



**HAL**  
open science

# De la mise en place d'une dynamique bas-carbone au sein d'une entreprise à la création d'outils d'aide à la décision

William Bonguet

## ► To cite this version:

William Bonguet. De la mise en place d'une dynamique bas-carbone au sein d'une entreprise à la création d'outils d'aide à la décision. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2021. dumas-03601881

**HAL Id: dumas-03601881**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03601881v1>**

Submitted on 8 Mar 2022

**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



# Travail de fin d'études

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

---

Année 2020-2021

Voie d'approfondissement :  
Bâtiment

Soutenu le 15/09/2021

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Mohammed EL MANKIBI
- Tuteur : Pierrick LE MANACH
- Expert : Solène PEYRAGROSSE

Par

**William BONGUET**

**De la mise en place d'une dynamique bas-carbone au sein  
d'une entreprise à la création d'outils d'aide à la décision**



# Notice analytique

AUTEUR	
Nom	BONGUET
Prénom	William
ORGANISME D'ACCUEIL	
Nom de l'organisme et Localité	VOXOA Conseils, 25 Rue Joannes Carret, 69009 Lyon
Nom du Tuteur	Pierrick LE MANAC'H
ANALYSE DU TFE	
Titre (français)	De la mise en place d'une dynamique bas-carbone au sein d'une entreprise à la création d'outils d'aide à la décision
Titre (anglais)	From the establishment of a low-carbon dynamics in a company to the creation of a decision aid tool
Résumé (français)	<p>Du fait d'un changement profond et imminent de la réglementation du monde de la construction, les acteurs de ce secteur doivent se préparer aux enjeux décrits dans ce nouveau paradigme, à savoir la prise en compte de l'empreinte environnementale du secteur, en particulier les impacts carbone des projets immobiliers de construction et de réhabilitation.</p> <p>Cette révision de fonctionnement et cette préparation doivent se faire sous le rythme d'une dynamique interne à l'entreprise. En prenant la position d'assistantat à maîtrise d'ouvrage, la dynamique bas-carbone doit tout d'abord s'installer au sein de l'équipe et des réflexions de l'entreprise pour ensuite cristalliser ces nouvelles connaissances dans des outils d'aide à la décision permettant d'aiguiller la maîtrise d'ouvrage vers des choix bas-carbone et pérennes.</p> <p>C'est ce que réalise VOXOA Conseils via la montée en compétences de ses collaborateurs dans le domaine bas-carbone et notamment les leviers bas-carbone que sont les matériaux biosourcés et géosourcés, ou encore l'évolution de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). De plus, elle confirme cette montée en compétences via la création de deux outils d'aide à la décision : un outil de chiffrage carbone et un outil de production graphique carbone.</p> <p>Une opération immobilière de grande ampleur de VOXOA dont la maîtrise d'ouvrage est Est Métropole Habitat sert alors de test et de cobaye aux outils créés.</p>

Résumé (anglais)	<p>Due to a profound and imminent changes in the regulations of the construction sector, the actors of this sector must prepare themselves for the challenges described in this new paradigm, namely the consideration of the environmental footprint of the sector, in particular the carbon impacts of construction and rehabilitation of real estate projects.</p> <p>This revision of the operation and this preparation must be done under the rhythm of an internal dynamic in the company. By taking the position of contracting authority support, the low-carbon dynamic must first be installed within the team and the company's reflections, and then crystallize this new knowledge into decision-making tools that will guide the contracting owner towards sustainable low-carbon choices.</p> <p>This is what VOXOA Conseils is doing by increasing the skills of its employees in the low-carbon field and in the low-carbon levers such as biosourced and geosourced materials, or the evolution of Life Cycle Assessment (LCA). In addition, it confirms this increase in skills through the creation of two decision-making tools: a carbon calculation tool and a carbon graph production tool.</p> <p>A large-scale real estate operation by VOXOA, whose contracting authority is Est Métropole Habitat, was used as a test and guinea pig for the tools created.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Stratégie, bas-carbone, matériaux, biosourcé, outil		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Strategy, low-carbon, materials, bio-based, tool		
Termes géo-graphique (français)	France, Région Auvergne – Rhône – Alpes, Lyon.		
<b>COLLATION</b>			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	72	12	19

## 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 souhaite tout d'abord remercier VOXOA Conseils pour leur accueil au sein de leur structure dans le cadre de mon stage de fin d'études. Je souhaite remercier mes collaborateurs pendant cette période de leur savoir-faire et savoir-être technique, professionnel et humain. J'ai pu découvrir la sphère privée du monde professionnel du bâtiment, et en particulier l'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage par un acteur privé. Je remercie VOXOA pour leur confiance envers moi lors de l'acquisition de mes missions de stage.

Je souhaite particulièrement remercier Pierrick LE MANAC'H pour avoir été mon Tuteur Entreprise et m'avoir fourni un réel support et suivi dès que nécessaire. Sa réactivité et sa disponibilité ont été des éléments moteurs à la production des missions de stage qui m'étaient inculquées. Son sens professionnel m'a permis d'avoir un point de vue nouveau sur les enjeux de projets et sur les enjeux actuels dans le domaine du bâtiment.

Je souhaite remercier Richard CANTIN qui a pu résoudre ma situation et celles d'un certain nombre de collègues étudiants en amont des stages de fin d'étude, suite au départ à la retraite de Pierre MICHEL en prenant le poste de chef de VA Bâtiment en intérim.

Je souhaite remercier Mohammed EL MANKIBI pour présider mon jury de soutenance, et Solène PEYRAGROSSE qui a pu se rendre disponible pour devenir mon experte de jury.

Enfin, j'aimerais remercier tout mon cercle de proches qui ont pu m'accompagner lors de ce stage et lors de la production de ce mémoire.

# Sommaire

---

Notice analytique .....	2
Déclaration de travail personnel.....	4
Remerciements.....	5
Sommaire .....	6
Liste des illustrations.....	8
Glossaire.....	9
Introduction .....	11
Contexte.....	11
Présentation de la structure d'accueil .....	12
Objectifs .....	12
1. Descriptif des dynamiques .....	13
1.1 Ensemble du processus d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage .....	13
1.2 Stratégie bas carbone .....	17
1.2.1 Evolution du contexte réglementaire .....	17
1.2.2 La Stratégie Nationale Bas-Carbone .....	20
1.2.3 Leviers bas-carbone.....	22
2. Mise en relation de ces deux dynamiques .....	27
2.1 Outil de bilan carbone en phase de programmation.....	27
2.1.1 Etat de l'art de la donnée carbone .....	27
2.1.2 Database utilisée .....	28
2.1.3 Constats de l'état de l'art .....	31
2.1.4 Méthodologie de l'outil de chiffrage carbone .....	31
2.2 Méthodologie de communication .....	37
2.2.1 Faire monter en compétence une équipe.....	37
2.2.2 Production d'éléments graphiques pour la Maîtrise d'Ouvrage .....	37
3. Cas d'application à Saint Priest : une réhabilitation durable ? .....	47
3.1 Présentation de l'opération.....	47
3.1.1 Contexte du projet .....	47
3.1.2 Objectifs d'Est Métropole Habitat.....	47
3.2 Présentation du périmètre .....	48
3.2.1 Périmètre bâtementaire.....	48
3.3 Hypothèses.....	50
3.3.1 Définition des modèles .....	51
3.3.2 Définition des scénarios.....	54
3.4 Analyse des résultats .....	54
Mise en perspective, Conclusion, Ouverture .....	56

Bibliographie ..... 58  
Annexes..... 61



# Liste des illustrations

---

Figure 1. Schéma général temporel de l'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage [4] .....	16
Figure 2. Evolution des seuils des différentes réglementations .....	18
Figure 3. Evolution des EGES en France à partir de 1990, tendances pour 2050 et décomposition des budgets carbone .....	20
Figure 4. Evolution et tendance pour 2050 des EGES pour le secteur du bâtiment (logements et tertiaire) .....	21
Figure 5. Carte des acteurs du Label Bas-Carbone.....	24
Figure 6. Cycle de vie d'un élément, exemple pour un bâtiment (process et flux).....	25
Figure 7. Evolution temporelle des coefficients de pondération de l'ACV dynamique (source de données : ADEME).....	26
Figure 8. Liste des acteurs responsables de la base de données INIES.....	29
Figure 9. Schéma de gouvernance et de vérification de la base de données INIES.....	30
Figure 10. Schéma de vérification d'un outil configurateur de FDES, Programme INIES.....	30
Figure 11. Etapes et modules de la vie d'un produit défini à l'aide d'une FDES.....	32
Figure 12. Les principales sollicitations de l'enveloppe extérieure.....	39
Figure 13. Extrait de la traduction de scénarios par l'outil .....	40
Figure 14. Descriptif des impacts carbone de 7 scénarii de solution technique de façade avec totaux des impacts carbone .....	41
Figure 15. Descriptif des impacts carbone de 7 scénarii de solution technique de façade, pour 1m <sup>2</sup> (histogrammes de gauche foncés), muni de leur pourcentage (histogrammes de droite clairs).....	42
Figure 16. Descriptif des impacts carbone de 7 scénarii de solution technique de façade (histogrammes de gauche foncés), muni de leur pourcentage (histogrammes de droite clairs) .....	43
Figure 17. Diagramme de flux d'impact carbone d'1 m <sup>2</sup> de solution technique en Mur à Ossature Bois (MOB), laine de bois et bardage en bois. ....	44
Figure 18. Diagramme de flux de gains carbone d'1 m <sup>2</sup> de solution technique en MOB, laine de bois et bardage en bois. ....	45
Figure 19. Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m <sup>2</sup> de solution technique en MOB, laine de bois et bardage en bois.....	46
Figure 20. Plan Guide du quartier Bel Air, Saint-Priest .....	48
Figure 21. Plan par adresse, secteur et typologie .....	49
Figure 22. Vue satellite des 28 bâtiments de l'opération .....	49
Figure 23. Plan en coupe d'une solution technique proposée en MOB, pour l'opération du Mas du Taureau .....	50
Figure 24. Plan en coupe du Modèle 1 proposé en MOB .....	51
Figure 25. Plan en coupe du Modèle 2 proposé en MOB .....	51
Figure 26. Plan en coupe du Modèle 3 proposé en ITE.....	52
Figure 27. Plan en coupe du Modèle 4 proposé en ITE.....	52
Figure 28. Plan en coupe d'une solution technique proposée en MOB, pour l'opération du Mas du Taureau .....	53
Figure 29. Impact carbone des modèles au m <sup>2</sup> .....	53
Figure 30. Total des impacts carbone des différents scénarios, rapporté à la surface de façade concernée .....	55
Figure 31. Impacts instantané, cumulatif et relatif à 1 kgCO <sub>2</sub> d'une émission d'1 kg CO <sub>2</sub> pendant 50 ans .....	57

# Glossaire

---

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

EGES : Emission de Gaz à Effet de Serre

AMO : Assistant/Assistance à Maîtrise d'Ouvrage

MOA : Maîtrise/Maître d'ouvrage

DP : Directeur de Projet

CdP : Chef de Projet

DSA : Dossier de Suivi d'Affaires

PLU : Plan Local d'Urbanisme

PLH : Plan Local de l'Habitat

ADB : Analyse Des Besoins

EF : Etude de Faisabilité

PTD : Programme Technique Détaillé

MOE : Maîtrise d'œuvre

CSPS : Coordinateur de Sécurité et de Protection de la Santé

APS : Avant-Projet Sommaire

APD : Avant-Projet Défini

PRO : Projet de Réalisation de l'Ouvrage

DCE : Dossier de Consultation des Entreprises

AE : Acte d'Engagement

CCTP : Cahiers des Charges Techniques Particulières

ACT : Assistance pour la passation du Contrat de Travaux

SNBC : Stratégie Nationale Bas-Carbone

LTECV : Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte

PPE : Programmation Pluriannuelle de l'Energie

PNACC : Plan National d'Adaptation au Changement Climatique

EP : Energie Primaire

DPE : Diagnostic de Performance Energétique

HPE : Haute Performance Energétique

BBC : Bâtiment Basse Consommation

EF : Energie Finale

ELAN : Loi portant sur l'Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique

