur la méthodologie de l'ouvrage « Environmental Life Cycle Assessment », Olivier Jolliet et al.

Pour déterminer l'unité fonctionnelle (*functional unit*) d'un bâtiment, il est nécessaire de déterminer auparavant la **fonction du système** (*system function*). La fonction doit être commune à plusieurs alternatives et permettre de les comparer. Un élément doit avoir une fonction principale, et peut avoir plusieurs fonctions secondaires qui ne sont pas forcément les mêmes. Les auteurs donnent les exemples suivants pour appréhender ce qu'est la fonction d'un système :

« Par exemple, on peut essayer de comparer une paire de bottes avec une paire de sandales, parce qu'elles remplissent toutes deux une fonction primaire de protection des pieds. Cependant, les bottes protègent également les pieds du froid ; une comparaison directe des deux types de chaussures n'est donc généralement pas utile.

Lorsqu'un composant d'un système plus large est étudié, la fonction choisie est généralement celle de l'ensemble du système. Par exemple, bien que la fonction

⁵⁸ Isabelle Rey-Lefebvre, « En quête d'une meilleure qualité de vie, les Français rejettent la densité des grandes métropoles », *Le Monde*, 14 décembre 2021, https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/12/14/en-quete-d-une-meilleure-qualite-de-vie-les-francais-rejettent-la-densite-des-grandes-metropoles_6105963_3234.html.

⁵⁹ « Le bien-être au travail se pense aussi hors les murs de l'entreprise », *Les Echos*, 2 mars 2023, <https://www.lesechos.fr/thema/articles/le-bien-etre-au-travail-se-pense-aussi-hors-les-murs-de-lentreprise-1911289>.

principale d'une portière de voiture soit d'assurer l'accès au véhicule et la protection des passagers, elle ne devient efficace que lorsque le véhicule est utilisé pour transporter des passagers. Ainsi, une fonction plus significative est d'assurer l'accès et la protection pour le transport des passagers pendant toute la durée de vie de la voiture.

Ainsi, l'ACV prendrait en compte non seulement les impacts liés à la fabrication de la porte, mais aussi l'influence du poids de la porte de la voiture sur la consommation de carburant durant son utilisation. Lors de l'examen d'une ACV, il convient de vérifier la validité de la fonction du système dans tous les scénarios, en explicitant toute différence entre les scénarios. Une attention particulière doit être accordée lorsque les fonctions secondaires des scénarios alternatifs diffèrent. »⁶⁰

Product	Primary Function	Secondary Functions
Pair of shoes	Protect feet	Protection from weather Protection from cold Social stature
Restaurant	Serve meals	Socializing Heated space
Car door	Help to ensure safe use of the car	Protection from theft Safety in case of accident Sealing the car shut
Potato	Food for humans, animal feed, or raw material (starch)	Maintenance of arable land Protection of the landscape and environment

Figure 24 - Fonctions primaires et secondaires de produits étudiés (sources : Environmental Life Cycle Assessment, Olivier Jolliet et al., page 26)

Dans le cas de l'étude d'un bâtiment en général, il est difficile d'offrir une réponse sur sa fonction sans prendre en compte les différentes typologies. Les spécificités liées aux typologies apparaîtront donc comme des fonctions secondaires dans un premier temps, mais il s'agirait dans un second temps de réaliser une analyse en considérant chacune des typologies de bâtiment comme des systèmes distincts avec des fonctions primaires différentes. Pour une définition plus générale, le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales définit un bâtiment comme une : "*Construction d'une certaine importance destinée à abriter des personnes, des animaux, des choses, et, spécialement, à servir d'habitation*". Sur la base de ces informations, le tableau ci-dessous présente donc une adaptation personnelle de LCA au concept global de "bâtiment".

Système	Fonction primaire	Fonctions secondaires
Bâtiment	Abriter des personnes, des animaux, des choses	Vie en société Confort Loisir Travail Repas Education ...

⁶⁰ « Chapter 3. Goal and System Definition », in *Environmental Life Cycle Assessment*, par Olivier Jolliet et al. (CRC PressTaylor & Francis Group, 2015), 23-46.

Bien entendu, il serait intéressant de réaliser cette étude plus précisément pour les différentes typologies de bâtiment. Les fonctions primaires seraient probablement plus détaillées. Par exemple, la fonction primaire d'un restaurant serait de servir des repas à des personnes sous un abri. Mais pour le moment, poursuivons le déroulement du début d'une étude de LCA.

Maintenant qu'une fonction primaire a été définie pour un système "bâtiment", nous allons pouvoir nous intéresser à l'unité fonctionnelle (UF) de chacun de ces bâtiments. D'après la méthodologie LCA :

« Selon la norme ISO 14044 (2006), le FU est la "performance quantifiée d'un système de produits à utiliser comme unité de référence". Cette mesure quantifie la fonction d'un système en termes de service offert. L'UF est la même pour tous les scénarios, les flux d'inventaire et les impacts de chaque scénario étant calculés par UF (chapitres 4 et 5). Par exemple, différentes méthodes de transport sont souvent comparées sur la base d'une UF de transport d'une personne sur une distance de 1 km (c'est-à-dire 1 personne-km). »⁶¹

Certains écueils doivent être évités pour déterminer l'unité fonctionnelle d'un système. Une UF ne peut en aucun cas être un ratio, et doit être **quantifiée et additionnable**. L'UF d'un système est très étroitement liée aux **flux de référence** (*reference flows*) : si l'unité fonctionnelle est le "*service fourni*" au consommateur, le flux de référence représente tout ce qui se cache derrière, "*ce qui est acheté*" pour rendre possible ce service. Le tableau ci-dessous illustre bien ces différentes notions. Par exemple, si le système considéré est une paire de chaussures, son UF serait : une paire de chaussures en état de fonctionner pendant un an. Ainsi, en considérant la durée de vie moyenne d'une chaussure de bonne qualité comme étant de deux ans, seule une demie paire serait nécessaire pour répondre à l'unité fonctionnelle. Au contraire, avec une paire de mauvaise qualité durant 6 mois, deux paires seraient nécessaires. On notera donc au passage que les paramètres clés (*key parameters*), par exemple la durée de vie, sont essentiels dans le calcul des LCL.

System	Functional Unit (Service Offered)	Reference Flows (What is Purchased)	Key Parameters (Linking Reference Flows to FU)
Pair of shoes	1 pair of functional shoes for 1 year	0.5 pair of high-quality shoes (2 year lifespan) 2 pairs of low-quality shoes (6 month lifespan)	Lifetime of shoe
Hand-dryer	1 pair of dried hands	1.5 paper towels 1/182,625th paper towel dispenser 1800 W for 30 s 1/365,250th electric dryer	Number of towels per usage Power of dryer and duration of use
Wall paint	100 m ² of wall painted for 20 year	30 kg of long-lasting paint that lasts 20 year 2 × 25 kg of less durable paint that lasts 10 year	Amount of paint applied per square meter Lifetime of paint

Figure 25 – Unités fonctionnelles et flux de références de produits étudiés (sources : Environmental Life Cycle Assessment, Olivier Jollier et al., page 28)

Pour des bâtiments en France, la méthode d'ACV en RE2020 considère que le bâtiment doit assurer sa fonction de bâtiment **pendant 50 ans**. Pour cela, le calcul inclut principalement les "composants", c'est-à-dire les

⁶¹ « Chapter 3. Goal and System Definition ». p.27.

éléments immeubles qui composent un bâtiment et entrent dans le Icconstruction. Mais d'autres éléments sont pris en compte comme l'énergie nécessaire pour se chauffer via le Icénergie, ou le temps de chantier et la quantité de terre évacuée, par le Icchantier, ou enfin la quantité d'eau consommée via le Iceau. En repartant de l'exemple précédent, il est possible d'ébaucher quelques flux de référence qui seront nécessaires pour répondre à la première définition de l'UF, à savoir abriter des personnes, des animaux, des choses pendant 50 ans.

Système	Unité fonctionnelle	Flux de référence	Paramètres clés
Bâtiment	Abriter des personnes, des animaux, des choses pendant 50 ans	X m3 de béton (durée de vie de 50 ans) X m3 de bois X kg de ferrailage X tonne de terres évacuées X m ² de peinture (durée de vie de 10 ans) X m ² de tuiles X m de plinthes X m franchis par les escaliers X ascenseurs X convecteurs électriques X kWh d'électricité X L d'eau consommés X km de transport X mois de chantier (et bien d'autres éléments encore)	Durée de Vie (DDV) de chacun éléments

Toutefois, l'unité fonctionnelle que nous présentons dans le tableau ci-dessus n'est pas très complète : la durée de 50 ans offre un cadre temporel bien défini, mais "abriter" est un terme extrêmement vague et non quantifiable qui ne répond donc pas à la définition d'Unité Fonctionnelle.

Il s'agit donc de déterminer ce à quoi pourrait correspondre le concept d'"abriter des personnes, des animaux, des choses" et comment le quantifier. La RE2020 a tranché cette question et a opté pour l'utilisation de la surface de référence, qui complète la définition en ajoutant une notion de clos couvert et une unité rapportée qui est le m². Toutefois, comme nous l'avons vu précédemment, cette définition est contestable, et ce, d'autant plus que le m² n'est pas forcément l'unité qui vient spontanément en tête lorsque l'on parle "d'abriter des personnes" ...

En réfléchissant le bâtiment à travers le prisme de l'humain, **c'est plutôt la personne, l'utilisateur, l'occupant, l'habitant qui pourrait être mis au centre des calculs.** Dans les cas de bâtiments de logement, de bureaux, d'ERP les effectifs sont souvent des calculs réalisés, ne serait-ce que dans le cadre de sécurité incendie. Mais ces effectifs sont plutôt des maximums, et dans l'idée d'une ACV complète, un paramètre clé des effectifs serait bien sûr la variation de leur présence dans une journée, dans une semaine, dans un mois, dans une année ou une décennie pour pouvoir pondérer plus justement.

Prenons l'exemple d'un stade de foot fictif avec un effectif maximal de 50 000 au maximum. Dans les faits, il sera peut-être occupé à 90% pendant 4h, 5 jours par semaine, et accueillerait donc en moyenne 5 350 personnes par jour. Il serait possible de définir un taux d'utilisation tel que :

$$\text{Taux utilisation} = \frac{\text{Effectif moyen par jour}}{\text{Effectif maximal prévu}}$$

Le stade aurait un taux d'utilisation de 11%. En comparaison un T2 aurait un taux d'utilisation de 28% et des bureaux pratiquants le télétravail auraient un taux d'utilisation de 20%.

Indicateurs	Stade	T2	Bureaux avec TT
Effectif maximal prévu	50 000	2	100
Taux de remplissage en période d'utilisation	90%	80%	75%
Nombre d'heures d'utilisation par jour	4	9	9
Nombre de jours d'utilisation par semaine	5	6,5	5
Effectif moyen par jour	5 357	0,6	20
Taux d'utilisation	11%	28%	20%

Figure 26 - Etude personnelle basée sur des hypothèses - Taux d'utilisation d'un bâtiment par rapport à sa capacité

Il est possible de considérer l'unité d'un occupant à temps plein, c'est-à-dire une personne utilisant le bâtiment pendant 24h. A partir de là, on pourrait envisager l'impact carbone comme un indicateur rapporté, non pas au m², mais à un occupant à temps plein. La dernière ligne du tableau ci-dessous représenterait donc le poids carbone d'un occupant à temps plein du bâtiment étudié. **Rapporté à l'occupant, l'impact carbone d'un stade serait donc environ 1000 fois supérieure à celle d'un logement.**

Indicateurs	Stade	T2	Bureaux avec TT
Taux d'utilisation	11%	28%	20%
Effectif moyen	5 357	0,6	20
Surface moyenne en m ²	30 000	50	1 200
Impact total en kgCO ₂	266 666 667	50 000	1 200 000
Impact carbone en kgCO ₂ /m ²	4 000	1 000	1 000
Impact carbone en kgCO₂/occupant à temps plein	2 488 900 000	200 000	6 000 000

Figure 27 - Etude personnelle basée sur des hypothèses - Impact carbone d'un bâtiment en fonction d'un occupant à temps plein

Certains logiciels d'ACV commencent à proposer, en plus de rapporter l'impact carbone à l'unité du mètre carré, la possibilité de rapporter l'impact carbone à l'occupant, en se basant sur le nombre d'occupants maximal.

Pour conclure cette première introduction à l'Analyse de Cycle de Vie, cette méthode est en cours de développement et consolidation en France, et les hypothèses de périmètre spatial, temporel et fonctionnel ne sont pas figées dans le marbre et pourraient être amenées à évoluer.

Chapitre 3.

Le casse-tête du calcul carbone en rénovation

« Le problème climatique est une affaire de quantité. La solution est aussi une affaire de quantité. »⁶²

L'ACV en rénovation n'est **pas encore obligatoire** en France. Pour autant, pour favoriser le « bas carbone » dans le bâtiment neuf, le levier réglementaire et l'obligation d'ACV sont des outils très puissants, il est donc fort possible que la rénovation suive le même chemin. Mais pour cela, encore faut-il savoir comment calculer les impacts carbonés en rénovation ! Ce chapitre traitera donc des méthodes d'ACV en rénovation, qui seront comparées via des études de cas. Il ne sera pas forcément le plus digeste, mais permettra de mettre en avant les avantages et les défauts de chacune des méthodes.

Les méthodes d'Analyse de Cycle de Vie en rénovation sont **multiples**, mais **un consensus n'est pas encore établi en France**. Il est en effet très complexe de déterminer le périmètre d'une étude ACV en rénovation, notamment en ce qui concerne la durée de vie du bâtiment, celle de ses composants et le périmètre temporel utilisé pour l'étude. Une autre problématique majeure concerne la manière de comptabiliser les différents types de composants. En rénovation, les composants se décomposent en trois grands types d'éléments :

- Éléments **neufs** (composants nouvellement ajoutés à l'ouvrage lors de l'opération de rénovation)
- Éléments **conservés** (composants conservés lors de la rénovation, potentiellement renouvelés sur la période de référence lorsqu'ils dépassent leur durée de vie théorique)
- Éléments **déposés** (composants déposés lors du chantier de rénovation)

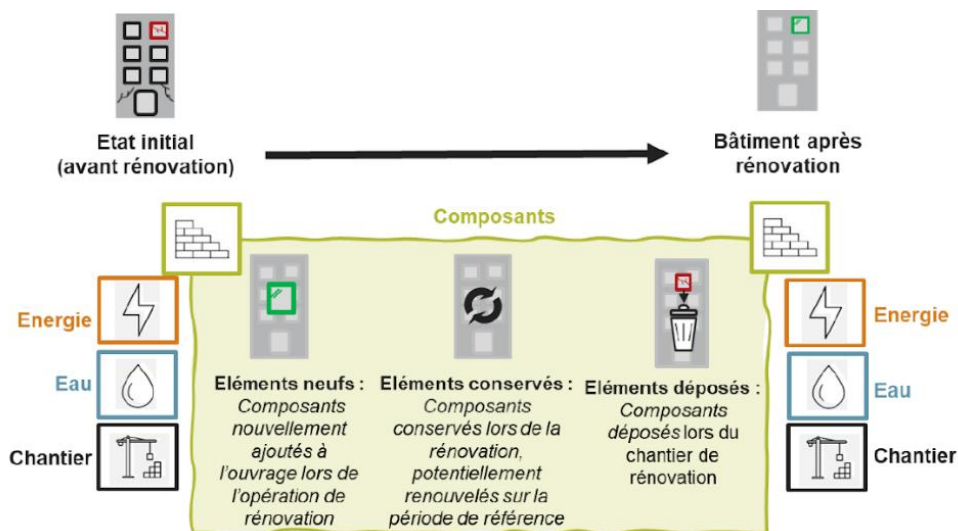


Figure 28 - Comment évaluer les impacts environnementaux d'une rénovation ? Périmètre d'évaluation de l'opération en rénovation (source : Hub des prescripteurs Bas Carbone, Atelier de rénovation n°1)

⁶² Blain et Jancovici, *Le monde sans fin*.

Le calcul des émissions de GES pour les éléments **neufs** ne pose pas de problème puisque ces méthodes d'ACV se basent sur des méthodes de construction neuves. En revanche, pour les éléments **conservés** et les éléments **déposés**, ces calculs diffèrent selon les méthodes et les périmètres temporels envisagés. Le calcul des autres indicateurs, énergie, eau et chantier, restent similaires à ceux de la construction neuve.

Avertissement pour les lecteurs allergiques aux calculs : il est possible de passer directement à la conclusion de ce chapitre.

Différentes méthodes, différentes philosophies

Il existe plusieurs moyens de juger la performance carbone d'une rénovation. Le Hub des Prescripteurs Bas Carbone propose par exemple d'avoir recours aux indicateurs IRréno et aux TRC (Temps de Retour Carbone) :

- $IRréno = Egescomposantsneufs - (Egesénergie,avant - Egesénergie,après)$

Avec Eges = Emissions de Gaz à Effet de Serre

Si $IRréno < 0$, la rénovation est performante d'un point de vue du carbone, les émissions sont réduites par la rénovation

- $TRC = Egescomposantsneufs / ((Egesénergie,avant - Egesénergie,après) / PER)$

Le Temps de Retour Carbone doit être inférieur à la période de référence (PER) sinon la rénovation est jugée contre-productive.

Ces indicateurs se focalisent en grande partie sur les **gains carbone liés à l'énergie**. En effet, il semble que lorsque l'on parle rénovation, l'aspect énergétique est immédiatement celui qui vient en tête, notamment car c'est celui qui a l'impact financier le plus important. Cependant, **les émissions de Gaz à Effet de Serre ne sont pas dues qu'à l'énergie dans le bâtiment** : les Produits de Construction et Équipements sont également très émetteurs, et pourtant bien moins étudiés en rénovation.

S'il est vrai que favoriser la rénovation thermique dans le secteur du bâtiment permet déjà, en théorie, de réduire ses émissions de GES, il n'en reste pas moins qu'étudier l'impact carbone des composants de projets rénovés sera probablement la prochaine étape pour réduire le bilan du secteur du bâtiment. Cette étude choisira donc plutôt de s'orienter sur la partie "composants", sur les matériaux, les Produits de Construction et Équipements, puisque les études de gain carbone et d'économie d'énergie sont déjà monnaie courante sur les projets de rénovation.

Ainsi, nous étudierons trois méthodes d'ACV en rénovation : **BBCA Rénovation, HQE-GBC et Quartier Energie Carbone**. Comme en neuf, ces référentiels divisent les émissions carbonées en plusieurs catégories : Produits de Construction et Équipement (PCE), Energie, Chantier, Eau.

Méthode BBCA Rénovation – la plus simple

Le label BBCA Rénovation, sorti en octobre 2018, peut s'appliquer à "tous les bâtiments existants faisant l'objet de travaux de rénovation". A l'heure actuelle, la version 1.0 en application concerne uniquement deux typologies d'usage final (après rénovation ou transformation) : les bâtiments tertiaires de bureaux (hors IGH) et les logements collectifs. Bien que les deux typologies retenues pour le label BBCA Rénovation soient

réglementées dans la RE2020 en neuf, en termes de méthodes de calcul, le label se base plutôt sur les méthodes E+C-, à savoir une Analyse de Cycle de Vie statique.⁶³

La période d'étude de référence est une durée de vie de 50 ans, comme en RE2020. Toutefois, l'indicateur retenu est le "kg équivalent CO₂ par m² de SDP", alors que c'est le kgCO₂e./m²SHAB ou SU qui est retenu pour la RE2020.

Le périmètre du label est le même que celui du permis de construire, et intègre donc le bâtiment, sa parcelle et la déconstruction de l'existant si tel est le cas.

Dans le référentiel, la rénovation est définie par 3 typologies de rénovation sur bâtiment existant :

- Rénovation lourde (avec ou sans changement d'usage) = opération immobilière impliquant l'arrêt total de l'activité de l'immeuble pendant la réalisation des travaux
- Rénovation thermique = opération où il y a au minimum des changements sur les PCE liés à l'enveloppe et équipements influençant la performance thermique
- Rénovation partielle (qui ne peut pas permettre d'obtenir le label)

Dans tous les cas de rénovation, le label distingue les Produits de Construction et Équipements (PCE) neufs et existants.

Si la rénovation est lourde, l'indicateur EGESpce;max est fixé à 480 kgCO₂e/m²SDP pour les logements collectifs, et 735 pour les bureaux.

Si la rénovation est thermique, l'indicateur EGESpce;max correspond à la somme des impacts carbone de tous les lots impactés (cf définition des lots impactés dans le paragraphe suivant).

Pour le calcul des PCE **neufs**, il existe deux situations de projet :

- Si la rénovation est lourde, les impacts des PCE neufs sont comptabilisés classiquement (c'est-à-dire en suivant une méthode E+C-)
- Si la rénovation est thermique, seuls les lots impactés par la rénovation sont pris en compte. Un lot est considéré comme impacté dès lors que son impact carbone est supérieur à 15% de l'impact de référence du lot (cf tableau ci-dessous).

⁶³ Association BBKA, « Label BBKA - Référentiel de labellisation des bâtiments en rénovation v1.0 », 5 octobre 2018.

Lot HQE	Impact carbone de référence Bâtiments collectifs d'habitation (kg éq.CO ₂ /m ² SDP)	Impact carbone de référence Bâtiment de bureaux (kg éq.CO ₂ /m ² SDP)
Lot 01	28	41
Lot 02	106	135
Lot 03	279	244
Lot 04	21	21
Lot 05	50	37
Lot 06	63	111
Lot 07	49	76
Lot 08	76	157
Lot 09	32	9
Lot 10	46	116
Lot 11	6	12
Lot 12	44	91

Figure 29 - Tableau des impacts de référence par lot en BBCA Rénovation (source : Label BBCA Rénovation)

Concernant les PCE **conservés**, ils émettent des GES lors de leur vie en œuvre durant leur durée de vie résiduelle, lors de leur fin de vie future, lors de leur futur remplacement, etc. Cependant, dans le calcul, il a été choisi de considérer les Émissions de Gaz à Effet de Serre comme nulles pour :

- « Encourager la conservation des Produits de Construction et Équipements existants,
- Éviter les approximations inévitables et fausses liées à l'absence d'historique
- Réduire les coûts d'études liés à l'inventaire des produits de construction et équipements conservés »⁶⁴

Ainsi, l'impact des PCE **conservés** est considéré comme nul :

$$\Sigma I_{pc} = 0$$

Concernant les PCE **déposés** (évacués), il faut distinguer deux situations pour le calcul :

- Si leur Durée de Vie (DV) dans le bâtiment a été supérieure à leur Durée de Vie de Référence (DVR), alors leur impact est considéré comme nul :

$$DV > DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = 0$$

- Si leur DV effective est inférieure à leur DVR, alors les impacts résiduels des PCE doivent être calculés car les PCE ne sont pas considérés comme amortis :

$$DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi} \times DV_{résiduelle} / DVR$$

Avec :

Q_{pdi} Quantité de PCE déposés non amortis utilisés dans le sous lot n

DE_{pdi} Impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti

⁶⁴ Association BBCA.

DVrésiduelle Durée de vie résiduelle du produit ou équipement, c'est la différence entre la durée de vie de référence du PCE et sa durée de vie déjà réalisée dans le bâtiment initial soit $DV_{résiduelle} = DVR - DV_{réalisée}$

DVR Durée de vie de référence du produit ou équipement en années. Cette donnée est disponible au sein des FDES et PEP de la base INIES

Méthode HQE-GBC - l'intermédiaire

En juillet 2017, le Ministère de la Transition Ecologie et Solidaire et le ministère de la Cohésion des Territoires publiait un Référentiel Energie Carbone pour son Expérimentation E+C-. Avec le soutien de ces ministères, de l'ADEME et du CSTB, l'Alliance HQE GBC France a sorti en novembre 2018 un addendum à ce référentiel pour traiter des bâtiments rénovés.⁶⁵

Les impacts des PCE **neufs** sont traités de manière classique, en se basant sur la méthodologie E+C-.

Pour les Produits de Construction et Équipements (PCE) **conservés** ou **déposés**, deux cas de figures sont traités :

- Si leur Durée de Vie (DV) dans le bâtiment a été supérieure à leur Durée de Vie de Référence (DVR), alors leur impact est considéré comme nul, tant pour les PCE **conservés** (*Ipc*) que pour les PCE **déposés** (*Ipd*) :

$$DV > DVR \Rightarrow Ipc = 0$$

$$DV > DVR \Rightarrow Ipd = 0$$

- Si leur DV effective est inférieure à leur DVR, alors les impacts résiduels des PCE doivent être calculés car les PCE ne sont pas considérés comme amortis. Un terme de **renouvellement** est ajouté pour les éléments le nécessitant (hors gros œuvre et fondations). Cela signifie qu'au bout d'un certain temps, le PCE conservé aura atteint sa durée de vie maximale et devra être remplacé par un PCE neuf.

- PCE **conservés** :

$$DV < DVR \Rightarrow \Sigma Ipc = \Sigma Qpci \times DEpci \times DV_{résiduelle} / DVR + \Sigma Qpni \times DEpni \times Rpc$$

- PCE **déposés** :

$$DV < DVR \Rightarrow \Sigma Ipd = \Sigma Qpdi \times DEpdi \times DV_{résiduelle} / DVR$$

Avec :

Qpci *Qpdi* Quantité de PCE conservés/déposés non amortis utilisés dans le sous lot n

Qpni Quantité de PCE neufs qui seront ajoutés pour remplacer les PCE conservés pendant la période d'étude de référence (PER) du bâtiment existant

DEpci *DEpdi* Impact issu de la donnée environnementale du PCE non amorti

DEpni Impact issu de la donnée environnementale du PCE qui sera renouvelé

⁶⁵ Alliance HQE-GBC, « Addendum au Référentiel « Energie-Carbone » pour la réalisation d'ACV de bâtiments rénovés issu des travaux HQE Performance - Version 1.0 », novembre 2018.

<i>DVrésiduelle</i>	Durée de vie résiduelle du produit ou équipement, c'est la différence entre la durée de vie de référence du PCE et sa durée de vie déjà réalisée dans le bâtiment initial soit $DV_{résiduelle} = DVR - DV_{réalisée}$
<i>DVR</i>	Durée de vie de référence du produit ou équipement en années. Cette donnée est disponible au sein des FDES et PEP de la base INIES
<i>Rpc</i>	Facteur de renouvellement du PCE conservé : $Rpc = \max(0, (PER - DV_{résiduelle}) / DVR)$

La différence de calcul entre PCE conservés et PCE déposés se situe dans le terme " $\Sigma Q_{pni} \times DE_{pni} \times R_{pc}$ " présent dans I_{pc} mais pas dans I_{pd} . Ce terme signifie que les impacts des PCE conservés prennent en compte le renouvellement futur dudit PCE par un PCE neuf. Les impacts des PCE déposés ne prennent pas en compte ce renouvellement. On considère en effet que le PCE déposé est soit remplacé par un PCE neuf (qui sera comptabilisé dans I_{pn}), soit que le-dit PCE n'a plus son utilité et ne sera plus présent dans le futur projet rénové.

Méthode Quartier Energie Carbone – le niveau expert

En septembre 2022, le CSTB, Efficacity et Elioth produisent la Méthode Quartier Energie Carbone, diffusée par l'ADEME. Son objectif est d'évaluer la performance énergétique et carbone d'un quartier de manière qualitative et quantitative.⁶⁶

Cette méthode prend en compte la dépose éventuelle de l'existant, et des produits qui seront remplacés. Le périmètre d'évaluation pour le contributeur PCE inclut :

- Les impacts liés à la **dépose** des produits et équipements remplacés lors de l'opération de rénovation, considérés essentiellement comme les impacts liés à la fin de vie de ses produits et équipements
- Les impacts liés à la **vie en œuvre et à la fin de vie** des produits et équipements conservés lors de la rénovation. En outre, si ces éléments sont renouvelés pendant la PER, les impacts liés au **renouvellement** de ces produits sont également pris en compte.
- Et les impacts du cycle de vie complet des éléments neufs ajoutés au moment de l'opération de rénovation.

En principe, cette méthode réalise ses calculs de manière dynamique. Mais pour mieux comparer ses hypothèses avec les autres méthodes, **il a été choisi de l'étudier en ACV statique**. La version étudiée ici n'est donc pas exactement la même que celle préconisée dans le référentiel.

Pour les produits et équipements **conservés**, le calcul des impacts est le suivant :

$$\Sigma I_{pc} = \Sigma Q_{pci} \times DE_{voepci} \times DV_{conservation} DVR + \Sigma Q_{pci} \times DE_{fdvpci} + \Sigma Q_{pni} DE_{pni} R_{pc}$$

Pour les PCE **déposés**, seuls les impacts de fin de vie sont pris en compte (module C).

$$\Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi}$$

avec :

I_{pc} Impacts des PCE conservés

Q_{pci} Q_{pdi} Quantité de PCE conservés/déposés non amortis utilisés dans le sous lot n

⁶⁶ CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et al., « Méthode Quartier Energie Carbone ».

<i>Qpni</i>	Quantité de PCE neufs qui seront ajoutés pour remplacer les PCE conservés pendant la période d'étude de référence (PER) du bâtiment existant
<i>DEvoepci</i>	Impacts liés à la maintenance issus de la donnée environnementale du PCE conservés (module B)
<i>DEfdvpci</i>	Impacts liés à la fin de vie issus de la donnée environnementale du PCE conservés (modules C)
<i>DEpni</i>	Impacts liés à l'ensemble du cycle issus de la donnée environnementale du PCE qui sera renouvelé (modules A, B, C et D)
<i>DEpdi</i>	Impacts liés à la fin de vie issus de la donnée environnementale du PCE déposés
<i>DVconservation</i>	Durée de vie pendant laquelle le produit ou équipement sera conservé dans le bâtiment rénové.
<i>DVR</i>	Durée de vie de référence du produit ou équipement en années. Cette donnée est disponible au sein des FDES et PEP de la base INIES
<i>Rpc</i>	Facteur de renouvellement du PCE conservé : $Rpc = \max(0, (PER - DVconservation) / DVE)$

Résumé



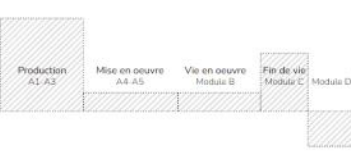
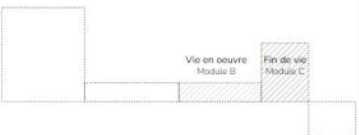
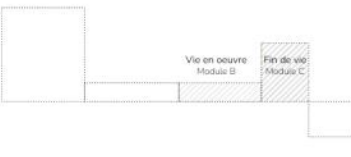

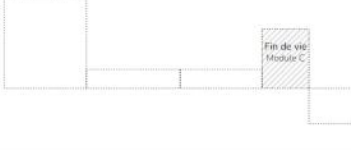
	BBCA Rénovation	Méthode HQE GBC	Méthode Quartier Energie Carbone	
PCE	Neuf Distinction réno lourde ou thermique (impacts des lots différents) 			
	Conservés Si $DV < DV_{ref}$ $I_{pc} = 0 \text{ kgCO}_2$ pour encourager la rénovation	Si $DV > DV_{ref}$ $I_{pc} = 0 \text{ kgCO}_2$ pour encourager la rénovation	Si $DV < DV_{ref}$ $I_{pc} = \sum Q_{pci} \times DE_{pci} \times (DV_{résiduelle} / DVR) + \sum Q_{pni} \times DE_{pni} \times R_{pc}$ Amortissement linéaire selon la durée de vie résiduelle du produit + prise en compte du remplacement du composant durant la PER du bâtiment 	$\sum I_{pc} = \sum Q_{pci} \times DE_{voe} \times pc \times (DV_{conservation} / DVR) + \sum Q_{pci} \times DE_{fd} \times v_{pci} + \sum Q_{pci} \times DE_{pni} \times R_{pc}$ Distinction des étapes d'exploitation et fin de vie du produit conservé + prise en compte du remplacement du composant durant la PER du bâtiment 
	Déposés Si $DV < DV_{ref}$ $\sum I_{pd} = \sum Q_{pdi} \times DE_{pdi} \times (DV_{résiduelle} / DVR)$ Amortissement linéaire selon la durée de vie résiduelle du produit 	Si $DV > DV_{ref}$ $I_{pd} = 0 \text{ kgCO}_2$ pour encourager la rénovation	$\sum I_{pd} = \sum Q_{pdi} \times DE_{pdi}$ Uniquement impacts liés à la fin de vie 	

Figure 30 - Résumé des hypothèses de modélisations des PCE selon différentes méthodes de modélisation (source : figure personnelle, fortement inspirée du travail du Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

Et en pratique ? Etude comparative des méthodes

Afin d'étudier les différentes philosophies, forces et faiblesses des méthodes d'ACV, une étude comparative a été réalisée

Pour réaliser la comparaison entre les méthodes, un outil Excel a été créé, inspiré de la méthode de modélisation du logiciel Vizcab en mode "Explo" : le projet y est envisagé comme un assemblage de « macro-composants » : toiture, poteaux, poutres, menuiseries, cloisons, planchers ... Ces macro-composants sont des additions de fiches INIES, permettant de créer un complexe. Par exemple, 1m² du macro-composant "Toiture végétalisée- 15cm" sera composé de :

1,00	m ²	Dalle pleine en béton d'épaisseur 0.20 m, C25/30 XC1 CEM II/A-
1,00	m ²	Membrane synthétique en PVC-P pour étanchéité de toiture - DED
1,00	m ²	Panneau isolant en laine de verre pour toiture terrasse [R= 5 m ² .K/W] - DED
1,00	m ²	Pare-vapeur bitume polymère pour toiture - DED
1,00	m ²	Couche drainante en polystyrène expansé [ép.25 mm] - DED
0,07	ml	Couvertine en aluminium laqué pour acrotère - DED
1,00	m ²	Feuilles à base majoritairement végétale (bicouche) pour l'étanchéité de toiture - DED
0,07	ml	Solins et bandes de rives en aluminium [largeur 100mm ; ép. 1,5mm] - DED
0,07	ml	Garde-corps en aluminium [Hauteur = 1m] - DED
1,00	m ²	Substrat pour toiture végétalisée semi intensive [ep: 15 cm] - DED

Cette approche par macro-composants est plutôt adaptée pour des projets en phase concours ou avant-projet. Mais dès lors que des métrés plus précis sont connus, et que les éléments à modéliser seraient plus nombreux et complexes, il serait préférable d'utiliser un autre outil.

Pour étudier les méthodes, il a été choisi de réaliser des **ACV statiques** pour toutes, bien que Quartier Energie Carbone préconise plutôt une ACV dynamique. Cette comparaison permet de mieux comprendre les différentes philosophies de prise en compte des PCE, de leur durée de vie, de leurs émissions de GES en fonction de leurs étapes de vie, etc. Il a également été choisi de **ne prendre en compte le module D que pour les PCE neufs ou renouvelés** (par des PCE neufs). La méthode Quartier Energie Carbone recommande ceci car « il est probable que les données environnementales choisies ne correspondent pas exactement au produit réellement présent dans le bâtiment. »⁶⁷ Le module D est donc compté seulement pour les PCE neufs et renouvelés, avec un coefficient multiplicatif de **1/3**, comme en méthode E+C-. Par la suite, il pourrait être intéressant de comparer ces méthodes en mode de calcul dynamique. Mais dans cette étude comparative, ce sont bien des ACV statiques qui seront étudiées.

⁶⁷ CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) et al.

Fabrication des études : données de l'existant et du projet

Métrés

Afin d'approximer des métrés par défaut et de calculer des impacts rapportés par m², il est demandé à l'utilisateur de l'outil quelques informations basiques : surfaces, nombre de niveaux, hauteur, taux de vitrage etc. Une fois les métrés réalisés, il est nécessaire de déterminer pour chaque macro-composant la nature de l'existant, sa durée de vie, son taux de conservation, avant de définir le macro-composant neuf qui le remplacera en partie ou en totalité.

Éléments	Existant				Neuf			Résultats d'ACV			
	Quantité PCE Existants	Unités PCE Existants	Macrocomposants PCE Existants	Durée de vie effectuée	Choix de projet	Quantité PCE Neufs	Unités PCE Neufs	Macrocomposants PCE Neufs	Impacts BCCA	Impacts HQE GBC	Impacts Quartier
Escaliers	18 m		Escalier - Béton	20	Conservé à 75%	4 m		Escalier - Béton	2	4	1
Toiture	815 m ²				Déposé	971 m ²		Toiture pente - Charpente CLT, zinc et botte de paille	46	46	47
Poteaux Poutres	0 m ³			40	Déposé	0 m ³			0	0	0
Infra	374 m ²			20	Conservé à 100%	0 m ²			0	0	0
Poteaux	58 m ³		Poteaux - Béton CEMI	25	Conservé à 50%	29 m ³		Poteaux - Bois CLT	7	14	1
Poutres	186 m ³		Poutres - Béton CEMI	25	Conservé à 50%	93 m ³		Poutres - Bois CLT	26	48	3
Façade	960 m ²			40	Conservé à 75%	240 m ²		Façade Ossature Bois isolation paille + bardage bois	-1	-2	-4
Parois opaques	576 m ²			50	Conservé à 75%	144 m ²			0	0	0
Menuiseries extérieures	299 m ²		Menuiseries extérieures - Aluminium	15	Conservé à 50%	149 m ²		Menuiseries extérieures - Bois	13	23	14
Plancher bas	664 m ²		Plancher bas - Béton CEMIII isolé	15	Conservé à 75%	166 m ²		Plancher bas - Béton CEMIII isolé	21	51	13
Plancher intermédiaire	664 m ²			40	Conservé à 75%	166 m ²			0	0	0
Cloisons	0 m ²				Déposé	0 m ²			0	0	0
Murs de refend	836 m ²		Murs de refend - Béton CEMI	25	Conservé à 75%	209 m ²		Murs de refend - Ossature bois	9	29	1
Menuiseries intérieures	0 m ²			7	Déposé	0 m ²			0	0	0
Emetteurs	149 unité		Emetteurs - Convecteur électrique	7	Conservé à 50%	75 unité		Emetteurs - Panneau rayonnant	10	19	12
Système de production	1 unité		Système de production - Chaudière gaz à condensation [P=50kW]	10	Conservé à 75%	0 unité		Système de production - PAC air eau réversible [Pchaud = 40 kW à 80kW]	9	29	29
Total									143	261	117

Figure 31 - Interface de la partie "Choix de projet" de l'outil de comparaison des ACV en rénovation – Exemple (source : outil personnel)

Définition des macro-composants

L'une des problématiques associées à la création d'un outil d'ACV est la **solidité des données sources utilisées pour modéliser l'existant**. Les méthodes d'ACV étudiées demandant parfois le détail des impacts par phase pour les PCE, il a été nécessaire de recréer une base de données de macro-composants similaire à celle de Vizcab, détaillant les impacts par phase de vie. Dans cette optique, les informations de fiches INIES ont été reprises sur Excel, puis assemblées pour créer des macro-composants.

Derrière ce travail de fiabilisation d'une base de données personnelle de macro-composants, se cachent toutefois des difficultés. Tout d'abord, le choix des fiches (DED, collectives, individuelles) dans les macro-composants peut peser énormément sur le poids carbone total du macro-composant. L'outil étant ici envisagé en phase très en amont d'une conception, les fiches utilisées sont donc plutôt des DED ou des fiches collectives regroupant de nombreuses références.

Par ailleurs, la **modélisation d'éléments existants en rénovation a des spécificités** : il faut parvenir à trouver des fiches INIES qui pourraient correspondre aux PCE existants, mais aussi aux PCE neufs spécifiques à la rénovation de certains types de bâtiment. Comme le dit le CEREMA : « *L'ensemble des études insiste sur l'importance d'une base de données robuste, ce qui conforte la nécessité de création de fiches de déclaration environnementale et sanitaires les plus précises possibles. Il serait ainsi intéressant de pouvoir modéliser l'impact d'éléments constructifs couramment utilisés dans la réhabilitation du bâti d'avant 1948 (menuiseries bois artisanales, enduits traditionnels...) grâce à des données génériques types aujourd'hui absentes de la base*

INIES. »⁶⁸ Pour le moment, la modélisation des macro-composants est un peu générique et le choix des FDES a été réalisé en essayant de trouver la plus grande ressemblance possible avec ce que l'on sait des PCE existants et des futurs PCE neufs.