GES : Gaz à Effet de Serre

ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur

RFCP : Réseau Français de Construction Paille

RPCP 2018 : Règles Professionnelles de Construction Paille 2018

C2P : Commission Prévention Produit

DTU : Document Technique Unifié

HQE : Haute Qualité Environnementale

ACV : Analyse de Cycle de Vie

DVR : Durée de Vie de Référence

FDES : Fiches de Données Environnementales et Sanitaires

CODIFAB : Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois

FCBA : Institut Forêt Construction Bois Ameublement

HQE-GBC : Haute Qualité Environnementale – Green Building Council

AIMCC : Association française des industries des produits de construction

PEP : Profils Environnementaux des Produits

MDEGD : Modules de Données Environnementales Génériques par Défaut

UF : Unité Fonctionnelle

MOB : Mur à Ossature Bois

# Introduction

---

## Contexte

En 2018, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publie un nouveau rapport traitant des conséquences du réchauffement climatique et comparant celles causées par une hausse des températures de 1.5°C et celles d'une hausse de 2°C. Ce rapport décrit ces scénarios en prenant en compte la même forme : ils placent l'Homme et son impact (sachant que le monde d'aujourd'hui est passé à l'ère de l'Anthropocène, l'ère de l'humain, dont les impacts sont de plus en plus irréversibles [1]) comme premier acteur dans la production d'Emissions de gaz à Effets de Serre (EGES) et dans la consommation de ressources naturelles. Il appuie le fait d'installer urgemment des freins sur les impacts environnementaux d'origine humaine, notamment sur les EGES mais aussi sur d'autres facteurs environnementaux. [2]

Le secteur du bâtiment, particulièrement en construction et réhabilitation, est l'un des plus impactant quant aux EGES, donc quant à la pollution atmosphérique et au changement climatique. Ces dernières décennies, une prise de conscience collective des enjeux de la pérennité et de la sobriété du monde de la construction par la population, les acteurs publics et les acteurs professionnels concernés a vu le jour et a pris en ampleur. Cette prise de conscience a pu se traduire par une évolution de la définition de ce qu'est un bâtiment et des leviers qui l'accompagnent, notamment ses performances énergétiques et environnementales.

Le secteur du bâtiment compte pour 43% des consommations énergétiques et produit 23% des EGES annuellement en France. Il est alors nécessaire de définir les enjeux énergétiques et environnementaux permettant un accès à la sobriété.

Ces enjeux ont alors un triple objectif :

- ❖ Baisser les consommations d'énergie des bâtiments
- ❖ Réduire les coûts liés aux factures d'énergie
- ❖ Réduire l'empreinte carbone des bâtiments

Ces objectifs traduisent alors une idée commune : améliorer le niveau de performance du parc bâtiminaire français actuel et à venir, dans le cadre de réhabilitations et de constructions neuves durables. De plus, ils sont moteurs quant à l'évolution des réglementations énergétique, environnementale et concernant les consommations d'énergie dans les bâtiments (équipements). A termes, cette vision réglementation permet une généralisation de la sobriété carbone dans le domaine du bâtiment. D'ici à 2050, les objectifs de pérennité et de sobriété concernent tout type de bâtiment, immeubles collectifs, bureaux tertiaires ou encore des maisons individuelles et tout type d'opération, construction neuve, réhabilitation de l'existant ou l'exploitation du bâtiment. [3]

C'est alors dans ce contexte que le monde de la construction s'avère être un domaine dans lequel la charge de travail pour arriver à une situation pérenne est conséquente.

Dans un contexte réglementaire en phase de transition, les acteurs de la construction doivent être capables de répondre aux enjeux futurs. C'est pourquoi on peut apercevoir des dynamiques bas-carbone dans ce domaine ainsi qu'une prise de conscience de la validité à avoir pour respecter la future réglementation. C'est de ces éléments que traite ce mémoire, trace écrite d'un témoignage de mise en place d'une dynamique bas-carbone au sein d'une entreprise de conseils.

## **Présentation de la structure d'accueil**

VOXOA Conseils a une activité de prestations intellectuelles dans le domaine du bâtiment localisée à Lyon et Paris. (Siège social : 25 rue Joannès Carret – 69009 LYON)

VOXOA est constituée d'une équipe pluridisciplinaire qui partage compétences, grande pratique du terrain et culture de l'engagement. Leur vision globale et novatrice du service aux professionnels de la construction et de la rénovation s'étend sur les grands domaines suivants :

- ❖ Assistance à Maîtrise d'Ouvrage / Conduite d'Opération / Maîtrise d'Ouvrage Déléguée
- ❖ Management de projet : aspects économiques, techniques, administratifs et juridiques
- ❖ Programmation architecturale, Stratégie Immobilière et d'Aménagement
- ❖ Audits techniques, économiques et Exploitation / Maintenance de Patrimoine
- ❖ Développement Durable – Analyses en coût global
- ❖ Expertise, Conseil, Formation

Leurs missions les amènent donc à intervenir dans l'ensemble des secteurs liés aux opérations immobilières. Conscient de l'impact du secteur de la construction sur l'environnement, VOXOA souhaite développer l'accompagnement de ses clients afin de réduire l'empreinte carbone de leurs opérations. En effet, en lien avec le besoin grandissant des professionnels de la construction d'aide à la définition de leur empreinte environnementale, VOXOA Conseils doit appréhender ces enjeux et pouvoir proposer à ses clients un accompagnement dans ces nouveaux domaines pour cette entreprise. Dès lors, c'est de cette dynamique en particulier que naquit le stage de fin d'étude.

## **Objectifs**

Les objectifs de VOXOA dans cette dynamique sont les suivants :

- ❖ Développer des outils et méthodologies bas-carbone aux différentes phases du processus AMO des opérations immobilières :
  - Développer une approche simplifiée du bilan carbone au stade de la programmation
  - Etablir un outil d'aide à la décision à destination de l'équipe afin d'intégrer la stratégie bas carbone sur l'ensemble des étapes de l'acte de construire
- ❖ Développer des éléments graphiques permettant de sensibiliser l'équipe et les acteurs aux enjeux de la transition énergétique

# 1. Descriptif des dynamiques

## 1.1 Ensemble du processus d'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage

L'assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO) a pour mission d'accompagner le maître d'ouvrage (MOA) sur le pilotage et l'exploitation de projets de construction ou de réhabilitation. Elle sert de conseils, d'assistance pure et de force de proposition technique, sachant que c'est le maître d'ouvrage qui est à la charge des décisions du projet. A termes, lors d'une opération, elle peut servir d'interface entre la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre.

Sur chaque opération, VOXOA va installer deux de ses collaborateurs en binôme d'un Directeur de Projet (DP) et un Chef de Projet (CdP), ce dernier étant l'équivalent d'un chargé d'études. Il existe plusieurs étapes dans le déroulement d'une opération immobilière :

### ❖ Démarrage de l'opération :

Dès le démarrage de l'opération, l'AMO réalise une notification du marché, c'est-à-dire qu'il envoie au titulaire (soit souvent à la maîtrise d'ouvrage), qui demande un mandataire, étant VOXOA.

Ensuite, elle va créer le Dossier de Suivi d'Affaires (DSA), permettant la trace de toutes les évolutions et échanges lors de l'opération. Elle crée de la même manière une interface opérationnelle et juridique qui elle traduit le contexte d'assurabilité et le montage de l'opération.

### ❖ Etudes préalables :

Lors de cette étape, l'AMO installe des réunions avec la MOA, comprenant une trace écrite via comptes-rendus. Elle collecte les informations qui lui sont disponibles à ce stade en réalisant des visites de site, en récupérant les documents déjà existants pour analyse (archives, ancienne réhabilitation) ainsi que la documentation réglementaire associée comme les Plan Local d'Urbanisme (PLU) ou Plan Local de l'Habitat (PLH). Toutes ces données lui permettront de réaliser un diagnostic fonctionnel, architectural, et technique de l'existant. De ce diagnostic découlera un cahier des charges qui inscrira le montage de l'opération dans le DSA.

### ❖ Programmation :

C'est à cette étape qu'est conçu l'Analyse Des Besoins (ADB) de la MOA (besoins et contraintes) et des intervenants de l'opération via des rencontres et des échanges. De cette ADB vient une proposition de plusieurs scénarios répondant aux besoins techniques de l'opération, ces scénarios ayant été produits via une Etude de Faisabilité (EF) et la création d'un préprogramme de l'opération. Suivant les décisions de la MOA sur ces scénarios, l'AMO construit un premier budget à alloué et un premier planning à l'opération. Enfin, via la validation de la MOA, l'AMO conçoit le Programme Technique Détaillé (PTD) de l'opération.

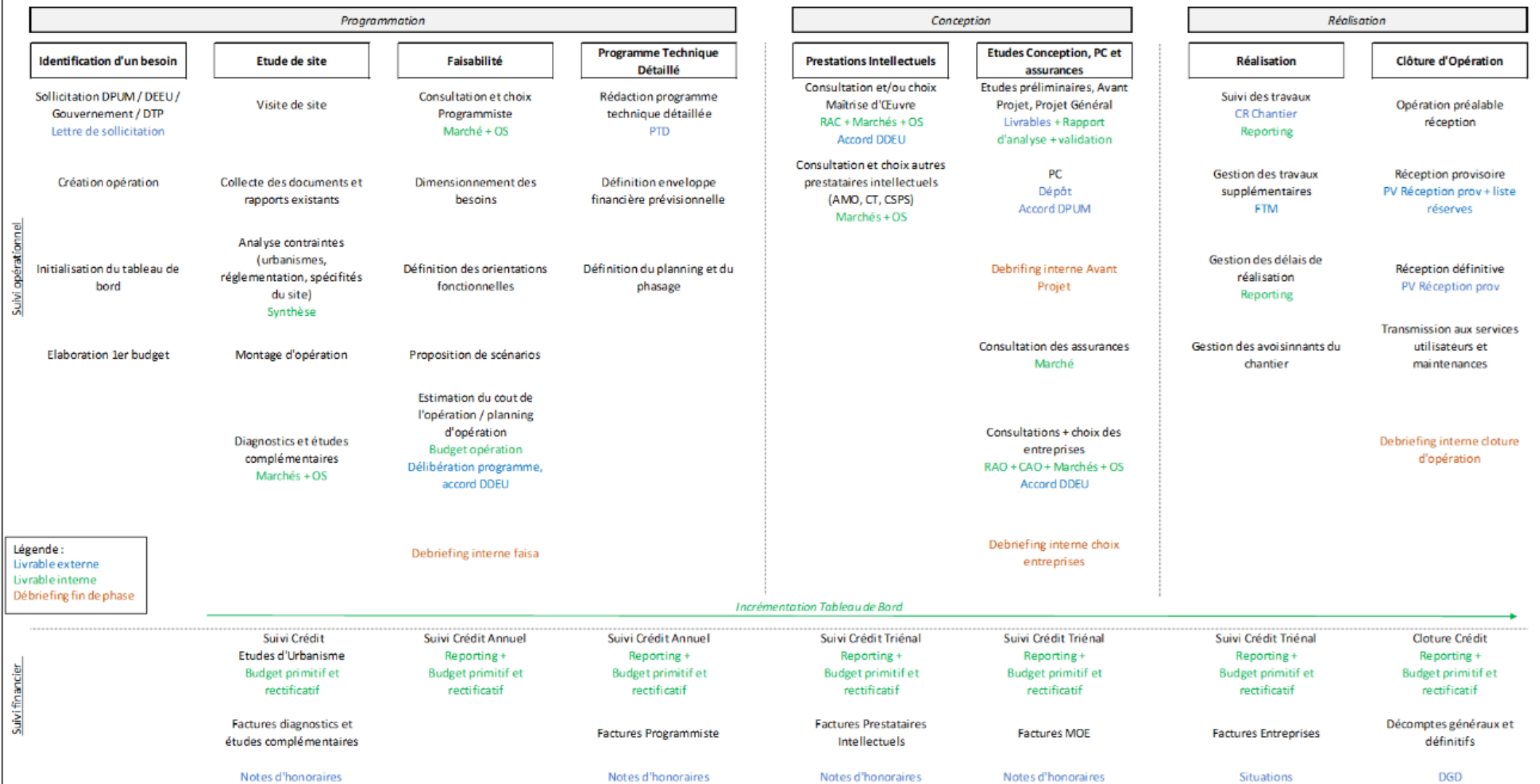
- ❖ **Choix des prestataires intellectuels** : via des Réponses à Appels d'Offre (RAO), l'AMO crée un système de notation défini en amont permettant de classer les différents candidats postulant en Maîtrise d'œuvre (MOE) ou en Coordinateur de Sécurité et de Protection de la Santé (CSPS). En même temps, les premières démarches pour le permis de construire et les assurances se mettent en place.
  