Paramètres clés des méthodes : analyses de sensibilité

Afin de mieux comprendre quels sont les paramètres influant majoritairement sur les impacts calculés par les différentes méthodes d'ACV en rénovation, nous allons réaliser des analyses de sensibilité sur les différents paramètres entrant en compte dans les calculs : **taux de conservation de l'existant, durée de vie déjà effectuée de l'existant, choix des macro-composants ...**

Par ailleurs, pour aider le lecteur à naviguer plus simplement dans les graphiques qui vont suivre, le code couleur suivant a été adopté pour distinguer les Produits de Constructions et Equipements (PCE) :

■ : PCE conservés ■ : PCE déposés
 ■ : PCE neufs ■ : Tous les PCE

Tout conserver ou tout remplacer ? Analyse du taux de conservation

L'un des paramètres clés du calcul d'ACV en rénovation est la **quantité** de Produits de Construction et Equipements **conservés** et la quantité de PCE **déposés**. Un indicateur "taux de conservation des PCE existants" a été créé dans l'outil. A partir du pourcentage choisi, les quantités de PCE existants conservés, les quantités de PCE existants déposés et les quantités de PCE neufs sont recalculées.

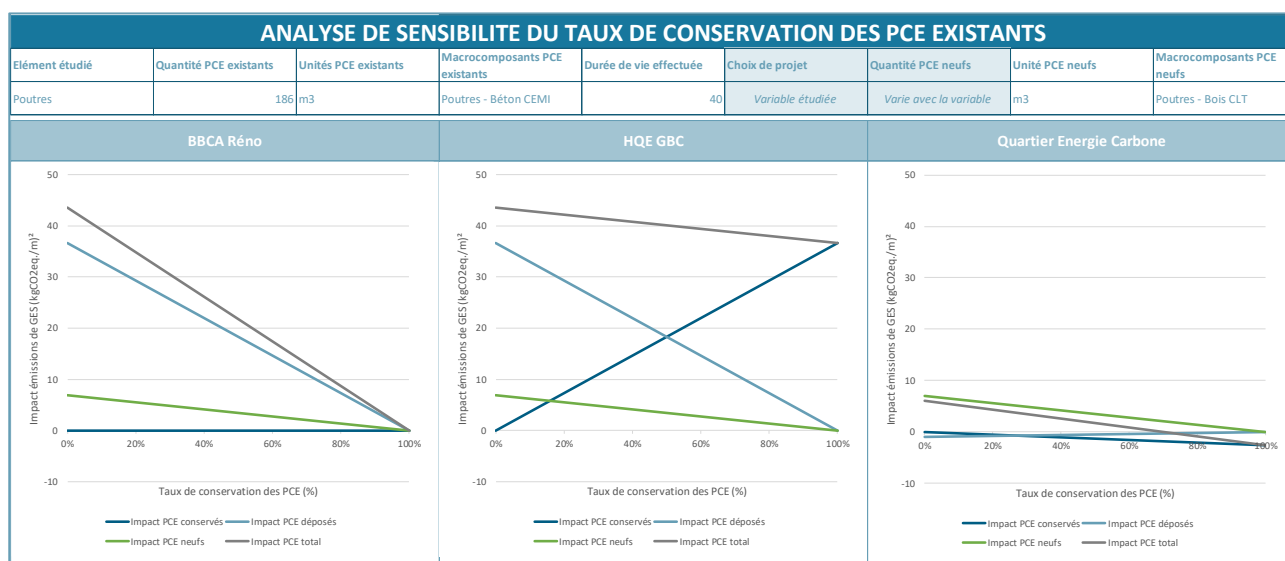


Figure 32 - Analyse de sensibilité du taux de conservation des PCE existants - Etude des poutres (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'un m3 de poutre CLT (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'un m3 de béton armé CEM I (PCE existants et déposés).

⁶⁸ Cerema, « Comment évaluer l'impact carbone dans les projets de rénovation des bâtiments ? Etat des lieux des méthodes et pratiques actuelles en France », consulté le 22 août 2023, <http://www.cerema.fr/fr/actualites/comment-evaluer-impact-carbone-projets-renovation-batiments>.

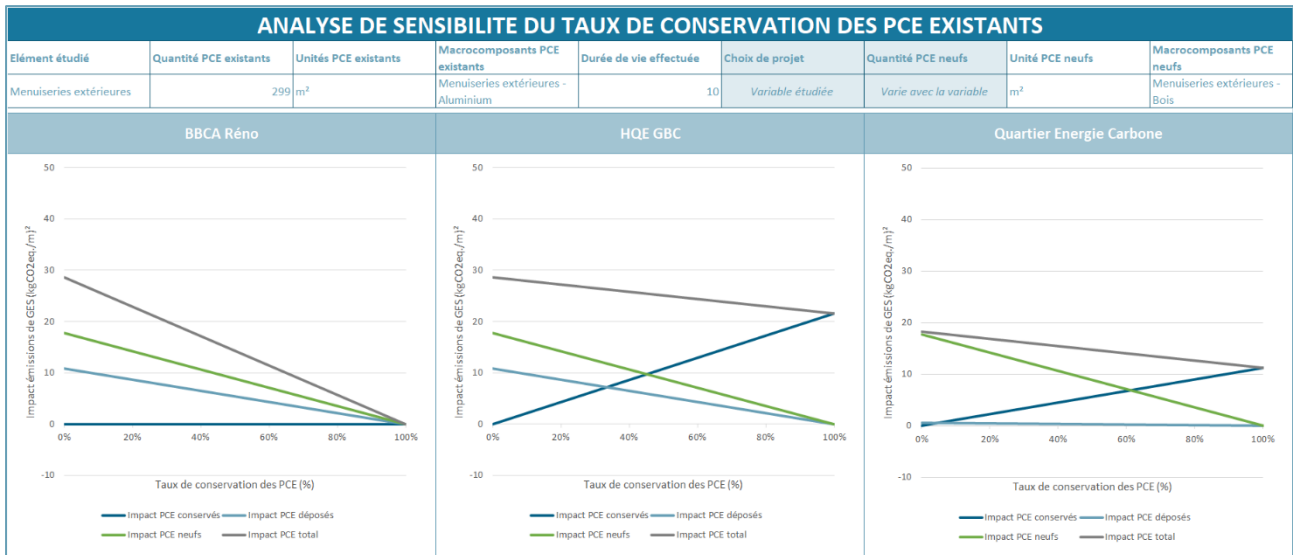


Figure 33 - Analyse de sensibilité du taux de conservation des PCE existants - Etude des menuiseries extérieures (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'une menuiserie bois (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'une menuiserie aluminium (PCE existants et déposés).

L'analyse de sensibilité du taux de conservation des PCE existants permet de confirmer un premier point commun entre les trois méthodes d'ACV en rénovation : **plus l'existant est conservé, plus l'impact carbone total diminue**. Toutefois, le taux de conservation de l'existant n'a pas les mêmes impacts selon les méthodes : avec la méthode BBCA Réno, le 100% de conservation de l'existant permet d'atteindre des impacts égaux à zéro, ce qui n'est pas le cas des autres méthodes. La méthode Quartier Energie Carbone quant à elle, a des valeurs d'impact total souvent inférieures aux autres. Au vu des différences de profil des analyses, il est pertinent de rentrer dans le détail de la décomposition des calculs entre impacts des PCE neufs, conservés ou déposés.

L'impact des PCE **neufs** suit globalement la même tendance entre les trois méthodes : il diminue fortement à mesure que le taux de conservation augmente. L'impact des PCE neufs dépend en effet fortement du taux de conservation car celui-ci influe sur la quantité de matériaux conservés dans le projet, et donc par soustraction, sur la quantité de matériaux neufs qu'il sera nécessaire d'ajouter.

En revanche, l'impact des PCE **conservés** ne suit pas les mêmes tendances selon les différentes méthodes d'ACV :

BBCA Réno $\Sigma I_{pc} = 0$

L'impact des PCE conservés est considéré comme **nul** (la courbe est donc une droite horizontale où $y=0$). Cette méthode de calcul de ΣI_{pc} favorise grandement la conservation de l'existant.

HQE-GBC $DV > DVR \Rightarrow \Sigma I_{pc} = 0$
 $DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pc} = \Sigma Q_{pci} \times DE_{pci} \times (DV_{résiduelle}/DVR) + \Sigma Q_{pni} \times DE_{pni} \times R_{pc}$

Si le PCE n'est pas amorti, l'impact des PCE conservés **augmente proportionnellement au taux de conservation**. En effet le calcul est fortement dépendant de la **quantité de PCE conservés** (ΣQ_{pci}) et à renouveler dans le futur (ΣQ_{pni}). Cette quantité augmente forcément lorsque le taux de conservation est plus élevé. Cette méthode de calcul de ΣI_{pc} ne favorise pas la conservation de l'existant.

Quartier EC $\Sigma I_{pc} = \Sigma Q_{pci} \times DE_{voepci} \times (DV_{conservation}/DVR) + \Sigma Q_{pci} \times DE_{fdvpci} + \Sigma Q_{pni} \times DE_{pni} \times R_{pc}$

L'impact des PCE conservés dépend de 3 termes, tous multipliés par la quantité de matériaux conservés/renouvelés qui est directement corrélé au taux de conservation de l'existant. Le premier terme est lié à la **vie en œuvre** (module B), le deuxième est lié à la **fin de vie** (module C) et le dernier concerne le **renouvellement futur** des PCE conservés (total cycle + 1/3 module D).

Du fait de cette décomposition par phase, les impacts des PCE conservés peuvent parfois être négatifs : *par exemple une poutre en béton CEM I conservé à 100% et pourra avoir un impact négatif. Cela s'explique car le module B du béton est négatif (dû à la carbonatation du béton qui capte du CO2), et que son module C (fin de vie) peut émettre moins de GES que ce qui est capté lors de la vie en œuvre du matériau.*

Cette méthode de calcul de ΣI_{pc} ne favorise ou ne défavorise pas la conservation de l'existant, mais permet plutôt une réflexion plus fine sur l'exploitation et la fin de vie des PCE, et le potentiel de réutilisation, récupération et/ou recyclage du PCE utilisé pour renouveler dans le futur l'existant. (En méthode dynamique les résultats pourraient être différents).

Concernant les PCE **déposés** (évacués), la tendance est plutôt similaire entre les trois méthodes : **l'impact des PCES déposés diminue proportionnellement à l'augmentation du taux de conservation**. En effet, ce taux de conservation a un impact direct sur la quantité de PCE déposés (ΣQ_{pdi}), qui est structurante dans les calculs des trois méthodes :

BBCA Réno $DV > DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = 0$
 $DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi} \times (DV_{résiduelle}/DVR)$

HQE-GBC $DV > DVR \Rightarrow I_{pd} = 0$
 $DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi} \times (DV_{résiduelle}/DVR)$
 avec $DE_{pdi} = \text{Total cycle de vie} + 1/3 \text{ Module D}$

Les deux méthodes partagent le même calcul pour ΣI_{pd} . Elles pénalisent grandement l'impact des PCE déposés en considérant l'impact total du PCE. Le calcul est par ailleurs très lié à la durée de vie effective et à la durée de vie résiduelle du produit, que nous étudierons par la suite. **Ces méthodes de calcul de ΣI_{pd} favorisent donc largement la conservation de l'existant**

Quartier EC $\Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi}$
 avec $DE_{pdi} = \text{Module C}$

Cette méthode ne prend en compte dans ces calculs que les impacts directement attribuables à la fin de vie des éléments déposés. Le ΣI_{pd} de la méthode Quartier Energie Carbone est souvent plus de dix fois inférieur à ceux des deux autres méthodes. **Cette méthode de calcul de ΣI_{pd} est la plus proche de la réalité, mais elle incite peu à la conservation de l'existant.**

BBCA Réno Cette méthode est peu détaillée : elle ne prend en compte que les impacts des PCE neufs et des PCE déposés non amortis.
 Elle favorise très fortement la conservation de l'existant.

HQE-GBC Cette méthode est moyennement détaillée : elle prend en compte les impacts des PCE neufs, conservés non-amortis et déposés non amortis.
 Elle favorise modérément la conservation de l'existant.

Quartier EC Cette méthode est très détaillée : elle prend en compte les impacts des PCE neufs, conservés et déposés en les détaillant par phase si nécessaire.
 Elle favorise modérément la conservation de l'existant.

Quand rénover ? Analyse de la durée de vie effectuée

L'analyse de la durée de vie effectuée d'un composant est fortement liée à la **durée de vie résiduelle** du produit, c'est-à-dire le nombre d'années qu'il pourrait encore rester en place théoriquement (= durée de vie théorique – durée de vie effectuée). Les calculs dépendent également énormément du **coefficient de renouvellement du produit conservé**, c'est-à-dire le nombre de fois où le produit devra être changé durant la période d'étude (50 ans).

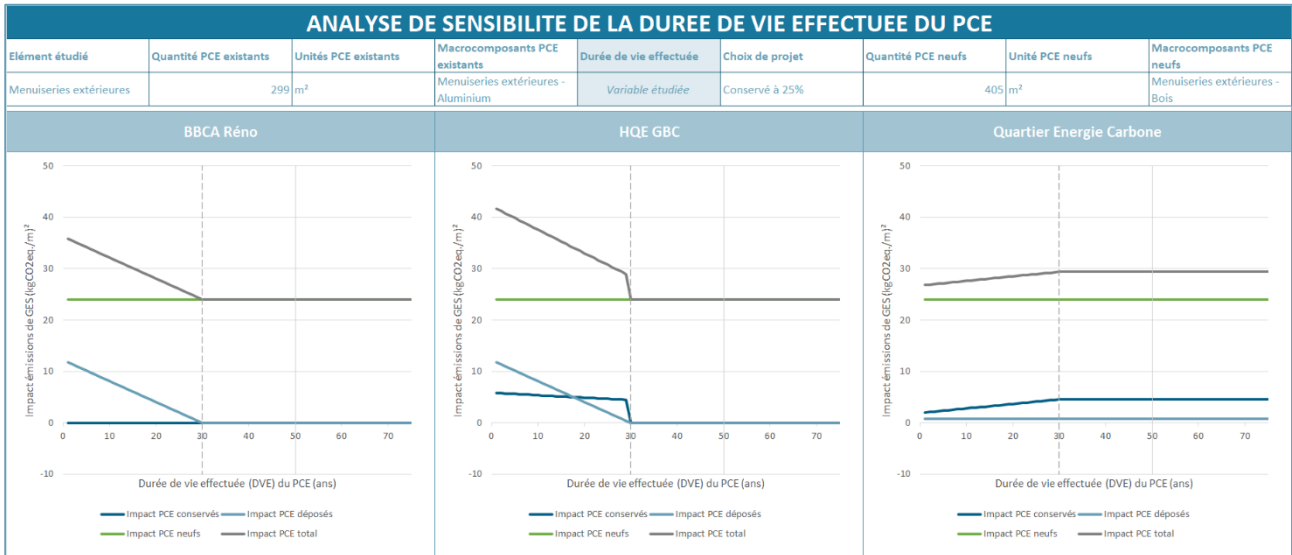


Figure 34 - Analyse de sensibilité de la durée de vie effectuée des composants - Etude des menuiseries extérieures (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'une menuiserie bois (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'une menuiserie aluminium (PCE existants et conservés).

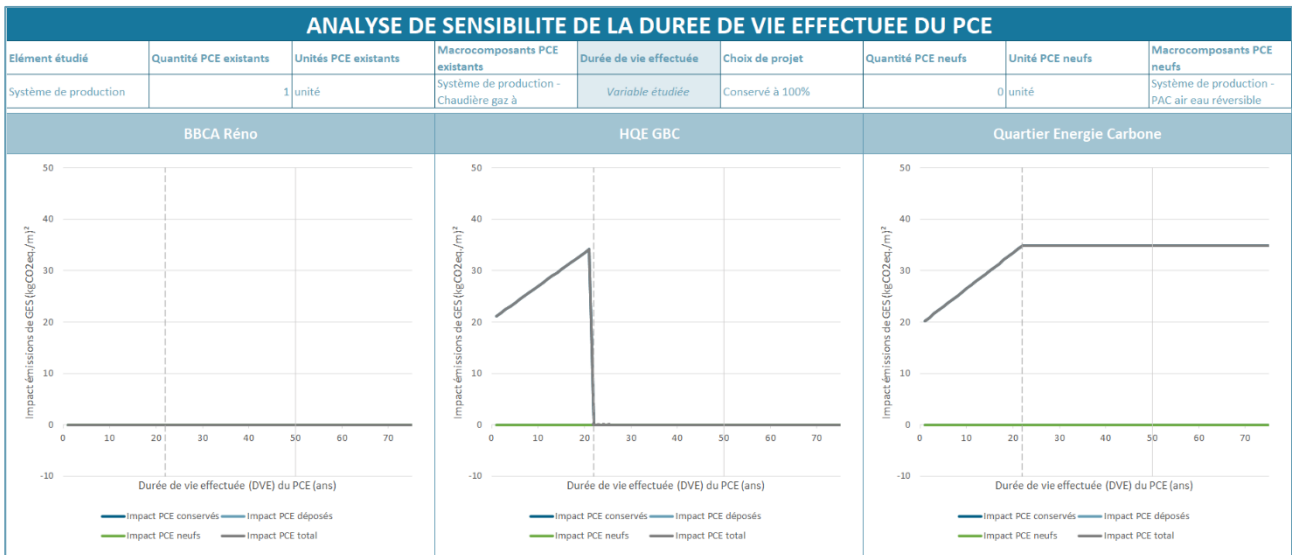


Figure 35 - Analyse de sensibilité de la durée de vie effectuée des composants - Etude des Systèmes de production d'ECs et chauffage (source : étude personnelle) – L'impact carbone de la PAC (PCE neufs et renouvelés) est bien plus important que celui de la chaudière (PCE existants et déposés) car la FDES de la chaudière ne prend pas en compte la phase d'exploitation alors que la FDES de la PAC si.

L'impact des PCE **neufs** suit la même tendance entre les trois méthodes : il reste stable peu importe la durée de vie du produit conservés. En effet, cette durée n'aura d'effet que sur les produits conservés à renouveler.

En revanche, l'impact des PCE **conservés** ne suit pas les mêmes tendances selon les différentes méthodes d'ACV :

BBCA Réno $\Sigma I_{pc} = 0$

L'impact des PCE conservés est considéré comme nul (la courbe est donc une droite horizontale où $y=0$).

HQE-GBC

$$DV > DVR \Rightarrow \Sigma I_{pc} = 0$$

$$DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pc} = \Sigma Q_{pci} \times DE_{pci} \times (DV_{résiduelle}/DVR) + \Sigma Q_{pni} \times DE_{pni} \times R_{pc}$$

Dans cette méthode, l'impact des PCE conservés chute brutalement à 0 dès lors qu'ils sont amortis dans le temps. Auparavant, les impacts diminuent ou linéairement en fonction de la **durée de vie effectuée** du produit et de la **différence d'impact carbone** entre l'impact du PCE conservés (DE_{pci}) et l'impact du PCE neuf qui le renouvelle (DE_{pni}). Ainsi, lorsque l'on renouvellera dans le futur un PCE existant par un PCE bien plus émetteur de GES, l'impact augmentera.

Quartier EC

$$\Sigma I_{pc} = \Sigma Q_{pci} \times DE_{voepci} \times (DV_{conservation}/DVR) + \Sigma Q_{pci} \times DE_{fdvpci} + \Sigma Q_{pni} \times DE_{pni} \times R_{pc}$$

Dans cette méthode, la durée de vie résiduelle (ou durée de conservation) n'est pas prise en compte dans le second terme, lié à la fin de vie du produit. Elle n'apparaît que dans le premier terme, lié à la vie en œuvre du produit (module B)

Concernant les PCE **déposés** (évacués), la tendance est identique entre BBCA Réno et HQE-GBC, mais pas avec Quartier Energie Carbone.

BBCA Réno

$$DV > DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = 0$$

$$DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi} \times (DV_{résiduelle}/DVR)$$

HQE-GBC

$$DV > DVR \Rightarrow I_{pd} = 0$$

$$DV < DVR \Rightarrow \Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi} \times (DV_{résiduelle}/DVR)$$

avec $DE_{pdi} = \text{Total cycle de vie} + \frac{1}{3} \text{ Module D}$

Pour ces deux méthodes, l'impact des produits déposés **diminue à mesure que la durée de vie résiduelle diminue**. Puis lorsque le produit est amorti, c'est-à-dire lorsque sa durée de vie résiduelle est égale à zéro, l'impact de la dépose chute alors à zéro.

Quartier EC

$$\Sigma I_{pd} = \Sigma Q_{pdi} \times DE_{pdi}$$

avec $DE_{pdi} = \text{Module C}$

L'impact des PCE déposés **ne dépend ici pas du tout de la durée de vie résiduelle du composant**, mais simplement de son impact en fin de vie, qui lui reste stable peu importe la durée.

Par quoi remplacer l'existant ? Analyse des macro-composants neufs

L'une des fonctionnalités premières de l'ACV est de permettre la comparaison de variantes de projet. L'outil développé pour cette étude permet donc d'étudier différents macro-composants neufs et il évalue par la même occasion la manière dont les méthodes de calculs les prennent en compte.

Il est important de noter que les macro-composants neufs influenceront, logiquement, sur le calcul d'impact des PCE **neufs**. Mais les macro-composants neufs seront aussi pris en compte dans la partie "renouvellement" qui intervient souvent dans le calcul d'impact des PCE **conservés**. Ce "renouvellement" correspond au besoin potentiel de devoir remplacer le produit conservé durant la période d'étude. Par exemple, si l'on conserve une menuiserie qui a déjà vécu 20 ans, sachant que sa durée de vie estimée est de 30 ans, il est probable qu'elle doive être changée dans 10 ans (durée de vie résiduelle).

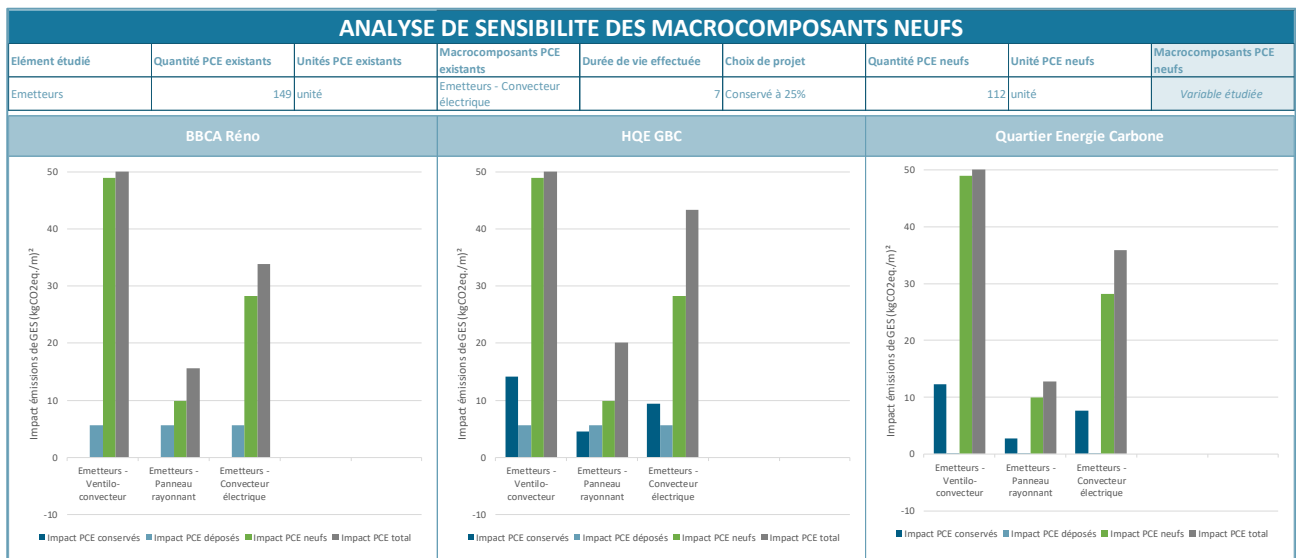


Figure 36 - Analyse de sensibilité des composants neufs - Etude des émetteurs (source : étude personnelle)

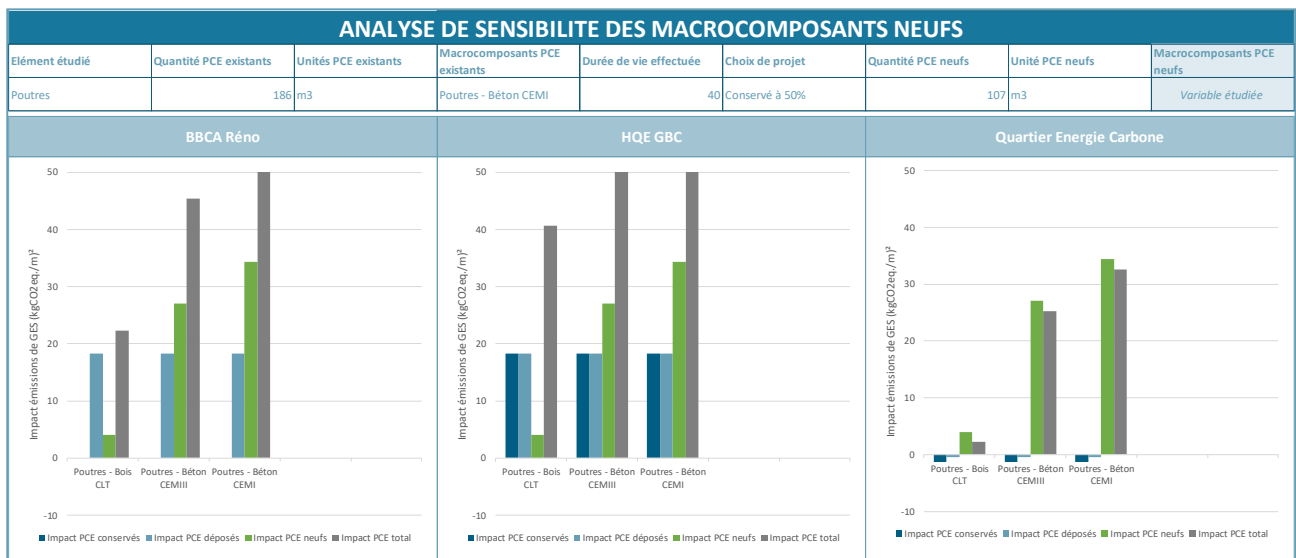


Figure 37 - Analyse de sensibilité des composants neufs - Etude des poutres (source : étude personnelle)

L'analyse de sensibilité nous permet de constater que les trois méthodes présentent des tendances similaires pour l'impact **total** des PCE : le PCE avec l'impact le plus faible est toujours le même entre les trois méthodes. **Les trois méthodes présentent le même classement des macro-composants selon leur impact total. Les ordres de grandeur ne sont toutefois pas toujours les mêmes** : la méthode HQE GBC présente des résultats jusqu'à 50 fois plus élevés que la méthode Quartier Energie Carbone (en prenant l'exemple d'une poutre en CLT par exemple). Ces différences sont donc à étudier plus dans le détail.

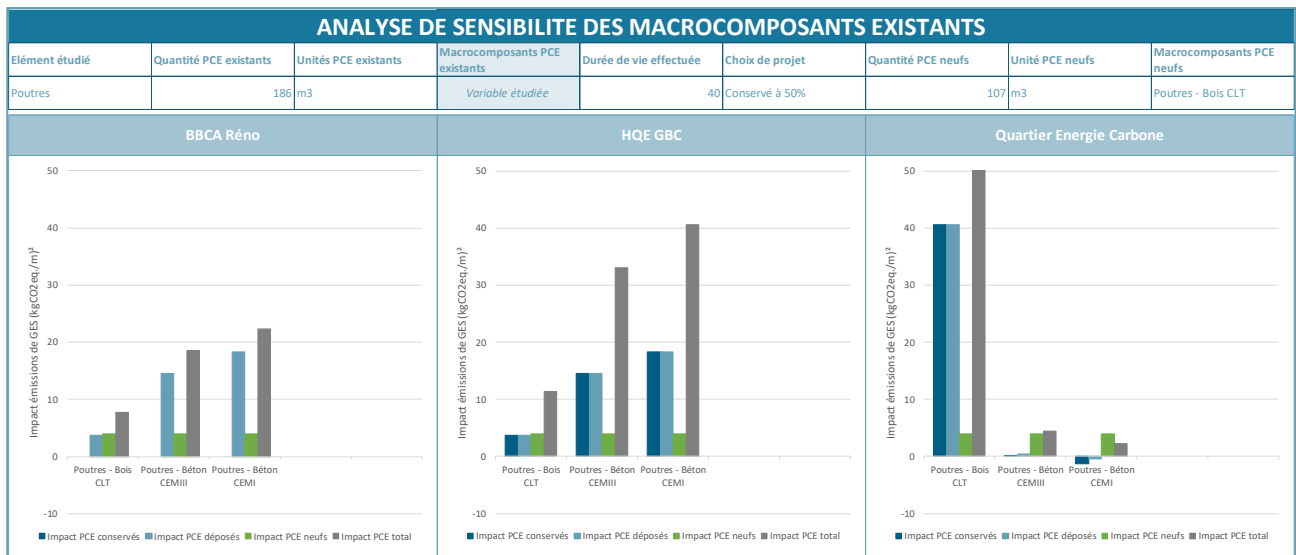
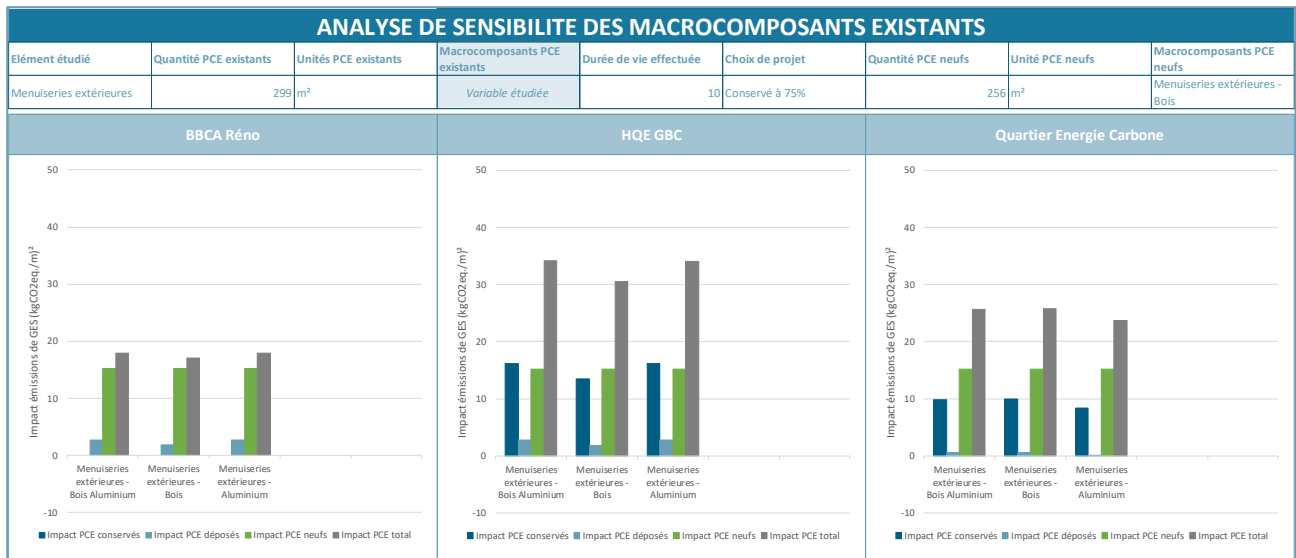
Pour les PCE **neufs**, l'impact est le même entre les trois méthodes. C'est tout à fait logique puisque la méthode de calcul est la même.

Pour les PCE **conservés**, l'impact varie fortement entre les méthodes. Pour étudier ces différences, il est pertinent de continuer l'analyse en ne faisant plus varier les macro-composants neufs, mais plutôt les macro-composants existants.

Pour les PCE **déposés**, l'impact varie également fortement entre les méthodes.

Que conserver de l'existant ? Analyse des macro-composants existants

Cette étude autour des macro-composants existants vise à déterminer lesquels sont intéressants ou non à conserver dans un bâtiment existant. Les comparaisons resteront de l'ordre du **théorique** : dans les faits, un bâtiment sera doté par exemple des poutres existantes en béton CEMI, que l'on souhaiterait déposer et remplacer par des poutres en lamellé collé. Mais dans cette étude, nous chercherons à savoir en quoi les impacts des GES seraient différents si les poutres existantes n'étaient pas en béton CEMI mais plutôt en béton CEMIII, ou encore en bois.



Concernant l'impact **total** des PCE, BBCA Réno affiche le plus souvent l'impact le plus faible, tandis que HQE GBC présente en général l'impact le plus élevé, et Quartier énergie carbone montre des résultats souvent intermédiaires.

On remarque que BBCA Réno et HQE GBC, malgré leur écart d'ordre de grandeur suivent les mêmes tendances : par exemple, l'impact d'un remplacement d'une menuiserie bois par une menuiserie bois est jugé moins émetteur que le remplacement d'une menuiserie aluminium par une menuiserie bois.

En revanche, la méthode Quartier énergie carbone présente des résultats diamétralement opposés. *Il est jugé moins émetteur de remplacer une menuiserie aluminium par une menuiserie bois que de remplacer une menuiserie bois par une menuiserie bois. De même, remplacer des poutres CLT par des poutres CLT a un impact 9 fois plus élevé en méthode Quartier Energie Carbone qu'en méthode HQE GBC.*

Pour explorer ces différences, il s'agit de regarder la décomposition des impacts par types de PCE.

Pour les PCE **neufs**, l'impact est le même entre les trois méthodes.

Pour les PCE **conservés**, les 3 méthodes présentent des résultats différents.

L'impact est nul pour BBCA Réno.

En plus des impacts de renouvellement, la méthode HQE GBC prend notamment en compte le total des impacts sur le cycle de vie du PCE existant, au prorata de sa durée de vie résiduelle par rapport à sa durée de vie théorique estimée.

La méthode Quartier Energie Carbone décompose plutôt les impacts par phase : l'impact d'exploitation du PCE existant (module B) est au prorata de sa DVrésiduelle/DVR, l'impact de fin de vie du PCE (module C et D) et le calcul des impacts de renouvellement (total et module D). *Avec cette méthode, conserver des poutres en CLT a un impact bien plus élevé que conserver des poutres en CEM I car la fin de vie est beaucoup plus émettrice de GES pour le CLT que pour le CEM I.*

Pour les PCE **déposés**, les méthodes BBCA Réno et HQE GBC sont exactement les mêmes : l'impact est une fois encore un amortissement du total des impacts du cycle de vie du PCE, au prorata de la durée de vie résiduelle du PCE.

En revanche, l'impact est bien plus faible pour la méthode Quartier Energie Carbone car seule la fin de vie (module C) est prise en compte.

Comparaison d'ACV en rénovation : premières conclusions

Ce chapitre assez technique a permis de comparer trois méthodes d'ACV en rénovation en France. Les méthodes BBCA Rénovation, HQE-GBC et Quartier Energie Carbone ont chacune leurs objectifs, leurs forces et leurs limites, que l'on pourrait résumer de la manière suivante :

	BBCA Rénovation	HQE GBC	Quartier EC
Incitation à la conservation de l'existant	+++	+	++
Incitation à la conservation longue durée des composants	++	+++	-
Décomposition du carbone par phase	-	-	+++
Présence de seuils	+	-	-
Facilité de calcul	+++	++	+
« Exactitude » du calcul	+	++	+++

Plusieurs thématiques de calculs d'ACV en rénovation ressortent de l'analyse de ces méthodes :

- Le **renouvellement des PCE existants conservés** :
 - Lorsque les Produits de Construction et Equipements (PCE) existants sont conservés, il est prévu qu'ils soient **remplacés au cours de la période d'étude** de référence (50 ans) : *si une menuiserie de 20 ans d'âge est conservée, elle devra être remplacée au bout de 10 ans car sa durée de vie de référence est de 30 ans. Son coefficient de renouvellement sur la période d'étude sera donc égal à : $(50-10)/30=1.33$*
 - Cela signifie donc que d'après les calculs, **choisir de conserver un composant qui a déjà dépassé sa durée de vie de référence revient à le renouveler immédiatement !** *Si une menuiserie a déjà dépassé les 30 ans d'âge, sa durée de vie résiduelle sera de 0 année. Son coefficient de renouvellement sur la période d'étude sera donc égal à : $(50-0)/30=1.67$.*
 - Le calcul d'impact de renouvellement des PCE conservés ne favorise pas de conserver l'existant le plus longtemps possible. **Il n'est pas prévu, ni calculé de conserver un composant qui a dépassé sa durée de vie théorique.** Cette problématique ne semble être abordée dans aucune des méthodes et semble être délicate à résoudre, et pourtant très importante à traiter.
- La **fin de vie** des produits :
 - En méthode BBCA Rénovation et HQE GBC, la fin de vie n'est pas vraiment une question : elle est noyée dans l'information globale de l'impact du produit. En revanche, la question se pose réellement pour la méthode Quartier Energie Carbone, notamment pour les **matériaux biosourcés**. La **dépose** de ces matériaux est **extrêmement carbonée** dans cette méthode. *Remplacer ou conserver une poutre en CLT dans cette méthode est 9 fois plus émetteur en GES qu'avec la méthode HQE-GBC. Ce chiffre serait à éprouver en méthode d'ACV dynamique également : la différence serait probablement bien plus faible du fait des coefficients de pondération relatifs à la cinétique des GES.*
 - En méthode Quartier Energie Carbone, il semblerait que l'impact élevé de fin de vie des matériaux biosourcés soit liés aux hypothèses actuelles de fin de vie des matériaux biosourcés dans la base INIES. **L'incinération est souvent considérée par défaut** dans les fiches FDES des matériaux biosourcés, alors qu'il est probable qu'au bout de leurs 50 ans de durée de vie théorique, les matériaux restent encore en place dans le bâtiment, ou soient réemployés, réutilisés ou encore recyclés. Avec le passage

de la nomenclature des **fiches INIES de A1 vers A2**, l'impact de la fin de vie du biosourcé devrait d'ailleurs encore **augmenter**.⁶⁹

- Le **module D** (Bénéfices et risques au-delà des limites)
 - Pour le moment la prise en compte ou non du module D dans les calculs est **assez floue**. La méthode Quartier Energie Carbone évoque notamment des orientations contraires quant à sa place dans les calculs, notamment pour les PCE conservés. En effet, pour ces matériaux existants depuis un certain temps dans un bâtiment, les **hypothèses** d'avantages et charges au-delà des frontières du système utilisées dans les FDES ne sont **pas forcément applicables**. Par exemple, une charpente en acier existante ne contiendra pas nécessairement d'acier recyclé, et verra peut-être son module D nul théoriquement, alors que la FDES existante la plus proche aurait un module D négatif qui favoriserait trop le PCE.
- **L'attribution du carbone aux différents acteurs du bâtiment**
 - Les différentes méthodes ont des **philosophies très différentes** sur la répartition de l'impact carbone sur les différents acteurs.
 - La méthode BBCA Rénovation propose aux porteurs de projet une **part très faible de l'impact** : à partir du moment où les éléments sont conservés, ils comptent pour zéro, et de même s'ils sont déposés après avoir été suffisamment longtemps dans le bâtiment. Cette méthode encourage la maîtrise d'ouvrage (MOA) à rénover un maximum.
 - La méthode HQE GBC se veut plus exacte dans ses calculs et offre moins de carbone « gratuit » à la MOA. Cette méthode **encourage la rénovation, mais pas la rénovation trop rapide** : il est plus avantageux de rénover lorsque les produits ont déjà bien vécu en place dans le bâtiment. Ses résultats d'impact sont souvent bien plus importants que dans les autres méthodes.
 - La méthode Quartier Energie se rapproche le plus de la « vérité » des émissions carbone grâce à sa décomposition par phase, mais n'encourage pas nécessairement à rénover autant que les autres.