- ❖ **Etudes Conception** :
  - Phase Esquisse : à cette phase, l'AMO propose des incarnations techniques des scénarios proposés en étape de programmation qui traduisent les éléments du programme. Cette phase permet aussi de préciser la temporalité, soit les délais de réalisation de ces scénarios. L'AMO examine la compatibilité avec l'enveloppe financière prévisionnelle retenue par la MOA. Enfin, ces précisions de scénarios entraînent une vérification de la faisabilité de l'opération au regard des différentes contraintes du programme et du site.
  - Phase Avant-Projet Sommaire (APS) : l'AMO propose des solutions d'ensemble qui sont des caractérisations techniques traduisant les éléments majeurs du programme fonctionnel. Elle présente les dispositions générales techniques envisagées et indique les durées prévisionnelles de réalisation. Enfin, elle établit une estimation provisoire du coût prévisionnel des travaux des différentes solutions étudiées.
  - Phase Avant-Projet Défini (APD) : cette phase permet à l'AMO d'arrêter en plans, en coupe et en façades les dimensions de l'ouvrage ainsi que son aspect. Elle permet d'arrêter de la même manière définitivement le programme et certains choix d'équipements en fonction des coûts d'investissements, d'exploitation et de maintenance. Elle définit précisément les matériaux utilisés. L'AMO établit l'estimation définitive du coût prévisionnel des travaux, décomposés en lots séparés. Cette phase permet l'établissement du forfait de rémunération dans les conditions prévues par le contrat de maîtrise d'œuvre.
  - Phase de Projet de Réalisation de l'Ouvrage (PRO) : à cette phase, l'AMO précise par des plans, coupes, et élévations, les formes des différents éléments de la construction, la nature et les caractéristiques des matériaux et les conditions de leur mise en œuvre. Elle détermine l'implantation, et l'encombrement de tous les éléments de structure et de tous les équipements techniques. Elle précise les tracés des alimentations et évacuations de tous les fluides. Elle arrête le coût prévisionnel de la réalisation de l'ouvrage et estime les coûts de son exploitation. Elle détermine le délai global de réalisation de l'ouvrage.
  - L'AMO crée le Dossier de Consultation des Entreprises (DCE) qui permet de fixer les Actes d'Engagement (AE) et les Cahiers des Charges Techniques Particulières (CCTP)

- Enfin, l'AMO participe à l'Assistance pour la passation du Contrat de Travaux (ACT) qui permet au maître d'œuvre d'assister la MOA dans le cadre de ses missions de réalisation de travaux.
- ❖ **Réalisation** : l'AMO réalise un suivi des travaux et produit des rapports de suivi pour la MOA
- ❖ **Clôture de l'Opération** : l'AMO réalise la vérification des réserves de construction sur certains points techniques du projet.

Ainsi, la dynamique d'assistance à maîtrise d'ouvrage se veut être une dynamique de conseils et de support technique pour la maîtrise d'ouvrage. Pour aller plus loin, l'AMO comporte des savoir-faire et des savoir-être unique à son rôle dans l'acte de construire. Une nouvelle dynamique peut s'inscrire dans cette définition, la dynamique de montée en compétences la maîtrise d'ouvrage. En effet, par les études poussées par l'AMO et ses échanges avec la MOA, un besoin de vulgarisation et de transmission de connaissances voit le jour, afin de créer des acteurs de l'acte de construire comportant de nouvelles et multiples conséquences. En page suivante se trouve un schéma exhaustif précisant le rythme d'AMO lors d'une opération immobilière.



Déroulement d'une opération immobilière (Maîtrise d'Ouvrage directe)



Suivi opérationnel

Suivi financier

**Légende :**  
*Livrable externe*  
*Livrable interne*  
*Debriefing fin de phase*

Figure 1. Schéma général temporel de l'Assistance à Maîtrise d'Ouvrage [4]

## 1.2 Stratégie bas carbone

### 1.2.1 Evolution du contexte réglementaire

- ❖ **Les réglementations thermiques :** (1974,1982,1988, 2000, 2005)

Ces réglementations thermiques installent la prise de conscience gouvernementale à éviter la surconsommation énergétique (commençant en 1974 notamment en réponse au choc pétrolier de 1973, puis celui de 1979). Les évolutions techniques des équipements (chauffage électrique) et le besoin de renouveler les seuils standard de dépense énergétique ont créé la mise à jour des réglementations thermiques. La considération des apports solaires voit le jour. Ces réglementations se mettent à considérer la réhabilitation de l'existant et non plus uniquement la construction neuve. Cependant, le seul critère de référence est l'Energie Primaire (EP). Chaque mise à jour de la réglementation thermique a baissé les seuils de consommations énergétiques des constructions neuves et existantes. Pour la RT2005, le seuil moyen pour les logements est fixé à 150 kWhEP/m<sup>2</sup>/an. De plus, des labels traduisant une bonne performance énergétique du bâtiment (HPE : Haute Performance Energétique, BBC : Bâtiment Basse Consommation) permettent d'appuyer cette nouvelle réglementation.

- ❖ 2006 : **les Diagnostics de Performance Energétique (DPE)** sont créés et sont à fournir pour toute vente et location de biens immobiliers neufs. Est considérée l'EP uniquement.
- ❖ 2008 : les **paquets Energie-Climat** permettent la définition des objectifs quant à l'empreinte environnementale et la consommation énergétique à l'échelle européenne. Les objectifs 20 - 20 - 20 y sont précisés (20% d'énergies renouvelables dans le mix énergétique, -20% d'émissions de CO<sub>2</sub>, +20% d'efficacité énergétique). Cette étape se met à considérer en seuil et grandeur les taux d'EGES et l'Energie Finale (EF).

- ❖ 2009-2010 : **Lois Grenelle I et II**. Ces lois permettent la planification de la RT2012 et de ses évolutions réglementaires sur la construction neuve, et du dispositif Eco-Energie Tertiaire pour l'existant, en prenant en compte les EGES. Elles prennent en compte le plan de rénovation des logements, lancent des travaux d'étude sur les éco-matériaux, sur la gestion des déchets du BTP et aussi sur la qualité de l'air, à l'échelle nationale.
- ❖ **RT2012** : C'est la réglementation thermique actuelle pour la construction neuve. Elle reconsidère le seuil de besoins énergétiques des logements à 50 kWhEP/m<sup>2</sup>/an.

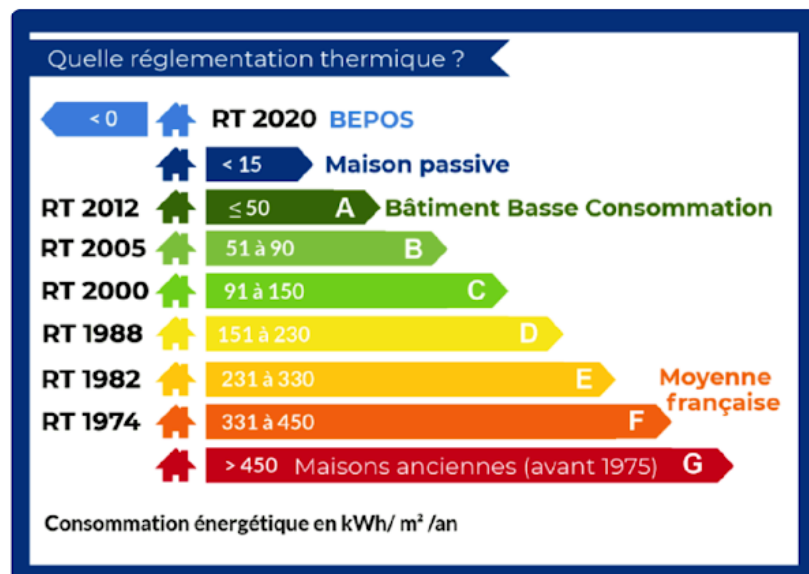
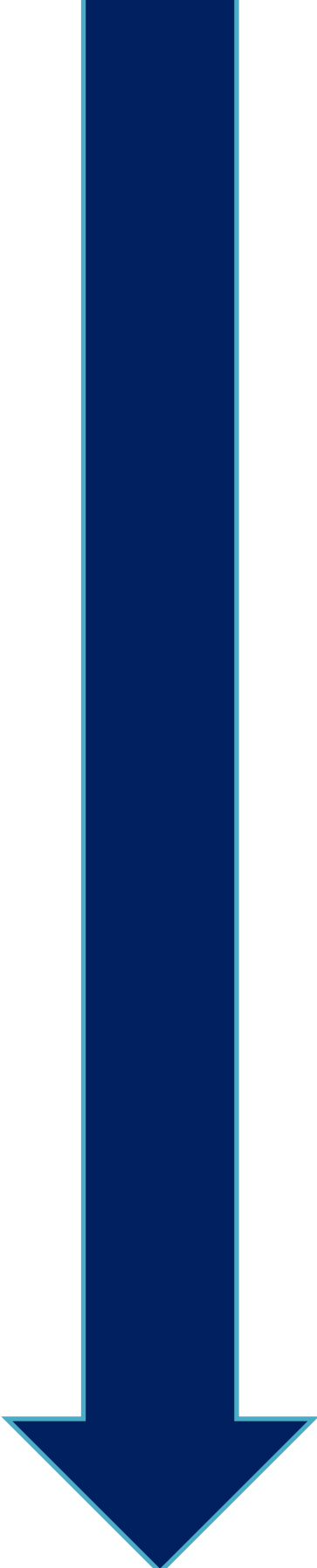


Figure 2. Evolution des seuils des différentes réglementations

- ❖ 2015 : **Loi de Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV)**  
 Cette loi permet de définir deux grands ensembles réglementaires que sont la **Stratégie Nationale Bas-Carbone** (SNBC) et la **Programmation Pluriannuelle de l'Énergie** (PPE). La SNBC planifie la décarbonation d'un grand nombre de domaines (construction, transport) avec pour objectif la neutralité carbone pour 2050. Elle crée des budgets carbone pour chaque domaine, sur des phases de 5 ans (zoom sur la SNBC partie suivante). Elle ne traite que des EGES. La PPE permet quant à elle de planifier les actions et objectifs traitant de la production et de la consommation d'énergie en général, avec de la même manière l'allocation de budgets sectoriels sur 5 ans. La PPE traite des EP et EF.