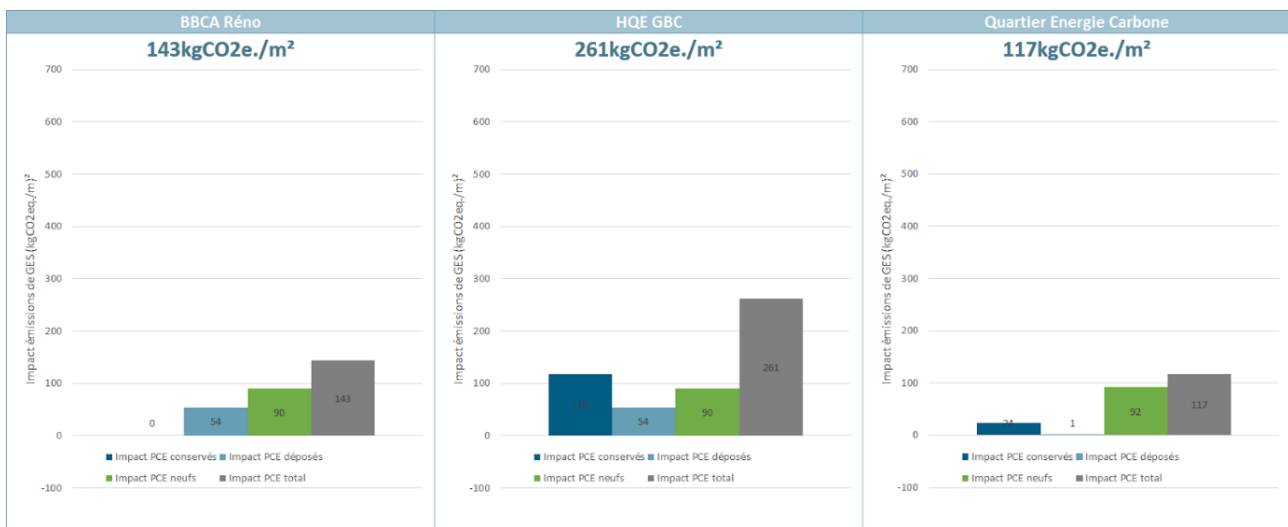


Figure 40 - Exemple d'impact total d'un projet de rénovation selon différentes méthodes (source : étude personnelle)

A travers ce chapitre très théorique et calculatoire, nous avons balayé différentes méthodes d'ACV qui pourraient être appliquées en rénovation en France. **Toutefois, au-delà des calculs, la rénovation bas carbone se traduit aussi dans problématiques constructives plus tangibles.**

⁶⁹ Bertrand Cargill, « Analyses de cycle de vie en RE2020 », *Etamine* (blog), 12 décembre 2022, <https://www.etamine.coop/analyses-de-cycle-de-vie-en-re2020/>.

Chapitre 4.

Haro sur le carbone ! Les leviers de la rénovation bas carbone en France

Avant de se pencher sur le cas de la rénovation, il est intéressant de se demander où nous en sommes dans la **décarbonation du neuf**. Le Hub des Prescripteurs Bas Carbone mené par l'IFPEB (Institut Français pour la Performance du Bâtiment), Carbone 4, et CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), a étudié le sujet avec une première étude sur un panel d'une cinquantaine de bâtiments de logements neufs, et en a dégagé trois grands axes pour décarboner le bâtiment en France.

Le premier, méthodologique, concerne plutôt les **Méthodes de calcul** : il préconise le recours aux FDES plutôt qu'aux DED, et le détail de certains lots forfaitaires (comme le 8.1. pour les équipements de production de chaud/froid). Cela permet simplement de se rapprocher de la réalité du poids carbone, et de ne pas s'encombrer de carbone "virtuel" majoré par des données peu précises. Ce levier méthodologique a peu d'intérêt pour décarboner "réellement" le bâtiment, il agit simplement sur la manière de calculer. Il ne sera pas détaillé pour la suite de cette étude.

Le deuxième levier s'intitule **Consommer Moins**, et encourage notamment la conception bioclimatique pour atteindre les seuils énergie et construction. D'autres pistes sont présentes, comme le réemploi de cloisons amovibles opaques, de plancher technique, de revêtement de sol souple, de sanitaire ou de luminaires. Cette option est actuellement considérée comme pesant **0 kg de CO2** dans les calculs afin de la favoriser grandement. La réflexion sur la diminution de la consommation de carbone peut aussi être poursuivie via l'optimisation de la volumétrie et la recherche de compacité. Ces pistes se heurtent toutefois à la désirabilité de l'habitat, puisque les questions de lumière naturelle, de paysage, d'accès à un espace extérieur et d'esthétisme des bâtiments et des villes entrent également en compte.

Enfin, le troisième levier envisagé préconise de **Consommer Mieux**. Les bâtiments les plus à même de passer les seuils 2025 et 2028 dans le panel étudié sont en effet ceux qui utilisent moins de béton et plus de matériaux biosourcés ou géosourcés pour répondre aux exigences carbone Icconstruction. Du côté énergie, les énergies de chauffage bas-carbone (Bois, plaquettes, poêle, réseau de chaleur urbain, électricité) permettent sans surprise d'atteindre largement les seuils.

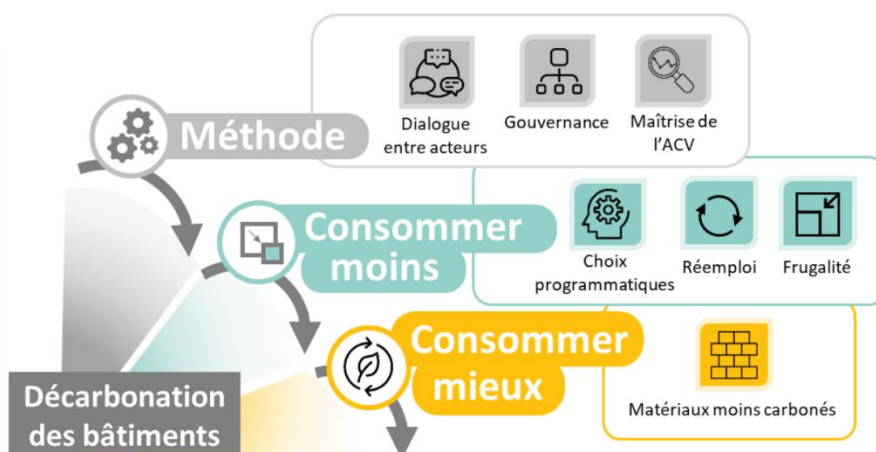


Figure 41 - Message clé du Hub des prescripteurs bas carbone pour décarboner le bâtiment tout au long du projet (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

Consommer moins

Tout comme l'énergie la plus verte est celle qui n'est pas consommée, les matériaux et bâtiments les plus verts sont ceux qui ne sont pas construits.

Mais notre économie actuelle est plutôt celle de la consommation jetable : emballages, mouchoirs, vaisselle, cigarettes ... et celle du rapidement consommé : fast food, fast fashion ... Cela génère une quantité de déchet impressionnante : **342,4 millions de tonnes de déchets en 2018 en France**, soit 5,1 tonnes par habitant. Toutefois, l'impact de l'individu en tant que tel dans ces chiffres est assez faible : seulement 8,7% des déchets totaux sont des déchets ménagers. En revanche, près de **70% des déchets** sont des déchets minéraux, issus en quasi-totalité de déchets provenant du **secteur de la construction**. Tous types de déchets confondus, seuls **66%** des déchets du secteur de la construction étaient **recyclés** en 2018, les 34% restants étant enfouis ou incinérés.⁷⁰

Sobriété énergétique

Consommer moins, cela passe aussi par la diminution de la consommation d'énergie. Certaines mesures architecturales participent à cette réduction des consommations d'énergie, et donc des émissions carbone associées. La **compacité** par exemple, permet de bien meilleures performances thermiques, et réduit donc les émissions carbone de l'énergie, ainsi que la surface de façade. Plus le bâtiment est compact, moins il est carboné : jusqu'à 120 / 130 kg eq.CO₂/m²SDP peuvent être évités sur un projet.⁷¹

Compacité : Surface de parois déperditives / Volume Chauffé

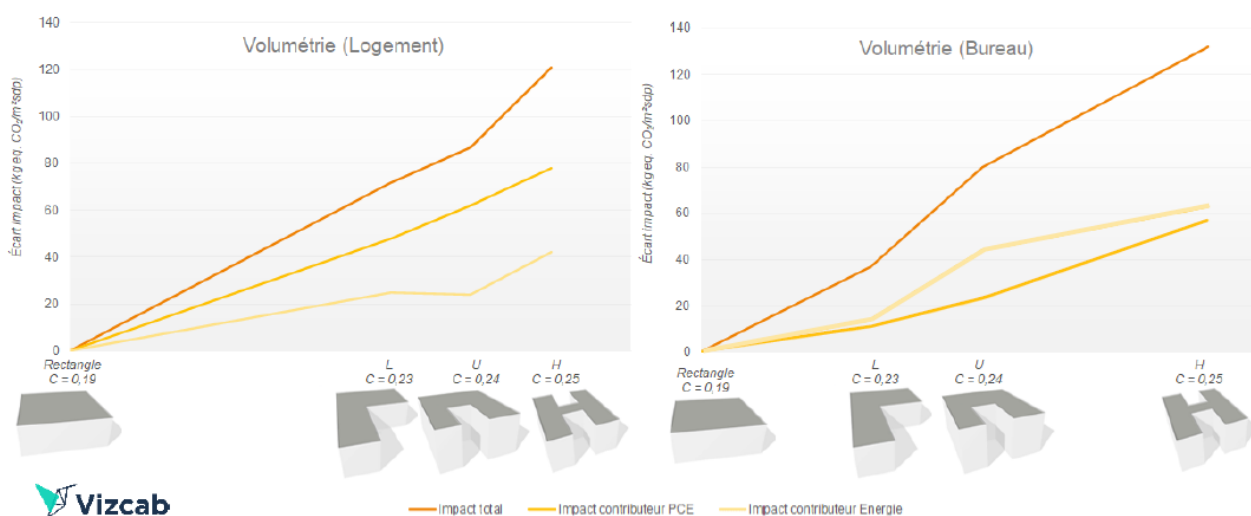


Figure 42 - L'impact de la compacité sur le carbone (source : Hub des prescripteurs bas carbone)

De même, le **taux de vitrage** est à optimiser entre impact carbone sur l'énergie, et impact carbone sur le produit de construction. Pour du logement, pour un optimum entre confort, carbone et coût, le taux de vitrage pourrait se situer aux alentours de 35%. Pour du bureau, ce taux serait plutôt aux alentours de 50%.

⁷⁰ « Bilan environnemental de la France - Édition 2022 », Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports, consulté le 1 août 2023, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/SAISIR>.

⁷¹ Hub des Prescripteurs Bas Carbone et al., « Equation Coût Carbone », 10/21.

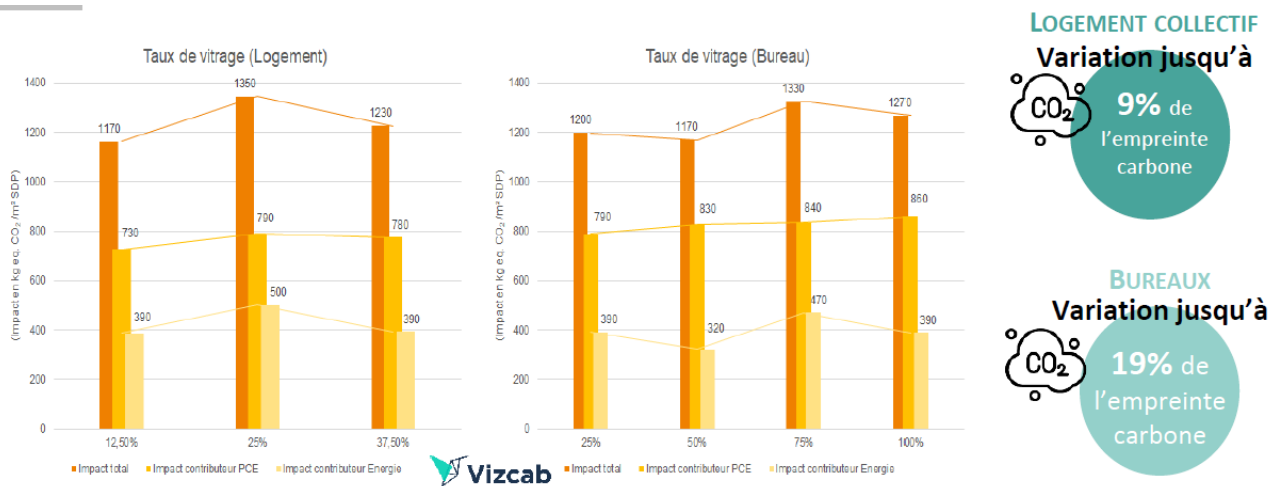


Figure 43 - L'impact du taux de vitrage sur le carbone (source : Hub des prescripteurs Bas Carbone)

L'**isolation des parois** opaques a évidemment un impact important sur le carbone : plus la paroi est isolée, plus l'impact carbone énergie diminue drastiquement.

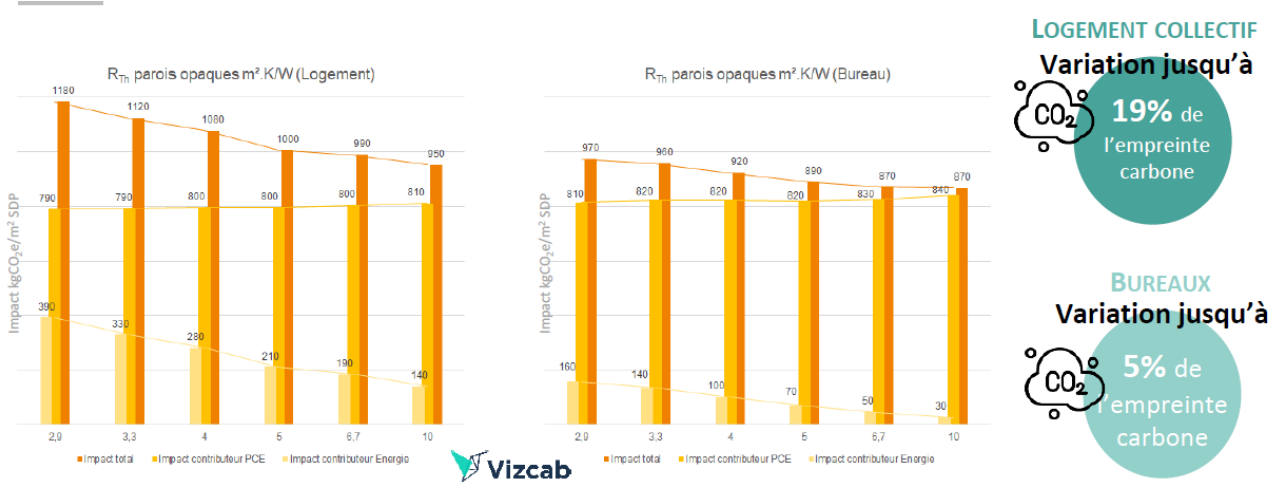


Figure 44 - L'impact de l'isolation des parois opaques sur le carbone (source : Hub de prescripteurs Bas Carbone)

Evidemment, le **bioclimatisme** joue également un rôle très fort dans la diminution de la consommation d'énergie. Bien choisir ses orientations, ses protections solaires, l'inertie et l'isolation de ses murs, les albédos des matériaux, la manière de ventiler naturellement, permet à un projet d'abaisser drastiquement ses consommations d'énergie, voire de se rapprocher du statut de bâtiment passif.

Frugalité

Le concept de Frugalité heureuse et créative, développé par les architectes et ingénieurs Philippe Madec, Dominique Gauzin-Müller et Alain Bornarel, prend corps à travers quatre grands axes : énergie, matière, technicité, territoire. Ce concept se rapproche de la sobriété, mais sans l'aspect d'austérité qui l'accompagne bien souvent. L'idée principale qui traverse ce courant de pensée est d'éviter le gaspillage de ressources, d'énergie et de lieux dans toutes les thématiques évoquées précédemment.

Dans le bâtiment, le concept de **frugalité de matériaux** revient régulièrement pour diminuer l'impact carbone d'un bâtiment. L'idée derrière ce terme est d'éviter autant que possible l'utilisation de matière non nécessaire. Par exemple, la frugalité de matière peut être dans le choix de ne pas opter pour des faux plafonds, ou des faux planchers, et de laisser plutôt apparente la structure et les éléments techniques. Ce concept peut s'exprimer

également dans des choix de conception : supprimer un élément programmatique moyennement nécessaire, comme un parking souterrain, peut permettre d'économiser énormément de matière. De même, travailler de concert avec les bureaux d'études techniques peut permettre des économies de matière en termes de dimensionnement de la structure, ou des réseaux de CVC ou CFO. En évitant ces quantités de matières en conception, la dépose future du bâtiment produira aussi moins de déchets, c'est-à-dire « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire »⁷²

Recyclage

Le recyclage réfère à « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblayage ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage ».

Certains industriels utilisent le recyclage pour leurs matériaux de construction : c'est le cas de l'association Echo-Mer en Charente-Maritime qui **recycle des bouchons de liège** en les broyant, pour en faire de l'isolant en vrac.⁷³

C'est aussi le cas du géant du bâtiment Saint Gobain, qui propose désormais un verre à partir de **verre recyclé**, plus de 40% moins émetteur en GES que la moyenne des concurrents. Le recyclage est souvent évoqué comme la solution verte par excellence, pourtant, recycler des produits peut exiger un surcroît d'énergie, voire de nouveaux matériaux. Le verre recyclé de Saint Gobain affiche certes moins d'émissions que les autres, mais dans sa FDES, sa fin de vie est indiquée comme à « 100% d'enfouissement », ce qui épargne des kilos de carbone supplémentaires liés à un transport plus long pour assurer un recyclage en fin de vie.⁷⁴ Certes le verre est 100% recyclable (sans compter les pertes liées aux mélanges avec des colles, adjuvants ... impossibles à traiter) mais il n'est clairement pas 100% recyclé.

Dans la même veine, les industriels du béton sont souvent les premiers à parler du **recyclage du laitier**, un déchet de l'industrie sidérurgique des hauts fourneaux, dans leur béton. En réalité, d'autres pays considèrent le laitier non pas comme un déchet, mais comme un coproduit. Cette méthode lui attribue un poids carbone bien supérieur et plombe alors le bilan carbone de tous les bétons dits « bas-carbone », qui sont moins carbonés, mais sont loin d'être bas-carbone.

« Même avec un taux réduit en clinker, suggérer au travers d'un packaging « vert-éco-naturel » qu'un ciment normalisé courant est avant tout une solution « bas carbone » induit en erreur et peut être qualifié de Green Washing. »⁷⁵

Le recyclage reste bien sûr une solution à conserver et à développer, mais **d'autres manières de traiter les déchets permettent d'économiser de l'énergie, de la matière et potentiellement du transport**, tout en leur assurant une deuxième vie.

⁷² « Article L541-1-1 », Code de l'environnement §, consulté le 2 septembre 2023, https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042176087.

⁷³ « Filière de valorisation des bouchons en liège », recita.org, consulté le 14 septembre 2023, <https://www.recita.org/initiative/h/filiere-de-valorisation-des-bouchons-en-liege.html>.

⁷⁴ INIES, « FDES 34239 (individuelle) - Verre clair ORAÉ® 4 mm (hors accessoire de pose) », s. d.

⁷⁵ Trélat Mélanie, « Bétons bas carbone : entre Green Washing et Far West - Entretien avec Christian Rech, fondé de pouvoir chez Cimalux », Neomag, s. d., 48-51.

Réutilisation

La **réutilisation** concerne « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau »⁷⁶. Après sa dépose dans une borne d'apport volontaire ou dans une déchetterie, le produit perd son statut et devient **déchet**. Puis il subit une opération de traitement des déchets appelée « préparation en vue de la réutilisation », et regagne alors un statut de **produit**.⁷⁷ La notion est très proche de celle de réemploi, et s'en distingue éventuellement en ce qu'elle comprend également des changements d'usage. La réutilisation peut mener à des projets originaux, qui utilisent souvent les anciens déchets comme des éléments de façade à visée clairement esthétique.

A l'occasion de la COP 21, le collectif Encore Heureux a conçu le **Pavillon Circulaire** à Paris en 2015, qui réutilise 180 portes en chêne, issues d'une réhabilitation d'un immeuble de logements HBM, en bardage. Bien que ne relevant pas de la rénovation, ce projet a permis de communiquer une certaine créativité liée à la réutilisation. Dans la même idée, le **siège du Conseil Européen et du Conseil de l'UE à Bruxelles** a été réhabilité entre 2005 et 2016 par Samyn and Partners. 3000 châssis de fenêtres ont été réutilisés pour couvrir 3890m² de surface vitrée assurant un premier tampon acoustique, et assurant un rôle de surfaçade (pas d'étanchéité à l'eau, à l'air ou d'isolation).

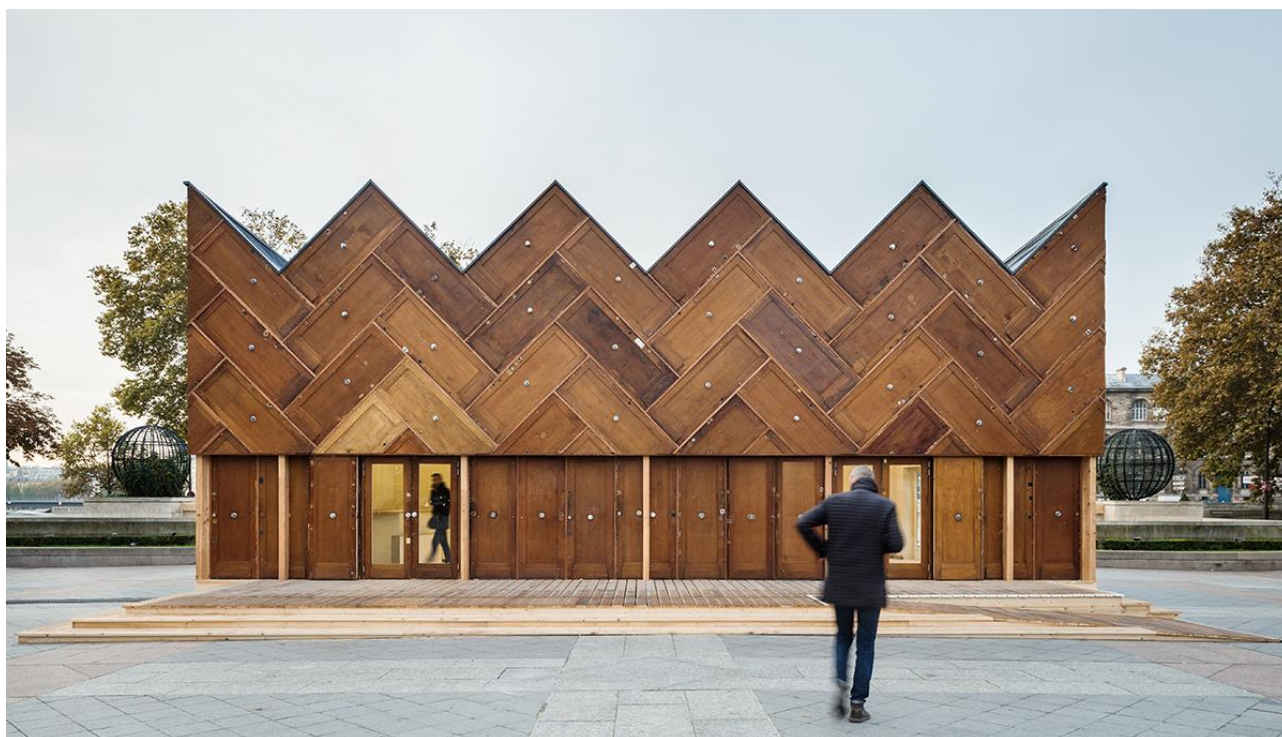


Figure 45 - Pavillon Circulaire par le collectif Encore Heureux, Paris, 2015 (source : <http://encoreheureux.org/projets/pavillon-circulaire/>)

⁷⁶ Article L541-1-1.

⁷⁷ ADEME, « Le réemploi et la réutilisation », Agence de la transition écologique, 30 août 2021, <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-laction/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation>.



Figure 46 – Réhabilitation du Siège du Conseil Européen et du Conseil de l'UE par Samyn and Partners, Bruxelles, 2016 (source : <https://samynandpartners.com/fr/portfolio/europa-siege-du-conseil-europeen-et-du-conseil-de-union-europeenne/>)

Réemploi

Le réemploi a toujours existé, il a simplement été délaissé avec l'industrialisation de notre société.

Beaucoup de grands monuments historiques présentent des « bouts manquants », comme le Colisée ou le Parthénon. La raison derrière ces déconstructions partielles est simple : lorsque ces bâtiments n'ont plus été utilisés, leurs matériaux de construction ont été réemployés par les habitants pour d'autres constructions, qui elles seraient plus utilisées.

En France, l'article L541-1-1 définit le réemploi comme « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus »⁷⁸ En ACV en RE2020, le réemploi compte pour **0kg de CO2** équivalent par m², peu importe le produit, la distance parcourue en transport et le nettoyage/curage nécessaire, ce qui explique également qu'il se développe plus rapidement. Le réemploi *in situ* permet en outre souvent de conserver une partie de l'identité du site.

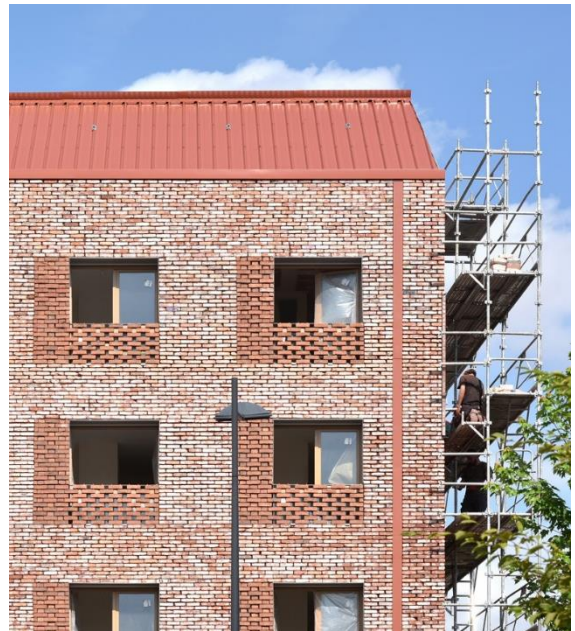


Figure 47 – Façade en brique de réemploi sur une résidence étudiante à Pierrefitte-sur-Seine, par BFV Architectes, 2023 (source : <https://bfv.team/fr/projects/pierrefitte>)

⁷⁸ Article L541-1-1.

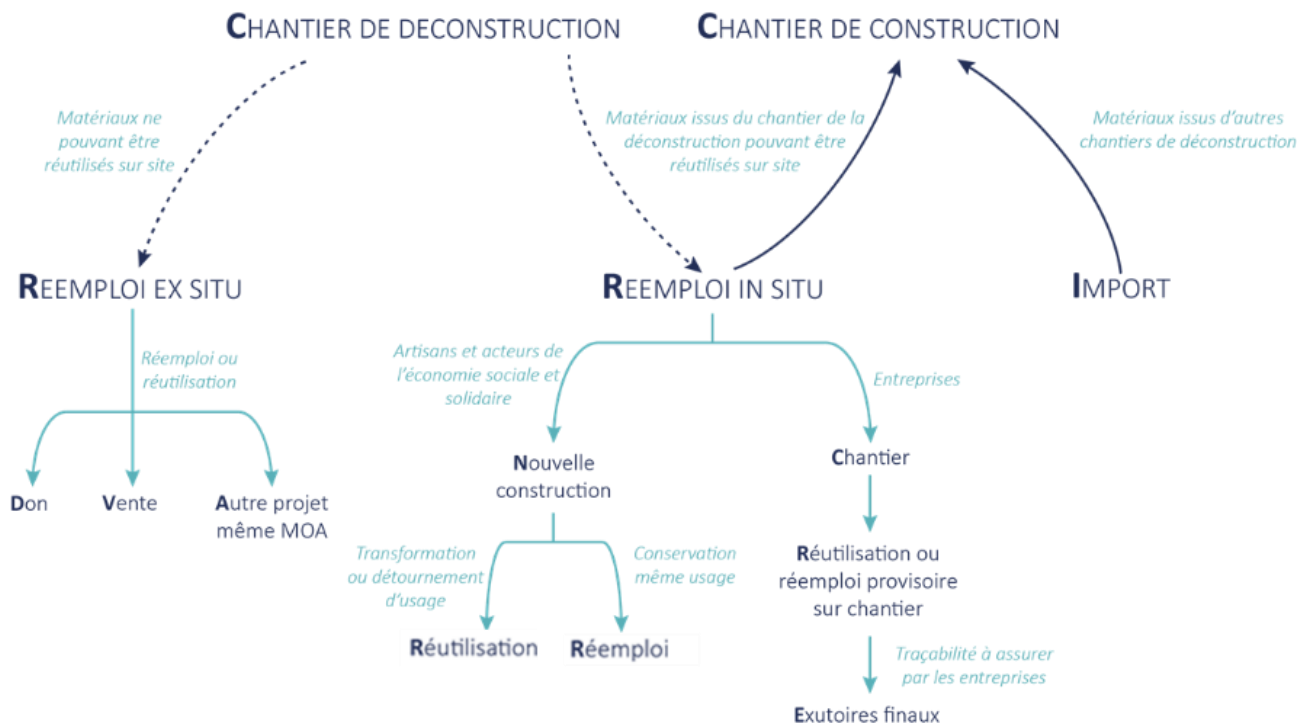


Figure 48 - Différentes manières de réemployer, réutiliser (source : Artelia)

A l'heure actuelle en France, **certains produits commencent à être de plus en plus réemployés** : faux plancher technique, dalle de moquette, dalle de faux plafond, cloison, émetteurs, cuvette de toilette, lavabo, chemins de câbles, brique de parement ... que ce soit dans des projets neufs comme rénovés. Le projet européen **FCRBE** (Faciliter la circulation des éléments de réemploi) accompagne le réemploi dans la construction en Europe du Nord-Ouest, avec pour but de doubler la quantité d'éléments de construction récupérés d'ici 2032. A cet usage, ils ont compilé 36 fiches pratiques pour encourager le réemploi.⁷⁹

« Le réemploi de structure, on n'y est pas encore. »⁸⁰

Le réemploi de produit de second-œuvre permet d'**éviter des émissions de gaz à effet de serre** de manière certaine : jusqu'à 100 kgCO₂eq/m²SU statique en bureaux.⁸¹ Le second œuvre ne représente toutefois qu'un tiers des émissions, le gros œuvre et les lots techniques émettent chacun un tiers. Or, il est pour l'heure difficile de réemployer des éléments de structure étant donné la réglementation et l'assurabilité, ce qui constitue un frein majeur que nous aborderons par la suite.

⁷⁹ « 36 fiches pratiques pour le réemploi des matériaux », Ordre des architectes, 22 février 2022, <https://www.architectes.org/actualites/36-fiches-pratiques-pour-le-reemploi-des-materiaux>.

⁸⁰ Entretien avec Antoine Deltheil, ingénieur Artelia, 1 septembre 2023.

⁸¹ Hub des Prescripteurs Bas Carbone, IFPEB (Institut Français pour la Performance du Bâtiment), et Carbone 4, « Accélérer la réussite des seuils futurs de la RE2020 » (Hub des prescripteurs Bas Carbone, 27 juin 2023).

Consommer mieux

En termes d'émissions carbone, il est quasiment toujours préférable de réemployer ou de réutiliser un produit existant.

Si l'option retenue pour un Produit de Construction ou Equipement (PCE) est le neuf, certaines options sont toutefois clairement moins carbonées que d'autres.

Décarboner en théorie

Les produits de construction n'ont pas de DPE ou de nutriscore : il est difficile de faire la part entre bas carbone et green washing.

Plusieurs facteurs permettent toutefois de prédéterminer si un produit va être très émetteur en Gaz à Effet de Serre. Pour plus de détail, il est toujours intéressant de se plonger dans les fiches de la base INIES pour comprendre comment sont émis les GES et comment ils sont comptabilisés : par phase.

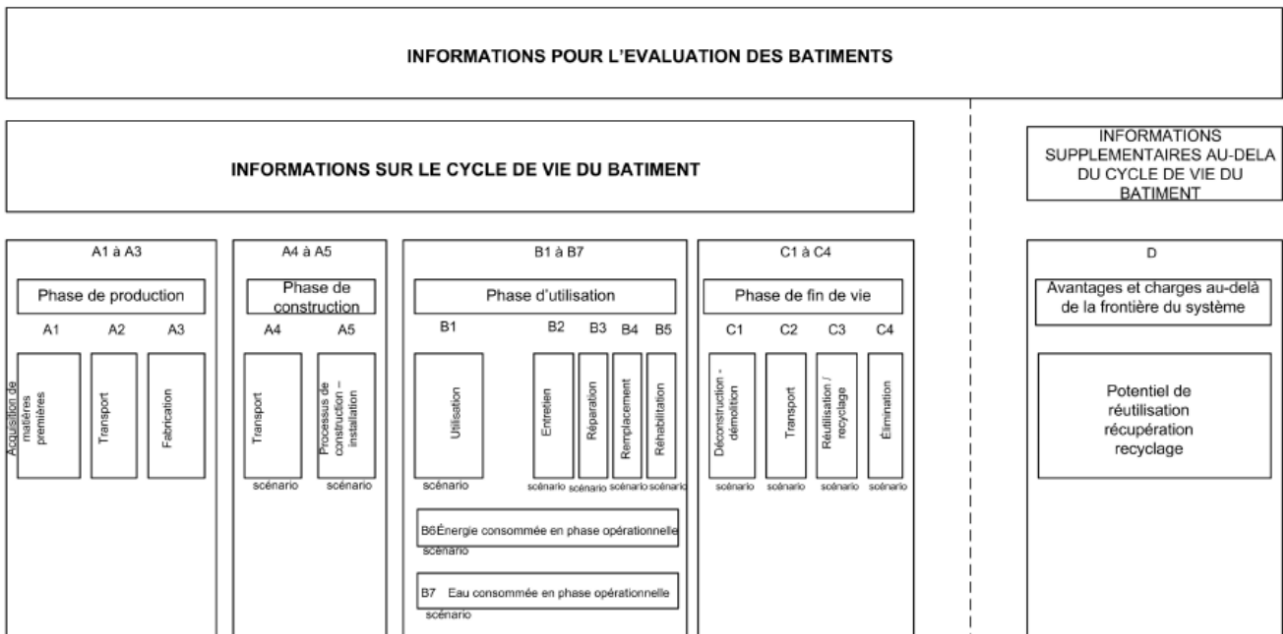


Figure 49 - Découpage par phases et modules du cycle de vie d'un bâtiment selon la norme NF EN15978



Figure 50 - Principe de l'ACV (source : Guide RE2020 du CEREMA et du MTE)

Certains de ces facteurs sont présentés ci-dessous de manière non exhaustive afin de mieux établir pourquoi certains produits sont plus émetteurs de GES que d'autres :

- Le **transport** (dans toutes les étapes de la RE2020) : plus les matières premières, matériaux et produits font de kilomètres, plus ils vont émettre de Gaz à Effet de Serre, car le transport est un domaine très carboné (transport par camion ou bateau brûlant des carburants fossiles pour avancer) – *par exemple, le béton est un matériau plutôt local : le ciment est vendu en moyenne dans un rayon de 150 km autour de la cimenterie ; le béton et les granulats ne voyagent classiquement pas sur plus de 20 à 50 km : ses émissions de GES liées au transport sont donc faibles.*⁸²
- L'**énergie** (dans toutes les étapes de la RE2020) : bien qu'elle semble « plus propre » et moins émettrice que le facteur transport et ses énergies fossiles bien visibles, l'énergie émet souvent beaucoup de GES car elle est souvent produite dans le monde via des centrales à charbon ou à gaz, et plus rarement via du nucléaire, de l'hydraulique, de l'éolien ou du solaire. En toute logique, un matériau utilisant beaucoup d'énergie pour être produit, mis en œuvre, exploité ou déposé émettra beaucoup de GES.
- Le **stockage carbone** (dans toutes les étapes de la RE2020) : certains matériaux stockent du carbone à des étapes de leur vie ce qui permet de diminuer leur impact carbone global en RE2020, et de ralentir le réchauffement climatique : *1kg de bois à 20% d'humidité stocke environ 1,5 kg d'équivalent CO₂, et 0,494 kg de carbone lorsqu'il est sec.*⁸³
- La **production** du matériau (étapes A1-A3 en RE2020)
 - L'obtention des **matières premières** : l'extraction de métaux, de silice, de pierre ou d'argile, ainsi que l'abattage d'arbres ou encore le fauchage de pré vont nécessiter de l'énergie (et du transport), à différents niveaux, ce qui va nécessairement émettre des Gaz à Effet de Serre.
 - Le processus de **chauffe** : les matériaux nécessitant des températures élevées pour être fabriqués sont très gourmands en énergie calorifique, souvent obtenue en faisant brûler des combustibles fossiles (donc non-renouvelables) :
 - Verre : Température de fusion à 1500°C environ⁸⁴
 - Métal : Température de fusion pour l'acier à 1500°C environ⁸⁵
 - Brique de terre cuite : Température de cuisson à 1000°C environ⁸⁶
 - Ciment : Température de 1450°C pour être fabriqué, ce qui est responsable de l'émission d'environ 220kg de CO₂éq./tonne de ciment)⁸⁷
 - Les **réactions chimiques** : certains matériaux sont créés via de réactions chimiques particulièrement émettrices de GES :
 - Ciment : décarbonatation lors de sa fabrication : 525 kgCO₂ / t de clinker
 - Chaux hydraulique : décarbonatation lors de sa fabrication : 335-568 kgCO₂ / t de chaux

⁸² The Shift Project, « Décarboner la filière ciment-béton », 2022.

⁸³ Bruno Peuportier, « Note sur l'analyse du cycle de vie des matériaux biosourcés », lab recherche environnement, 13 janvier 2022, <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/note-sur-lanalyse-du-cycle-de-vie-des-materiaux-biosources/>.

⁸⁴ « Du sable au verre | Fédération de l'industrie du verre (FIV) », consulté le 2 septembre 2023, <https://www.vgi-fiv.be/le-verre/du-sable-au-verre/>.

⁸⁵ « Température de fusion d'un métal | Air Liquide France Industrie - Fournisseur de gaz industriels », consulté le 2 septembre 2023, <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/temperature-de-fusion-dun-metal>.

⁸⁶ « La brique... processus de fabrication », Briques Nord, consulté le 2 septembre 2023, <http://www.briques-nord.org/processus-de-fabrication/>.

⁸⁷ The Shift Project, « Décarboner la filière ciment-béton ».

- Tuiles et briques : décarbonatation lors de sa fabrication : 40 kgCO₂ / t de tuiles et briques
 - Verre : décarbonatation d'une partie des intrants (dont carbonate de soude)
 - Acier : oxydation du carbone (du coke) lors de la réduction du minerai de fer
 - Aluminium : émanation de perfluocarbure (CF₄) lors de l'électrolyse de l'alumine
 - Autres process très émetteurs de gaz à effet de serre dans leur fabrication : certains solvants, la castine dans les procédés sidérurgiques, les mousses d'isolation thermique, les semi-conducteurs, les panneaux photovoltaïques, les équipements électriques ...⁸⁸
- Le **processus de construction** (A4-A5 en RE2020)
 - Les **outils** de chantier : perceuses, scies circulaires, excavateurs et grues utilisent toutes des quantités d'énergie non négligeables. Evidemment, à l'échelle d'un projet, cette énergie de levage et mise en œuvre est relativement faible. Pour autant, certains chantiers commencent à être réfléchis avec une pensée du chantier « low tech »
 - La **pose** :
 - La **chauffe** : certains matériaux nécessitent d'être chauffés pour être mis en œuvre : c'est le cas du bitume notamment, que ce soit en tant qu'étanchéité de toiture, ou en revêtement routier, il doit être chauffé à 150°C au minimum. De même, pour la construction métallique, des assemblages peuvent être réalisés par soudure sur place et nécessiter de hautes températures allant jusqu'à 500°C.
 - Le **liant** : colle et mortier sont souvent nécessaires pour mettre en œuvre de nombreux matériaux (maçonnerie, revêtement, carrelage ...). Bien que ces matériaux soient présents en petite quantité, ils ont souvent un impact carbone médiocre. Il en va de même pour la quincaillerie : en faible volume sur un projet, mais possède un mauvais bilan carbone intrinsèquement.
 - Les éléments bonus : certains matériaux comme le métal nécessitent souvent des surcouches de protection contre les flammes en cas d'incendie : le flocage ou la peinture intumescente ont un poids carbone non négligeable qu'il s'agit de prendre en compte dans l'ACV (21kgCO₂/m² de peinture intumescente pour charpente métallique⁸⁹ par exemple). De même, si un système de sprinklage est imposé pour une construction bois, le poids carbone augmente en flèche.
 - La **vie en œuvre** (Module B en RE2020)
 - Le **captage de CO₂** : certains matériaux, comme le béton, captent du CO₂ durant leur vie en œuvre via un processus nommé « carbonatation ». Si à l'origine ce phénomène est considéré comme une pathologie, à l'heure du bas carbone il devient plutôt un argument de vente. Le module B du béton est généralement négatif en ACV dynamique.
 - L'entretien/**maintenance**/réparation : les équipements techniques comme les CTA, ou les chaudières peuvent nécessiter des remplacements de pièces : filtres, électrodes, et des interventions humaines, qui émettent un peu de carbone durant la vie du produit.
 - La **fin de vie** (Module C en RE2020)
 - **Recyclage** : les matériaux d'origine plastique ou les bétons sont souvent concassés pour être réutilisés dans un tout : les plastiques sont réincorporés dans du plastique, les bétons servent de couche de forme sous les routes. Les métaux sont également recyclables. Il faut toutefois garder à l'esprit que bien que beaucoup de matériaux soient théoriquement 100% recyclables, ils ne le sont plus lorsque

⁸⁸ ADEME, « Base Carbone - Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone ® », 13 avril 2023.

⁸⁹ INIES, « FDES 29534 - Peinture intumescente pour la protection incendie de charpente métallique - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT », consulté le 18 septembre 2023, <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit/29534>.

trop d'adjuvants ou de matières différentes sont combinés. A l'heure actuelle, bien que de nombreux matériaux soient théoriquement 100% recyclables, ils sont loin d'être 100% recyclés.

- **Incinération** : certains matériaux, comme les biosourcés, sont souvent incinérés. Ils peuvent parfois être « valorisés énergétiquement » en fin de vie, ce qui signifie que leur combustion, qui émet des GES, servira à produire de l'énergie (mais ce n'est pas toujours adopté). Pour les matériaux biosourcés, il serait techniquement possible de les laisser se décomposer en fin de vie (ce qui émettrait des GES aussi mais dans un futur plus lointain).
- **Enfouissement** : certains matériaux inertes (verre, céramique ...) sont purement et simplement destinés à être enfouis sous terre sans autre forme de réutilisation : il est évident que bien que cette vie en tant que telle soit peu carbonée (seulement les émissions liées au transport), elle est en contradiction totale avec des objectifs d'économie circulaire.

Les produits très carbonés le sont le plus souvent à cause de leur besoin d'être chauffés à des températures très hautes lors de leur processus de transformation, de leurs réactions chimiques, ou de leur besoin de transport important.

Les produits les moins carbonés le sont souvent grâce à leur stockage de carbone important, et leur recours à peu de transport et d'énergie.

Décarboner en pratique

« L'intelligence s'arrête là où la mousse polyuréthane commence. »⁹⁰

Certains matériaux sont plus « verts » que d'autres. Mais dans la pratique de la rénovation, il est parfois difficile de prendre du recul et de parvenir à concilier les problématiques de projet et de décarbonation des produits mis en œuvre. Dans cette partie, nous aborderons les impacts carbone de différents matériaux, les performances de produits innovants (ou non) et les manières de diminuer les émissions d'un projet concrètement. Pour cela, nous parcourrons les composants d'un projet à travers trois grands lots : les lots du gros œuvre, les lots architecturaux et les lots techniques. Le support principal utilisé sera la base INIES via un outil Vizcab. Les données sont donc directement liées aux informations présentes ou non dans la base de données INIES : certains produits peuvent être manquants.

Lots du gros-œuvre

Le gros œuvre est le squelette du bâtiment.

Les lots du gros œuvre comprennent généralement les lots 1 (Voirie et réseaux divers), 2 (Fondations et infrastructure) et 3 (Superstructure et maçonnerie). En rénovation légère ou thermique, ces lots sont en principe peu impactés par le projet.

En rénovation lourde, il n'est en revanche pas rare que la **superstructure**, voire **l'infrastructure** ou même les **fondations**, soient **reprises et modifiées**. Cela s'explique souvent par de la **mise aux normes** constructives : pour les bâtiments anciens, les charpentes, dalles, voiles, poteaux et poutres ne sont pas souvent dimensionnés comme le préconisent les Eurocodes actuels. Cela peut s'expliquer également par des **changements d'usages** : par exemple, un bâtiment d'habitation peut être reconverti en un bâtiment de bureaux, ou inversement. Cela nécessite parfois des adaptations de la structure à cause de problèmes de hauteur sous plafond, d'aménagement de l'espace et de **charge supportée** par la structure existante.

⁹⁰ Dicton entendu plusieurs fois durant mes études d'architecte-ingénieur. Pour plus d'informations sur le polyuréthane : <https://www.build-green.fr/le-polyurethane-nec-plus-ultra-ou-a-deconseiller/>

Dans le cas d'une reprise structurelle importante, il devient nécessaire de se poser la question de la **pertinence de la rénovation** : les éléments ajoutés en support structurel n'émettent-ils pas plus de GES que si le projet avait été démolé et reconstruit autrement ? Par exemple, la reprise d'une structure béton ou bois peut se faire avec des plats carbone, ou des poutres métalliques, fortement carbonés. Il est toutefois probable que dans la plupart des cas, la rénovation soit moins carbonée que la déconstruction/construction d'un bâtiment. Dans tous les cas, en termes d'économie de matière et d'économie circulaire, rénover est toujours une réponse plus pertinente que déconstruire et construire.

S'agissant des **matériaux de structure en général**, il est difficile de comparer leurs performances directement. Une structure constituée d'un mètre cube de béton armé ou d'acier affichera probablement des performances de **résistance** à la traction, compression et torsion bien supérieures à celles d'une structure composée d'un mètre cube de bois. A l'inverse, si l'indicateur n'est plus la résistance mais l'impact carbone, un mètre cube de bois émet bien moins de GES qu'un mètre cube d'acier ou de béton.

Pour comparer deux systèmes structurels de matérialités différentes, l'unité fonctionnelle devrait probablement être le $\text{kgCO}_2\text{éq./kN}$ repris par le matériau. Au vu des difficultés techniques de calcul liées à la forme de la structure, des sections qui la compose et des assemblages, le $\text{kgCO}_2\text{éq./m}^3$ ou par kg est plutôt utilisé. Dans tous les cas, puisqu'une structure **bois** a très souvent un **impact carbone négatif**, les quantités à mettre en œuvre importent peu : son bilan sera toujours meilleur que celui d'une structure en béton armé. Evidemment, ces résultats sont très liés au choix d'un mode d'ACV dynamique adopté en France. Dans un modèle statique comme en E+C-, un mètre cube de bois a toujours un impact moins important qu'un mètre cube de béton armé, mais l'impact carbone du bois sera malgré tout positif.

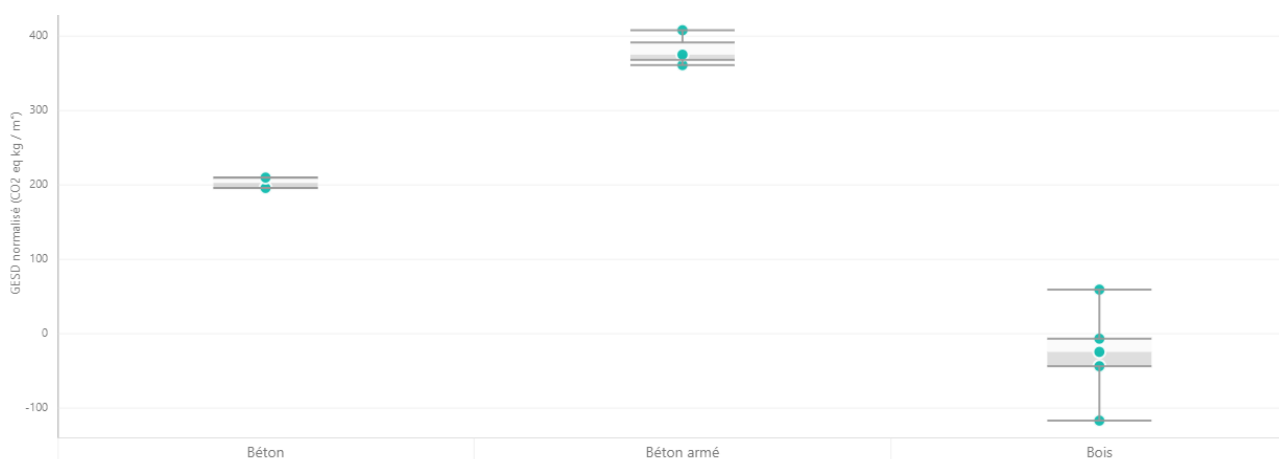


Figure 51 - Comparaison des impacts carbone de différents matériaux de structure, en $\text{kgCO}_2\text{éq./m}^3$ normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES collective (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales)

Outre la structure, la **maçonnerie** est également un sujet de réflexion pour décarboner la rénovation. Le premier réflexe qui vient lorsque l'on souhaite « remplir » une structure poteaux-poutres existante à bas coût est le fameux **monomur** (brique de terre cuite extrudée) ou le **parpaing** (objet similaire, mais en ciment). Pourtant, leur impact carbone n'est pas du tout négligeable (bien que meilleur que celui d'un voile en béton armé). Ces maçonneries, comme beaucoup de maçonneries, émettent des GES car elles nécessitent d'être chauffées à de **hautes températures** (brique de terre « cuite » ou obtention du clinker) et/ou émettent du CO₂ lors de réaction chimique (le ciment dans le parpaing, encore et toujours). Elles sont, de plus, difficilement recyclables, à part concassées sous des routes, et difficilement réemployables. Les briques de terre cuite pleines sont plus facilement réemployables, lorsque le mortier utilisé le permet, mais leurs émissions de GES initiales sont également élevées.

Certains matériaux de remplissage ont des propriétés thermiques similaires, et les mêmes potentialités de remplissage : il s'agit des matériaux **géosourcés**. Par exemple, pierre et terre crue n'ont pas besoin d'être

chauffées pour être fabriquées et leurs réactions chimiques n'émettent pas ou peu de GES. Les émissions carbonées de ces matériaux proviennent simplement de l'énergie nécessaire à leur extraction, à leur transport et à leur pose sur chantier. Ces matériaux **ne stockent pas de carbone** comme les matériaux biosourcés, mais sont **théoriquement réutilisables à l'infini**. Pierre de taille, pierre sèche, pisé, brique de terre crue, bauge ou adobe peuvent servir de remplissage, voire d'éléments porteurs verticaux grâce à leur résistance à la compression (bien plus faible que celle du béton armé toutefois).

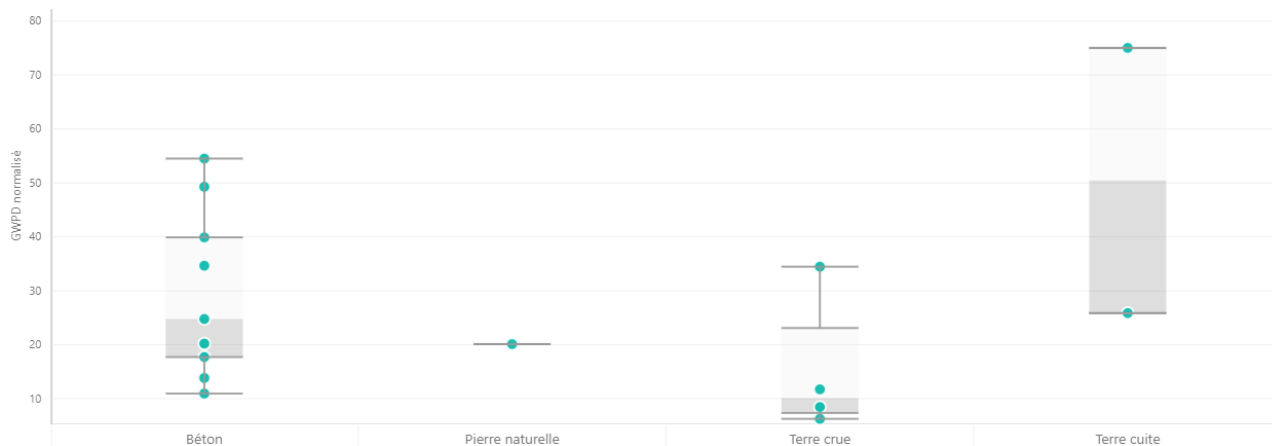


Figure 52 - Comparaison des impacts carbone de différents petits éléments de maçonnerie, en kgCO₂eq/m² normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES collective (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales)

Ces matériaux possèdent en outre une **inertie** pouvant participer à un **déphasage** et un certain confort en été, et les matériaux en terre possèdent en outre des qualités de régulation **hygrothermique**. Les savoir-faire liés à la mise en œuvre de ces matériaux se sont un peu perdus après la fin de la seconde guerre mondiale. Depuis quelques années toutefois, du fait de la prise en compte grandissante de problématiques environnementales, les matériaux géosourcés recommencent à avoir le vent en poupe.

Concernant les matériaux et techniques utilisés pour reprendre des **fondations**, le béton armé et le métal restent les plus à mêmes de reprendre un ouvrage existant. Plutôt que d'utiliser ces matériaux carbonés dans l'intégralité du bâtiment, pourquoi ne pas les réserver pour les parties de bâtiment qui le nécessitent bien plus, notamment les fondations ? Des variantes de fondations en pierre ou en pieux de bois existent, mais sont plus complexes à appliquer à des constructions existantes.

Lots du second-œuvre

Le second œuvre clôt, couvre et habille le squelette du bâtiment.

Il comprend les lots 4 (Couverture, étanchéité, charpente, zinguerie), 5 (Cloisonnement, doublage, plafonds suspendus, menuiseries intérieures), 6 (Façades et menuiseries extérieures) et 7 (Revêtements des sols, murs et plafonds, chape, peintures, produit de décoration). En cas de rénovation, lourde, légère ou thermique, ces lots seront probablement fortement impactés. Les **façades** représentent souvent une lourde part du second œuvre.

Le **bardage** notamment, peut impacter fortement un projet : un bardage en brique de terre cuite peut avoir un impact carbone jusqu'à 100 fois supérieur à un bardage bois. Pour un bardage en verre, l'impact peut être 250 fois plus élevé que pour du bois. De manière générale, un bardage plus lourd à porter nécessitera également plus de quincaillerie et de support (souvent métallique) pour le soutenir, alourdissant son impact carbone. Dans une optique de **frugalité**, la place du bardage pourrait être **questionnable** : cet élément de la façade est souvent plutôt esthétique que technique car l'isolation et l'étanchéité à l'eau et à l'air d'un bâtiment sont assurées par d'autres éléments (isolants et membranes). Pour autant, l'esthétique d'un bâtiment a son importance et le bardage peut contribuer à la qualité d'un paysage urbain ou rural.

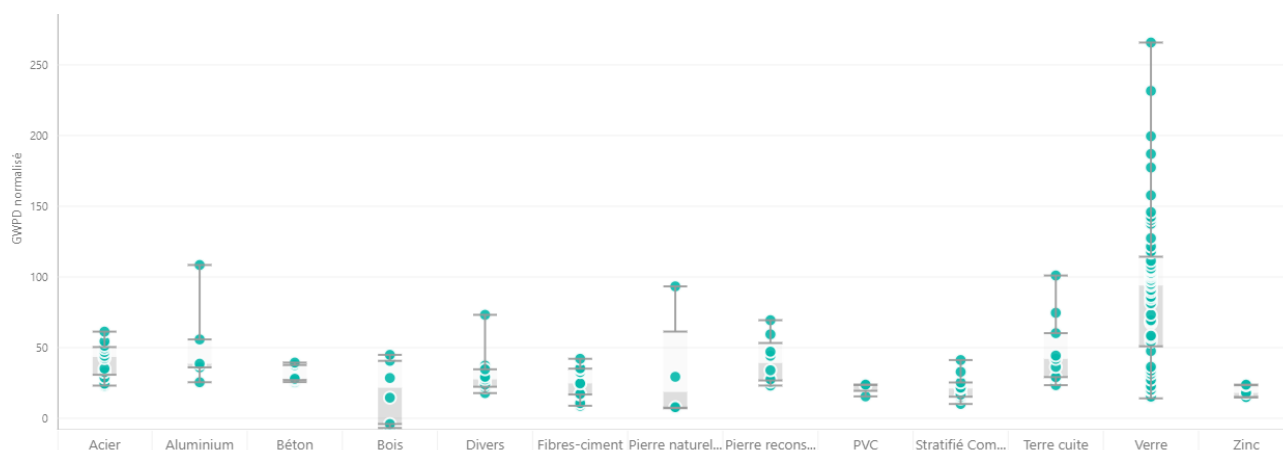


Figure 53 - Comparaison des impacts carbone de différents bardages (vêtures, vêtages, parement) en $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales) – l'enduit n'apparaît pas sur ce graphique mais est très peu carboné.

L'**isolation** est une thématique récurrente dans la rénovation. En termes d'impact, les isolants sont généralement bien moins carbonés au mètre carré que d'autres composant du bâtiment : un mètre carré de polystyrène extrudé est en moyenne cinq à dix fois moins carboné qu'un mètre carré de bardage de brique de terre cuite. Autrement dit, sur un projet de rénovation d'une façade, mieux vaut prêter attention au bardage en priorité, plutôt que se concentrer sur l'isolant.

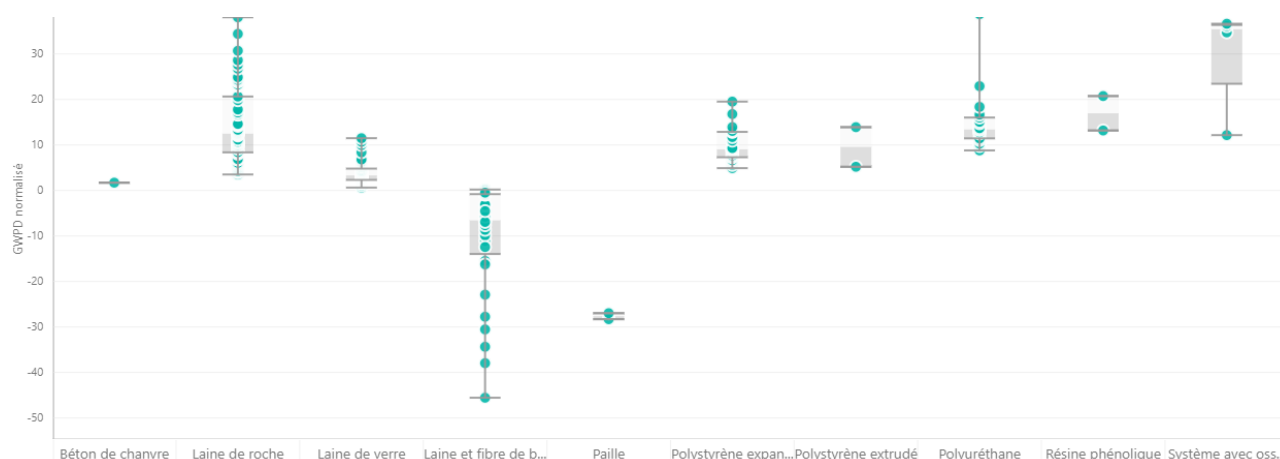


Figure 54 - Comparaison des impacts carbone de différents isolants pour ITE ou isolation répartie en $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales)

Certains isolants permettent tout de même de très bonne performance d'un point de vue carbone : les isolants en laine de bois, fibre de bois, paille, chanvre **stockent du carbone** et affichent un impact carbone négatif. Divers matériaux biosourcés « nouveaux » pourraient servir d'isolants ou de briques isolantes et sont à l'étude actuellement, comme des algues ou du mycélium de champignons⁹¹.

⁹¹ « Panneau isolant au Mycélium de champignon — Low-tech Lab », consulté le 16 septembre 2023, https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Panneau_isolant_au_Myc%C3%A9lium_de_champignon.

L'**étanchéité** des toitures est un sujet majeur dans le bâtiment. Cette problématique représente environ 1 désordre sur 5 signalé dans les bâtiments français.⁹² Pour les **toitures terrasses**, les feuilles à base de bitume ont des fiches sur INIES avec des impacts carbone moins importants en moyenne que les autres produits.

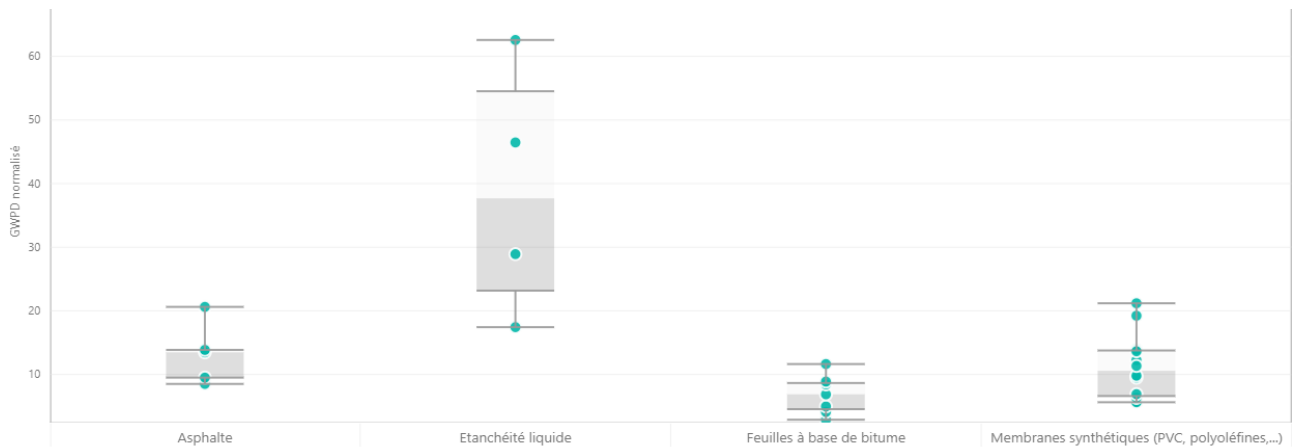


Figure 55 - Comparaison des impacts carbone de différents systèmes d'étanchéité en kgCO₂eq/m² normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES par défaut, collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales)

Pour les **toitures en pente**, les possibilités de matériaux sont plus nombreuses. Sans grande surprise, l'élément de couverture avec le plus petit impact carbone est le bardeau de bois (seulement si la forêt est gérée de manière durable). L'ardoise se situe en deuxième position, suivie du béton et de la terre cuite.

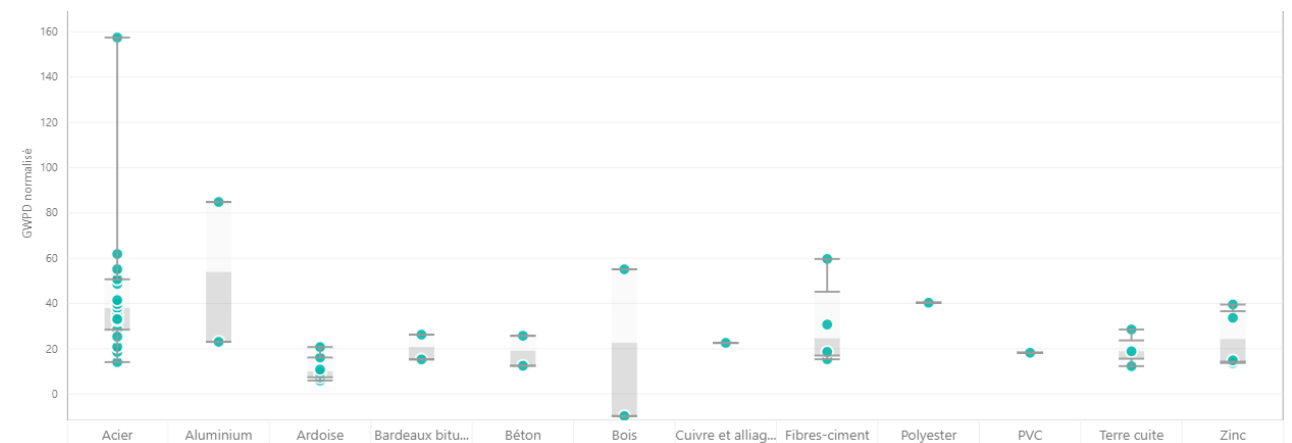


Figure 56 - Comparaison des impacts carbone de différents éléments de couverture en kgCO₂eq/m² normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES par défaut, collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales)

Lots techniques

Les lots techniques sont les organes qui alimentent un bâtiment.

En RE2020, les lots techniques du bâtiment comprennent les sanitaires, la CVC, la CFO, la CFA, les ascenseurs, le PV, soit respectivement les lots 8, 9, 10, 11, 12, 13.

⁹² Agence Qualité Construction (AQC), « Observatoire de la Qualité de la Construction - Editions 2023 », 2023.

Pour les systèmes de chauffage, penser autrement les sources de chaleur et de fraîcheur à l'échelle urbaine peut être une idée pertinente. Plusieurs municipalités, comme Fontenay-sous-Bois, combinent ainsi des **systèmes de piscine-patinoire**, où la chaleur fatale des installations frigorifiques de la patinoire sert à réchauffer les eaux chaudes sanitaires des bâtiments, ainsi que l'eau de la piscine.

Autre exemple, la marque **Qalway/Quarnot** propose d'utiliser la **chaleur fatale** émise par des micro-processeurs de **Datas Center** en tant qu'énergie de chauffage. Les datas centers peuvent ainsi servir à réchauffer des piscines, à alimenter un réseau de chaleur urbain, de chaudière dans un bâtiment de logement collectif ou même de radiateur numérique chez un particulier. Les frais de chauffage en sont réduits pour les occupants puisque l'énergie utilisée est attribuable aux entités utilisant les micro-processeurs.⁹³ La fibre est nécessaire pour faire circuler les données, réduisant donc potentiellement le champ d'installation aux villes équipées. Dans le cadre de Paris 2024, le **centre aquatique olympique** de Saint Denis sera chauffé sur le même principe, en récupérant la chaleur fatale du Data Center Equinix. Ce système permettra au centre de passer de 60 à 75% d'énergie renouvelable.⁹⁴



Figure 57 - Radiateur numérique par Qalway/Quarnot (source : <https://qalway.com/fr/product/radiateur-numerique>)

Pour la plupart des lots techniques, l'économie de carbone vient souvent de la réduction de leur nombre et de leur périmètre d'action : favoriser la ventilation naturelle plutôt que des CTA lorsque c'est possible, privilégier un bâtiment passif plutôt que des systèmes de chauffage et de refroidissement.

Nous l'avons vu, **les solutions constructives bas carbone sont nombreuses, mais est-il si simple de les appliquer en réalité ?**

⁹³ « Qalway - la chaleur de récupération par Qarnot », consulté le 14 septembre 2023, <https://qalway.com/fr>.

⁹⁴ Léo Da Veiga, « La chaleur fatale d'Equinix chauffera le centre aquatique de Saint-Denis », *Les Echos*, 28 septembre 2022, sect. PME Régions, <https://www.lesechos.fr/pme-regions/ile-de-france/la-chaleur-fatale-dequinix-chauffera-le-centre-aquatique-de-saint-denis-1852404>.

Chapitre 5.

Rénover bas carbone, facile non ?

Pas vraiment.

Les leviers d'action évoqués auparavant sont simples dans le principe, mais ils ne sont pour autant faciles à appliquer. Dans les faits, de nombreuses problématiques rendent difficile l'exécution de ces actions. Les aspects financiers et techniques freinent ainsi la mise en place de rénovation bas carbone en France.

Le Hub des Prescripteurs Bas Carbone a commencé à se pencher sur la rénovation bas carbone en créant un groupe de travail sur le sujet en 2023. Quatre cas d'études existants y sont questionnés, avec des typologies variées : logement collectif, tertiaire, enseignement, changement d'usage. Quatre équipes étudient ces projets, composées des acteurs opérationnels (Maîtrise d'Ouvrage et Maîtrise d'Œuvre) et des membres du Hub (qui étudient le carbone, la thermique, le chiffrage des lots architecturaux et techniques, la faisabilité architecturale, la faisabilité énergie).

Ce premier atelier a permis de faire ressortir de premiers enseignements, comme les différents motifs de dépose de matériaux dans un projet de rénovation :

- La **vétusté** : *il est difficilement possible de contrer l'obsolescence des produits*
- L'**obsolescence fonctionnelle/esthétique** : *ce genre de dépose intervient souvent car le programme est fait sans tenir compte de l'existant*
- La baisse du poids carbone du **contributeur énergie** : *des seuils plus bas impliquent parfois d'isoler et de changer les systèmes techniques existants, même s'ils ne sont pas arrivés au bout de leur durée de vie*
- La **fiscalité** : *deux fiscalités différentes sont appliquées pour les rénovations et le neuf. Lors de rénovations lourdes, c'est la fiscalité du neuf qui est appliquée, plus avantageuse. Cette application fiscale est alors désavantageuse pour les acteurs qui maximisent le réemploi car ils ne bénéficient pas de la fiscalité la plus favorable*
- L'**assurabilité** du matériel réemployé : *par exemple chemins de câble, ascenseurs ... »*⁹⁵

De ces problématiques, nous tirerons trois grandes thématiques que nous allons aborder : l'aspect **financier**, l'aspect **technique** (assurance et sécurité incendie) et l'aspect concernant l'**usage et l'usager** (fonctionnalité, confort, accessibilité, acceptabilité ...)

L'argent ne fait pas le bonheur, mais il fait les choix de projet

« **Money run the world** »⁹⁶

⁹⁵ Hub des Prescripteurs Bas Carbone et al., « Ateliers rénovation : restitution n°2 », 25 mai 2023.

⁹⁶ En français : « *L'argent dirige le monde* » - proverbe états-unien

Nous avons longuement évoqué le carbone jusqu'ici, mais il est certain que pour le moment, ce n'est pas ce critère qui oriente majoritairement les décisions de projet de rénovation, mais plutôt l'aspect financier.

Les finances des filières

On entend souvent que la construction bas carbone a un coût plus élevé que les méthodes "classiques" ... et cela est souvent avéré. A l'heure actuelle, le réemploi, qui ne nécessite pourtant pas de production nouvelle de produit, n'est pas toujours plus économique que le neuf. Quelles sont les raisons, par exemple, qu'une structure bois coûte en moyenne **5 à 10% plus cher** qu'une structure béton ?⁹⁷ La différence majeure entre les deux filières est que celle du béton est fermement implantée en France depuis la reconstruction dans les années 1950. La filière béton est très organisée et dispose d'un monopole bien installé dans le secteur de la construction en France. Elle a su y développer des économies d'échelle, ainsi que des méthodes industrielles et constructives toujours moins coûteuses.

Permettons-nous au passage une digression sur le sujet des "économies" dans le milieu de la construction : parlons de **sous-traitance** et de travail illégal. Dans un article de 2014 des Echos, le syndicaliste (CGT) Eric Aubin constate : « On voit souvent quatre ou cinq niveaux de sous-traitants en dessous du donneur d'ordre, voire plus. [...] Mis sous pression par les grands groupes de BTP, les petits sous-traitants sont parfois contraints de recourir au travail illégal s'ils veulent dégager la moindre marge. Pour lutter contre le travail au noir, il faut d'abord limiter cette sous-traitance en cascade qui a explosé depuis vingt ans. »⁹⁸ En 2014, parmi les entreprises du secteur de la construction de bâtiment contrôlées par l'URSAFF, 22% ont été jugées pour fraude concernant le travail illégal. Bref, ce n'est pas parce que le domaine est compétitif sur le plan économique que certaines entreprises ne cachent pas des pratiques douteuses.

Pour revenir à notre sujet, toujours est-il que la filière de la construction bois est pour le moment encore en plein développement, tout comme les autres filières de matériaux bio et géo-sourcés. Les matériaux de la filière sèche (bois par exemple) présentent toutefois des avantages de mise en œuvre par rapport à la filière humide (béton). La préfabrication est possible, les matériaux "secs" n'ont donc qu'à être assemblés sur le chantier, sans besoin de couler ou de laisser sécher : la **durée de chantier** en est en principe diminuée. Mais la préfabrication nécessite cependant une anticipation du chantier plus importante.

D'après Jean-Michel Raymond, économiste de la construction au sein d'Artelia, les surcoûts actuels des matériaux biosourcés proviennent de différents facteurs. Si le matériau est structurel, le surcoût peut provenir de la main d'œuvre sur chantier, car les équipes ne seront pas les mêmes que sur un projet "classique", sans préfabriqué. La main d'œuvre de production du matériau en lui-même et les études spécifiques supplémentaires peuvent engendrer des surcoûts également, liés au manque de maturité de la filière.⁹⁹ En clair, pour le moment, le prix des matériaux biosourcés et géosourcés provient en partie du **salaires de la main d'œuvre et des BET** spécialisés plutôt que du matériau en lui-même. Mais à terme, d'après François Consigny, architecte et ingénieur civil des Ponts et Chaussées et anciennement à la Présidence d'Elioth, la **massification**

⁹⁷ Léo Da Veiga, « Entretien avec François Consigny : « Par rapport au béton, le bois est sans comparaison » », *Les Echos*, 10 mai 2023, sect. Théma, <https://www.lesechos.fr/thema/articles/construction-par-rapport-au-beton-le-bois-est-sans-comparaison-1941967>.

⁹⁸ « Le travail au noir atteint des sommets dans la construction », *Les Echos*, 29 juillet 2014, <https://www.lesechos.fr/2014/07/le-travail-au-noir-atteint-des-sommets-dans-la-construction-307396>.

⁹⁹ Entretien avec Jean-Michel Raymond, économiste de la construction Artelia, 24 avril 2023.

de l'utilisation de ces matériaux devrait permettre une réduction de leur prix par rapport aux matériaux de construction "classiques".¹⁰⁰

Le sujet est similaire pour les matériaux de réemploi : leur prix final est souvent plus élevé que le prix des mêmes matériaux neufs. Pourtant, aucun matériau n'est produit dans le cadre du réemploi. Le problème est que ces pratiques ne sont pas encore généralisées, et que la main d'œuvre réalisant ce genre d'opération est donc plus qualifiée que la main d'œuvre traditionnelle.

Parallèlement à cela, un sujet subsiste : pour que la valeur environnementale d'un produit soit reconnue, il faut qu'il ait une fiche inscrite dans la base INIES. Or, **ces fiches INIES sont payantes**, à des prix dérisoires pour de grands fabricants, mais plus impactants pour des petites entreprises ne disposant pas des mêmes modèles de financement.

Les logiques de marché

Les différentes typologies de bâtiment ne vont pas suivre les mêmes logiques de financement. Concernant le logement social, les programmes de travaux sont fortement influencés par les potentiels de financement et donc par les aides de l'Etat et des collectivités locales. Ainsi, depuis 2022, l'Etat finance la restructuration lourde des logements sociaux couplée à une rénovation globale.¹⁰¹ Par logement, le montant d'aide est fixé à 10 000€, et peut atteindre jusqu'à 20 000€ selon les opérations. Avec ce genre de campagne d'aide, le nombre de rénovations thermiques a explosé dans le logement social. Il en va de même avec le logement individuel où la rénovation est encouragée avec des campagnes comme Ma Prim'Rénov, l'aide la plus connue. Au-delà des incitations financières, l'Etat impose également des obligations : à partir de 2023 les passoires thermiques (logements les plus énergivores) ne peuvent plus être proposés à la location (cf p.**Erreur ! Signet non défini.**). Pour le tertiaire, moins d'aide sont disponibles, mais des obligations de réduction des consommations sont en revanche bien présentes via le décret tertiaire (cf p.17). En bref, **pour que le parc de bâtiment commence à être rénové thermiquement et voit ses performances énergétiques améliorées, il aura fallu que l'Etat régule et incite financièrement**. Alors, comme le dit Cécile Granier ingénieure Artelia :

*« Tant qu'on n'aura pas proposé de financements sur le bas carbone autre que l'énergie, il ne se passera rien en termes de carbone ».*¹⁰²

Pour le moment, ni réglementation ni aide ne prennent en compte le carbone dans la rénovation, il est à craindre que le boom de la rénovation bas carbone n'arrive pas de sitôt en France, faute de financement notamment.

L'équation coût-carbone

Le Hub des prescripteurs bas carbone, mené par l'IFPEB et Carbone 4, a étudié l'impact financier et carbone de différents produits de construction sur plusieurs **bâtiments neufs en cours de réalisation**, logements et bureaux, sans ambition carbone initiale. Le rapport est disponible dans son intégralité en ligne, aussi il m'a semblé intéressant d'extraire les informations principales d'un cas d'étude de bureaux neufs.

¹⁰⁰ Da Veiga, « Entretien avec François Consigny : « Par rapport au béton, le bois est sans comparaison » ».

¹⁰¹ « Rénovation énergétique et réhabilitation lourde des logements sociaux », Ministère de l'Economie, consulté le 28 août 2023, <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/renovation-energetique-rehabilitation-lourde-logements-sociaux>.

¹⁰² Entretien avec Cécile Granier, ingénieure Artelia, 26 juillet 2023.