❖ 2018 : **Loi portant sur l'Evolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique (ELAN)**, et notamment un de ses articles

- Article 175 : futur dispositif éco-énergie tertiaire qui traduit une obligation de réduction drastique des consommations énergétiques des locaux tertiaires (-40% en 2030, -50% en 2040 et -60% en 2050), en EF. [5]

❖ 2020 : **RE2020**

Elle fixe les dynamiques à adopter sur le court terme afin d'axer en globalité les réglementations futures vers la neutralité carbone pour 2050. Pour cela, différents objectifs y sont définis :

- Diminuer l'impact climatique de la construction neuve en déterminant sur l'intégralité du cycle de vie les EGES et émissions de déchets. Le phasage carbone de cette réglementation (via une nouvelle méthode de calcul, définie après) se veut préférentielle pour des matériaux bas-carbone.
- Poursuivre les travaux réglementaires sur la diminution des seuils de consommation énergétique et d'augmentation d'efficacité énergétique. En particulier, elle prendra en compte la rentabilité de l'isolation et des équipements pour obtenir un environnement sain et confortable pour l'habitant.
- Prévenir les conséquences du réchauffement climatique déjà en marche pour assurer un confort thermique d'été soutenable pour l'habitant, en répondant à des contraintes climatiques futures les plus défavorables (canicules fréquentes). [6]

## 1.2.2 La Stratégie Nationale Bas-Carbone

La Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC) est issue de la Loi de Transition Energétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015. Elle constitue et synthétise l'un des deux volets du plan d'action d'atténuation du changement climatique de la France, soit le Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC).

Elle fut mise à jour en 2017 afin d'activer plus rapidement les actions définies par les accords de Paris, fixant une neutralité carbone pour 2050. On entend par neutralité carbone une production si faible de Gaz à Effet de Serre (GES) qu'elle peut être absorbée par les phénomènes biogéniques des milieux naturels (anthropisés ou non) et les phénomènes chimiques des procédés industriels. Dès lors, cette neutralité impose une réduction massive des GES pour 2050. C'est pourquoi il a été défini des budgets carbone, limite quantitative à ne pas atteindre sur le territoire national, et ce par échelon de 5 ans.

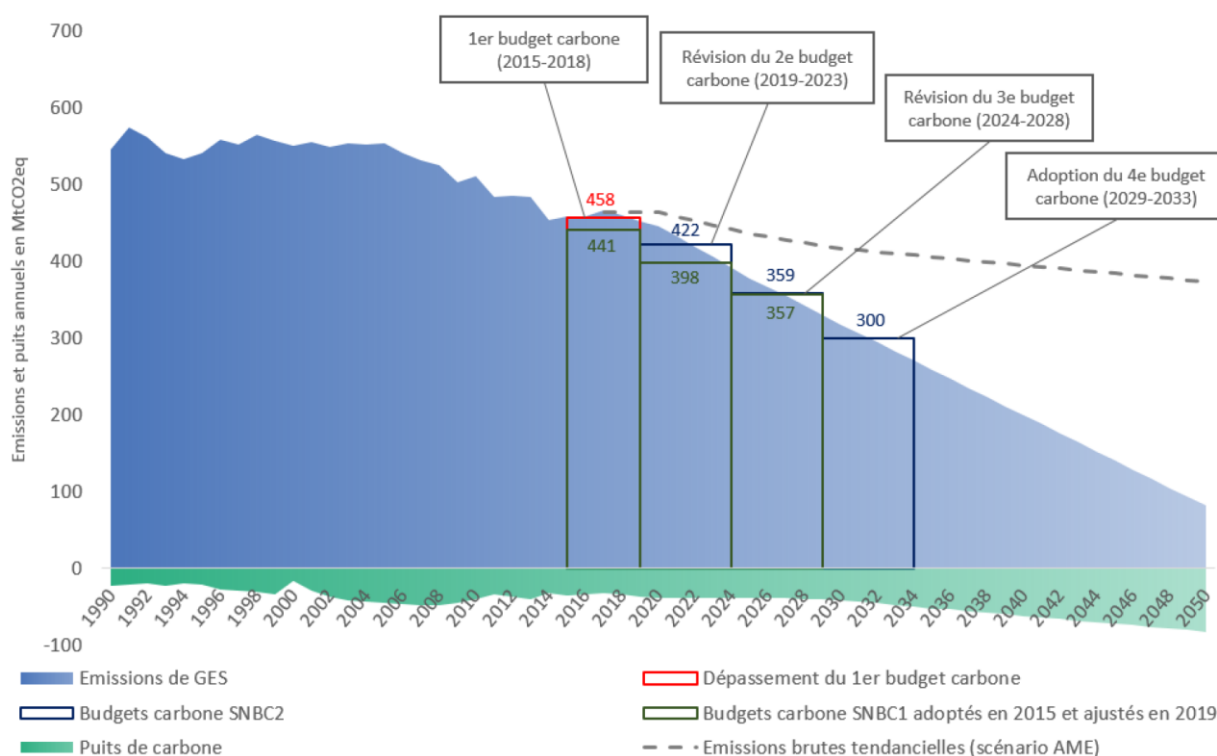


Figure 3. Evolution des EGES en France à partir de 1990, tendances pour 2050 et décomposition des budgets carbone

Cette stratégie a installé dans sa méthodologie un scénario de référence, illustrant l'impact des politiques publiques en phase avec les accords de Paris permettant le respect des objectifs climatiques fixés. A l'horizon 2050, la France aura atteint un niveau d'EGES de **80 MtCO<sub>2</sub>eq/an**. Cependant, les leviers d'actions dans les domaines de l'énergie ou du bâtiment seront très restreints, alors la neutralité carbone implique une part très importante de puits de carbone.

En particulier, la neutralité carbone est accessible seulement :

- ❖ En décarbonant l'intégralité des systèmes de production d'énergie en utilisant des sources d'énergie décarbonées (biomasse, géothermie etc) et de l'électricité décarbonée.
- ❖ En réduisant fortement les consommations d'énergies dans tous les secteurs, soit en réduisant fortement leur besoin en énergie en révisant en profondeur l'efficacité énergétique et en développant la sobriété énergétique.
- ❖ En diminuant fortement les EGES non liées à la consommation d'énergie.
- ❖ En multipliant le nombre de puits de carbone aujourd'hui présents, permettant d'absorber les émissions restantes et de développer la production de biomasse.

Dès lors, il est intéressant de zoomer sur le secteur de la construction afin d'observer ce qu'est qualifié de bâtiment bas-carbone dans les textes réglementaires.

Le secteur de la construction, en particulier du résidentiel et du tertiaire, est le plus consommateur d'énergie et le second en termes d'EGES. La SNBC vise alors comme objectif une réduction de 49% en 2030 par rapport à 2015 et décarbonation totale de l'énergie consommée par ce secteur d'ici 2050. Cela implique alors une réduction annuelle moyenne des EGES de **2.5 MtCO<sub>2</sub>eq/an entre 2015 et 2050**. Il est à prendre en compte qu'en moyenne annuelle, la consommation d'énergie a stagné voire est restée constante entre 1990 et 2015, avec une réduction de **2.1 MtCO<sub>2</sub>eq/an entre 2005 et 2015**.

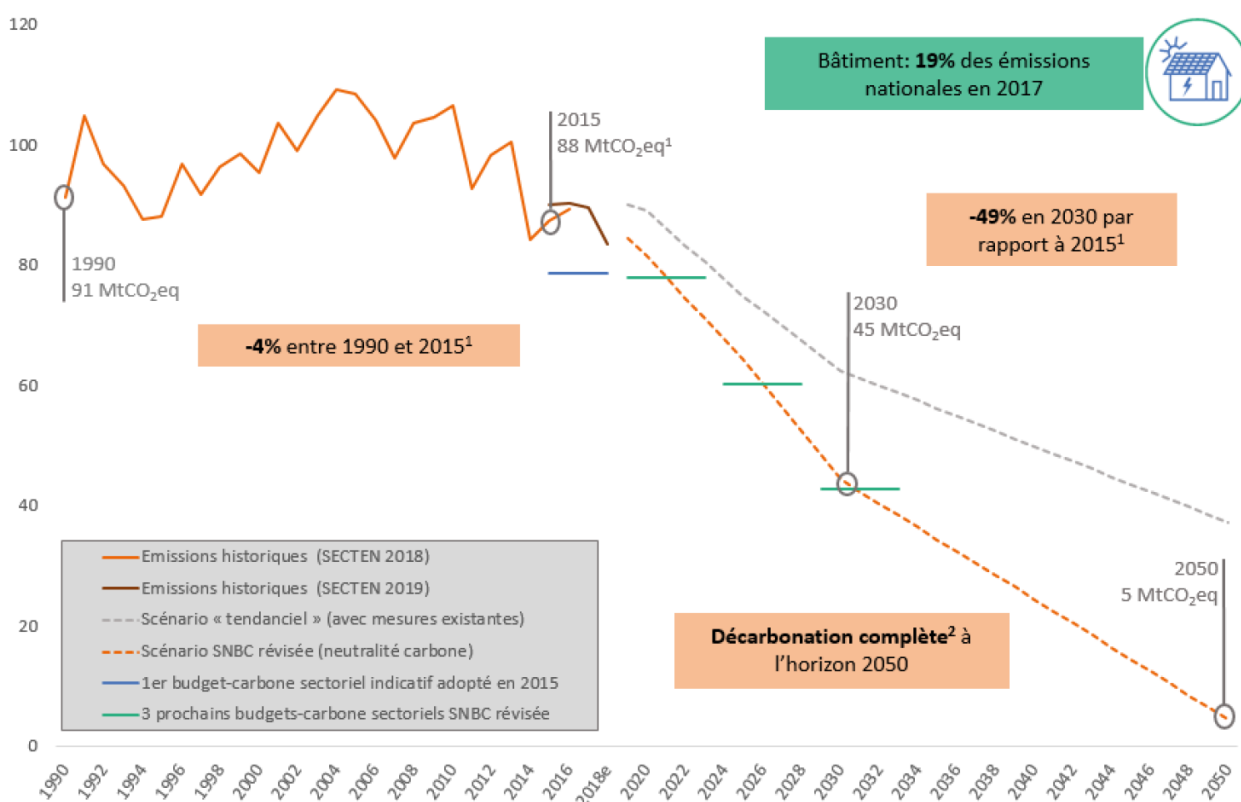


Figure 4. Evolution et tendance pour 2050 des EGES pour le secteur du bâtiment (logements et tertiaire)

Les préconisations du plan d'action de la SNBC via son scénario de référence sont les suivantes :

- ❖ Différencier les types de bâtiments afin de proposer à chacun la solution technique la plus adaptée.
- ❖ Intégrer dans les politiques publiques un ou des critère(s) traitant des EGES afin d'orienter le secteur vers une utilisation d'énergies décarbonées d'ici 2050.
- ❖ Accélérer la cadence de rénovation du parc bâtiminaire français actuel (logements et tertiaire), en passant de 500 000 rénovations par an à 700 000 rénovations par an dès 2022 afin de développer une efficacité énergétique pérenne d'ici 2050 (en réduisant la consommation d'énergie de ce secteur de 40%).
- ❖ Accroître l'exigence sur les niveaux de performances thermiques et environnementales des bâtiments neufs via les futures réglementations.
- ❖ Être plus strict quant à l'efficacité énergétique des équipements.
- ❖ Promouvoir une certaine sobriété des usages et une demande énergétique réduite, soit un utilisateur qui demande moins d'énergie comme baisser d'1°C le chauffage en moyenne.