Les **fondations et le gros œuvre** représentent en général environ 1/3 de l'impact carbone d'un projet : agir sur le type de structure est donc primordial. Sans grande surprise, on s'aperçoit que le tout bois est l'option la plus coûteuse, mais a un poids carbone bien meilleur. Ceci est d'autant plus vrai que l'étude ci-dessous est réalisée en ACV statique : en ACV dynamique, il serait possible que l'impact carbone de la structure bois soit négatif. Finalement, pour ce cas d'étude de bureaux, la variante présentant le meilleur compromis entre coût, carbone et surtout contraintes techniques de l'opération (hauteur libre, gabarit) est la structure bois-métal.¹⁰³

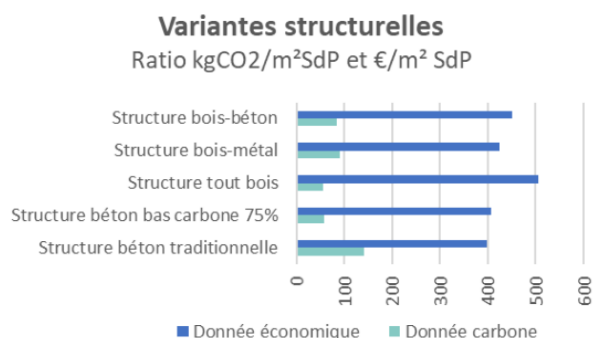


Figure 58 - Equation coût carbone de variantes structurelles pour des bureaux de 23000m², 6 étages de superstructure et 3 étages d'infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

Le **second œuvre**, comprenant les façades, la toiture, le cloisonnement et les revêtements intérieurs, représente-lui aussi 1/3 de l'impact carbone d'un projet. Concernant les **façades**, de grandes disparités en termes de carbone et de coût existent entre les différentes options de **revêtements**. Bien que la pierre soit un matériau géosourcé, son utilisation en parement est carbonée car du fait de son poids, les accroches métalliques doivent être dimensionnées conséquemment. Au contraire, l'enduit sur isolant en fibre de bois présente un excellent ratio coût/carbone grâce à sa légèreté et sa sobriété en utilisation de matériaux. L'étude ne propose pas de graphique comparatif pour les revêtements intérieurs, mais les peintures recyclées et les moquettes réemployées sont des options très intéressantes en termes de ratio coût/carbone.¹⁰⁴

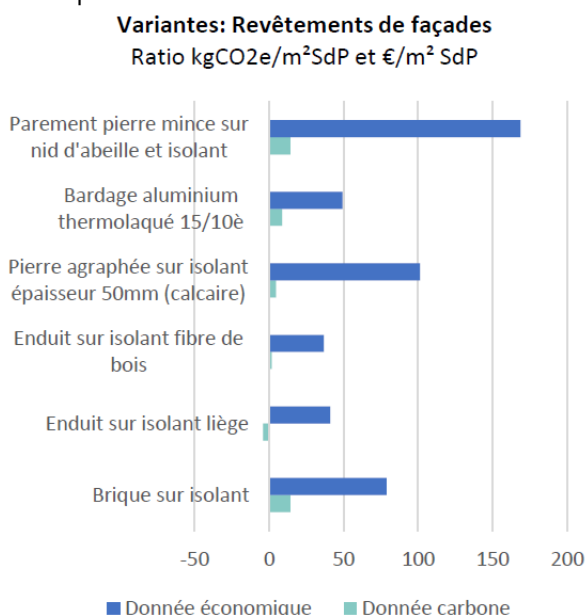


Figure 59 - Equation coût carbone de variantes de revêtements de façade pour des bureaux de 23000m², 6 étages de superstructure et 3 étages d'infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

¹⁰³ Hub des Prescripteurs Bas Carbone et al., « Equation Coût Carbone ».

¹⁰⁴ Hub des Prescripteurs Bas Carbone et al.

Le **cloisonnement** peut également peser dans l'impact carbone du projet. L'étude réalisée pour ce projet de bureau démontre que, en ACV statique, le produit présentant le meilleur ratio coût/carbone est la classique cloison Placostil. Cependant, la comparaison a été réalisée il y a plus de deux ans et de nombreuses fiches sont sorties sur la base INIES entre temps. Un outil Vizcab nous permet de comparer les impacts carbonés dynamiques normalisés de différents produits de cloisonnement. D'après cette comparaison plus récente, les cloisons en **bois** apparaissent comme les moins carbonées de toute, et les cloisons en **terre crue** sont généralement moins carbonées que celles en plâtre.

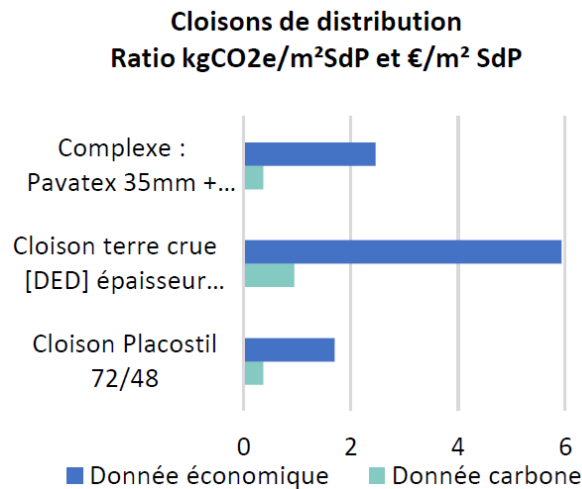


Figure 60 - Equation coût carbone de variantes de cloisonnement pour des bureaux de 23000m², 6 étages de superstructure et 3 étages d'infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

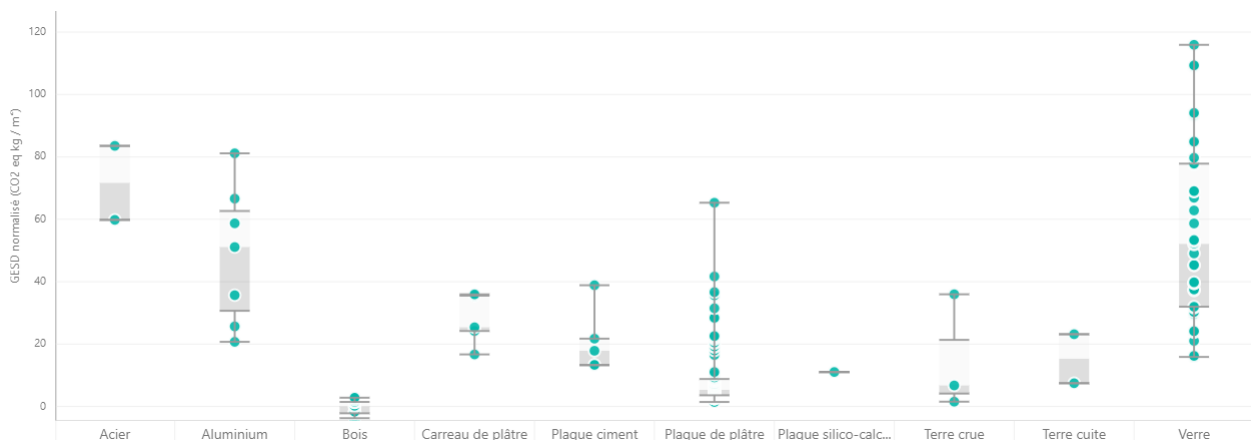


Figure 61 - Comparaison de différents matériaux de cloisonnement, en m² (source : Vizcab explorateur de fiches environnementales)

Enfin, les **lots techniques** (CVC, sanitaires, CFO, CFA, ascenseurs, PV) représentent eux aussi environ 1/3 en moyenne de l'impact carbone d'un projet. Les **fluides frigorigènes** étant des gaz à effet de serre avec un Potentiel de Réchauffement Global extrêmement élevé, il est préférable de choisir l'option avec le PRG le plus faible. Les autres variantes ont moins d'impact, mais il est toujours possible de remplacer des tuyaux en acier par du PVC ou du cuivre afin de réduire l'impact carbone de l'opération. Le graphique ci-dessous ne le précise pas, mais comme sur les autres lots, le **réemploi** peut aussi permettre de diminuer les émissions de GES de

l'opération. Les éléments réemployés peuvent être des émetteurs, des systèmes de production, des luminaires, des chemins de câbles, des disjoncteurs reconditionnés ...¹⁰⁵

Variantes sur les lots techniques

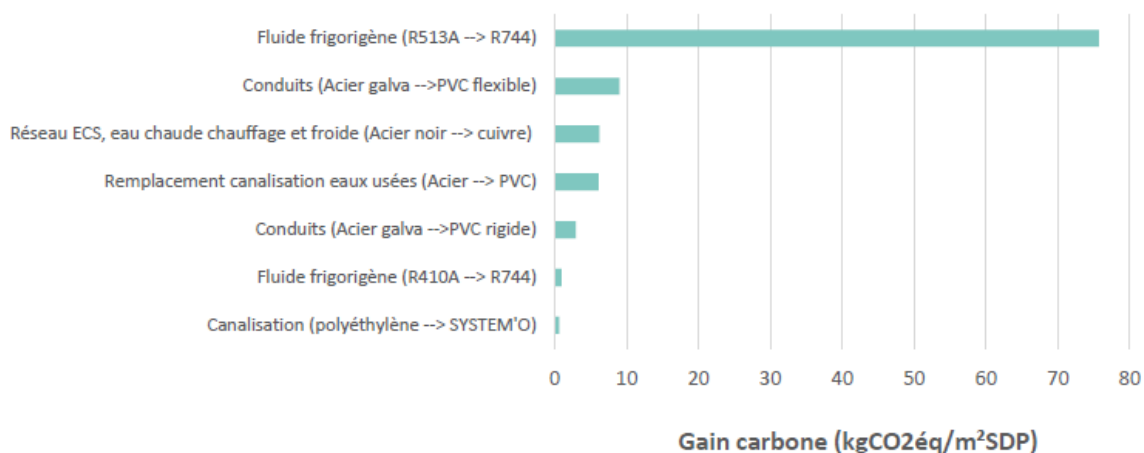


Figure 62 - Equation coût carbone de variantes des lots technique pour des bureaux de 23000m², 6 étages de superstructure et 3 étages d'infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

Pour cette étude sur un projet de bureaux, les actions ci-dessous ont été jugées comme les plus efficaces en termes de carbone et de coût. Evidemment, ce genre d'étude serait à renouveler pour chaque projet, mais elle permet toutefois d'afficher de grandes tendances : les revêtements de sol, choix structurels et de fondation occupent une place prépondérante dans l'équation coût carbone en bureaux.

Efficacité coût carbone des variantes

Gain carbone par € du m² investi

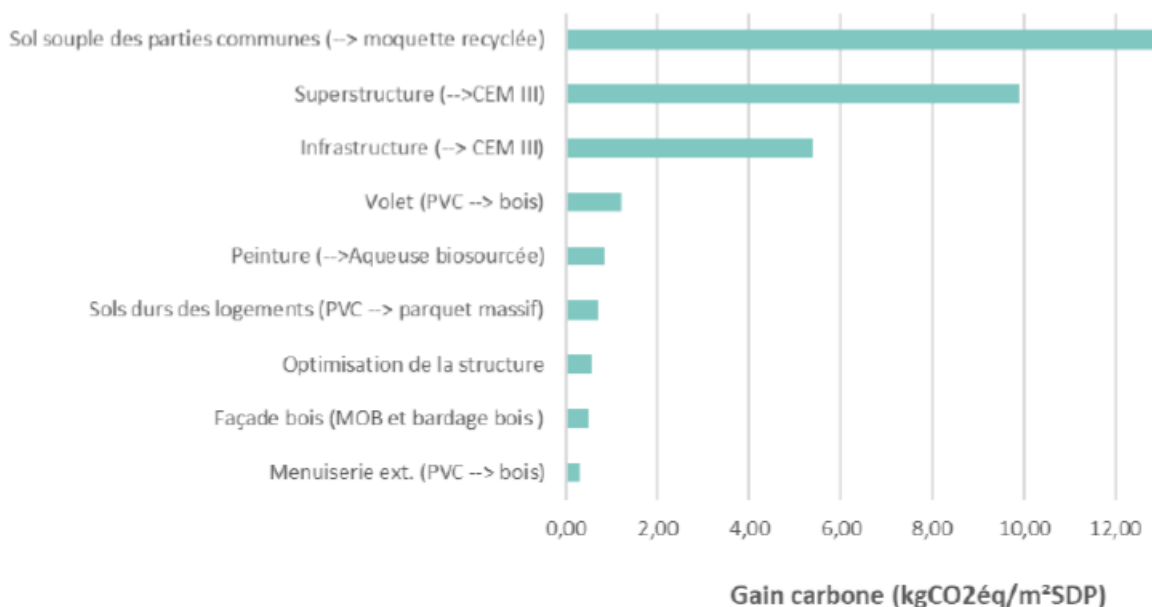


Figure 63 - Efficacité coût carbone de variantes sur un projet de bureaux de 23000m², 6 étages de superstructure et 3 étages d'infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone)

¹⁰⁵ Hub des Prescripteurs Bas Carbone et al.

En conclusion, chaque projet est différent et des études coût carbone devraient être réalisées dans le détail à chaque fois pour évaluer la pertinence de solutions dans le contexte. Toutefois, de grandes tendances se dessinent pour diminuer le coût et le carbone. Tout d'abord, aborder la question de **l'impact environnemental dès les premières phases de conception** permet de mieux maîtriser l'impact en carbone et en coût du projet : dans les études du Hub, 2/3 des variantes retenues concernent des mesures à intégrer avant le PC. Des mesures architecturales concrètes permettent généralement de réduire l'impact carbone et le coût d'un bâtiment tout au long de sa vie : la **compacité**, l'**optimisation du taux de vitrage** et l'**isolation** des parois. Dans le choix des produits, le **réemploi** et la **frugalité** (consommer moins de matière, faux plafonds, faux plancher par exemple) permettent de diminuer le bilan financier et carbone. Et enfin, choisir des produits moins carbonés est évidemment la meilleure des options d'un point de vue environnemental, mais il n'est pas toujours possible de faire ces choix, par contrainte financière, technique ou encore assurantielle.

L'assurabilité et la technique, d'épineuses questions pour l'écologie ?

« **Aujourd'hui la technique et la réglementation incendie nous brident.** »¹⁰⁶

La sécurité incendie

Qui dit bas carbone dit souvent matériaux biosourcés. Et qui dit matériaux biosourcés dit souvent problèmes de réaction au feu.

La France a encore en tête certains incendies qui l'ont marquée, comme celui de Notre Dame de Paris en 2019 par exemple, mais aussi d'autres plus meurtriers dans des logements.

Avec le développement du biosourcé dans la construction, la question de la sécurité incendie se pose d'autant plus. La Brigade des Sapeurs-Pompiers de Paris indique que des « retours d'expériences d'incendie dans des immeubles en bois notamment à l'étranger, montrent des développements importants du feu en raison du concours du bois à l'alimentation de l'incendie avec une menace d'incendie généralisé, de ruine de l'édifice et de propagation aux bâtiments voisins ». En 2021, la Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris communique donc une « Doctrine pour la construction d'immeubles en matériaux biosourcés ».¹⁰⁷

Ainsi, la doctrine impose notamment :

- « Dans les bâtiments d'une **hauteur inférieure à 8 mètres**, il n'est préconisé aucune disposition particulière en ce qui concerne la protection des structures ou des cloisons ou la mise en œuvre d'un système de protection active.
- Dans les bâtiments d'une **hauteur comprise entre 8 et 18 mètres**, il est préconisé :
 - Soit de protéger tous les éléments de structures et les cloisons devant réglementairement avoir une résistance au feu particulière (protection partielle) ;
 - Soit de mettre en œuvre un système d'extinction automatique à eau approprié au risque.
- Dans les bâtiments d'une **hauteur comprise entre 18 et 28 mètres**, il est préconisé :
 - Soit de protéger l'ensemble des éléments en bois (protection généralisée) ;

¹⁰⁶ Entretien avec Cécile Granier, ingénieure Artelia.

¹⁰⁷ Brigade de sapeurs-pompiers de Paris et al., « Doctrine pour la construction d'immeubles en matériaux biosourcés », 20 juillet 2021.

- Soit de mettre en œuvre un système d'extinction automatique à eau approprié au risque ; ce SEAE devant couvrir l'intégralité des parties de bâtiments comprenant du bois apparent.
- Dans les bâtiments d'une **hauteur supérieure à 28 mètres**, il est considéré que l'action précoce sur le développement de l'incendie devient prioritaire et c'est donc le SEAE qui devient obligatoire. Il est cependant autorisé de ne réaliser qu'une protection partielle des éléments structurels en bois. Le SEAE devra être installé dans l'intégralité des parties de bâtiments comprenant des éléments structurels en bois.
- Dans les bâtiments d'une **hauteur supérieure à 50 mètres**, compte tenu des particularités réglementaires imposées aux IGH en ce qui concerne notamment la charge calorifique des éléments de constructions mais aussi des aménagements, il a été considéré que la protection généralisée des éléments bois et la mise en œuvre d'un SEAE à l'intégralité des parties de bâtiments comprenant des éléments structurels en bois étaient nécessaires. »¹⁰⁸

Pour résumer cette doctrine simplement, au-delà de 8 mètres de haut, il devient **impossible de construire en bois sans l'encoffrer** (c'est-à-dire recouvrir de plaques de plâtre), **et/ou mettre en place du sprinklage**, qui nécessite de nombreux tuyaux métalliques fortement émetteurs en GES. Si ce document de recommandations n'est pas censé avoir de valeur réglementaire, dans les faits, un permis de construire peut ne pas être instruit si la commission sécurité juge qu'il ne respecte pas suffisamment les attendus de sécurité incendie.

Avant cette doctrine, de grands projets démonstrateurs en construction bois de grande hauteur ont pourtant été menés en Ile-de-France dans le **village olympique de Paris 2024**. Pour permettre leurs réalisations, de nombreux acteurs se sont mobilisés pour rédiger des notes techniques, dont la brigade des sapeurs-pompiers de Paris. De nombreuses recommandations ont été établies, faisant consensus et ayant permis l'instruction des permis de construire des projets. C'est pourquoi la sortie de la doctrine bois « contre toute attente et sans aucune concertation »¹⁰⁹ a surpris le milieu de la construction bois, d'autant plus qu'une future réglementation est en cours d'élaboration. Dominique Cottineau, délégué général de l'Union des industriels et constructeurs bois (UICB), exprime ainsi son point de vue sur la future réglementation concernant la sécurité incendie des constructions bois, qui devrait s'inspirer de la Doctrine Bois :

« Il faut une réponse pour garantir la sécurité en matière d'incendie qui soit cohérente et qui ne soit pas faite de surenchères. »¹¹⁰

Une réglementation incendie plus contraignante pourrait bloquer la construction bois, bien qu'elle soit de plus en plus nécessaire pour parvenir à respecter les seuils à venir de la **RE2020** et le **Zéro Carbone** en 2050. L'UICB attend donc de la future réglementation incendie la prise en compte de « l'impact technico-économique des projets et les objectifs fixés par la réglementation environnementale ». En attendant cette nouvelle réglementation, il est toujours possible de construire en bois en obtenant ou suivant les **avis de laboratoire**. Le CSTB a ainsi réalisé un recueil en 2020 permettant notamment de construire en bois tout en respectant les contraintes incendie en logement, jusqu'à la quatrième famille (50m de hauteur maximum)¹¹¹. Ces appréciations de laboratoires sont valables partout en France théoriquement, mais en Ile de France cela reste à vérifier, au regard de la récente Doctrine Bois.

¹⁰⁸ Brigade de sapeurs-pompiers de Paris et al.

¹⁰⁹ Rachida Boughriet, « Bois et sécurité incendie - Entretien avec Dominique Cottineau », Actu-Environnement (Actu-environnement, 14 mars 2022), <https://www.actu-environnement.com/ae/news/bois-securite-incendie-reglementation-dominique-cottineau-uicb-39253.php4>.

¹¹⁰ Boughriet.

¹¹¹ CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), « Appréciation de laboratoire Bois construction et propagation du feu par les façades », 7 décembre 2020.

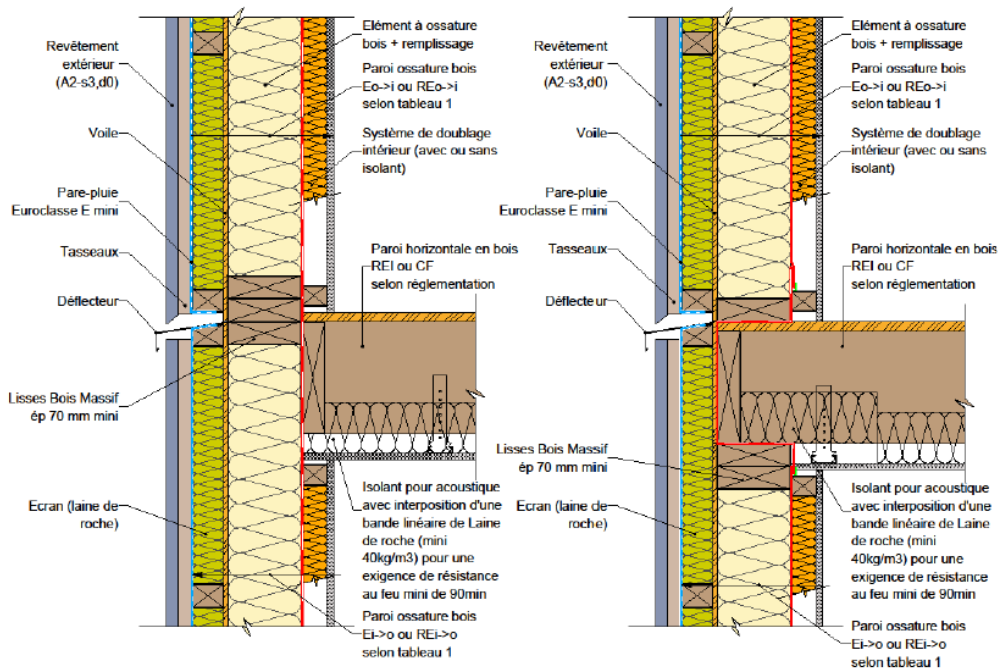


Figure 64 – Façade/mur en ossature bois & plancher en ossature bois pouvant être mis en place pour des bâtiments d'habitation neufs de 4ème famille (source : CSTB)

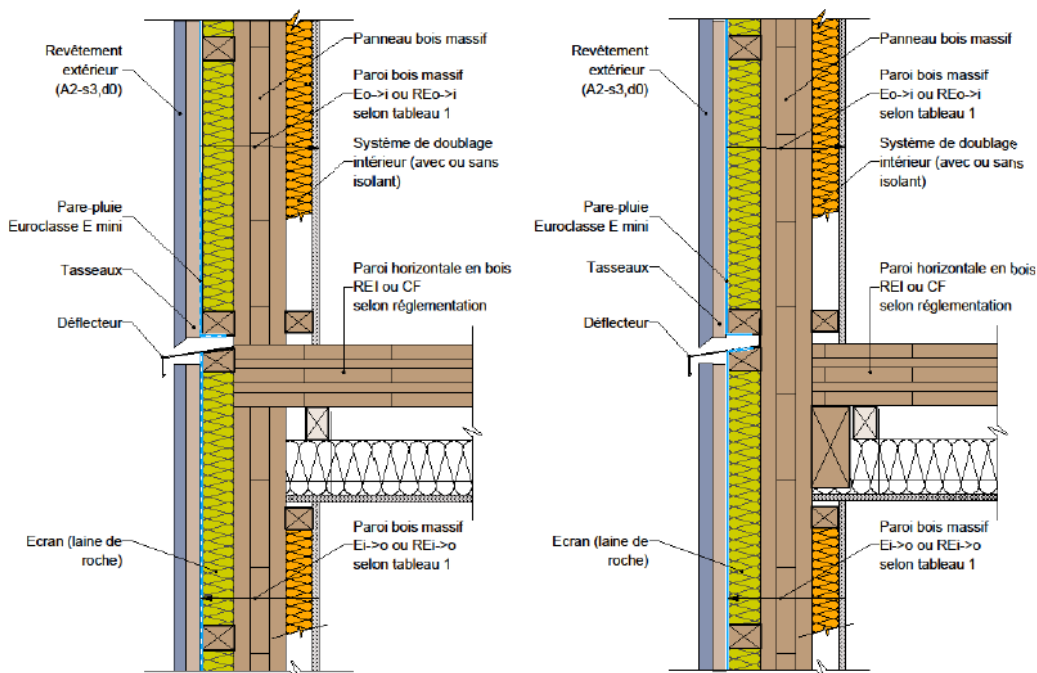


Figure 65 – Façade/mur en panneaux bois massif & plancher en panneaux bois massif pouvant être mis en place pour des bâtiments d'habitation neufs de 4ème famille (source : CSTB)

Techniques courantes et assurabilité

La question des **assurances** est primordiale dans le monde de la construction : aucun projet ne peut être lancé sans elles (pour des questions d'argent que nous avons commencé à évoquer précédemment). Or, les matériaux moins carbonés, biosourcés, géosourcés, réemploi, ne commencent à être envisagés à nouveau comme « fiables » dans la construction que depuis peu. En effet, si historiquement la construction vernaculaire s'est basée sur du géosourcé, biosourcé et du réemploi, l'industrialisation a plutôt poussé l'avènement de matériaux à base de métal, ciment, silice ou pétrole. Ces techniques constructives ayant été utilisées massivement au cours des cent dernières années, c'est tout naturellement que les premières normes,

Eurocodes, etc. ont commencé à traiter de ces matériaux en priorité. Cependant, depuis une dizaine d'années, une prise de conscience émerge sur la nécessité de décarboner les matériaux de construction, et donc d'encadrer législativement et normativement les produits moins carbonés. La Mutuelle des Architectes Français (MAF) commence ainsi à se positionner sur le sujet de l'assurabilité du biosourcé et du réemploi.

Le biosourcé

Concernant le **biosourcé**, plusieurs textes permettent de commencer à encadrer le sujet¹¹² :

- La loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte
- La loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant Évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (dite loi ELAN) qui favorise le recours aux matériaux renouvelables en inscrivant leur performance comme l'une des préoccupations principales pour la production de bâtiments
- L'ordonnance n° 2015-899 du 23 juillet 2015 relative aux marchés publics qui précise notamment qu'il est nécessaire de trouver des solutions intégrant les matériaux biosourcés parce qu'ils concourent au stockage du carbone atmosphérique.

Depuis une dizaine d'années en France, la législation commence à inciter l'emploi de matériaux biosourcés dans les projets, notamment en encourageant la prescription de matériaux biosourcés. Bien que pour l'heure la sinistralité des matériaux biosourcés ne soit pas plus un sujet que pour les autres matériaux, la Mutuelle des Architectes Français met en garde sur des problématiques générales les concernant :

- « **Ventilation** insuffisante des bâtiments
- Densité irrégulière de l'isolant en vrac qui crée des **ponts thermiques**
- Protection déficiente du matériau particulièrement **vulnérable à l'eau**
- **Condensations** à l'intérieur des murs de façade dues à la pénétration de vapeur d'eau
- Propagation de la flamme en cas **d'incendie**
- Vulnérabilité aux **insectes** xylophages et aux termites, ainsi qu'aux **rongeurs**. »¹¹³

Pour éviter ces écueils, il s'agit d'accorder une attention toute particulière à la conception de l'ouvrage utilisant des matériaux biosourcés. La phase chantier est également à surveiller, notamment lors de leur mise en œuvre et leur **stockage**, afin d'éviter toute prise d'humidité ou risque incendie.

Bien que les filières du biosourcé et du géosourcé commencent à s'organiser, comme c'est le cas avec la filière paille et ses règles professionnelles créées en 2011 et révisées en 2017, de nombreux produits relèvent de **techniques non courantes** et ne possèdent pas **d'avis techniques**, ce qui pose un problème d'assurance.

Le réemploi

Concernant le réemploi, le cadre législatif est plus récent avec l'article L541-1-1 du code de l'environnement qui décrit le réemploi comme « toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus. ».

¹¹² « Les biosourcés et le réemploi à l'épreuve des assurances », MAF Assurances (Mutuelle des Architectes Français), consulté le 1 septembre 2023, <https://www.maf.fr/actualite/les-biosources-et-le-reemploi-lepreuve-des-assurances>.

¹¹³ « Les biosourcés et le réemploi à l'épreuve des assurances ».

Il s'agit de faire une distinction avec la réutilisation, qui s'applique aux items ayant le statut de déchets, alors que le réemploi non. ¹¹⁴

Les produits de réemploi font l'objet d'une **garantie décennale** au même titre que des produits neufs. Par un exemple, un radiateur de réemploi devra apporter les mêmes performances qu'un radiateur neuf et répondre aux **mêmes caractéristiques techniques**. Si jamais ce radiateur réemployé se mettait à fuir et générerait un dommage, il relèverait de la garantie décennale (loi Spinetta) pour cause de biais d'impropriété à destination : le fabricant ne pourrait pas être tenu pour responsable. Même si la maîtrise d'ouvrage acceptait contractuellement une responsabilité dans le choix du réemploi, la clause serait reconnue sans valeur en cas de dommage. ¹¹⁵

Conséquence logique de cette loi Spinetta, les assureurs sont souvent réticents à assurer des produits de réemploi avant que des règles professionnelles soient validées. A l'heure actuelle, la Fédération des assureurs, en collaboration avec les différents acteurs de la construction, examine l'assurabilité des matériaux et produits réemployés. Pour le moment, leurs recommandations sont les suivantes :

- « Le matériau réemployé doit rester **conforme à un DTU et mis en œuvre dans le respect de la réglementation en vigueur** (il est très probable qu'un produit de construction, tel qu'une menuiserie extérieure par exemple, prélevée sur un bâtiment construit avant l'entrée en vigueur des réglementations thermiques, ne réponde pas aux contraintes actuelles)
- Le matériau doit disposer des caractéristiques intrinsèques requises pour répondre à la **sécurité** attendue (la sécurité des personnes notamment)
- Le matériau doit présenter une **durée d'usage** attendue compatible avec la durée des responsabilités et assurances des acteurs (en particulier pour la responsabilité décennale dans laquelle il est aujourd'hui possible d'inclure de nombreux dommages)
- En cas d'achat de matériaux sur **plateforme de réemploi**, le **négociateur de matériaux** doit être identifié au sein d'une filière organisée, (ces négociateurs n'exposent pas leur responsabilité en première ligne)
- En cas de **récupération in situ**, l'**architecte** et le **bureau d'études** ont un rôle important à jouer dans le choix des produits et matériaux qui peuvent, ou non, être réemployés
- Enfin, le matériau de réemploi doit être **validé par un acteur de confiance qui s'engage** sur les capacités du produit à être réemployé. » ¹¹⁶

Au vu de ces nombreuses contraintes à respecter, on comprend mieux pourquoi un matériau réemployé est souvent bien plus cher qu'un matériau neuf !

En outre, tout comme l'utilisation de matériaux biosourcés, le réemploi est souvent considéré comme une technique non courante, et donc peu couverte, sauf par quelques assurances comme la MAF. Afin d'intégrer du réemploi dans un projet, la MAF donne les recommandations suivantes :

- « Le diagnostic est le premier stade pour l'identification de la ressource - PEMD (Produits, équipements, matériaux et déchets) ou autres, notamment lorsque les matériaux sont utilisés in situ ou sur un site à déconstruire déjà identifié
- En cas de recours à une plateforme de réemploi, les maîtres d'œuvre doivent favoriser les acteurs reconnus au sein d'une filière organisée
- Les matériaux sont validés par un acteur de confiance qui s'engage sur les capacités du produit à être réemployé (éventuellement par échantillonnage)

¹¹⁴ Article L541-1-1.

¹¹⁵ « Les biosourcés et le réemploi à l'épreuve des assurances ».

¹¹⁶ « Les biosourcés et le réemploi à l'épreuve des assurances ».

- Le contrôleur technique doit être désigné le plus en amont possible, avec une mission spécifique réemploi pour participer à l'élaboration du projet et valider le choix des matériaux qui vont être réemployés
- Le recours au réemploi ainsi que ses conditions doivent être spécifiés dans le CCTP lorsque le gisement est connu, et envisagé lorsqu'il n'est pas encore identifié
- L'adhérent MAF ou EUROMAF veille à ce que les autres intervenants du chantier soient assurés dans de bonnes conditions au regard du réemploi et des matériaux biosourcés. Et ceci pour qu'il ne soit pas le seul à supporter le risque de l'innovation, du réemploi et des matériaux biosourcés. »¹¹⁷

Le chemin est encore long vers une plus grande assurabilité de ces techniques non-courantes et moins carbonées, mais les filières se mettent doucement en place.

L'usage et l'habitant : le cœur du sujet

Au-delà de considérations purement technico-financières, un bâtiment est avant tout occupé.

La question de ses occupants et de leur rapport au lieu est primordiale. La rénovation, aussi bas carbone soit-elle, se doit de s'interroger à ce sujet.

Le confort, intemporel désir

De nombreux indicateurs entrent en jeu lorsqu'il s'agit de qualité environnementale d'un bâtiment, mais le bien-être de l'utilisateur doit être une priorité. Pour autant, il ne s'agit pas de **confondre confort et bien-être**. Si le premier peut être décrit comme « ce qui contribue au bien-être matériel, à la commodité de la vie »¹¹⁸, le second regrouperait plusieurs composantes, dont le confort, pour parvenir in fine à un « idéal matériel mais également physique ou moral lié à un épanouissement optimal. »¹¹⁹

Concernant le confort thermique, Philippe Rahm, architecte, renvoie l'origine de l'architecture à la condition « homéotherme » de l'être humain et à sa **nécessité vitale de maintenir son corps à une température de 37°C**. Pour y parvenir, l'être humain dispose de moyens corporels internes comme la sudation ou les contractions musculaires. Au cours des millénaires, il a également su développer des trésors d'ingéniosité pour réguler sa température interne, tels que l'alimentation, l'habillement, la migration et l'architecture. L'architecture permet donc de retenir entre ses murs, son sol et son plafond, une quantité d'air qu'il est possible de maintenir assez aisément à une température de confort entre 20 et 28°C.¹²⁰

« Pour s'abriter des vents qui refroidissent la peau par convection, se protéger de la pluie qui accélère le refroidissement du corps par conduction ou se cacher du soleil dont les rayons brûlent par radiation, l'être humain construit des toits et des parois. »¹²¹

¹¹⁷ « Les biosourcés et le réemploi à l'épreuve des assurances ».

¹¹⁸ Académie française, « Définition : confort » (Dictionnaire de l'Académie française), consulté le 5 septembre 2023, <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9C3548>.

¹¹⁹ Delphine Magnan, « Réhabiliter Les Grands-Ensembles, l'équation "Ressources, Confort, Patrimoine" - Thèse Professionnelle » (Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, 2021), https://issuu.com/delphmagnan/docs/th_se_pour_issuu.

¹²⁰ Philippe Rahm, « Histoire naturelle de l'Architecture - Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments » (Pavillon de l'Arsenal, 24 octobre 2020).

¹²¹ Rahm.

Toutefois, contrairement à la croyance générale, **le confort thermique n'est pas nécessairement une notion objective**. Au-delà de la technique, de la climatique, ou de la physiologie, le confort n'est pas un algorithme ayant pour entrées et sorties seulement des quantités, mais c'est plutôt une notion **culturellement construite**, dépendant de la perception de tout un chacun.¹²² Si à l'heure actuelle, la question est de savoir si l'on chauffe son logement à 21°C ou 19°C, en remontant dans le temps les standards ne sont pas du tout les mêmes. L'historien français Renan Viguié évoque un médecin du XVIIIème qui recommandait une température comprise entre **12,5°C et 15°C** dans les chambres. Mais cette recommandation était difficilement applicable avant le XIXème siècle, pour la simple et bonne raison que le thermomètre était encore très peu présent dans les foyers. Dans l'entre-deux-guerres, les manuels d'éducation évoquent une température de foyer idéal de **15°C**. Ce n'est qu'à partir des **Trente glorieuses**, avec l'avènement des énergies fossiles peu coûteuses, que la température de chauffage va s'élever de 15 vers 19, voire 20°C.¹²³

A l'heure actuelle, des différences culturelles existent aussi sur le confort d'été entre l'Amérique du Nord, qui a l'habitude de climatiser à 18°C ses espaces intérieurs, et l'Europe de l'Ouest qui préférera une climatisation à 26°C ou pas du tout (bien que face au réchauffement climatique ces constats commencent à changer). Deux visions majeures du confort thermique ont existé : très récemment, celle de **l'installation technique et des machines** à faire le climat intérieur du bâtiment (chaud ou froid), et avant cela, une vision plus « **low tech** » de la régulation du climat par l'urbanisme, l'architecture, de l'ameublement ou de la décoration même. Rahm évoque ainsi les textiles qui ont joué un rôle majeur dans la thermique jusqu'au XIXème siècle.

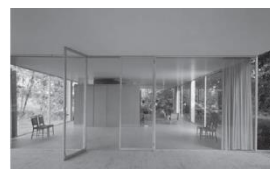
« Jusqu'à l'avènement des techniques de régulation thermique modernes, la décoration d'intérieur joue un rôle crucial en apportant des revêtements aux surfaces internes des constructions - qu'il s'agisse des tapisseries du Moyen-Age, des boiseries de la Renaissance, ou des tentures qui doublent les murs des pièces au XIXème siècle. »¹²⁴



À L'ORIGINE DE LA DÉCORATION



LES TEXTILES, UNE BARRIÈRE CONTRE LE FROID



POURQUOI LA DÉCORATION DISPARAIT AVEC LA MODERNITÉ



L'ISOLATION THERMIQUE PAR LE TEXTILE

Figure 66 - Quand les arts décoratifs n'étaient pas seulement décoratifs (source : Philippe Rahm via son Exposition Histoire naturelle de l'Architecture au Pavillon de l'Arsenal)

« Aujourd'hui, le divorce entre la décoration d'intérieur et régulation thermique prononcé au début de la modernité laisse place à une réconciliation inattendue. La lutte contre le réchauffement climatique et les réglementations récentes en matière de construction introduisent ainsi des éléments inédits d'aménagement intérieur : la laine isolante aux murs comme une

¹²² Eduardo Pietro, Franz Graf, et Giulia Marino, « La culture du bien-être, les poétiques du confort dans l'architecture du XIXème et XXème siècle », in *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XXème siècle : connaissances et stratégies de sauvegarde*, Editions Presses polytechniques et universitaires romandes, 2016, p.42.

¹²³ Rémi Noyon, « 15, 19 ou 21 °C : « Le confort thermique est une construction sociale » - Entretien avec Renan Viguié », *L'Obs*, 1 septembre 2022.

¹²⁴ Rahm, « Histoire naturelle de l'Architecture - Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments ».

réactualisation de la tapisserie, l'isolation des planchers comme un renouveau de l'art des tapis, la redéfinition de la ventilation comme un perfectionnement du principe de la cheminée, les films étanches posés sur les murs ou les « rideaux thermiques » placés devant une fenêtre comme un nouveau type de paravent ou de courtine»¹²⁵

En rénovation, la question du confort thermique est souvent au cœur des projets des maîtres d'ouvrage ; probablement puisque c'est un sujet qui permet en principe plus de **confort thermique** pour l'occupant, des **économies** de chauffage, et en bonus, un meilleur **bilan carbone**. Cependant, comme nous le verrons par la suite, la rénovation thermique systématique présente des problématiques diverses : techniques, patrimoniale, humaine, et même de confort ... d'été principalement. Les matériaux biosourcés, souvent légers, peu denses et ayant donc peu d'inertie, ne sont que moyennement performants en confort d'été, en particulier lors d'une canicule. En revanche, les matériaux **géosourcés** (terre, pierre), du fait de leur grande inertie, apportent un déphasage thermique important au bâtiment, lui permettant des températures plus agréables en période de canicule.