Les principaux leviers quant à l'obtention d'un secteur de la construction bas-carbone sont la formation des professionnels de ce secteur, l'évolution de la position des entreprises actuelles et l'accompagnement de la population vers des comportements bas-carbone. [7]

### **1.2.3 Leviers bas-carbone**

#### ***Matériaux Biosourcés et Géosourcés***

Les matériaux biosourcés sont des matériaux ayant pour matière première de la matière issue de la biomasse, renouvelable et organique, d'origine végétale ou animale. Il est intéressant de faire un état de l'art sur les techniques/marchés des matériaux biosourcés et géosourcés, étant par essence des matériaux bas carbone. En particulier, leur caractéristique principale permettant de les définir est la capacité d'être des puits de carbone : en effet, ce type de matériaux a la particularité en début et milieu de vie d'absorber une quantité parfois importante de carbone (très majoritairement sous la forme de CO<sub>2</sub> aérien) et de le renvoyer dans l'atmosphère lors de sa phase de fin de vie/recyclage. Ainsi cette dynamique est en phase avec la réglementation à venir fraîchement mise à jour.

Les acteurs de la construction biosourcée, alliés en filière d'une même source, proposent une large gamme de produits issus de la même matière organique. Il existe sur le territoire français différentes filières de matériau de construction :

- ❖ La paille (principalement sous forme d'isolant) du fait de la porosité linéique des fibres du matériau. La paille en botte, en vrac, installée dans un panneau préfabrique ou en Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) permet une isolation thermique à très faible coût carbone



- ❖ Le chanvre (principalement sous forme d'isolant, ou d'enduit). La chènevotte des tiges de chanvre est la partie ligneuse de la plante. Fibre végétale, elle comprend une porosité et une solidité lui permettant d'être broyée puis installée dans un ciment de chaux pour créer du mortier/béton de chanvre, à faire couler dans un caisson préfabriqué par exemple.
- ❖ Le bois (en structure, en isolant). Le bois se veut comme étant l'un des puits de carbone les plus efficaces selon son essence, par le phénomène classique de photosynthèse.
- ❖ La ouate de cellulose (principalement sous forme d'isolant)
- ❖ Autres fibres végétales comme le bambou ou plantes céréalières
- ❖ Matériau d'origine organique comme la laine de mouton

Il est à noter que certains produits nécessitent de réels process de production (mélange chimique pour obtenir du béton de chanvre, broyage jusqu'à l'obtention d'une certaine dimension pour les fibres végétales etc). Ces process deviennent alors obligatoires pour obtenir les caractéristiques recherchées du produit.

De la même manière, les matériaux géosourcés sont un levier carbone. Bien que leur ressource soit limitée, le demande de faible transformation les rend tout autant intéressant que leurs homologues biosourcés. Il existe deux principales filières de matériaux géosourcés en France :

- ❖ La terre crue : selon les principes constructifs mis en œuvre, la terre crue proposera des solutions techniques pérennes principalement en structure et en enduit
- ❖ La pierre naturelle : issue majoritairement de sols moyennement profonds, sa capacité à avoir échangé que très peu avec l'atmosphère (du fait de son enfouissement) lui permet un déphasage thermique, une inertie thermique intéressante.

Ces filières se veulent en plein essor aujourd'hui. Les constructeurs éparses sur le territoire et proposant des produits de construction différents mais de même source se regroupent alors afin de développer leur filière pour plusieurs points :

- ❖ Pour créer une législation pérenne. La filière paille française (Réseau Français de Construction Paille RFCP) produit les Règles Professionnelles de Construction Paille (RPCP 2018) approuvées par la Commission Prévention Produit (C2P, organe de l'AQC). Ces règles constituent le cadre de référence pour l'utilisation du matériau paille comme isolant et support d'enduit. Dans ce cadre, les ouvrages isolés en paille, conçus et construits conformément à ces règles appartiennent aux « techniques courantes » de construction. À ce titre, les concepteurs (architectes, bureaux d'études) et les entreprises de construction de bâtiments en paille qui le demandent, peuvent bénéficier de barèmes d'assurance standards (décennale notamment), à condition de respecter les règles de conception et de mise en œuvre préconisées dans les Règles



professionnelles CP 2018. Elles fonctionnent comme un Document Technique Unifié (DTU) général de la paille.

- ❖ Pour s'allier sur des appels d'offre de grande envergure.
- ❖ Communiquer, présenter leur filière aux maîtres d'ouvrages, architectes et professionnels possiblement concernés afin de multiplier les projets comprenant du biosourcé/géosourcé.

### Labélisation

La labélisation est un outil de communication et de vérification très efficace. Un grand nombre de labels permettant de traduire une construction pérenne existe (certification Haute Qualité Environnementale **HQE** en France, **PassivHaus** en Allemagne, **BREEAM** au Royaume-Uni). Ce genre de label comporte des critères et des seuils à respecter afin que le projet en question puisse recevoir le label, notamment sur les équipements des bâtiments, leur proportion de consommation d'énergie issu du renouvelable ou encore leur comportement thermique.

Dans le cadre de la recherche de levier bas-carbone, on peut s'intéresser au **Label Bas-Carbone**. Ce label considère les projets neufs ou de réhabilitation qui prennent en compte l'impact carbone de leur action, en supplément du projet de construction ou de réhabilitation en cours, comme une tranche optionnelle bas-carbone au sein de la réflexion du projet.

Ainsi, pour bénéficier de ce label, il est nécessaire de partir du projet initial (sans prise en compte de l'impact carbone) et d'en faire un scénario de référence. De ce scénario, des propositions techniques bas-carbone seront proposées afin de créer des scénarios permettant la réduction d'EGES. Pour ce faire, les EGES du scénario initial doivent être calculées et les scénarios proposés doivent suivre une méthodologie validée et vérifiée par le ministère de la Transition Ecologique. Les réductions d'EGES du possible nouveau scénario bénéficiant du label doivent alors être vérifiées par un expert indépendant. [8]

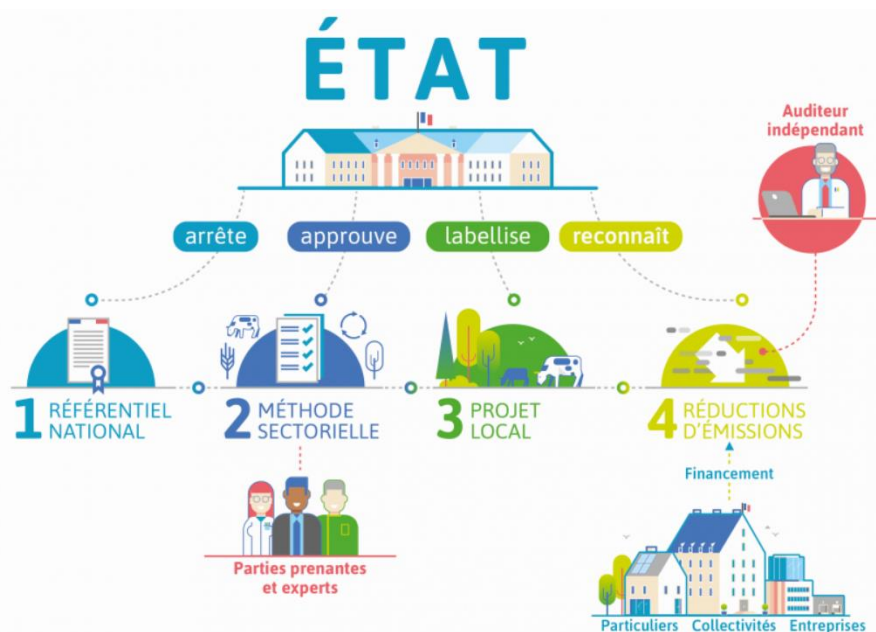


Figure 5. Carte des acteurs du Label Bas-Carbone

### Analyse de Cycle de Vie et son évolution

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil d'évaluation multicritère des performances environnementales d'un produit, d'un projet. Cette méthode de calcul permet de quantifier ses impacts environnementaux. Elle fonde sa logique par une approche qualitative ayant deux points de vue : une vision temporelle via le cycle de vie et une vision globale via son analyse multicritère.

Peu importe l'élément étudié, son ACV va comprendre toutes ses étapes de vie, afin de faire l'inventaire des flux d'énergie et de matière nécessaires à l'élément. Une ACV fonctionne « du berceau à la tombe », c'est-à-dire que l'on considère les calculs de l'extraction des matières premières pour produire l'élément, jusqu'à sa destruction et/ou son recyclage, à noter que les impacts carbone du transport nécessaire pour toutes ces étapes sont comptabilisés.

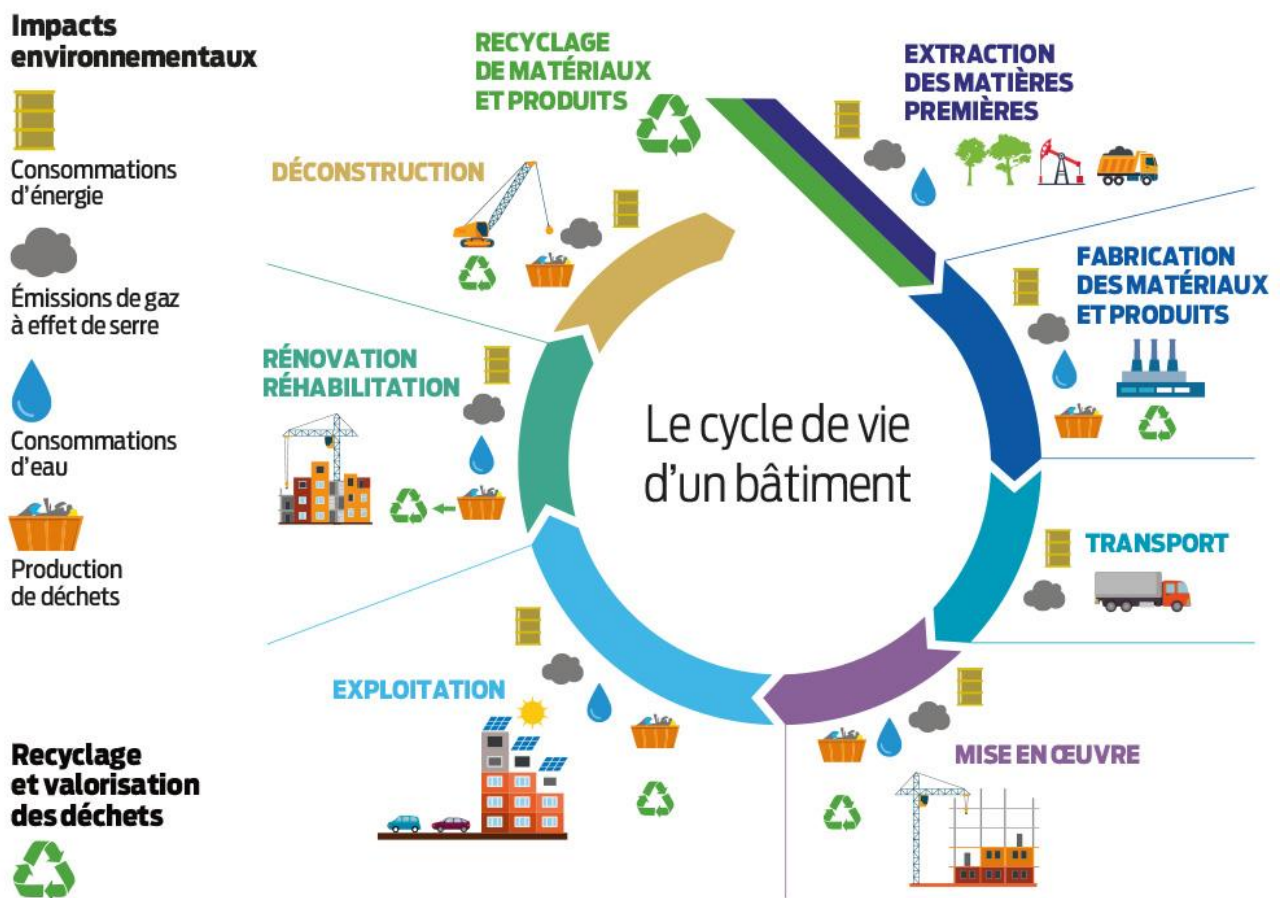


Figure 6. Cycle de vie d'un élément, exemple pour un bâtiment (process et flux)

Dès lors, chaque élément se verra attribuer une Durée de Vie de Référence (DVR) étant un nombre d'années fixe.