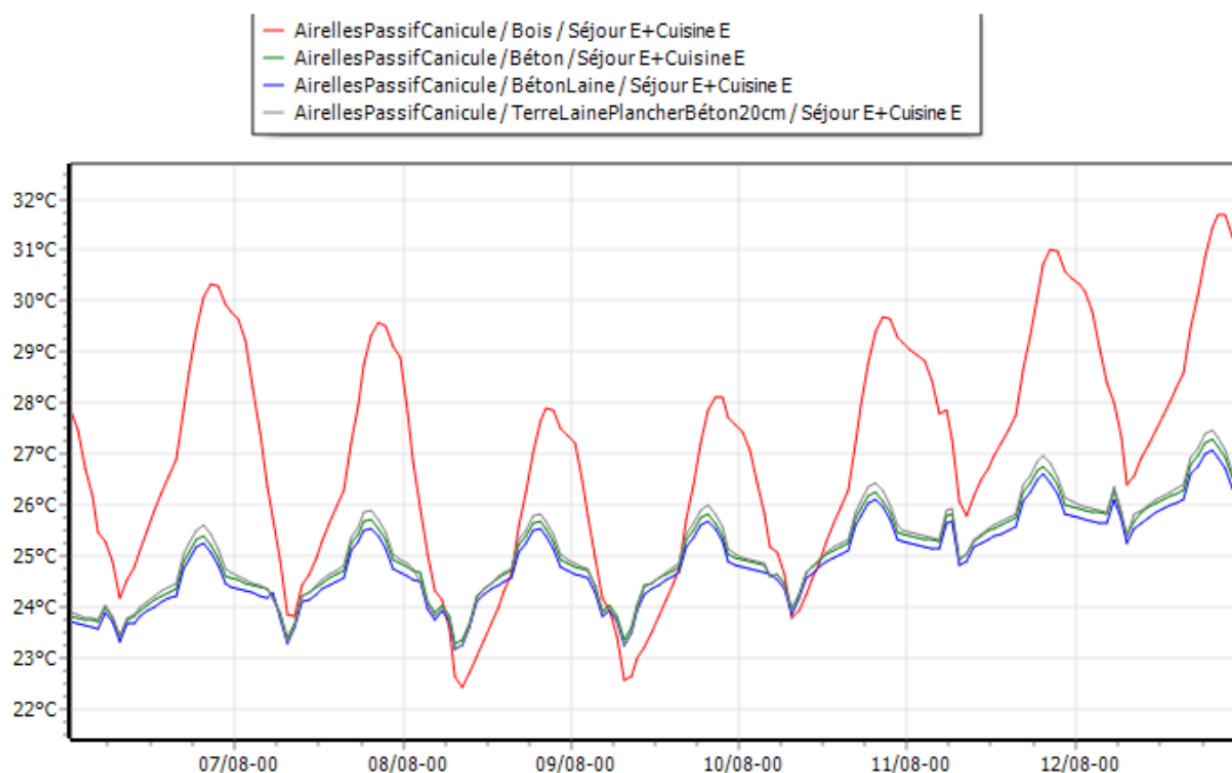


Figure 67 - Résultats de simulation thermique dynamique (Pleiades), maison passive sur une semaine de canicule, comparaison de variantes à inertie thermique forte et faible (source : Bruno Peuportier, via le Lab Recherche Environnement)

Une rénovation thermique peut parfois permettre plus de confort d'hiver, tout en contribuant à aggraver l'inconfort d'été, ce qui peut amener à une augmentation de l'installation et l'usage de la climatisation. La **climatisation** permet chaque année de sauver des vies face à la chaleur (30400 au Japon, où 90% de la population est équipée), même si 21 000 décès dans le monde sont dus aux particules fines générées par son utilisation. La climatisation est toutefois un **paradoxe** bien connu : bien qu'elle rafraîchisse l'air intérieur, elle réchauffe également l'air extérieur (jusqu'à 2°C supplémentaires en extérieur si tous les franciliens l'installaient)

¹²⁵ Rahm.

et provoque donc de l'inconfort en extérieur. Et puis, elle utilise énormément d'**énergie** (2000 tWh d'électricité consommée dans le monde en 2021), ce qui a émis près d'une gigatonne de carbone dans l'atmosphère en 2021, soit 2,5% des émissions mondiales. Enfin, les **gaz frigorigènes** fluorés qui permettent son bon fonctionnement ont un potentiel de réchauffement global très élevé, et leurs fuites régulières en exploitation ou en fin de vie émettent 3,5 millions de tonnes d'équivalent CO₂ en France chaque année.¹²⁶ **Pour décarboner la rénovation thermique, l'un des premiers leviers est donc la réflexion sur la thermique d'été et la limitation de l'usage à la climatisation.** Ces thématiques sont bien entendu aussi étroitement liées à des réflexions plus globales sur l'urbanisme.

Cependant, le confort n'est pas uniquement centré autour de la thermique : le confort **acoustique** joue également un rôle majeur. Avec la nécessaire transformation du secteur du bâtiment vers le réemploi, les constructions bio et géosourcées, de nouvelles problématiques acoustiques se posent. Pour le **réemploi**, comme nous l'avons évoqué précédemment, le matériau réemployé doit avoir les mêmes caractéristiques techniques que celles du neuf. Cela signifie que si l'élément doit posséder des caractéristiques acoustiques particulières (pour des panneaux absorbants, des portes ou des fenêtres par exemple), le produit réemployé doit y répondre, ce qui n'est pas toujours évident et peut nécessiter des tests supplémentaires. Pour les matériaux **géosourcés**, du fait de leur masse, les problématiques acoustiques sont moins prégnantes. En revanche, pour les matériaux biosourcés, par nature plus légers, moins denses que les matériaux « classiques », l'acoustique pose question :

« Le bois ne résonne pas comme le béton, le bruit de pas est perçu assez différemment. Il faut donc modifier les critères de jugements et se demander comment les personnes vont vivre dans le bâtiment. »¹²⁷

Les questions acoustiques récurrentes en **structure bois** sont liées à la protection du bruit extérieur des façades et aux séparations des espaces par les parois intérieures et les planchers. Ces sujets sont particulièrement récurrents en logement, où les niveaux d'affaiblissement demandés entre parois et planchers sont de 58 dB réglementairement, mais nécessitent souvent plus en construction bois. Pour répondre à ces sujets, un moyen très efficace est de traiter soigneusement les **interfaces**. Désolidariser les planchers entre eux, créer des refends par des contreventements placés à l'intérieur des murs extérieurs, ou encore mettre en œuvre des doubles parois (système « masse-ressort-masse ») sont des solutions réduisant les transmissions. Les transmissions peuvent intervenir également au niveau des cages d'escaliers, et nécessiter la pose de fixations antivibratiles entre les escaliers et les portes de paliers.¹²⁸

Mais des problèmes subsistent. Les fréquences entre 50 et 80 Hz peuvent provoquer des phénomènes de **résonance** dans les doubles parois. Les planchers bois sont délicats également et transmettent trop les **chocs mous**. Il est envisageable de réaliser du multicouche pour les planchers également, mais cela nécessite une chape flottante, de préférence humide (c'est-à-dire à base de ciment, donc carbonée) et un faux plafond suspendu. Dans ce cas, le bois n'est plus visible et perd son intérêt esthétique (mais pas celui de stockage de carbone biogénique).¹²⁹

¹²⁶ Jules Brion et Juliette Laffont, « Le Paradoxe de la climatisation », *Le Monde*, 20 août 2023.

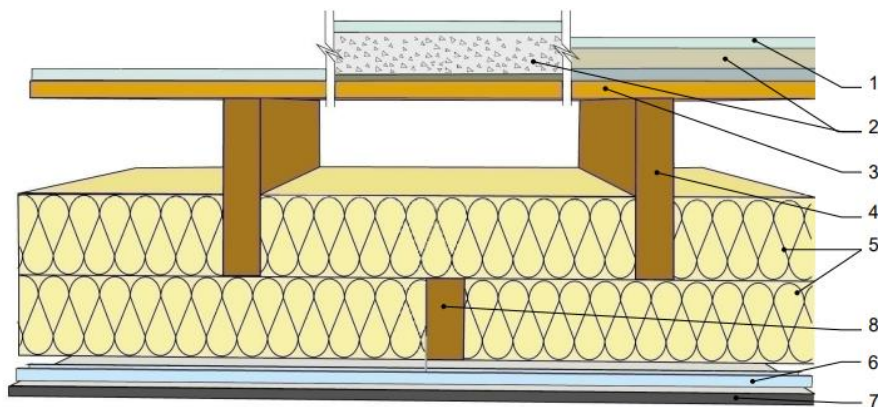
¹²⁷ Éric Gaucher, président d'Acoustique & Conseil dans : Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB), « Construction bois - Une acoustique à ne pas prendre à la légère », 17 mai 2016, <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/construction-bois-une-acoustique-a-ne-pas-prendre-a-la-legere.16543>.

¹²⁸ Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB).

¹²⁹ Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB).

Pour accompagner la technique sur ce sujet, des guides de bonne conception existent :

- Les guides Rage, les versions 2012 « Façades ossature bois non porteuses - neuf » et 2014 « Panneaux massifs bois contrecollés »
- La base de données du catalogue Construction bois réalisée par la FCBA et le CSTB



DEFINITION DES COMPOSANTS DE LA PAROI CONFORMES AU CGM DU NF DTU 31.1 ET 51.3 ET NOTAMMENT AUX CARACTERISTIQUES CI-DESSOUS

1 - Revêtement de sol :

Parquet : parquet contrecollé ou massif conforme au NF DTU 51.2 (pose collée) ou au NF DTU 51.1 (pose clouée) ou au NF DTU 51.11 (pose flottante)

Revêtement de sol souple : de type PVC ou textile conforme au NF DTU 53.12

2 - Chape :

Chape humide flottante : chape sous AT pour support bois, chape pour support bois selon Recommandations Professionnelles RAGE "chapes et dalles sur plancher bois", de 50mm d'épaisseur sur sous couche acoustique mince (SCAM inférieure à 5mm)

Chape sèche flottante : selon DTU 51.3 ou système sous AT ou DTA comportant 1 ou 2 plaques sur isolant à base fibrée

3 - Panneau à base de bois : Conforme au DTU 51.3 - Contreplaqué à usage structurel (marquage S) type 2 et 3, lamibois, panneaux de particules, OSB 3

4 - Solivage : Conforme au NF DTU 31.1. Bois massif ou BMA ou poutres en I, bois classés mécaniquement, compatible classe d'emploi 2, résistance aux insectes à larves xylophages et termites selon l'Arrêté du 27 Juin 2006 (modifié 2010)

5 - Isolant : souple ou semi-rigide

6 - Ossature métalliques support de plaque de plâtre : conforme au NF DTU 25.41

7 - Parement de plafond intérieur : 1 à 2 plaques de plâtre standard ou à résistance au feu améliorée selon exigences liées à l'ouvrage, conforme au NF DTU 25.41

8 - Solivage secondaire

Figure 68 - Exemple de plancher intermédiaire conforme à des exigences acoustiques et thermiques (source : Catalogue Construction Bois via <https://catalogue-bois-construction.fr/>)

Pour conclure sur le confort acoustique et la structure bois, au vu du développement de ce mode constructif, de nombreuses recherches sont à l'étude actuellement pour trouver comment réduire efficacement les transmissions dans les bâtiments.

L'accessibilité, pour un bâtiment plus équitable

Au-delà du confort, à quoi sert un bâtiment, si ce n'est à abriter des humains ?

Mais au-delà de ce simple constat, est-ce que le bâtiment parvient toujours à remplir son rôle auprès de tous les humains ? La réponse est non : en France, comme partout dans le monde, la question de l'accessibilité au bâtiment est toujours un chantier en cours.

« L'accessibilité c'est certes le combat des personnes handicapées, mais c'est aussi notre qualité de vie à tous, que l'on soit un petit enfant, une personne âgée qui est contente de trouver un banc dans sa ville, etc. »¹³⁰

Les **établissements recevant du public** (ERP) doivent être accessibles à tous, et à tous les types de handicaps, depuis la loi du 11 février **2005**. L'accessibilité repose sur 7 zones clés :

- L'entrée
- L'accueil
- Les circulations
- Les cabines, le cas échéant
- Les sanitaires, le cas échéant
- Le parking, le cas échéant
- La signalétique
- (et éventuellement l'espace extérieur s'il existe)

Toutefois, **des dérogations sont possibles dans l'existant**, (mais pas dans le neuf). ¹³¹

De même, depuis le décret n°2015-1770 et l'arrêté du 24 décembre **2015**, les **logements collectifs** doivent être accessibles, mais seulement s'ils sont **neufs**. La loi ELAN en 2018 oblige dans un bâtiment collectif, 20% de logements totalement accessibles, soit en rez-de-chaussée, soit desservis par un ascenseur. . Les autres logements doivent être évolutifs, c'est-à-dire qu'ils doivent à la fois permettre à une personne en fauteuil roulant d'y accéder, de circuler dans le séjour et d'utiliser le cabinet d'aisance, et qu'ils doivent également pouvoir être rendus accessibles avec des travaux simples. ¹³² L'accessibilité dans le bâtiment existant est une question primordiale, qui inclue également les problématiques de couples avec des poussettes, de personnes du troisième ou quatrième âge, etc.

L'accessibilité du bâti ancien est un sujet complexe. Et pourtant il est possible de combiner patrimoine et accessibilité, comme le montre un fameux ERP, le château le plus visité au monde : le château de Versailles. Frédéric Didier, architecte en chef des monuments historiques, qui supervise les travaux du château, résume le dilemme entre patrimoine et accessibilité de la manière suivante :

« Nous sommes là pour résoudre l'équation entre une conservation absolument parfaite, qui supposerait peut-être une fermeture totale au public et la notion de partage. (...) Ce partage avec un public nombreux et large suppose aujourd'hui que l'on puisse donner à voir le château dans de bonnes conditions à tous les publics : cela passe effectivement par des aménagements pour le public en situation de handicap. »¹³³

¹³⁰ Marie Prost Coletta, « Actes du séminaire - Accessibilité du cadre bâti ancien progéré » (Château des ducs de Bretagne de Nantes - Musée d'histoire de Nantes, 9 juin 2015).

¹³¹ « L'accessibilité des établissements recevant du public (ERP) », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 13 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/laccessibilite-des-etablissements-recevant-du-public-erp>.

¹³² « L'accessibilité du logement », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 13 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/laccessibilite-du-logement>.

¹³³ « Entretien avec Frédéric Didier, l'architecte en Chef des Monuments Historiques – Accessibilité Patrimoine », 04/16, <https://vimeo.com/167455092>.

La question du compromis est essentielle : la totalité du château ne peut pas être accessible puisque certains endroits sont déjà difficilement accessibles pour un public valide. Mais sur 80 000m² du château, 25 000m² sont des salles accessibles au public, dont 80% devraient être accessibles à tous les publics dans le futur d'après les objectifs des architectes. ¹³⁴

La mise en accessibilité n'est pas forcément en contradiction avec la mise en valeur du patrimoine. Par exemple, au château de Versailles, la grille royale d'entrée a été rétablie, et les pavillons d'accueil du public sur ses côtés la mettent désormais bien en valeur, mais les marches d'accès posaient encore des problèmes pour l'accessibilité. Après étude de la disposition d'origine, les architectes ont découvert que ces marches avaient été rajoutées au XIX^{ème} lorsque les cours avaient été surcreusées. En supprimant les marches et en réhaussant les cours, l'accessibilité des pavillons a donc été meilleure et le bâtiment a retrouvé une configuration d'origine. Des aménagements à l'intérieur du château ont également été réalisés, ainsi que la création de 7 ascenseurs, assez discrets. ¹³⁵

Bien entendu, cette mise en accessibilité a un **coût**, que tous les bâtiments existants ne peuvent pas assumer :

« Quand vous recevez 7 millions de visiteurs, il y a un investissement nécessaire. (...) Je pense que c'est plus difficile, sur un monument qui reçoit peu de visiteurs, de financer des équipements pour un besoin qui est très occasionnel et qui est beaucoup complexe à prendre en considération où le coût de l'investissement n'a aucune chance d'être « amorti ». »¹³⁶

Toutefois, il ne faut pas oublier que les monuments historiques protégés ne sont qu'une goutte d'eau dans l'océan : seulement 45000 sur les millions d'ERP qui existent en France. Et de même pour les logements, une fraction des bâtiments existants a une valeur patrimoniale de première importance. Mais pour autant, il est essentiel de **préserver aussi les bâtiments à valeur patrimoniale modérée** qui sont plus nombreux, et qui constituent une identité importante du paysage français. Il est difficile de trouver un juste milieu entre accessibilité et patrimoine. Frédéric Didier exprime ce délicat équilibre ainsi :

« La limite c'est qu'il ne faut pas tuer l'objet lui-même au nom de l'accessibilité pour tous. (...) Il faut admettre qu'il y a des choses qui ne peuvent pas être accessibles, il faudra le compenser par d'autres moyens. »¹³⁷

L'acceptabilité du (re), blocages psychologiques et inertie sociétale

Les maisons des trois petits cochons sont toujours présentes dans l'inconscient collectif.

La maison de brique résiste au loup tandis que les maisons de paille et de bois s'envolent avec son souffle. Si ce conte vise plutôt à réfléchir sur l'importance de se construire solidement en tant qu'individu, il n'en reste pas moins que l'on retiendra la paille et le bois comme des matériaux de construction peu adéquats. Mais

¹³⁴ « Entretien avec Frédéric Didier, l'architecte en Chef des Monuments Historiques – Accessibilité Patrimoine ».

¹³⁵ « Entretien avec Frédéric Didier, l'architecte en Chef des Monuments Historiques – Accessibilité Patrimoine ».

¹³⁶ « Entretien avec Frédéric Didier, l'architecte en Chef des Monuments Historiques – Accessibilité Patrimoine ».

¹³⁷ « Entretien avec Frédéric Didier, l'architecte en Chef des Monuments Historiques – Accessibilité Patrimoine ».

enfin, posons-nous la question honnêtement : **qui a besoin d'une maison qui résiste à un loup à l'heure actuelle ? La pollution de l'air et les vagues de chaleur tuent bien plus les humains que n'importe quel animal** (en excluant le moustique (et les autres êtres humains)).

Alors pourquoi construit-on encore en brique, en béton ou en métal alors que les émissions carbone de ces matériaux contribuent encore à aggraver le réchauffement climatique ? Les réponses peuvent être financières, techniques, liées aux lobbys, mais elles peuvent également être d'ordre humain, psychologique. Des artisans, architectes, BET ou MOA pourront répondre qu'ils ont « **toujours fait comme ça** », qu'il n'y a pas de raison que ça change. Mais dans les faits, les constructions vernaculaires se basaient bien plus sur des produits minéraux, végétaux et animaux. Les savoir-faire liés à la mise en œuvre de ces matériaux se sont perdus au fil du temps et de la mondialisation, lorsque des produits meilleur marché ont commencé à provenir de l'autre bout du monde. Toutefois, certains savoir-faire revivent, comme la construction en paille ou en terre crue, et commencent à s'organiser peu à peu en filières avec des règles professionnelles.

Du côté du réemploi, les mentalités changent petit à petit, et les entreprises et les filières commencent à s'organiser, mais restent encore très centralisées en Ile de France. Par ailleurs, **certaines produits facilement réemployables sont parfois mal aimés** : luminaires, cuvette de toilettes avec chasse, éléments de CVC ... En effet ces éléments « dynamiques » nécessitent, encore plus que les autres, un niveau d'exigence similaire au neuf, ce qui signifie une durée de vie en principe égale à celle d'un produit neuf. Sans cette assurance de la durée, il peut y avoir un manque à gagner pour les mainteneurs ou exploitaires par exemple. Par ailleurs, il y a aussi la simple question de la **vie antérieure du produit**. Certains maitres d'ouvrage ne conçoivent pas qu'un élément sanitaire puisse avoir été utilisé auparavant, alors que dans les faits le produit est complètement nettoyé, désinfecté et inerte.

En bref, à l'heure actuelle, le réemploi, le biosourcé et le géosourcé commencent petit à petit à redorer leur blason, mais le chemin est encore long pour qu'ils rentrent dans les mœurs.

Chapitre 6.

Au-delà du carbone

L'exigence de l'existant

Le patrimoine très ancien : avant le XVIIIème

Puisque l'on parle de rénovation et de réhabilitation, nous ne pouvons passer à côté des spécificités de ce type de projet. « Faire avec l'existant » ne coule pas toujours de source. A Bologne par exemple, il est possible d'apercevoir la réhabilitation ci-contre, où le respect et l'intégration du neuf à l'ancien est une notion plus que lointaine. Il est fort probable que cette réhabilitation ait permis de rendre ce bâtiment du XIVème/XVème siècle bien plus fonctionnel, confortable, lumineux et peut être performant énergétiquement que ce qu'il était à l'origine. Pour autant, le commun des mortels s'accordera à dire que ce projet est regrettable et dommageable, tant dans sa conception que dans son exécution. On pourrait identifier deux sujets principaux qui n'ont pas été traités dans cette réhabilitation : la **géométrie de l'existant** (hauteur de fenêtres, de plancher, de toiture, etc.) les **modénatures de la façade** (arcs-plein-cintre, corniches, etc.).



Figure 69 - Réhabilitation d'un bâtiment ancien à Bologne, piazza Santo Stefano (source : Antoine Deltheil)

Bien entendu, avec ce genre de patrimoine ancien, il est également question de la **technique constructive et des matériaux utilisés**. Avec les années, le savoir-faire mis en œuvre a pu se perdre, ou bien n'est plus d'actualité au vu des contraintes actuelles (incendie, technique, économique, etc.).

Nous avons pu avoir l'exemple récemment avec l'incendie de Notre-Dame : le choix a été fait de restaurer à l'identique l'ensemble du grand comble (la nef et le chœur) ainsi que la flèche. La nouvelle charpente se basera donc sur la charpente originelle médiévale, de 32 mètres de long, 14 mètres de large et de 10 mètres de haut, en chêne massif « d'une taille exceptionnelle ». Afin de représenter au mieux ce « témoignage patrimonial unique de l'art des compagnons du XIIIème siècle », **il a fallu mobiliser, voire ressusciter de nombreux savoir-faire constructif**. Pour reconstruire les 35 fermes et les 22 demi-fermes, 1200 chênes ont été sélectionnés dans les forêts du Nord-Ouest de la France. Ces 20km d'arbres voient d'abord leurs grumes dégrossies via un sciage mécanique, avant d'être équarries manuellement « à la hache de dégrossi et à la doloire (hache à simple biseau) pour respecter la fibre du bois ». Cette technique manuelle avait été peu à peu remplacée au XIXème par des techniques mécaniques, et renaît aujourd'hui de ses cendres grâce au travail des compagnons sur le chantier. Les poutres seront ensuite taillées entièrement à la main par des haches réalisées spécialement pour le projet par des taillandiers, dont le **métier en voie de disparition** consiste à fabriquer des

outils métalliques tranchants. Tous les assemblages de la charpente sont alors réalisés sans aucune pièce métallique, tout en tenon mortaise (assemblage bois-bois).¹³⁸



Figure 70 - Restauration de Notre-Dame : Quelques 20 km d'arbres sont transformés en poutre à la hache de dégrossi et à la doloire (source : Jean-Philippe Defawe via Le Moniteur)

Mis à part le transport du bois des forêts jusqu'au chantier et le levage de la charpente par grue, très peu d'énergie est utilisée pour la production et la mise en œuvre de cette charpente bois sans assemblage métallique. Durant la vie du bâtiment, qui sera probablement bien supérieure aux 50 ans réglementaires, **le bois continuera de stocker le carbone qu'il a engrangé durant sa croissance**, et ne le relâchera qu'à la fin de sa vie, idéalement dans plusieurs centaines d'années. Il est évident **que faire appel à ces techniques manuelles est bien plus coûteux, mais en termes d'émission carbone, le bilan est sans appel**. Evidemment, il n'est pas envisageable économiquement (ni souhaitable environnementalement) de massifier la construction en chêne centenaire. Toutefois, on retiendra qu'il est possible de faire à grande échelle de la rénovation bas carbone en France, et même très low tech, du moment que les moyens politiques et financiers accompagnent le projet.

Le patrimoine ancien : du XVIII^{ème} à la 2^{ème} Guerre Mondiale

Pour rester sur la thématique du bâti ancien, la rénovation énergétique du **bâti construit avant 1948** constitue un levier important de réduction des émissions carbone de la consommation d'énergie. Les logements anciens,

¹³⁸ Jean-Philippe Defawe, « Le chantier de Notre-Dame de Paris ressuscite des savoir-faire ancestraux », *Le Moniteur*, 26 mai 2023, <https://www.lemoniteur.fr/article/le-chantier-de-notre-dame-de-paris-ressuscite-des-savoir-faire-ancestraux.2273032>.

c'est-à-dire construits avant 1948, représentent environ **un quart du parc résidentiel** en France¹³⁹. Cependant, les modes constructifs et les matériaux utilisés sont très différents de ceux actuels. Si la rénovation énergétique de ce type de bâti est réalisée de la même manière que pour du bâti plus récent, le bâtiment peut subir au mieux **des pertes patrimoniales importantes**, au pire des **pathologies** pouvant mettre en danger l'intégrité structurelle du bâtiment.

L'exemple d'une petite maison de maître alsacienne ci-dessous est flagrant. La suppression des menuiseries, des marquises, des lucarnes, et des cheminées a complètement **dénaturé l'architecture d'origine** : les proportions de la façade et des ouvertures sont altérées, les modénatures de façade et encadrements de fenêtres sont cachés, les murs sont aplanis et raidis ... De plus, un enduit non traditionnel a été mis en œuvre, ce qui, en plus de donner un aspect lisse et un peu monotone à la façade, lui confèrera aussi un vieillissement différent de celui traditionnel. A la place d'avoir la patine de l'âge et de s'effriter peu à peu en laissant apparaître les couches précédentes d'enduits, il va se cloquer et se décoller.¹⁴⁰ Les **matériaux**, les **compositions de parois** et les **modénatures de façade** sont donc primordiaux.



Figure 71 - Exemple de rénovation énergétique ayant pour effet une perte patrimoniale et une altération architecturale (source : Carole Pezzoli via ANABF)

Le Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et de la Transition Energétique (PACTE) a étudié le parc résidentiel français, l'a classé par typologies et par années, et en a tiré plusieurs **fiches opérationnelles** par typologies pour guider les maîtrises d'ouvrage et maîtrises d'œuvre dans leurs choix de projet. Concernant la rénovation thermique par l'extérieure pour des projets avec une identité patrimoniale forte, le PACTE évoque la solution d'**enduits isolants à base de mortier** (souvent de chaux) dans lesquels sont présents des particules de matériaux isolants (chanvre, liège, verre cellulaire, billes de polystyrène expansé, silice, etc.). Cette méthode d'isolation a la même conductivité thermique que des isolants classiques mais est limitée à une épaisseur de 6

¹³⁹ PACTE (Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et de la Transition Energétique), « Analyse détaillée du parc résidentiel existant - version 2.0 ».

¹⁴⁰ « Habitat ancien en Alsace : Énergie et Patrimoine », La Pierre d'Angle, 18 février 2021, <https://anabf.org/pierredangle/dossiers/le-climat-change-quid-de-l-architecture/habitat-ancien-en-alsace-energie-et-patrimoine>.

à 8 centimètres. Du fait de cette épaisseur, la résistance thermique est plus faible que pour des isolants classiques. Ce genre d'enduit isolant à base de mortier permet de conserver les modénatures de façade de l'existant, et ne bloque pas la migration de la vapeur d'eau dans les parois.¹⁴¹ A Lyon, cette méthode a été mise en œuvre pour réhabiliter le 56-58 rue Saint Jean. Le ravalement à l'enduit chaux à la pouzzolane de ces immeubles de plus de 400 ans a permis de meilleures performances thermiques tout en conservant les modénatures de façade de l'existant.¹⁴² Pour améliorer les performances d'un bâtiment ancien, les fenêtres peuvent être un sujet délicat, à l'intersection entre patrimoine et thermique. Une solution peut se présenter sous la forme de **système de doubles fenêtres**, avec conservation des fenêtres d'origine à l'extérieur, et ajout de fenêtres plus performantes à l'intérieur du bâti.

Pour résumer ces multiples solutions techniques, le Centre de Ressources pour la Réhabilitation Responsable du Bâti Ancien (CREBA) a développé un outil intitulé « Guidance Wheel – **Outil d'aide à la décision pour une réhabilitation responsable** » permettant de comparer différentes solutions de réhabilitation selon une approche multicritères recoupant problématiques techniques, patrimoniales et énergétiques.¹⁴³

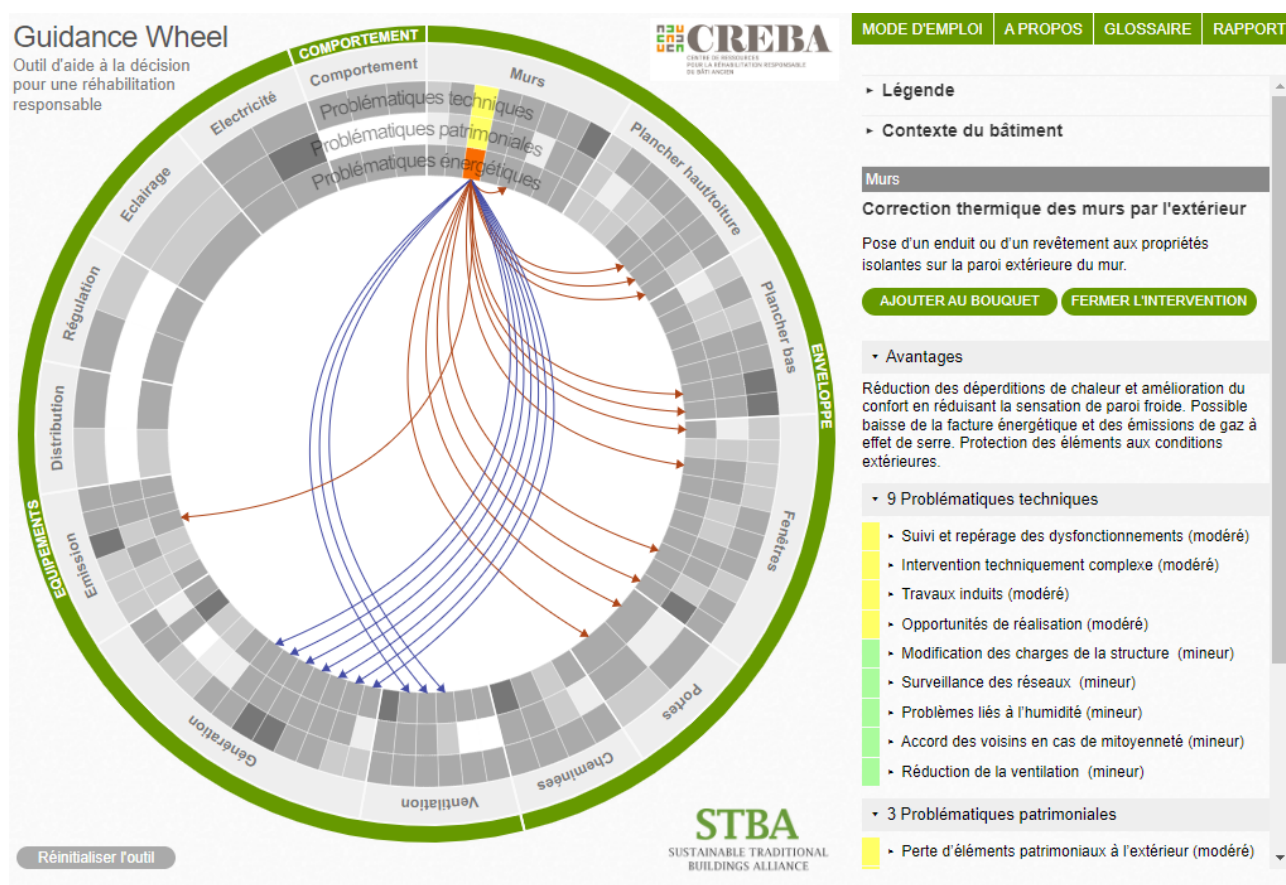


Figure 72 - Guidance wheel, outil d'aide à la décision pour une réhabilitation responsable - Correction thermique des murs par l'extérieur (source : CREBA Guidance Wheel)

¹⁴¹ PACTE (Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et de la Transition Energétique), « Stratégie de rénovation - version 1.0 », octobre 2017.

¹⁴² Lyon Mag, « Lyon Mag », Text, Lyon Mag, 3 octobre 2022, World, <https://www.lyonmag.com/article/126086/lyon-une-aide-eco-patrimoine-a-la-renovation-des-anciens-batiments>.

¹⁴³ « Guidance Wheel : outil d'aide à la décision pour une réhabilitation responsable », consulté le 29 août 2023, <https://responsible-retrofit.org/greenwheel-fr/>.

Le CREBA a également écrit une **charte de réhabilitation responsable du bâti ancien**, c'est-à-dire construit avant 1948 en France. La charte détaille trois grandes approches pour une réhabilitation du bâti ancien réussie :

- **Dimension patrimoniale** : objectif de préservation des valeurs architecturales et patrimoniales du bâtiment,
- **Dimension technique** : objectif de pérennité des composants et de qualité sanitaire du bâtiment,
- **Dimensions énergétiques et environnementales** : objectif de réduction des consommations d'énergie et de l'impact environnemental du bâtiment et d'augmentation du confort intérieur.¹⁴⁴

Dans cette charte, le CREBA conseille, pour une bonne prise en compte de la dimension patrimoniale, de privilégier :

- La **conservation des fenêtres** au maximum, ou leur **remplacement par des équivalents** en termes de dessins, de proportion et de matériaux plus aux normes thermiques ;
- L'**isolation en « comble-perdus »**, ou une isolation en extérieure qui respecte l'architecture et la volumétrie de l'existant ;
- La **correction thermique** des parois pour les bâtiments à fort enjeu patrimonial en intérieur comme en extérieur (si le bâtiment n'a pas d'intérêt patrimonial particulier, l'isolation des parois est tout à fait recommandée) ;
- Des interventions sur les **systèmes** utilisant les **réseaux existants** au maximum, ou à défaut, privilégiant les sorties en toiture et la **discretion** ;
- Une réflexion poussée sur la nécessité et le dessin architectural d'une éventuelle **extension**.

Patrimoine ancien et rénovation thermique et fonctionnelle ne sont pas incompatibles, mais nécessitent une réflexion conjointe en amont.

Le bâtiment plus récent : modernisme, postmodernisme etc.

La rénovation du bâti construit après 1948 interroge depuis plusieurs années. Après la seconde guerre mondiale, le courant du **modernisme** a produit de nombreux bâtiments, qui atteignent quarante, cinquante, soixante ans ou plus et nécessitent des rénovations thermiques et fonctionnelles.

Un article du Monde sur le sujet du patrimoine moderne et de la réhabilitation évoque le cas des **anciens bureaux de l'INSEE**, un « tripode » de 14 étages, situé à Malakoff construit en **1974** par les architectes Serge Lana et Denis Honneger. La notice de présentation du projet de démolition présente le bâtiment existant comme un « écran » entre Paris et Malakoff. Les décideurs, à savoir la ville de Malakoff, l'établissement public territorial Vallé Sud Grand Paris, la Ville de Paris et l'Etat, évoquent le projet de déménagement comme une « libération de l'emprise foncière » et un bon moyen de relocaliser une école trop soumise à la pollution ou d'élargir une coulée verte. Le discours des décideurs est axé sur l'écologie, et pourtant ce sont 30000 mètres carrés de béton et d'acier qui seront démolis.¹⁴⁵ Le collectif d'habitants « Insee pas fini » a évalué la dépose de l'existant à 6000 tonnes de CO2 émis, sans compter la construction de l'immeuble du projet, évalué à 50000 tonnes de béton armé et une quantité colossale de CO2 émis.¹⁴⁶ Pourtant, l'existant, bien que nécessitant un

¹⁴⁴ CREBA (Centre de Ressources pour la Réhabilitation Responsable du Bâti Ancien), « Charte de la réhabilitation responsable du bâti ancien », mars 2022.

¹⁴⁵ Isabelle Regnier, « Le patrimoine moderne, angle mort politique », *Le Monde*, 24 avril 2022.

¹⁴⁶ Anne-Laure Pineau, « Hauts-de-Seine, bataille rangée autour de l'avenir de la Tour Insee », *Actu-Juridique*, 29 janvier 2023, <https://www.actu-juridique.fr/administratif/urbanisme-construction/hauts-de-seine-bataille-rangee-autour-de-lavenir-de-la-tour-insee/>.

désamiantage, possède encore une structure en bon état, une organisation générale lisible et des espaces traversants lumineux.¹⁴⁷



Figure 73 - Le Tripode de l'INSEE à Malakoff (source : Stéphane Martin via chronique-architecture.com)

Il n'y a pas que les plateaux de bureaux des années 70 qui soient menacés : les **grands ensembles** subissent également de lourdes transformations, voire des démolitions. Ces « opérations, privées et publiques, de logements collectifs construits entre 1950 et 1973 avec le soutien financier de l'État »¹⁴⁸ avaient l'origine un objectif double de rationalisation de la construction, et de rendement urbain et social. A partir des années 1980, ces immeubles commencent à être jugés vétustes ou inadaptés et sont peu à peu **renovés ou démolis**, et ce d'autant plus avec la création de l'**ANRU** (Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine) au début des années 2000.¹⁴⁹

Pour protéger l'architecture du XXème siècle, le ministère de la Culture Français créé en 1999 le label « Patrimoine du XXème siècle ». Mais les grands ensembles sont mal aimés. Face à leur « **déni de patrimonialité** »¹⁵⁰ des grands ensembles, leur protection face aux réhabilitations et démolitions excessives devient difficile. Entre patrimonialisation et réhabilitation, il est parfois compliqué de trouver des solutions « pour **préserver une architecture témoin d'une époque tout en lui permettant d'évoluer.** »¹⁵¹

« La réhabilitation des grands ensembles, pratiquée de manière massive et indifférenciée sur l'ensemble du territoire, dans une temporalité d'urgence, et la plupart du temps centrée exclusivement sur l'objet physique, s'oppose à la patrimonialisation qui s'intéresse aux valeurs de singularité, d'unicité, d'inscription dans un environnement historique, social, urbain et mémoriel »

¹⁴⁷ Regnier, « Le patrimoine moderne, angle mort politique ».

¹⁴⁸ Audrey Courbebaisse et Natacha Issot, « Les grands ensembles ou comment concilier réhabilitation et patrimonialisation ? », *In Situ. Revue des patrimoines*, n° 47 (15 avril 2022), <https://doi.org/10.4000/insitu.34440>.

¹⁴⁹ Courbebaisse et Issot.

¹⁵⁰ André Micoud et Jacques Roux, « L'architecture en procès de réhabilitation. Réflexions sur l'appropriation patrimoniale des traditions constructives », *Annales de la recherche urbaine*, n° 72 (1996): 136-43.

¹⁵¹ Courbebaisse et Issot, « Les grands ensembles ou comment concilier réhabilitation et patrimonialisation ? »

particulier, dans une temporalité plus longue valorisant la construction sociale et la multiplicité de sens (historique, symbolique, d'usage) de l'objet concerné. »

Certains projets de réhabilitation parviennent à préserver l'architecture et les spécificités de l'existant, tout en permettant l'évolution des usages en son sein. Le projet de réhabilitation de la Corniche à Firminy s'inscrit ainsi dans une optique de préservation de l'identité moderniste du quartier Firminy -Vert, conçu par Jean Kling, André Sive, Marcel Roux et Charles Delfante. Les architectes Yann Olivares et Frédéric Busquet ont ainsi transformé les 128 appartements existants de **la Corniche** en 34 maisons individuelles avec terrasse et jardin. La superposition des étages pour créer une unité d'habitation s'inspire des travaux du Corbusier, et évite les problématiques acoustiques. Le système de façade en bardage bois local avec des occultations métalliques s'intègre en tunnel dans la structure existante et des planelles sont posées contre le béton pour assurer l'isolation thermique en complément de la laine de bois.¹⁵² **Le projet parvient à concilier patrimoine et nouveaux usages, mais au prix d'un surcoût certain** : le dernier étage n'a d'ailleurs été réhabilité que sommairement, et laissé vide pour le moment.



Figure 74 - Réhabilitation du bâtiment de La Corniche à Firminy par Yann Olivares et Frédéric Busquet en 2009 (source : <https://www.prixnational-boisconstruction.org/les-laureats/palmares-precedents/6391>)

Si les bâtiments issus du modernisme présentent quelques fois des problématiques d'**amiante**, de **thermique**, d'**acoustique** et parfois de **hauteur sous-plafond**, ils ont généralement une **structure en bon état** et une **organisation fonctionnelle** qui mériteraient être réhabilitées. De manière générale, le patrimoine regorge de qualités, qui ne demandent qu'à être exploitées pour remettre les bâtiments existants aux attendus de confort et d'usage.

¹⁵² Vincent Charbonnier, « Des maisons individuelles redressent la barre », *Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment* 5967, n° 5967 (16 mars 2018): 56.

L'environnement

Il n'a pas que le carbone dans la vie, il y a l'environnement aussi.