Une ACV comptabilise les différents flux des différentes étapes de vie d'un élément. Par flux, on entend les flux entrants qui sont les flux d'énergie et de matière (pour la fabrication de l'élément, son transport, sa destruction etc) et les flux sortants qui sont la production de déchets et les EGES. Ces flux sont quantifiés pour chaque étape du cycle de vie. Au global, une ACV tente de chiffrer les impacts environnementaux des

phénomènes physicochimiques des éléments considérés. Du fait de la complexité de certains de ces phénomènes, il peut résider une incertitude sur la réelle intensité de ces impacts environnementaux, c'est pourquoi ces impacts sont qualifiés d'« impact potentiel au réchauffement climatique » par exemple.

Encore expérimentale il y a 30 ans, l'ACV est aujourd'hui reconnue internationalement comme un outil performant, notamment du fait de son support normatif (normes internationales ISO 14040 et 14043, 1994, et normes européennes spécialement dirigée vers le domaine de la construction EN15804, 2014). L'ACV se voit alors être une « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie ». [9]

Aujourd'hui, l'ACV la plus répandue est **l'ACV statique**. C'est l'ACV qui a été décrite succinctement précédemment. C'est via cette méthodologie qu'est vérifié le label E+C- La RE2020 comme énoncée précédemment quant à elle se verra attribué dans ces modélisateurs carbone une ACV statique vérifiée dont les données pourront être mises à jour et **l'ACV dynamique**. Quelles sont alors les différences ?

Les calculs du label E+C- attribuent aux étapes de vie d'un même matériau une empreinte carbone égale. L'ACV dynamique voit dans ses calculs une pondération des empreintes carbone des étapes de fin de vie d'un matériau, afin d'intégrer le phénomène physique de dégradation des GES dans l'atmosphère d'une part, et de permettre de privilégier l'utilisation de matériau puits de carbone en début de vie (i.e. les matériaux biosourcés) d'autre part. En effet, une des dynamiques promouvant l'utilisation de cette ACV est le besoin d'action rapide pour l'atténuation de l'impact anthropique sur le climat.

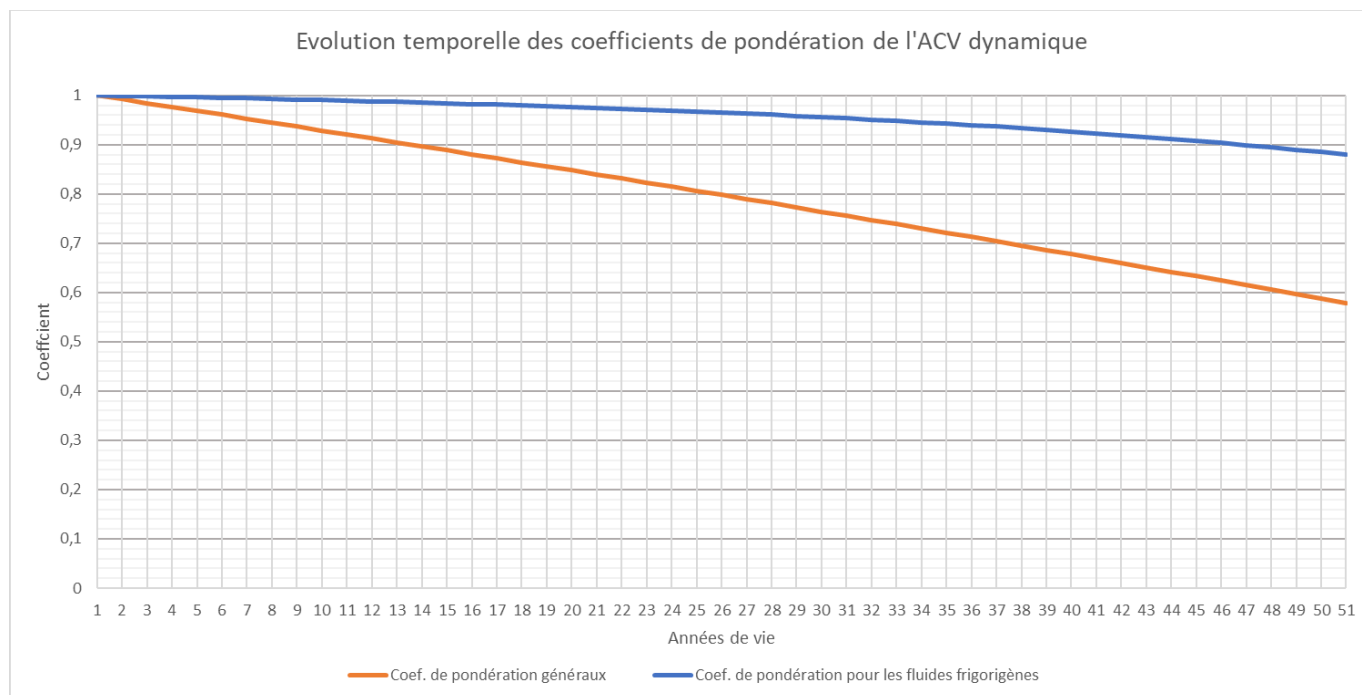


Figure 7. Evolution temporelle des coefficients de pondération de l'ACV dynamique (source de données : ADEME)

## 2. Mise en relation de ces deux dynamiques

### 2.1 Outil de bilan carbone en phase de programmation

#### 2.1.1 Etat de l'art de la donnée carbone

La communauté de professionnels du secteur de la stratégie bas carbone dispose déjà aujourd'hui d'un grand nombre d'accès à la donnée carbone. C'est justement dans l'exercice d'acquisition de ces données que la réalisation d'un état de l'art des databases existantes fut nécessaire. Dans cette sous-partie, un certain nombre de noms de logiciels et de databases sera évoqué, sans pour autant avoir l'objectif d'en produire une liste exhaustive du fait de l'existence d'autres logiciels par exemple. Cette liste traduit les rencontres de difficultés lors de l'obtention de database pendant le stage. Cet échantillon tout de même assez large montre ce que peut être le marché de la donnée carbone. Alors, on peut décomposer les databases existantes en deux grands ensembles :

- ❖ Les databases incluses au sein de logiciels de bilan carbone et en général d'analyse de cycle de vie
- ❖ Les databases libres en lecture, gratuites ou payantes

#### *Databases en libre lecture*

Ces databases sont sous la forme d'un répertoire très exhaustif permettant de définir chaque matériau, chaque produit et chaque procédé de manière très précise. Ce sont ces bases de données qui sont d'une certaine manière les données mères au sein de la communauté scientifique. En effet, ces databases sont plutôt difficiles d'accès si l'utilisateur n'est pas déjà sachant sur le sujet de l'analyse de cycle de vie.

Elles se retrouvent en accès gratuit ou payant avec licence, avec contribution des acteurs de la construction ou encore de l'agriculture gratuite ou payante. La plus répandue et la plus connue se trouve être la database **EcolInvent** : base de données Européenne payante pour l'utilisateur et mise à jour très fréquemment, du fait de sa popularité et de son grand nombre d'acteurs associés, dans le domaine de la donnée carbone dans le bâtiment au sens large. Sa jumelle agricole est **Agri-balyse**, base de données Française relatant des taux carbone des process alimentaires et agricoles en général.

En France particulièrement, on peut citer la base de données **INIES** qui se veut gratuite pour son utilisateur et payante pour ses contributeurs. La base INIES répertorie un très grand nombre de Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES) produites par le Ministère de la Transition Ecologique (anciennement les Ministères de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer et le Ministère du Logement et de l'Habitat Durable) ou bien par les constructeurs concernés. Les constructeurs cherchant à créer une FDES sur l'un de leur produit peuvent se tourner vers des acteurs spécialisés vérifiant les tests de comportement carbone de leurs produits. Il existe de la même manière des contributeurs experts selon le type de matériau, comme **Ekopolis**, pôle de

ressources pour l'aménagement et la construction durable en Île-de-France spécialisé dans les matériaux biosourcés. De même, **Karibati**, producteur de données biosourcées, développe un configurateur de FDES spécialement adapté pour les matériaux biosourcés : **Akacia**. [10] Le Comité professionnel de Développement des Industries Françaises de l'Ameublement et du Bois (CODIFAB) a par exemple demandé au centre technique industriel de l'Institut Forêt Construction Bois Ameublement (FCBA) de créer le configurateur de FDES **DE-bois**, pour les produits bois. [11]

Il existe un réel enjeu quant à la complétude de la base de données INIES. C'est pourquoi des configurateurs de FDES voient le jour. Ils ont pour rôle de simplifier la création de la FDES d'un produit pour son constructeur. Cette **FDES** sera alors **individuelle**, uniquement pour ce produit de ce constructeur. Les configurateurs FDES servent alors à créer des **FDES collectives** lorsque des constructeurs d'un même type de produits s'allient pour créer de la donnée brute.

### *Databases de logiciels*

Ces logiciels vont voir leur database cryptée afin d'obliger l'utilisateur à travailler avec ce dernier, sinon la database est affiliée au logiciel malgré sa disponibilité sur le web. Ces logiciels sont en majorité rentables pour la modélisation de combinaisons de matériaux et pour le calcul de bilan carbone. Ces databases sont inutilisables hors logiciels, qui eux sont conçus pour un besoin bien défini.

Dans le cadre d'analyse de cycle de vie ou de bilan carbone, on retrouve un grand nombre de logiciels qui fondent leur calcul sur les données de la base EcoInvent comme le logiciel Français **Vizcab** [12] ou le logiciel Néerlandais **SIMAPRO**. Les données de EcoInvent peuvent être complétées de données spécialisées comme un grand nombre de taux carbone de métaux rares pour le logiciel Allemand **GaBi**. Des logiciels bien plus larges comme **Open LCA** regroupent et fusionnent les bases de données de différents logiciels d'ACV pour modéliser un large nombre de process de différents domaines.

#### **2.1.2 Database utilisée**

La base de données retenue pour l'outil est la base de données INIES, du fait de sa gratuité, de la majorité des acteurs francophone connu dans l'univers de la construction et réhabilitation sur le territoire francophone. En effet, INIES est une base de données Française, gérée de façon participative par de nombreux acteurs de la construction, notamment les pouvoirs publics.



Figure 8. Liste des acteurs responsables de la base de données INIES

INIES constitue une base de données indispensable pour installer dans les mœurs l'écoconception des bâtiments. La gouvernance de la base de données INIES est régie par deux institutions :

- ❖ Un **conseil de surveillance** présidé par l'Alliance HQE-GBC (Haute Qualité Environnementale – Green Building Council) dont le rôle politique et stratégique est de veiller quant à l'éthique et au bon fonctionnement d'INIES
- ❖ Un **comité technique** présidé par l'AIMCC (Association française des industries des produits de construction) dont le rôle opérationnel est de s'assurer que la mise en ligne des données soit conforme aux normes en vigueur dans le cadre de la normalisation AFNOR P01E (normes sur le développement durable dans la construction). Ces normes introduisent le carbone comme grandeur d'entrée, répondant aux exigences de la loi ELAN [13]

Les programmes de vérification de la donnée INIES sont les garde-fous pour les acteurs de la construction souhaitant déclarer de la donnée. De plus, ils peuvent faire vérifier leur données par une tierce partie indépendante dans le cadre de ces programmes, afin d'en accroître la fiabilité. Il en existe deux en particulier :

- ❖ Le **Programme INIES** : ce programme de vérification est géré par l'AFNOR (Association Française de la Normalisation) et traite de la véracité des **FDES**.
- ❖ Le **Programme PEP** Profils Environnementaux des Produits : ce programme quant à lui est géré par l'association EcoPassport®. Les PEP sont des déclarations environnementales et sanitaires surtout utilisées pour les équipements électriques, électroniques et de génie climatique. [14]



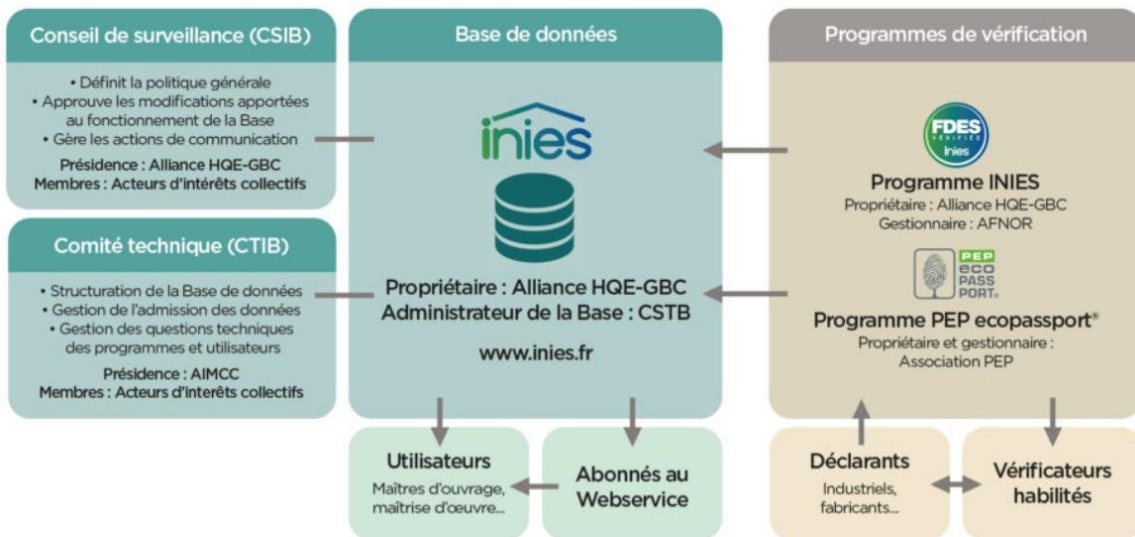


Figure 9. Schéma de gouvernance et de vérification de la base de données INIES

Ces programmes se sont vus mis à jour en mai 2020, pour une refonte en profondeur de l'accès à la donnée en phase avec l'arrivée de la RE2020. Les effets de la mise à jour s'observeront d'ici le deuxième semestre 2022. Les grands points sont les suivants :

- ❖ La **norme 15804+A2** a pour mission de fixer un nouveau format pour les FDES.
- ❖ La vérification des configurateurs FDES. En effet, tout comme les FDES, les configurateurs sont vérifiés par le Programme INIES. La vérification se fera par le test de fiabilité d'une FDES mère d'une certaine famille de produits, réalisée via un configurateur, puis par les tests des différentes possibilités (comme le changement d'épaisseur d'un isolant). Dès lors, toutes les FDES issues d'un configurateur vérifié seront qualifiées de vérifiées par défaut. Aujourd'hui, il existe trois configurateurs vérifiés, **BETie** pour le béton, **DE-bois** pour le bois, présenté précédemment et **SAVE** pour l'acier. [14]

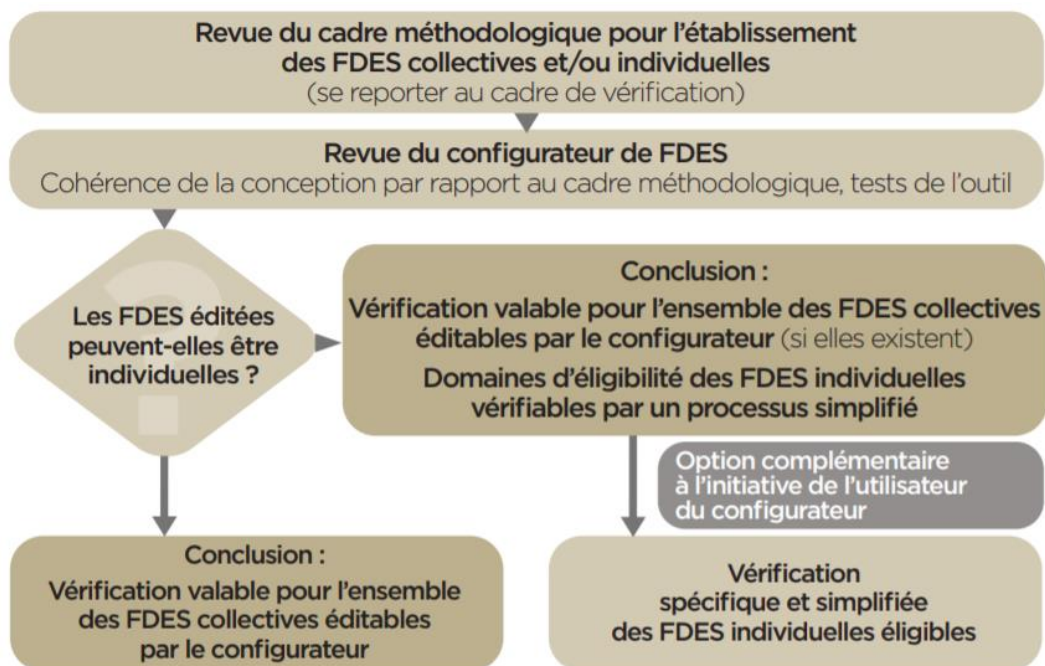


Figure 10. Schéma de vérification d'un outil configurateur de FDES, Programme INIES

### 2.1.3 Constats de l'état de l'art

Dans le cadre de la création d'outil de chiffrage carbone, seules les FDES seront étudiées et utilisées. La principale observation quant à cet état de l'art est l'accès difficile à la donnée pour un nouvel utilisateur dans le domaine carbone.

Le second constat quant à cet état de l'art est le format de la base INIES. En effet, elle est hébergée et lue sur un site web et suivant la liste des produits, les FDES sont téléchargeables au format PDF. Ainsi, il a été nécessaire de reconstruire via cet échantillon de FDES extrait de la base INIES une base de données sous forme de tableur afin qu'elle soit utilisable pour la création de l'outil.

Le dernier constat sera d'apprécier la qualité des données environnementales des FDES. En effet, une FDES comporte des critères environnementaux très précis et exhaustifs traduisant l'impact carbone du produit associé. De plus, les valeurs chiffrées attribuées à ces critères sont souvent justifiées dans la FDES, ce qui permet une compréhension claire et objective des process de ce produit lors de ses différentes étapes de cycle de vie. C'est pour ce point de clarté, de fiabilité et de précision sur la donnée que la base INIES a été retenue pour la création de l'outil. Il est à noter que d'autres bases de données référence dans le marché de la donnée carbone se voient moins claires et moins complètes que certaines FDES. Cependant, les deux principaux défauts de la base INIES seront sa possible incomplétude sur certains types de produits et sa variabilité de précision. Ces défauts se justifient par le fait que plusieurs constructeurs ne définissent pas l'impact carbone de la même manière, et c'est selon leur vision et leur jugement qu'ils produisent la FDES de leur produit. Ainsi, si un constructeur réalise une FDES exhaustive et parfaite aux yeux des vérificateurs INIES, ces derniers ne peuvent pas se permettre de négliger les autres FDES des autres constructeurs possiblement moins consciencieux, dont la donnée est tout de même utilisable. De plus, certaines catégories de produits sont rares dans la base INIES, par manque de constructeurs, et manque de communication auprès de ces constructeurs.

### 2.1.4 Méthodologie de l'outil de chiffrage carbone

#### *Fonctionnement d'une FDES*

Une FDES est une fiche relatant de toutes les données environnementales sur les produits de construction nécessaires à la réalisation d'une ACV. C'est alors une planche multicritère permettant de traduire tous les enjeux environnementaux associés à un matériau, à un produit. Il en existe trois types :

- ❖ Les FDES individuelles qui correspondent à un type de produit précis. Une FDES individuelle correspond à un produit précis (typiquement, une dalle de béton d'une certaine épaisseur). Ce genre de FDES se veut excessivement précise quant à la donnée associée à cet unique produit. Elles ne sont alors utilisables que lorsqu'il est certain d'utiliser ce matériau lors du projet pour lequel on souhaite réaliser une ACV.



- ❖ Les FDES collectives qui elles correspondent à une gamme de produit répondant au même type de besoin (par exemple une gamme d'isolant en fibre de bois, tous de différentes épaisseurs). Elles englobent alors les données environnementales d'une gamme de produit en les moyennant, ce qui fait que l'impact environnemental peut être supérieur ou inférieur à la réalité de l'impact environnemental du produit.
- ❖ Les Modules de Données Environnementales Génériques par Défaut (MDEGD) qui quant à eux ont pour mission de combler les manques de la base INIES. Ce sont les données environnementales à utiliser par défaut, si aucune FDES ne correspond au produit concerné. Ces fiches ont un fort impact environnemental, afin de préférer à termes un produit traduit par une FDES réalisant la même fonction.

Les FDES attribuent à leur produit associé des éléments de définition afin de réaliser une ACV, et ce dès le champ d'étude. De prime abord, la FDES permet de définir son produit précisément ([un mur ossature bois avec montant d'une largeur de 145 mm et un entraxe de 60 cm non isolé, fabriqué en France en sapin-épicéa](#)). Le champ d'étude de la FDES permet de quantifier les impacts environnementaux du produit selon un **scénario** très précis (hypothèses sur les distances de transport à parcourir, hypothèse sur le volume de sciure de bois récupérable suite à la découpe etc) qui se déroule lors de sa vie entière. Il peut exister dans une même FDES plusieurs scénarios qui se veulent assez proche, afin de gagner des degrés de liberté quant à l'utilisation du produit.

Il y est surtout décrit **l'Unité Fonctionnelle (UF)** du produit. L'unité fonctionnelle permet la définition précise des caractéristiques physiques et des fonctions du produit. L'unité fonctionnelle associe alors une fonction avec ces caractéristiques (géométrie, résistance thermique, débit) : [Assurer la fonction de mur porteur sur 1 m<sup>2</sup> de paroi pendant la durée de vie de référence \(100 ans\)](#).

Enfin, on retrouve la **Durée de Vie de Référence (DVR)** du produit. Elle correspond au nombre d'années fixé par le fabricant du produit au bout duquel, suivant le scénario de la FDES, le produit l'assure plus sa fonction et donc a atteint sa fin de vie.

Dans une FDES, la vie du produit y est décomposée en phases que sont les étapes de vie, ensembles de modules, selon la norme européenne NF EN 15804+A1 comme ci-dessous.