Le terme environnement peut sembler vaste, et pour cause ! Il réfère aussi bien à « l'ensemble des éléments (biotiques ou abiotiques) qui entourent un individu ou une espèce et dont certains contribuent directement à subvenir à ses besoins », qu'à « l'ensemble des éléments objectifs (qualité de l'air, bruit, etc.) et subjectifs (beauté d'un paysage, qualité d'un site, etc.) constituant le cadre de vie d'un individu »¹⁵³. Le concept d'environnement peut donc être objectif, en prenant en compte tous les paramètres physiques et biologiques qui composent la planète terre, ou bien plus subjectif, en se centrant sur les humains que nous sommes et nos besoins par rapport à ce qui nous entourent. Dans les deux cas, la notion de « carbone » (c'est-à-dire la notion d'**émissions de gaz à effet de serre**) a un impact fort sur l'environnement, en contribuant au réchauffement global de l'atmosphère, qui entraîne de nombreuses autres conséquences. Mais au-delà du carbone, les notions **d'énergie, de matières premières, d'eau et de biodiversité** sont primordiales.

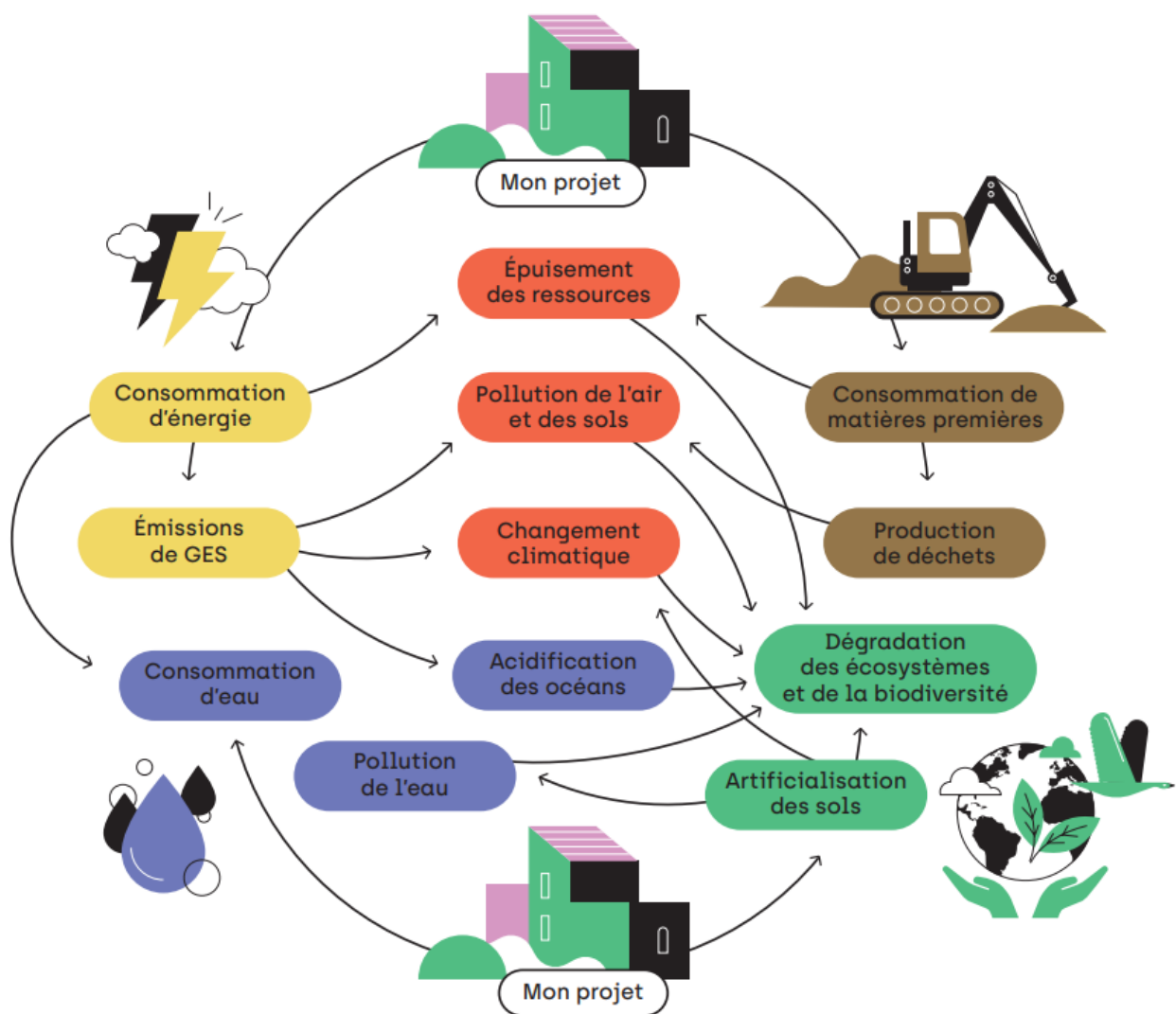


Figure 75 - Les enjeux environnementaux : des défis interconnectés (source : HQE Alliance GBC)

¹⁵³ Éditions Larousse, « Définitions : environnement », in *Dictionnaire de français Larousse* (Editions Larousse), consulté le 5 septembre 2023, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/environnement/30155>.

Les éléments listés sur le schéma ci-dessus sont tous repris comme indicateurs dans chaque fiche de la base INIES, même si c'est souvent seulement l'indicateur changement climatique qui est retenu.

Pour aborder ces indicateurs en pratique, suivons l'**exemple de cinq isolants** avec des résistances thermiques approximativement similaires. La paille est la seule fiche collective car aucune FDES individuelle n'existe sur la base INIES à l'heure actuelle : ses impacts sont donc potentiellement surévalués. Les autres fiches sont des fiches individuelles de la base INIES. Cinq grands types d'isolants seront étudiés ici : paille, fibre de bois, laine de verre, laine de roche, polyuréthane.

Type	Nom FDES	ID INIES	R de la paroi
Paille 370mm	Isolation en bottes de paille de plein champs issues de l'agriculture biologique	30441	7,1m ² .K/W
Fibre de bois 200mm	PARNATUR ISOLANT FIBRE DE BOIS 200 mm d'épaisseur, R = 5,10 m ² .K/W (hors accessoires de pose)	33060	5,1m ² .K/W
Laine de verre 160mm	KNAUF INSULATION Laine de Verre ECOSE SmartFaçade 32 BR 160mm	29827	5,0m ² .K/W
Laine de roche 200mm	KNAUF INSULATION Laine de roche FKD MAX C2 180 mm	29793	5,3m ² .K/W
Polyuréthane 120mm	Panneau d'isolation en mousse rigide de polyuréthane POWERWALL® (F) 120 mm d'épaisseur R= 5,45 m ² .K/W (hors accessoires de pose)	28966	5,5m ² .K/W

Figure 76 - Comparaison de cinq isolants, issu de différents matériaux (source : base INIES)

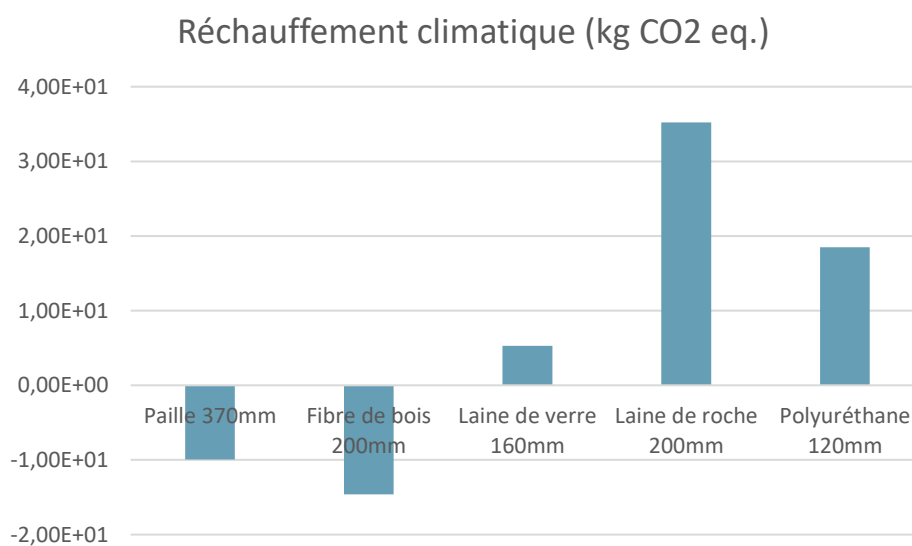


Figure 77 - Comparaison de l'impact sur le réchauffement climatique de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

Energie

L'énergie est le nerf de la guerre. Depuis la première révolution industrielle, **la consommation d'énergie dans le monde ne cesse d'augmenter**. Non seulement la production d'énergie émet des gaz à effet de serre, principalement à travers la combustion de vecteurs énergétiques fossiles (gaz, charbon, pétrole), mais ces combustibles sont en majorité non renouvelables.

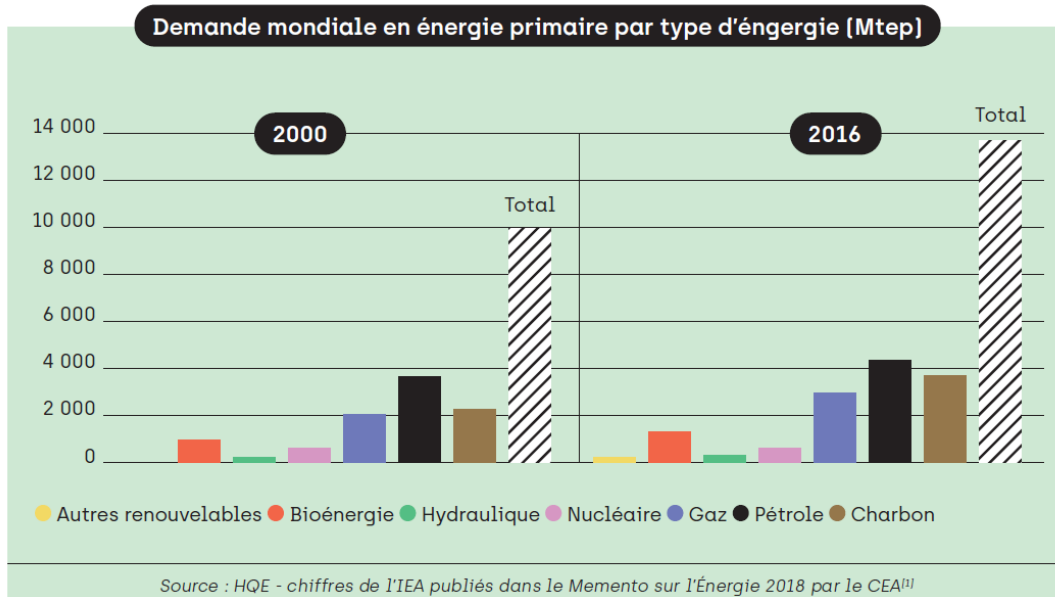


Figure 78 - Demande mondiale en énergie primaire par type d'énergie en Mtep (source : Alliance HQE GBC)

Le secteur du bâtiment n'est pas en reste et consomme près de **46% de l'énergie finale en France**¹⁵⁴, dont 75% durant la phase d'exploitation¹⁵⁵. Les 25% restants sont donc imputables en grande partie aux **produits de construction et équipements** et à la phase chantier. L'ACV en France développe plusieurs indicateurs liés à l'énergie pour mieux détailler les impacts de chaque produit, comme l'**utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables** (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières) (PERT), et l'**utilisation totale des ressources d'énergie primaire non renouvelables** (énergie primaire et ressources d'énergie primaire utilisées comme matières premières) (PENRT).

Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables ... (MJ)

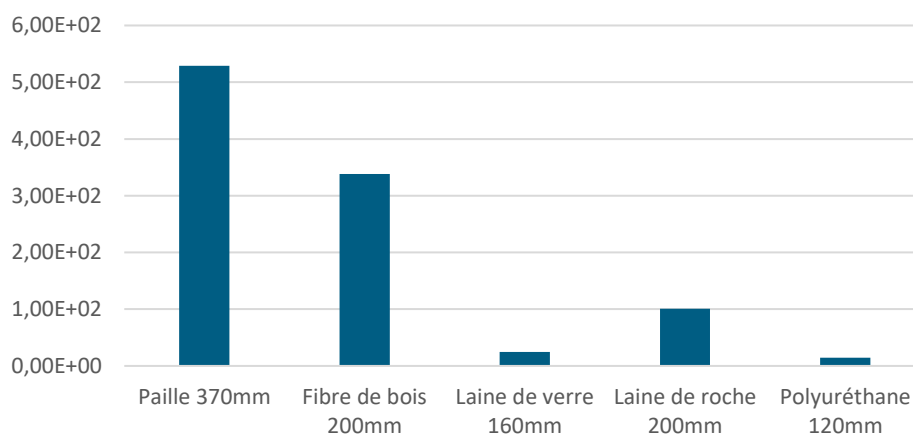


Figure 79 - Comparaison de l'utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels) – La paille consomme de l'énergie renouvelable notamment lors de sa croissance où elle bénéficie de l'énergie solaire directe. Cette énergie est donc très peu carbonée.

¹⁵⁴ CEA Saclay (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), « Memento sur l'énergie 2018 », 2018.

¹⁵⁵ LEBERT Alexandra et al., « Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance. Analyse statistique Action 22 », octobre 2013.

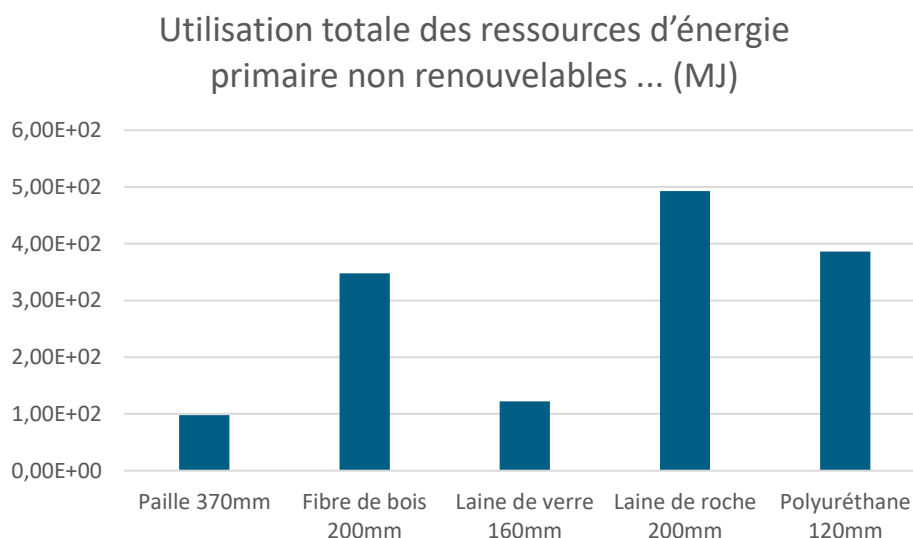


Figure 80 - Comparaison de l'utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

Matières premières

En un an, le secteur du bâtiment en France produit près de **46Mt de déchets**¹⁵⁶ et consomme **355Mt de matières premières** (graviers, sables ...)¹⁵⁷. L'ACV en RE2020 dispose d'indicateurs qui permettent de décrire et quantifier les impacts de ces matériaux sur la production de déchet, et l'épuisement des ressources et matières premières :

Épuisement des ressources abiotiques – éléments (ADPelements) :

« Cet indicateur exprime la quantité de matières « rares » (métaux utilisés dans le bâtiment (cuivre, zinc, aluminium, etc.)) consommée aux différentes étapes du cycle de vie du produit.

Le calcul correspond à la somme des masses de matières « rares » pondérées en fonction de la rareté des ressources et de la vitesse de leur exploitation. Plus la ressource est considérée comme rare et exploitée, plus la valeur de l'indicateur augmente et plus le produit contribue à l'épuisement des ressources.

Son unité s'exprime en antimoine (Sb) équivalent. L'antimoine est une ressource considérée comme épuisable à l'échelle humaine et a une valeur de 1 par convention. Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine. L'ADP antimoine vaut 1 mais celui de l'argile vaut 2,99.10-11 alors que celui de l'argent vaut 1,84. »¹⁵⁸

Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles (ADP-fossil fuels) :

« Cet indicateur exprime la quantité totale d'énergie fossile (gaz, lignite, pétrole, charbon, etc.) consommée aux différentes étapes du cycle de vie du produit.

¹⁵⁶ Ministère de la Transition écologique (MTE), « Déchets du bâtiment », Ministères Écologie Énergie Territoires, consulté le 17 septembre 2023, <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment>.

¹⁵⁷ Ministère de la Transition écologique (MTE), « Focus Ressources naturelles », notre-environnement, 17 septembre 2023, <http://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-economie-circulaire-ressources/article/focus-ressources-naturelles>.

¹⁵⁸ Alliance HQE-GBC, « Guide sur la Richesse de l'ACV - Pourquoi et comment prendre en compte d'autres impacts que le changement climatique ? », 2022.

Le calcul de cet indicateur prend donc en compte les énergies contenues dans les ressources non renouvelables. Son unité s'exprime en mégajoule (MJ) équivalent. »¹⁵⁹

Épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles (MJ)

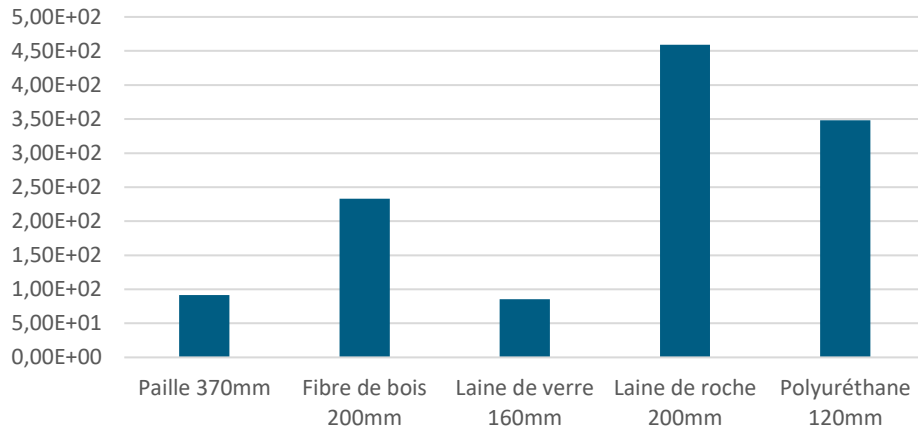


Figure 81 - Comparaison de l'épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

Utilisation de matière secondaire (SM) :

« La masse de matières récupérées après une première utilisation ou issues de déchets qui remplacent des matières primaires et qui sont intégrées dans le produit, exprimée en kilogramme (kg). »¹⁶⁰

Utilisation de matière secondaire (kg)

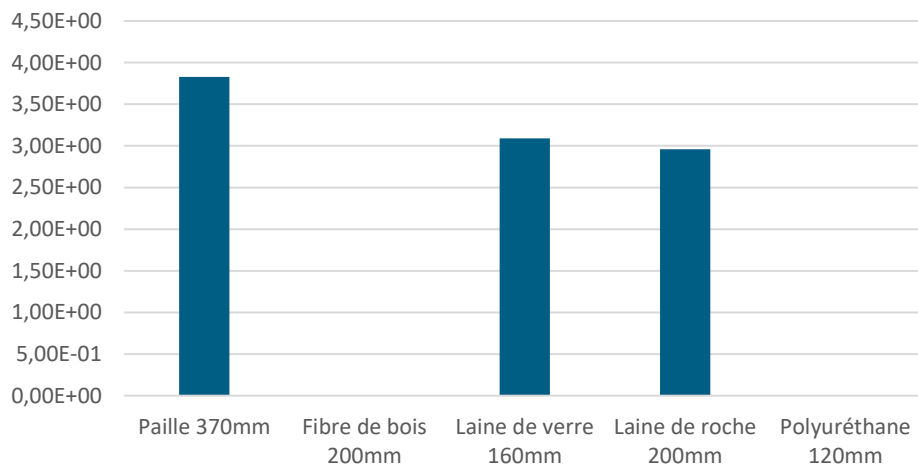


Figure 82 - Comparaison de l'utilisation de matière secondaire de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

¹⁵⁹ Alliance HQE-GBC.

¹⁶⁰ Alliance HQE-GBC.

Utilisation de combustibles secondaires renouvelables (RSF) :

« La quantité d'énergie consommée issue de combustibles renouvelables récupérés après une première utilisation ou issus de déchets, qui remplacent des combustibles primaires (ex : bois issu de la déconstruction d'un bâtiment utilisé comme combustible, déchets végétaux, huile végétale usagée), exprimée en mégajoule (MJ). »¹⁶¹

Utilisation de combustibles secondaires non renouvelables (NRSF) :

« La quantité d'énergie utilisée provenant de déchets d'origine non-renouvelable récupérés après une première utilisation ou issus de déchets, qui remplacent des combustibles primaires (ex : déchets plastiques), exprimée en mégajoule (MJ). »

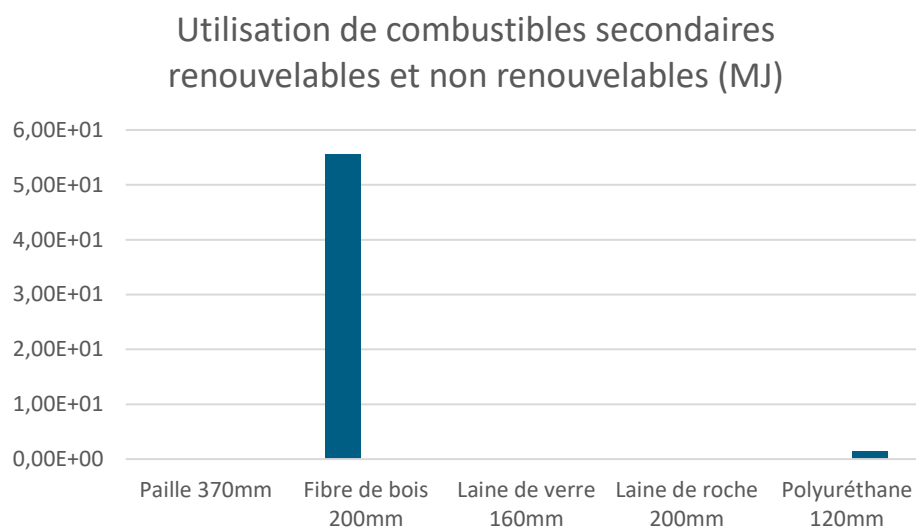


Figure 83 - Comparaison de l'utilisation de combustibles secondaires de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé – le combustible est renouvelable pour la fibre de bois, et non renouvelable pour le polyuréthane - (source : base INIES via graphiques personnels)

Déchets dangereux éliminés (HWD) :

« La quantité de déchets classés dangereux produite qui est enfouie ou incinérée. Cette évaluation est représentative des installations qui seront nécessaires au traitement et au stockage de ces déchets et conduiront à des impacts sur l'environnement induits par leurs activités. Il est exprimé en kilogramme (kg). »¹⁶²

Déchets non dangereux éliminés (NHWD) :

« La quantité de déchets classés non dangereux et inertes produite qui est enfouie ou incinérée. Cette évaluation est représentative des installations qui seront nécessaires au traitement et au stockage de ces déchets et conduiront à des impacts sur l'environnement induits par leurs activités. Il est exprimé en kilogramme (kg). »

¹⁶¹ Alliance HQE-GBC.

¹⁶² Alliance HQE-GBC.

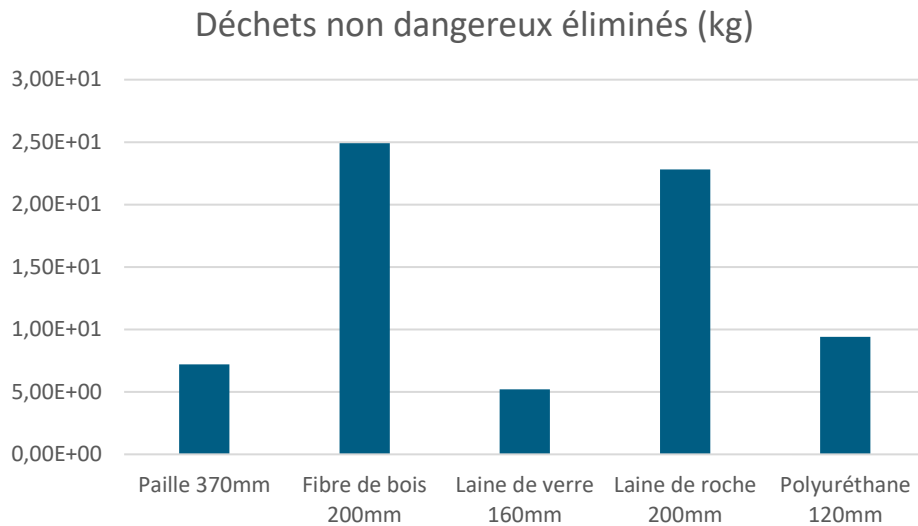


Figure 84 - Comparaison de kg de déchets non dangereux éliminés de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé – (source : base INIES via graphiques personnels)

Eau

Le secteur du bâtiment en France consomme environ **un quart de l'eau potable** utilisée, dont 40% durant les phases de chantier et de production des produits et équipements.¹⁶³ Au vu des **sécheresses** à répétitions qui ont lieu en France chaque année, l'utilisation d'eau douce est évidemment un facteur à prendre en compte. Plusieurs indicateurs développent cette thématique en ACV :

Utilisation nette d'eau douce (FW) :

« La quantité d'eau douce qui est consommée aux différentes étapes du cycle de vie du produit, exprimée en mètre cube (m³) »¹⁶⁴

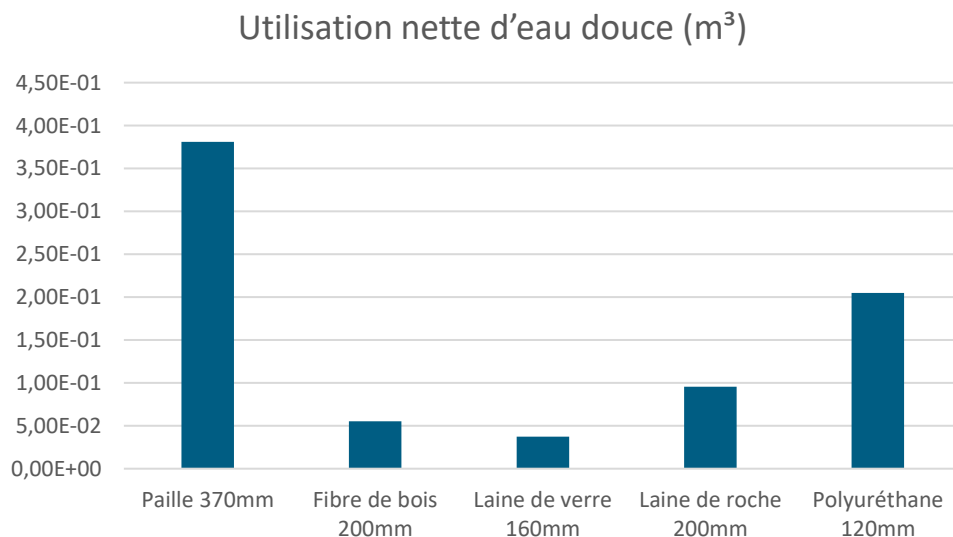


Figure 85 - Comparaison de l'impact sur l'utilisation nette d'eau douce de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

¹⁶³ Alliance HQE-GBC.

¹⁶⁴ Alliance HQE-GBC.

Biodiversité

Le **réchauffement climatique** (GWP), que nous avons déjà longuement abordé, a un impact fort sur la biodiversité, puisqu'il modifie les températures moyennes de l'atmosphère, participe à l'élévation du niveau moyen des océans et perturbe donc les écosystèmes. Mais il n'est pas le seul sujet qui impacte la biodiversité. Entre 2006 et 2014 en France, les surfaces **artificialisées** ont par exemple grignoté **12%** supplémentaires des surfaces **végétalisées**.¹⁶⁵ En France, **17,6 % des espèces évaluées sont menacées**, et **187 espèces ont disparues** ou sont éteintes.¹⁶⁶ De nombreux facteurs peuvent peser sur cette perte de biodiversité :

Appauvrissement de la couche d'ozone (ODP) :

« Cet indicateur exprime le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique engendré par des émissions de chlorofluorocarbures (CFC, HCFC) aux différentes étapes du cycle de vie du produit. Ces émissions réagissent avec les molécules d'ozone(O₃) présentes dans la stratosphère. Les molécules d'ozone, formant la couche d'ozone, jouent un rôle de filtrage des rayons ultraviolets dangereux (UV-B) pour l'homme, pouvant être cancérogènes et provoquer une dégradation des écosystèmes et de la qualité de vie. Son unité s'exprime en kilogramme de trichlorofluorométhane (CFC11) équivalent. »¹⁶⁷

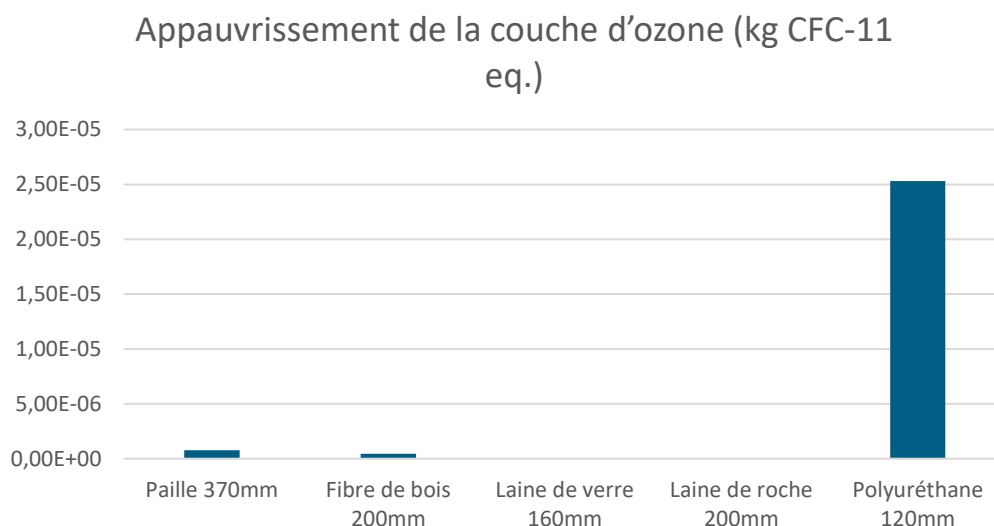


Figure 86 - Comparaison de l'impact sur l'appauvrissement de la couche d'ozone de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

Acidification des sols et de l'eau (AP) :

« Cet indicateur exprime le potentiel d'acidification engendré par les émissions dans l'atmosphère de composés susceptibles de se transformer en acides (dioxyde de soufre(SO₂), oxydes d'azote (NO_x), ammoniac(NH₃), acide chlorique (HCl), et autres substances susceptibles de se transformer en acides (acide sulfurique, acide nitrique), lessivés par les précipitations (pluies acides) et se retrouvant dans les eaux de ruissellement, de surface et dans le sol aux différentes

¹⁶⁵ ADEME, « Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 ».

¹⁶⁶ UICN France, « La Liste rouge des espèces menacées en France », UICN France, consulté le 18 septembre 2023, <https://uicn.fr/liste-rouge-france/>.

¹⁶⁷ Alliance HQE-GBC, « Guide sur la Richesse de l'ACV - Pourquoi et comment prendre en compte d'autres impacts que le changement climatique ? »

étapes du cycle de vie du produit. Les pluies acides baissent la productivité des écosystèmes naturels (forêts) ou artificiels (cultures), elles impactent la faune (mort de poissons, etc.) et la flore (déperissement de la végétation). Son unité s'exprime en kilogramme de dioxyde de soufre (SO₂) équivalent. »¹⁶⁸

Eutrophisation (EP) :

« Cet indicateur exprime le potentiel d'enrichissement des eaux en nutriments (phosphate ((PO₄)³⁻) et nitrate (NO₃⁻) engendré par les émissions aux différentes étapes du cycle de vie du produit. L'excès de nutriments provoque une prolifération d'algues. La respiration de ces organismes, puis leur décomposition, provoquent une diminution de la teneur en oxygène dissout (O₂) du milieu aquatique, perturbant l'équilibre de l'écosystème, entraînant une diminution de la diversité biologique une baisse de la qualité de l'eau et un engorgement des lacs. Son unité s'exprime en kilogramme de phosphate ((PO₄)³⁻) équivalent. »¹⁶⁹

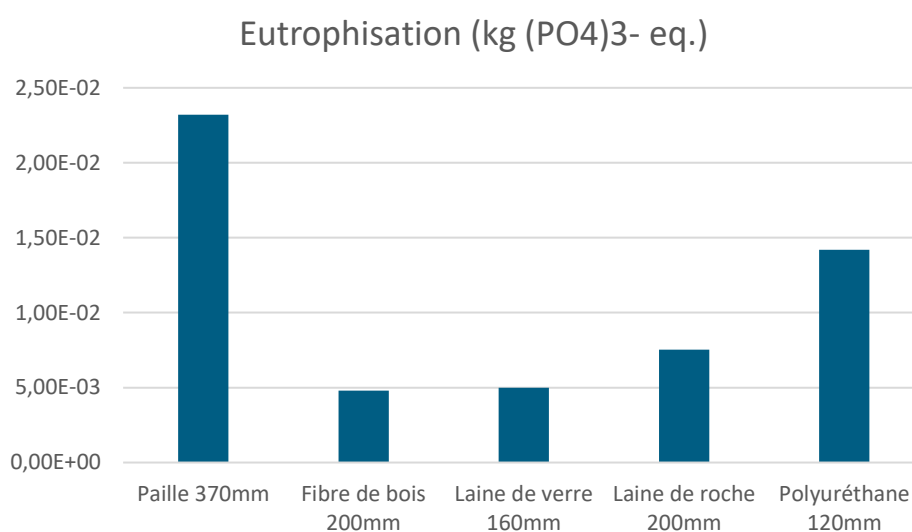


Figure 87 - Comparaison de l'impact sur l'eutrophisation de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)

Par ailleurs, nous avons longuement évoqué le sujet des **matériaux biosourcés** dans ce rapport, mais leur faible impact carbone pose aussi question.

« On peut ainsi lire sur le site du ministère de la transition écologique que « ces matériaux répondent aux enjeux du développement durable : empreinte environnementale favorable, car stockant le carbone ». Mais la même quantité de carbone stockée dans du bois de construction ne l'aurait-elle pas été tout autant en forêt si l'arbre n'avait pas été coupé ? »¹⁷⁰

Lorsqu'un matériau biosourcé arrive en fin de vie dans un bâtiment, le CO₂ est réémis dans l'atmosphère si le matériau est incinéré ou enfoui. Pour que le bilan du bois soit réellement négatif, il faut donc qu'un autre arbre soit planté lorsqu'il est coupé : **la forêt doit être gérée durablement** pour que l'impact carbone du bois soit

¹⁶⁸ Alliance HQE-GBC.

¹⁶⁹ Alliance HQE-GBC, « Addendum au Référentiel « Energie-Carbone » pour la réalisation d'ACV de bâtiments rénovés issu des travaux HQE Performance - Version 1.0 ».

¹⁷⁰ Peuportier, « Note sur l'analyse du cycle de vie des matériaux biosourcés ».

négatif. La culture intensive de matériaux biosourcés pour la construction pose d'autres questions, de monoculture, d'incinération, etc. :

« L'un des grands avantages des matériaux biosourcés est lié à la préservation des ressources. Leur bilan en termes de santé et de biodiversité est plus mitigé et dépend grandement des pratiques mises en œuvre.

La plantation intensive, en monoculture régulière, est très défavorable à la biodiversité par rapport à une sylviculture irrégulière, d'où l'intérêt de la certification des forêts. L'incinération, et l'usage du bois énergie, émettent des polluants toxiques. Il serait utile de progresser vers une méthodologie d'évaluation tenant compte de ces impacts et différenciant les pratiques plus ou moins vertueuses (certifications, essences utilisées, labels, etc.). »¹⁷¹

Nous l'avons vu, il n'existe pas de matériau, de produit ou de technique de construction idéal : chacun a ses spécificités et impacte plus ou moins les différents indicateurs environnementaux et le patrimoine. **L'essentiel est de parvenir à trouver un compromis entre qualité du bâtiment et empreinte environnementale.**

¹⁷¹ Peuportier.

Conclusion

Thermique, légère, lourde ou patrimoniale, **la rénovation est un levier pour diminuer l'impact carbone du secteur du bâtiment**. Rénover permet d'éviter ou de diminuer de nombreux problèmes environnementaux, comme l'artificialisation des sols, la génération de déchets de déconstruction, la production de quantités importantes de matériaux neufs. De ce fait, la rénovation a généralement un impact carbone moins important que la construction neuve.

Quantifier l'impact carbone d'un projet en rénovation est important, mais n'est pas simple. Plusieurs méthodes d'analyse de cycle de vie peuvent être utilisées : BBCE Rénovation, HQE GBC, Quartier Energie Carbone, mais aucune n'est encore obligatoire en France. Comme l'a prouvé la RE2020 avec le bâtiment neuf, la réglementation permet de guider les acteurs du bâtiment vers une décarbonation du secteur. Alors à quand une **réglementation environnementale sur la rénovation** ?

Au-delà de l'aspect réglementaire, deux axes majeurs peuvent permettre de décarboner la rénovation (et le neuf) : **consommer moins** et **consommer mieux**. Sobriété énergétique, frugalité de matière, réutilisation, réemploi, matériaux biosourcés et géosourcés sont autant de moyens de diminuer l'impact d'un projet.

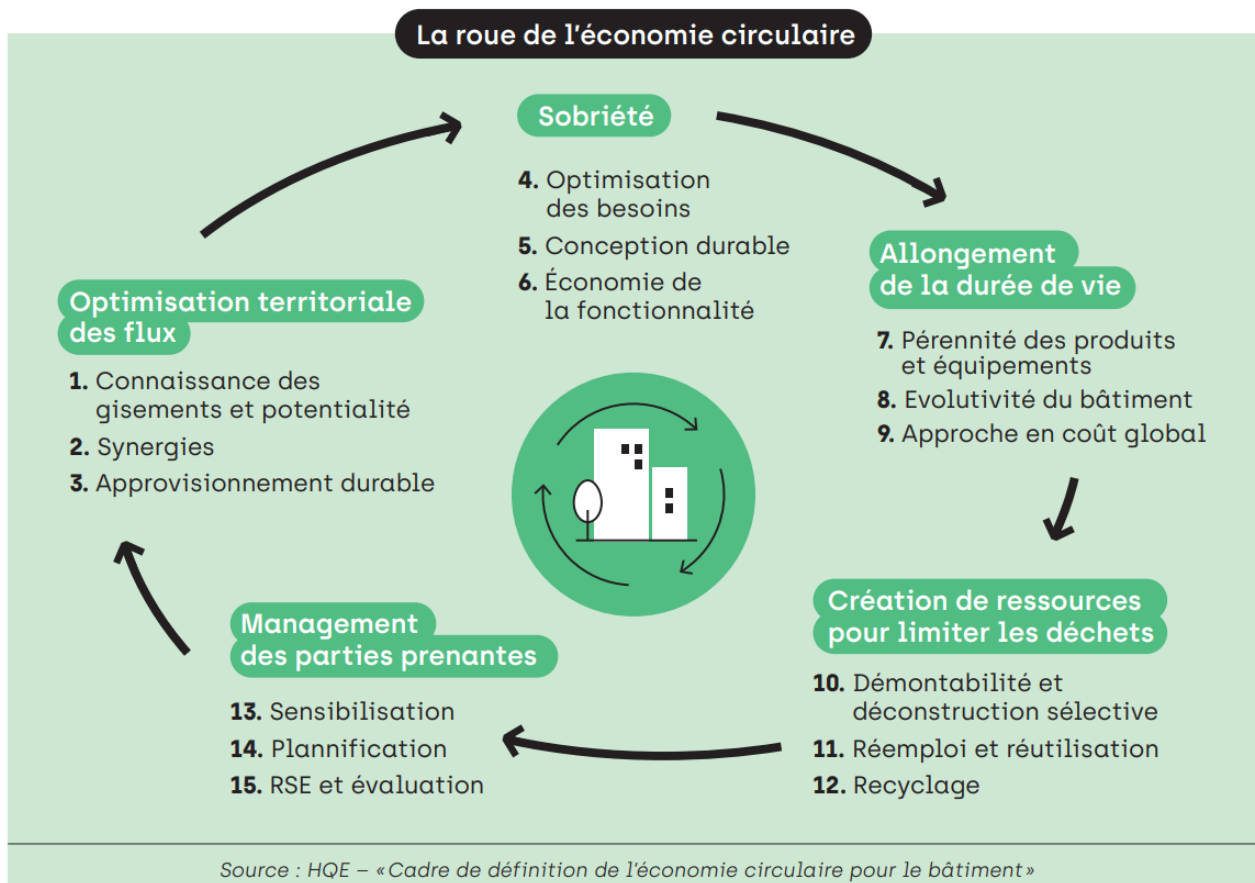


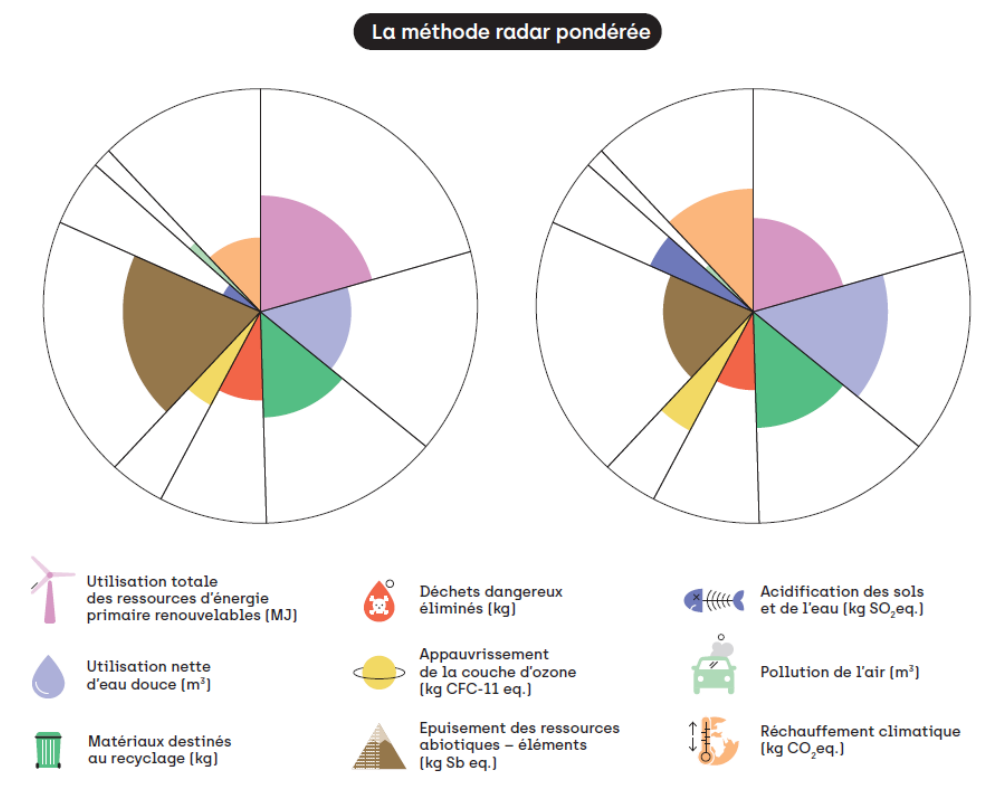
Figure 88 - La roue de l'économie circulaire (source : Alliance HQE GBC)

Mais dans la réalité du secteur, ces pistes d'actions se heurtent souvent à des **obstacles** de taille : économie de projet, assurabilité, sécurité incendie, accessibilité, habitudes, etc. Les solutions moins carbonées ont souvent un prix plus élevé, nécessitent des compétences plus spécifiques et encore peu développées, demandent plus de dialogue en amont avec tous les acteurs du projet, etc. Lentement mais sûrement, ces

modalités de projet nouvelles se développent et intègrent peu à peu l'analyse de cycle de vie dans les mœurs du secteur.

Par ailleurs, la rénovation bas carbone ne doit pas non plus se faire au prix d'une perte de **qualité patrimoniale**. Le bâti existant a des qualités et des particularités intrinsèques qu'il ne s'agit pas de détruire au nom du carbone. Entre modénatures, matériaux, savoir-faire, organisation, l'existant est riche de détails qui témoignent d'une époque et qui méritent d'être préservés au maximum. Un **compromis** est donc à trouver sur chaque projet entre patrimoine et bas carbone.

Mais il ne faut pas oublier que les émissions de gaz à effet de serre ne sont qu'un indicateur parmi d'autre. Il s'agit d'un indicateur urgent, puisqu'il est directement lié à l'augmentation de la température moyenne de l'atmosphère. Mais il ne doit pas pour autant occulter les autres problématiques environnementales : eutrophisation des sols, production de déchets, appauvrissement de la couche d'ozone, artificialisation des sols, pollution de l'air et de l'eau, etc. Pour prendre en compte ces multiples indicateurs au mieux, il est possible d'intégrer une **évaluation en ACV multicritère dès l'appel d'offre**, en pondérant par exemple certains indicateurs.



Source : Alliance HQE-GBC

Figure 89 - La méthode radar pondéré (source : Alliance HQE GBC)

Pour diriger le secteur de la rénovation en France vers le bas-carbone et le faible impact environnemental, la **prescription** des maîtres d'ouvrage est essentielle, mais aussi et avant tout **l'engagement et la curiosité de chacun des acteurs du bâtiment : entreprises du BTP, BET, MOE, MOA, collectivités et Etat.**

Bibliographie

- « Actes du séminaire - Accessibilité du cadre bâti ancien progéré ». Château des ducs de Bretagne de Nantes - Musée d'histoire de Nantes, 9 juin 2015.
- ADEME. « Base Carbone - Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone ® », 13 avril 2023.
- . « Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 », novembre 2018.
- . « Le réemploi et la réutilisation ». Agence de la transition écologique, 30 août 2021.
<https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-l'action/eviter-production-dechets/reemploi-reutilisation>.
- Agence Qualité Construction (AQC). « Observatoire de la Qualité de la Construction - Editions 2023 », 2023.
- Alliance HQE-GBC. « Addendum au Référentiel « Energie-Carbone » pour la réalisation d'ACV de bâtiments rénovés issu des travaux HQE Performance - Version 1.0 », novembre 2018.
- . « Guide sur la Richesse de l'ACV - Pourquoi et comment prendre en compte d'autres impacts que le changement climatique ? », 2022.
- Annexe 1 - RE2020, Code de la Construction et de l'habitation § (2021).
- Article L173-1, Code de la construction et de l'habitation §. Consulté le 8 septembre 2023.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000041569859.
- Article L541-1-1, Code de l'environnement §. Consulté le 2 septembre 2023.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000042176087.
- Article R111-22, Code de l'Urbanisme §. Consulté le 24 juillet 2023.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000031721274/.
- Article R173-8, Code de la construction et de l'habitation §. Consulté le 8 septembre 2023.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043819431.
- Assemblée Nationale. « Le protocole de Kyoto et la réduction des émissions de gaz à effet de serre ». Consulté le 1 août 2023. https://www.assemblee-nationale.fr/12/controle/delat/dates_cles/protocole_kyoto.asp.
- Association BBKA. « Label BBKA - Référentiel de labellisation des bâtiments en rénovation v1.0 », 5 octobre 2018.
- « Avec six mois de retard, la RE2020 va enfin démarrer... en 2022 ». 18 février 2021, L'Usine Nouvelle édition.
<https://www.usinenouvelle.com/article/avec-six-mois-de-retard-la-re2020-va-enfin-demarrer-en-2022.N1062519>.
- Blain, Christophe, et Jean-Marc Jancovici. *Le monde sans fin*. Paris: Dargaud, 2021.
- Boughriet, Rachida. « Bois et sécurité incendie - Entretien avec Dominique Cottineau ». Actu-Environnement. Actu-environnement, 14 mars 2022. <https://www.actu-environnement.com/ae/news/bois-securite-incendie-reglementation-dominique-cottineau-uicb-39253.php4>.
- Brigade de sapeurs-pompiers de Paris, Direction des transports et de la protection publique - Sous-direction de la sécurité du public, Laboratoire central de la préfecture de police, et Service des architectes de sécurité. « Doctrine pour la construction d'immeubles en matériaux biosourcés », 20 juillet 2021.
- Brion, Jules, et Juliette Laffont. « Le Paradoxe de la climatisation ». *Le Monde*, 20 août 2023.
- Briques Nord. « La brique... processus de fabrication ». Consulté le 2 septembre 2023. <http://www.briques-nord.org/processus-de-fabrication/>.
- Cabassud, Nicolas, Marion Chartier, Gaëlle Colin, Quentin Deslot, Jordan Giuly, Louis Orta, Justine Paradis, et al. « Guide RE2020 DHUP / Cerema ». MTE (Ministère de la Transition écologique) - (CEREMA) Centre

- d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, mars 2022.
https://rt-re-batiment.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_re_maj3_vf.pdf.
- Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB), Cahiers Techniques du. « Construction bois - Une acoustique à ne pas prendre à la légère », 17 mai 2016. <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/construction-bois-une-acoustique-a-ne-pas-prendre-a-la-legere.16543>.
- Cerema. « Comment évaluer l'impact carbone dans les projets de rénovation des bâtiments ? Etat des lieux des méthodes et pratiques actuelles en France ». Consulté le 22 août 2023.
<http://www.cerema.fr/fr/actualites/comment-evaluer-impact-carbone-projets-renovation-batiments>.
- « Changements environnementaux : vers de nouveaux risques pandémiques - Sanofi France ». Consulté le 17 septembre 2023. <https://www.sanofi.fr/fr/labsante/degradation-de-l-environnement-et-du-climat-vers-de-nouveaux-risques-pandemiques>.
- Chapitre V : Règles en matière énergétique (Articles R185-1 à R185-2), Code la construction et de l'habitation §. Consulté le 8 septembre 2023.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074096/LEGISCTA000043819583?dateVersion=08%2F09%2F2023&nomCode=bbVnEQ%3D%3D&page=1&query=L.+183-2+%C3%A0+L.+183-10&searchField=ALL&tab_selection=code&typeRecherche=date&anchor=LEGIARTI000043819585#LEGIARTI000043819585.
- « Chapter 3. Goal and System Definition ». In *Environmental Life Cycle Assessment*, 23-46. CRC PressTaylor & Francis Group, 2015.
- Charbonnier, Vincent. « Des maisons individuelles redressent la barre ». *Le Moniteur des Travaux Publics et du Bâtiment* 5967, n° 5967 (16 mars 2018): 56.
- Courbebaisse, Audrey, et Natacha Issot. « Les grands ensembles ou comment concilier réhabilitation et patrimonialisation ? » *In Situ. Revue des patrimoines*, n° 47 (15 avril 2022).
<https://doi.org/10.4000/insitu.34440>.
- Courrier international. « Record. Le 4 juillet 2023, la Terre a vécu son jour le plus chaud », 5 juillet 2023.
<https://www.courrierinternational.com/article/record-le-4-juillet-2023-la-terre-a-vecu-son-jour-le-plus-chaud>.
- CREBA (Centre de Ressources pour la Réhabilitation Responsable du Bâti Ancien). « Charte de la réhabilitation responsable du bâti ancien », mars 2022.
- CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). « Appréciation de laboratoire Bois construction et propagation du feu par les façades », 7 décembre 2020.
- CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Efficacity, Elioth, ADEME, Emilien Paron, Adélaïde Aublet, Marie Frapin, et al. « Méthode Quartier Energie Carbone », septembre 2022.
- Da Veiga, Léo. « Entretien avec François Consigny : « Par rapport au béton, le bois est sans comparaison » ». *Les Echos*, 10 mai 2023, sect. Théma. <https://www.lesechos.fr/thema/articles/construction-par-rapport-au-beton-le-bois-est-sans-comparaison-1941967>.
- . « La chaleur fatale d'Equinix chauffera le centre aquatique de Saint-Denis ». *Les Echos*, 28 septembre 2022, sect. PME Régions. <https://www.lesechos.fr/pme-regions/ile-de-france/la-chaleur-fatale-dequinix-chauffera-le-centre-aquatique-de-saint-denis-1852404>.
- Datalab, et Ministère de la Transition écologique (MTE). « Chiffres clés du logement - Editions 2022 », juillet 2022.
- Defawe, Jean-Philippe. « Le chantier de Notre-Dame de Paris ressuscite des savoir-faire ancestraux ». *Le Moniteur*, 26 mai 2023. <https://www.lemoniteur.fr/article/le-chantier-de-notre-dame-de-paris-ressuscite-des-savoir-faire-ancestraux.2273032>.
- « Définition : r(e)-, ré- ». Dictionnaire de l'Académie française. Consulté le 1 août 2023.
<http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9R0685>.

- Delaleu, Alice. « RE2020 : l'ACV dynamique, c'est de la dynamite écologique et ... politique ! » Chroniques d'architecture, 9 février 2021. <https://chroniques-architecture.com/re2020-acv-dynamique-cest-de-la-dynamite/>.
- Données et études statistiques pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports. « Bilan environnemental de la France - Édition 2022 ». Consulté le 1 août 2023. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.frSAISIR>.
- « Du sable au verre | Fédération de l'industrie du verre (FIV) ». Consulté le 2 septembre 2023. <https://www.vgi-fiv.be/le-verre/du-sable-au-verre/>.
- Entretien avec Antoine Deltheil, ingénieur Artelia, 1 septembre 2023.
- Entretien avec Cécile Granier, ingénieure Artelia, 26 juillet 2023.
- « Entretien avec Frédéric Didier, l'architecte en Chef des Monuments Historiques – Accessibilité Patrimoine », 04/16. <https://vimeo.com/167455092>.
- Entretien avec Jean-Michel Reymond, économiste de la construction Artelia, 24 avril 2023.
- française, Académie. « Définition : confort ». Dictionnaire de l'Académie française. Consulté le 5 septembre 2023. <http://www.dictionnaire-academie.fr/article/A9C3548>.
- Garric, Audrey, et Stéphane Mandard. « "Inaction climatique" : le Conseil d'Etat lance un nouvel ultimatum au gouvernement ». *Le Monde*, 10 mai 2023. https://www.lemonde.fr/planete/article/2023/05/10/inaction-climatique-le-conseil-d-etat-ne-relache-pas-la-pression-sur-le-gouvernement_6172792_3244.html.
- Géoconfluences. « Anthropocène ». Terme. École normale supérieure de Lyon, juin 2022. ISSN : 2492-7775. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/anthropocene>.
- Géoconfluences. « Biodiversité ». Terme. École normale supérieure de Lyon, avril 2023. ISSN : 2492-7775. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/biodiversite>.
- Géoconfluences. « Résilience ». Terme. École normale supérieure de Lyon, avril 2023. ISSN : 2492-7775. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/resilience>.
- Gonin, Alexis. « Transition écologique ». Terme. Géoconfluences. École normale supérieure de Lyon, mai 2021. ISSN : 2492-7775. <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/transition-ecologique>.
- « Guidance Wheel : outil d'aide à la décision pour une réhabilitation responsable ». Consulté le 29 août 2023. <https://responsible-retrofit.org/greenwheel/fr/>.
- Hub des Prescripteurs Bas Carbone, IFPEB (Institut Français pour la Performance du Bâtiment), et Carbone 4. « Accélérer la réussite des seuils futurs de la RE2020 ». Hub des prescripteurs Bas Carbone, 27 juin 2023.
- Hub des Prescripteurs Bas Carbone, IFPEB (Institut Français pour la Performance du Bâtiment), Carbone 4, et CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). « Ateliers rénovation : restitution n°2 », 25 mai 2023.
- . « Equation Coût Carbone », 10/21.
- INIES. « FDES 29534 - Peinture intumescence pour la protection incendie de charpente métallique - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT ». Consulté le 18 septembre 2023. <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/infos-produit/29534>.
- . « FDES 34239 (individuelle) - Verre clair ORAÉ® 4 mm (hors accessoire de pose) », s. d.
- Intergovernmental Panel On Climate Change. « Chapter 7. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity ». In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1^{re} éd., 923-1054. Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.
- « ISO 14044 : Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices ». Consulté le 2 septembre 2023. <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:fr>.

- La Pierre d'Angle. « Habitat ancien en Alsace : Énergie et Patrimoine », 18 février 2021.
<https://anabf.org/pierredangle/dossiers/le-climat-change-quoi-de-l-architecture/habitat-ancien-en-alsace-energie-et-patrimoine>.
- Larousse, Éditions. « Définitions : environnement ». In *Dictionnaire de français Larousse*. Editions Larousse. Consulté le 5 septembre 2023. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/environnement/30155>.
- Leconte, Christine, et Sylvain Grisot. *Réparons la ville ! propositions pour nos villes et nos territoires*. Rennes: Éditions Apogée, 2022.
- Légifrance. Article R156-1, Code de l'Urbanisme §. Consulté le 24 juillet 2023.
<https://www.legifrance.gouv.fr/codes/id/LEGIARTI000043819221/2021-07-01/#LEGIARTI000043819221>.
- Les Echos. « Le bien-être au travail se pense aussi hors les murs de l'entreprise », 2 mars 2023.
<https://www.lesechos.fr/thema/articles/le-bien-etre-au-travail-se-pense-aussi-hors-les-murs-de-lentreprise-1911289>.
- Les Echos. « Le travail au noir atteint des sommets dans la construction », 29 juillet 2014.
<https://www.lesechos.fr/2014/07/le-travail-au-noir-atteint-des-sommets-dans-la-construction-307396>.
- Low tech Lab. « Le manifeste du Low-tech Lab : pour un avenir low-tech ! », mai 2019.
<https://lowtechlab.org/fr/actualites-blog/le-manifeste-du-low-tech-lab>.
- . « Panneau isolant au Mycélium de champignon ». Consulté le 16 septembre 2023.
https://wiki.lowtechlab.org/wiki/Panneau_isolant_au_Myc%C3%A9lium_de_champignon.
- . « Qu'est-ce que la low-tech ? » Consulté le 11 septembre 2023. <https://lowtechlab.org/fr/la-low-tech>.
- Madec, Philippe, Dominique Gauzin-Müller, et Alain Bornarel. « Manifeste pour une Frugalité heureuse et créative dans l'architecture et l'aménagement des territoires urbains et ruraux ». *Frugalité heureuse & créative*, 18 janvier 2018. <https://frugalite.org/ressources-2/les-publications/4-engagements-30-principes/>.
- MAF Assurances (Mutuelle des Architectes Français). « Les biosourcés et le réemploi à l'épreuve des assurances ». Consulté le 1 septembre 2023. <https://www.maf.fr/actualite/les-biosources-et-le-reemploi-lepreuve-des-assurances>.
- Mag, Lyon. « Lyon Mag ». Text. Lyon Mag, 3 octobre 2022. World.
<https://www.lyonmag.com/article/126086/lyon-une-aide-eco-patrimoine-a-la-renovation-des-anciens-batiments>.
- Magnan, Delphine. « Réhabiliter Les Grands-Ensembles, l'équation "Ressources, Confort, Patrimoine" - Thèse Professionnelle ». Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier, 2021.
https://issuu.com/delphmagnan/docs/th_se_pour_issuu.
- Mélanie, Trélat. « Bétons bas carbone : entre Green Washing et Far West - Entretien avec Christian Rech, fondé de pouvoir chez Cimalux », Neomag, s. d., 48-51.
- Micoud, André, et Jacques Roux. « L'architecture en procès de réhabilitation. Réflexions sur l'appropriation patrimoniale des traditions constructives ». *Annales de la recherche urbaine*, n° 72 (1996): 136-43.
- Ministère de la Transition écologique (MTE). « Déchets du bâtiment ». Ministères Écologie Énergie Territoires. Consulté le 17 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/dechets-du-batiment>.
- . « Focus Ressources naturelles ». *notre-environnement*, 17 septembre 2023. <http://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/economie/l-economie-circulaire-ressources/article/focus-ressources-naturelles>.
- . « Stratégie Nationale Bas Carbone - La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone », mars 2020.

- Ministère de l'Économie. « Rénovation énergétique et réhabilitation lourde des logements sociaux ». Consulté le 28 août 2023. <https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/mesures/renovation-energetique-rehabilitation-lourde-logements-sociaux>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « Diagnostic de performance énergétique - DPE ». Consulté le 7 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/diagnostic-performance-energetique-dpe>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « Éco Énergie Tertiaire (EET) ». Consulté le 8 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/eco-energie-tertiaire-eet>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « L'accessibilité des établissements recevant du public (ERP) ». Consulté le 13 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/laccessibilite-des-etablissements-recevant-du-public-erp>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « L'accessibilité du logement ». Consulté le 13 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/laccessibilite-du-logement>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « L'économie circulaire ». Consulté le 13 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/leconomie-circulaire>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies. Consulté le 1 août 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>.
- . Loi énergie-climat. Consulté le 1 août 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-energie-climat>.
- . « Qu'est-ce que la biodiversité ? » Consulté le 11 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-informations-cles>.
- Ministères Écologie Énergie Territoires. « Réglementation environnementale RE2020 ». Consulté le 2 septembre 2023. <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>.
- Noyon, Rémi. « 15, 19 ou 21 °C : « Le confort thermique est une construction sociale » - Entretien avec Renan Viguié ». *L'Obs*, 1 septembre 2022.
- One Click LCA. « Construction carbon regulations in Europe - Review & best practises », octobre 2022.
- Ordre des architectes. « 36 fiches pratiques pour le réemploi des matériaux », 22 février 2022. <https://www.architectes.org/actualites/36-fiches-pratiques-pour-le-reemploi-des-materiaux>.
- PACTE (Programme d'Action pour la Qualité de la Construction et de la Transition Énergétique). « Analyse détaillée du parc résidentiel existant - version 2.0 », juillet 2017.
- . « Stratégie de rénovation - version 1.0 », octobre 2017.
- Peuportier, Bruno. « Note sur l'analyse du cycle de vie des matériaux biosourcés ». lab recherche environnement, 13 janvier 2022. <https://www.lab-recherche-environnement.org/fr/article/note-sur-lanalyse-du-cycle-de-vie-des-materiaux-biosources/>.
- Pietro, Eduardo, Franz Graf, et Giulia Marino. « La culture du bien-être, les poétiques du confort dans l'architecture du XIXème et XXème siècle ». In *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XXème siècle : connaissances et stratégies de sauvegarde*, Editions Presses polytechniques et Universitaires romandes., p.42, 2016.
- Pineau, Anne-Laure. « Hauts-de-Seine, bataille rangée autour de l'avenir de la Tour Insee ». *Actu-Juridique*, 29 janvier 2023. <https://www.actu-juridique.fr/administratif/urbanisme-construction/hauts-de-seine-bataille-rangee-autour-de-lavenir-de-la-tour-insee/>.
- « Qalway - la chaleur de récupération par Qarnot ». Consulté le 14 septembre 2023. <https://qalway.com/fr>.
- « Quels sont les gaz à effet de serre ? – Jean-Marc Jancovici ». Consulté le 3 septembre 2023. <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>.
- Rahm, Philippe. « Histoire naturelle de l'Architecture - Comment le climat, les épidémies et l'énergie ont façonné la ville et les bâtiments ». Pavillon de l'Arsenal, 24 octobre 2020.

recita.org. « Filière de valorisation des bouchons en liège ». Consulté le 14 septembre 2023.
<https://www.recita.org/initiative/h/filiere-de-valorisation-des-bouchons-en-liege.html>.

Regnier, Isabelle. « Le patrimoine moderne, angle mort politique ». *Le Monde*, 24 avril 2022.

« Rénovation : dans quels cas doit-on entreprendre des travaux d'isolation thermique ? » Consulté le 7 septembre 2023. <https://www.service-public.fr/particuliers/vosdroits/F33682>.

Rey-Lefebvre, Isabelle. « En quête d'une meilleure qualité de vie, les Français rejettent la densité des grandes métropoles ». *Le Monde*, 14 décembre 2021.
https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/12/14/en-quete-d-une-meilleure-qualite-de-vie-les-francais-rejettent-la-densite-des-grandes-metropoles_6105963_3234.html.

Section 2 : Dispositions applicables en cas de travaux importants de ravalement ou de réfection de toiture (Articles R173-4 à R173-7) - Légifrance, Code de la construction et de l'habitation §. Consulté le 8 septembre 2023.
https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006074096/LEGISCTA000043819419.

Sénécat, Adrien. « L'échec du bilan carbone "obligatoire", symbole du mépris des enjeux climatiques ». *Le Monde*, 24 mars 2023. https://www.lemonde.fr/les-decodeurs/article/2023/03/24/l-echec-du-bilan-carbone-obligatoire-symbole-du-mepris-des-enjeux-climatiques_6166785_4355770.html.

« Température de fusion d'un métal | Air Liquide France Industrie - Fournisseur de gaz industriels ». Consulté le 2 septembre 2023. <https://fr.airliquide.com/solutions/soudage-industriel/temperature-de-fusion-dun-metall>.

The Shift Project. « Décarboner la filière ciment-béton », 2022.

UICN France. « La Liste rouge des espèces menacées en France ». UICN France. Consulté le 18 septembre 2023. <https://uicn.fr/liste-rouge-france/>.

Vizcab. « RE 2020 : Points clés de la nouvelle réglementation environnementale ». Consulté le 2 septembre 2023. <https://vizcab.io/reglementation-environnementale-re-2020>.

Table des illustrations

Figure 1 - Potentiel de Réchauffement Global de l'Atmosphère des principaux gaz à effet de serre (source : 6ème rapport du GIEC)	14
Figure 2 - Occurrences de différents termes liés à la rénovation thermique dans la littérature de la base de données Google Books (source : Google Books Ngram Viewer)	16
Figure 3 - De l'énergie au carbone, la législation en action (source : http://www.betcsharel.com/evolution-de-la-rt.html)	17
Figure 4 - Exemple d'étiquette DPE pour un logement (source : https://jardinage.lemonde.fr/dossier-2698-diagnostic-performance-energetique-dpe.html)	17
Figure 5 - Interdiction progressive de location en fonction des étiquettes DPE des logements (source : https://scala-patrimoine.fr/2022/12/21/loi-climat-vers-une-interdiction-a-la-location-des-logements-energivores/)	18
Figure 6 - Répartition du parc tertiaire par activité (source : Artelia)	19
Figure 7 - Histogramme des obligations de réduction des consommations du décret tertiaire (source : Artelia)	20
Figure 8 - Évolution de la température moyenne dans le Monde (source : NASE – GISS – août 2018 via Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 de l'ADEME)	21
Figure 9 - Évolution de la température moyenne en France (source : NASE – GISS – août 2018 via Climat Air et Energie - Chiffres clés 2018 de l'ADEME)	22
Figure 10 - Emissions historiques et budgets carbone en MtCO ₂ eq (source : inventaire CCNUCC, format Kyoto, soumissions du 15 mars 2019 et 29 juin 2015, budgets carbone adoptés en 2015 et budgets carbone ajustés provisoirement en 2019)	23
Figure 11 - Indicateurs Carbone de la RE2020 (source : Artelia)	27
Figure 12 - Principe de calcul d'une contribution aux impacts en RE2020 (source : guide RE2020 du MTE et du CEREMA)	29
Figure 13 - Exemple d'ACV d'un projet de bureau de 1600m ² SU - Emissions totales dynamiques de GES (source : Vizcab Explo)	30
Figure 14 - Forçage radiatif résiduel, au cours du temps, et en watts par mètre carré, provenant d'une d'un million de tonnes de gaz émises à l'instant 0 (source : D. Hauglustaine, LSCE via jancovici.com)	31
Figure 15 - Durée de séjour approximative de GES dans l'atmosphère (source : jancovici.com)	32
Figure 16 - Coefficient de pondération des émissions de gaz à effet de serre pour l'ACV en RE2020 (source : guide RE2020 du MTE et du CEREMA)	32
Figure 17 - Etude d'une poutre en bois en ACV statique et dynamique (source : guide RE2020 du MTE et du CEREMA)	33
Figure 18 - Découpage par phases et modules du cycle de vie d'un bâtiment selon la norme NF EN15978	33
Figure 19 - Principe de l'ACV (source : Guide RE2020 du CEREMA et du MTE)	34
Figure 20 - Schéma de l'impact carbone d'un PCE en fonction du temps et de ses phases de vie	34
Figure 21 - Scénario de fin de vie pour la fiche collective "30452 - Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives...) (v.1.4)" de la base INIES, pour 1m ³ de matériau	35
Figure 22 - Calcul du module D pour la fiche collective "30452 - Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives...) (v.1.4)" de la base INIES, pour 1m ³ de matériau	35
Figure 23 - Extrait de l'ACV de la fiche collective "30452 - Élément porteur résineux en bois de France (poteaux, poutres, solives...) (v.1.4)" de la base INIES, pour 1m ³ de matériau	36
Figure 24 - Fonctions primaires et secondaires de produits étudiés (sources : Environmental Life Cycle Assessment, Olivier Jollier et al., page 26)	41
Figure 25 - Unités fonctionnelles et flots de références de produits étudiés (sources : Environmental Life Cycle Assessment, Olivier Jollier et al., page 28)	42
Figure 26 - Etude personnelle basée sur des hypothèses - Taux d'utilisation d'un bâtiment par rapport à sa capacité	44

Figure 27 - Etude personnelle basée sur des hypothèses - Impact carbone d'un bâtiment en fonction d'un occupant à temps plein.....	44
Figure 28 - Comment évaluer les impacts environnementaux d'une rénovation ? Périmètre d'évaluation de l'opération en rénovation (source : Hub des prescripteurs Bas Carbone, Atelier de rénovation n°1).....	45
Figure 29 - Tableau des impacts de référence par lot en BCCA Rénovation (source : Label BCCA Rénovation).....	48
Figure 30 - Résumé des hypothèses de modélisations des PCE selon différentes méthodes de modélisation (source : figure personnelle, fortement inspirée du travail du Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	52
Figure 31 - Interface de la partie "Choix de projet" de l'outil de comparaison des ACV en rénovation – Exemple (source : outil personnel).....	54
Figure 32 - Analyse de sensibilité du taux de conservation des PCE existants - Etude des poutres (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'un m3 de poutre CLT (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'un m3 de béton armé CEM I (PCE existants et déposés).....	55
Figure 33 - Analyse de sensibilité du taux de conservation des PCE existants - Etude des menuiseries extérieures (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'une menuiserie bois (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'une menuiserie aluminium (PCE existants et déposés).....	56
Figure 34 - Analyse de sensibilité de la durée de vie effectuée des composants - Etude des menuiseries extérieures (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'une menuiserie bois (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'une menuiserie aluminium (PCE existants et conservés).....	58
Figure 35 - Analyse de sensibilité de la durée de vie effectuée des composants - Etude des Systèmes de production d'ECS et chauffage (source : étude personnelle) – L'impact carbone de la PAC (PCE neufs et renouvelés) est bien plus important que celui de la chaudière (PCE existants et déposés) car la FDES de la chaudière ne prend pas en compte la phase d'exploitation alors que la FDES de la PAC si.....	58
Figure 36 - Analyse de sensibilité des composants neufs - Etude des émetteurs (source : étude personnelle).....	60
Figure 37 - Analyse de sensibilité des composants neufs - Etude des poutres (source : étude personnelle).....	60
Figure 38 - Analyse de sensibilité des composants existantes - Etude des menuiseries extérieures (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'une menuiserie bois (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'une menuiserie aluminium (PCE existants et conservés).....	61
Figure 39 - Analyse de sensibilité du taux de conservation des PCE existants - Etude des poutres (source : étude personnelle) – L'impact carbone d'un m3 de poutre CLT (PCE neufs et renouvelés) est plus faible que celui d'un m3 de béton armé CEM I (PCE existants et déposés), mais la fin de vie du CLT est beaucoup plus émettrice que celle du béton CEM I.....	61
Figure 40 - Exemple d'impact total d'un projet de rénovation selon différentes méthodes (source : étude personnelle).....	64
Figure 41 - Message clé du Hub des prescripteurs bas carbone pour décarboner le bâtiment tout au long du projet (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	65
Figure 42 - L'impact de la compacité sur le carbone (source : Hub des prescripteurs bas carbone).....	66
Figure 43 - L'impact du taux de vitrage sur le carbone (source : Hub des prescripteurs Bas Carbone).....	67
Figure 44 - L'impact de l'isolation des parois opaques sur le carbone (source : Hub de prescripteurs Bas Carbone).....	67
Figure 45 - Pavillon Circulaire par le collectif Encore Heureux, Paris, 2015 (source : http://encoreheureux.org/projets/pavillon-circulaire/).....	69
Figure 46 – Réhabilitation du Siège du Conseil Européen et du Conseil de l'UE par Samyn and Partners, Bruxelles, 2016 (source : https://samynandpartners.com/fr/portfolio/europa-siege-du-conseil-europeen-et-du-conseil-de-union-europeenne/).....	70
Figure 47 – Façade en brique de réemploi sur une résidence étudiante à Pierrefitte-sur-Seine, par BFV Architectes, 2023 (source : https://bfv.team/fr/projects/pierrefitte).....	70
Figure 48 - Différentes manières de réemployer, réutiliser (source : Artelia).....	71
Figure 49 - Découpage par phases et modules du cycle de vie d'un bâtiment selon la norme NF EN15978.....	72
Figure 50 - Principe de l'ACV (source : Guide RE2020 du CEREMA et du MTE).....	72
Figure 51 - Comparaison des impacts carbone de différents matériaux de structure, en kgCO ₂ eq/m ³ normalisé de matériau – chaque point représente l'impact carbone d'une FDES collective (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales).....	76

Figure 52 - Comparaison des impacts carbone de différents petits éléments de maçonnerie, en kgCO ₂ éq/m ² normalisé de matériau – chaque point représente l’impact carbone d’une FDES collective (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales).....	77
Figure 53 - Comparaison des impacts carbone de différents bardages (vêtures, vêtages, parement) en kgCO ₂ éq/m ² normalisé de matériau – chaque point représente l’impact carbone d’une FDES collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales) – l’enduit n’apparaît pas sur ce graphique mais est très peu carboné.....	78
Figure 54 - Comparaison des impacts carbone de différents isolants pour ITE ou isolation répartie en kgCO ₂ éq/m ² normalisé de matériau – chaque point représente l’impact carbone d’une FDES collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales).....	78
Figure 55 - Comparaison des impacts carbone de différents systèmes d’étanchéité en kgCO ₂ éq/m ² normalisé de matériau – chaque point représente l’impact carbone d’une FDES par défaut, collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales).....	79
Figure 56 - Comparaison des impacts carbone de différents éléments de couverture en kgCO ₂ éq/m ² normalisé de matériau – chaque point représente l’impact carbone d’une FDES par défaut, collective ou individuelle (source : base INIES via Vizcab explorateur de fiches environnementales).....	79
Figure 57 - Radiateur numérique par Qalway/Quarnot (source : https://qalway.com/fr/product/radiateur-numerique).....	80
Figure 58 - Equation coût carbone de variantes structurelles pour des bureaux de 23000m ² , 6 étages de superstructure et 3 étages d’infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	84
Figure 59 - Equation coût carbone de variantes de revêtements de façade pour des bureaux de 23000m ² , 6 étages de superstructure et 3 étages d’infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	84
Figure 60 - Equation coût carbone de variantes de cloisonnement pour des bureaux de 23000m ² , 6 étages de superstructure et 3 étages d’infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	85
Figure 61 - Comparaison de différents matériaux de cloisonnement, en m ² (source : Vizcab explorateur de fiches environnementales).....	85
Figure 62 - Equation coût carbone de variantes des lots technique pour des bureaux de 23000m ² , 6 étages de superstructure et 3 étages d’infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	86
Figure 63 - Efficacité coût carbone de variantes sur un projet de bureaux de 23000m ² , 6 étages de superstructure et 3 étages d’infrastructure (source : Hub des Prescripteurs Bas Carbone).....	86
Figure 64 – Façade/mur en ossature bois & plancher en ossature bois pouvant être mis en place pour des bâtiments d’habitation neufs de 4ème famille (source : CSTB).....	89
Figure 65 – Façade/mur en panneaux bois massif & plancher en panneaux bois massif pouvant être mis en place pour des bâtiments d’habitation neufs de 4ème famille (source : CSTB).....	89
Figure 66 - Quand les arts décoratifs n’étaient pas seulement décoratifs (source : Philippe Rahm via son Exposition Histoire naturelle de l’Architecture au Pavillon de l’Arsenal).....	93
Figure 67 - Résultats de simulation thermique dynamique (Pleiades), maison passive sur une semaine de canicule, comparaison de variantes à inertie thermique forte et faible (source : Bruno Peuportier, via le Lab Recherche Environnement).....	94
Figure 68 - Exemple de plancher intermédiaire conforme à des exigences acoustiques et thermiques (source : Catalogue Construction Bois via https://catalogue-bois-construction.fr/).....	96
Figure 69 - Réhabilitation d’un bâtiment ancien à Bologne, piazza Santo Stefano (source : Antoine Deltheil).....	100
Figure 70 - Restauration de Notre-Dame : Quelques 20 km d’arbres sont transformés en poutre à la hache de dégrossi et à la doloire (source : Jean-Philippe Defawe via Le Moniteur).....	101
Figure 71 - Exemple de rénovation énergétique ayant pour effet une perte patrimoniale et une altération architecturale (source : Carole Pezzoli via ANABF).....	102
Figure 72 - Guidance wheel, outil d’aide à la décision pour une réhabilitation responsable - Correction thermique des murs par l’extérieur (source : CREBA Guidance Wheel).....	103
Figure 73 - Le Tripode de l’INSEE à Malakoff (source : Stéphane Martin via chronique-architecture.com).....	105
Figure 74 - Réhabilitation du bâtiment de La Corniche à Firminy par Yann Olivares et Frédéric Busquet en 2009 (source : https://www.prixnational-boisconstruction.org/les-laureats/palmes-precédents/6391).....	106
Figure 75 - Les enjeux environnementaux : des défis interconnectés (source : HQE Alliance GBC).....	107
Figure 76 - Comparaison de cinq isolants, issu de différents matériaux (source : base INIES).....	108

Figure 77 - Comparaison de l'impact sur le réchauffement climatique de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)	108
Figure 78 - Demande mondiale en énergie primaire par type d'énergie en Mtep (source : Alliance HQE GBC)	109
Figure 79 - Comparaison de l'utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels) – La paille consomme de l'énergie renouvelable notamment lors de sa croissance où elle bénéficie de l'énergie solaire directe. Cette énergie est donc très peu carbonée.....	109
Figure 80 - Comparaison de l'utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelables de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels).....	110
Figure 81 - Comparaison de l'épuisement des ressources abiotiques – combustibles fossiles de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels)	111
Figure 82 - Comparaison de l'utilisation de matière secondaire de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels).....	111
Figure 83 - Comparaison de l'utilisation de combustibles secondaires de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé – le combustible est renouvelable pour la fibre de bois, et non renouvelable pour le polyuréthane - (source : base INIES via graphiques personnels).....	112
Figure 84 - Comparaison de kg de déchets non dangereux éliminés de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé – (source : base INIES via graphiques personnels).....	113
Figure 85 - Comparaison de l'impact sur l'utilisation nette d'eau douce de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels).....	113
Figure 86 - Comparaison de l'impact sur l'appauvrissement de la couche d'ozone de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels).....	114
Figure 87 - Comparaison de l'impact sur l'eutrophisation de cinq isolants – le total cycle de vie est utilisé - (source : base INIES via graphiques personnels).....	115
Figure 88 - La roue de l'économie circulaire (source : Alliance HQE GBC).....	117
Figure 89 - La méthode radar pondéré (source : Alliance HQE GBC).....	118