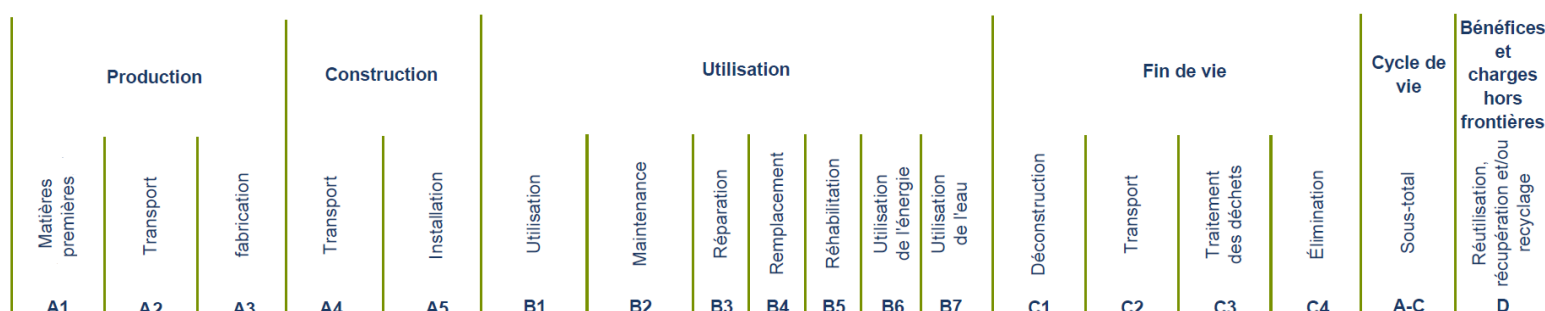


Figure 11. Etapes et modules de la vie d'un produit défini à l'aide d'une FDES

## ❖ **Etape A : Production et Construction, le « berceau » du produit**

Cette étape concerne l'origine et la création de la matière première, au transport de cette matière première vers le site de fabrication, la fabrication dont ces process, nécessaires à la construction du produit puis le transport au chantier et l'installation du produit dans le chantier

- Module A1, Matières premières : extraction de la matière première sur site naturel d'origine (carrière, rivière, forêt, terres agricoles ou élevage animal). Les flux concernés seront les flux de matière premières, les flux d'énergie et les flux d'eau par exemple. Les impacts environnementaux considérés seront la pollution et la destruction de l'écosystème, l'atteinte à la biodiversité et l'impact sur le climat, ramené en taux d'EGES équivalent.
- Module A2, Transport : transport de cette matière première vers le site de fabrication. Seul le carburant sera considéré en ressource consommée dans ce module. Les impacts environnementaux seront l'EGES suite à la combustion du carburant et la pollution de l'air et du climat.
- Module A3, Fabrication : production des différents composants sur site de construction du produit (usine, atelier), assemblage de ces composants et emballage. Il existe un impact environnemental climatique quant à la pollution de l'air et une EGES directe.
- Module A4, Transport : ce module correspond au transport du produit fini vers le site de chantier. La seule ressource consommée considérée sera le carburant, soit un impact environnemental dû à la combustion de ce carburant traduit en EGES directe.
- Module A5, Installation : déballage et utilisation du produit lors de la construction sur chantier du bâtiment. La production de déchets d'emballage et due à l'installation du produit lors du chantier est considérée comme un impact environnemental des sols et de l'air, ramené en impact carbone équivalent et en EGES directe.

On définit par écobilan l'analyse de l'étape A, nécessaire pour la fabrication d'un produit (matière première et matière secondaire transformée). Par EGES directe et EGES équivalente, il faut différencier les process produisant du CO<sub>2</sub> (EGES directe) et ceux produisant des déchets et autres GES qu'on ramène en CO<sub>2</sub> équivalent (EGES équivalent, voir page suivante).

## ❖ **Etape B : Utilisation, la vie en œuvre du produit**

L'interface entre le produit et l'utilisateur entraîne une détérioration de ce dernier lors sa phase de vie en œuvre. Sa manipulation entraîne un besoin de ressources, de matière première pour maintenir la qualité du rôle du produit.

- Module B1, Utilisation : ce module considère les impacts environnementaux du produit dû à la réponse aux besoins de l'utilisateur

- Module B2, Maintenance : ce module correspond aux impacts environnementaux dû à la consommation d'énergie et de matière première pour maintenir l'état de fonctionnement du produit (changement de fil de cuivre pour l'alimentation électrique).
- Module B3, Réparation : idem si l'état du produit demande une réparation plus ou moins importante (effritement de plâtre).
- Module B4, Remplacement : idem si l'état du produit demande un remplacement partiel ou complet du produit (putrescibilité de certains isolants).
- Module B5, Réhabilitation : idem si l'état de l'environnement du produit, ou de l'état de plusieurs produits nécessitent une refonte de leur usage et leur remplacement partiel ou complet.
- Module B6, Utilisation de l'énergie pendant la vie du produit : ce module correspond à la consommation d'énergie lors de l'utilisation du produit (typiquement un équipement de chauffage). L'impact environnemental associé sera l'EGES dû à ce besoin en énergie
- Module B7, Utilisation de l'eau pendant la vie du produit : idem pour l'eau (équipement de salle d'eau, arrosage)

Il est à remarquer que dans notre cas, les FDES rencontrées ont leurs colonnes de l'étape B majoritairement vides, du fait de l'absence d'équipements étudiés (donc absence d'impact carbone dû à l'Effet Joule par exemple) mais aussi du fait que les produits étudiés (majoritairement des isolants et des bardages) sont inertes lors de leur étape de vie en œuvre (pour un bardage en acier, impact environnemental de la rouille négligé mais impact carbone de la maintenance, soit du nettoyage de la rouille considéré).

#### ❖ **Etape C : Fin de vie, l'arrivée à la « tombe » du produit**

- Module C1, Déconstruction : ce module considère la consommation d'énergie nécessaire à la démolition, au démantèlement, au retraitage du produit au sein de sa structure ou de son environnement. Il considère de la même manière la préparation des déchets du produit pour leur transport, du fait qu'il ne réalise plus sa fonction première et que sa DVR a été atteinte.
- Module C2, Transport : ce module correspond au transport des déchets du chantier jusqu'au site de traitement. Seul le carburant crée un impact environnemental du fait de sa combustion, il crée une EGES directe.
- Module C3, Traitement des déchets : ce module correspond aux impacts environnementaux dus à la dépollution des matériaux et aux phénomènes physiques nécessaires au traitement des déchets. Ils sont traduits par un taux d'EGES directe et équivalente, mais aussi à une pollution des sols et de l'air.

- Module C4, Elimination : ce module correspond à la disparition des déchets qui ne peuvent pas être valorisés. Les deux procédés classiques d'élimination seront la combustion et l'enfouissement de ces déchets. Dès lors, leur impact environnemental se voit traduit par une pollution des sols, de l'air et une EGES directe.

De la même manière que pour l'étape B, on a un certain nombre de valeurs d'impact nulles, du fait que différents produits ont différents process de fin de vie (carbonatation du béton démolé, incapacité à réutiliser une partie des fibres d'acier d'un béton armé).

Le cycle de vie est alors composé des étapes A, B et C. **L'étape D de bénéfices et charges hors frontières** considère l'impact carbone du au réemploi et au recyclage des matériaux du produit d'un scénario précis proposé par le constructeur réalisant la FDES (bois pour de la combustion, déchets inertes pour la chaussée). Cette étape n'est pas obligatoire du fait qu'elle traduit un impact environnemental hors cycle de vie, c'est pourquoi elle est non calculée dans un grand nombre de FDES actuelles.

On qualifie les FDES de multicritères car elle comporte une liste de grandeurs d'impacts environnementaux complète, 8 précisément, permettant de traduire tout type d'atteinte à l'environnement :

- ❖ Réchauffement climatique (kgCO<sub>2</sub>éq/UF) : le potentiel de réchauffement global d'un gaz revient à sa contribution au réchauffement global issu des émissions de ce gaz, ramené à une unité de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> (d'où « CO<sub>2</sub>éq »)

Gaz	Emission en kg	Ramené en kgCO <sub>2</sub> éq
Dioxyde de carbone CO <sub>2</sub>	1	1
Méthane CH <sub>4</sub>	1	28
Protoxyde d'azote NO <sub>2</sub>	1	265
Hydrocarbures fluorés HFC : exemple du HFC-152a (1,1-difluoroéthane)	1	138

*Tableau 1. Tableau d'équivalence entre les GES classiques et le CO<sub>2</sub> [15]*

- ❖ Appauvrissement de la couche d'ozone (kgCFC11éq/UF) : le potentiel de destruction de la couche d'ozone protégeant la Terre des rayons UV, causée par la fission de chlore ou de brome lorsqu'elle se fait au niveau de la stratosphère, détruit les molécules d'ozone.
- ❖ Acidification des sols et de l'eau (kgSO<sub>2</sub>éq/UF) : le potentiel d'acidification se fait via les polluants acides dû à leur présence dans le domaine agricole et dans le domaine de la combustion fossile pour la production de chauffage, d'électricité et de transport.
- ❖ Eutrophisation (kg (PO<sub>4</sub>)<sup>3-</sup>éq/UF) : un enrichissement non contrôlé en nutriments des eaux et des sols peut entraîner un impact environnemental important sur les écosystèmes touchés.

- ❖ Formation d’ozone photochimique (kg Ethene éq/UF) : ce potentiel de formation traduit les possibles réactions chimiques provoquées par l’énergie transmise par la lumière du Soleil transformant de l’oxyde d’azote et des hydrocarbures en ozone (réaction photochimique).
- ❖ Epuisement des ressources abiotiques élémentaires (kgSBéq/UF) : ce potentiel traduit la consommation de ressource en matière première de construction par exemple (ressource inerte)
- ❖ Epuisement des ressources abiotiques fossiles (MJ/UF) : idem pour les ressources fossiles en particulier
- ❖ Pollution de l’air (m<sup>3</sup>/UF) : potentiel de production de pollution aérienne (EGES, particules fines)
- ❖ Pollution de l’eau (m<sup>3</sup>/UF) : idem pour l’eau (pollution intervenant dans tout le cycle de l’eau)

De la même manière, un zoom sur l’utilisation des ressources (en matière et en énergie), sur les différents types de déchets (dangereux et radioactifs) et sur les flux sortants (qualité du matériau en fin de vie pour le réemploi et le recyclage).

### *Hypothèses et squelette de l’outil*

Il est à rappeler que le besoin de VOXOA a été de démarrer la dynamique bas carbone afin de présenter à ses clients un support quant à la réduction de leur empreinte environnementale. Ainsi, le point de vue adopté lors de la création de l’outil a été un point de vue simplificateur de ce que peut être un bilan carbone.

Utilisant alors la base de données créée en interne, le squelette de cet outil repose sur celui d’un outil interne à VOXOA qui est un outil de chiffrage économique classique, dépendant des propositions de l’opération immobilière concernée et des scénarios avancés par VOXOA pour répondre aux besoins de la maîtrise d’ouvrage.

Dès lors, chaque matériau ou élément composé d’une combinaison de matériau se voit attribuer un coût économique au m<sup>2</sup> (du fait de l’existence d’un grand nombre d’opérations immobilières de réhabilitation de façades par exemple, soit d’éléments surfaciques). Ainsi, via la base de données créée en interne, il a été attribué pour chacun de ces matériaux ou éléments un taux carbone au m<sup>2</sup>. Les FDES retenues pour la création de la base de données comportent alors une unité fonctionnelle de surface, en m<sup>2</sup>, ou bien en volume en m<sup>3</sup> comprenant un ratio en m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

La première hypothèse de cet outil est de s’intéresser uniquement au potentiel de réchauffement global (kgCO<sub>2</sub>éq/UF) afin d’installer le mode de pensée sur ce que peut être un bilan carbone. En effet, la base de données issues de la lecture d’un grand nombre de FDES compile la ligne du réchauffement global de chaque FDES.

## 2.2 Méthodologie de communication

### 2.2.1 Faire monter en compétence une équipe

Il est à rappeler l'objectif de VOXOA de sensibiliser ses collaborateurs afin de promouvoir à leurs clients la stratégie bas-carbone. La qualité de rendus de communication interne sur des points techniques (état de l'art de filières biosourcées) est un réel enjeu quant à la montée en compétence de ces acteurs. Comme énoncé, cette montée en compétence s'inscrit dans une dynamique bas-carbone pérenne interne à l'entreprise, une dynamique qui se veut encore à un stade de lancement.

La veille active de la presse spécialisée et des acteurs du bas-carbone ont permis un gain d'informations et de connaissances notable. Ce gain a pu alors être redistribué en réunion mensuelle interne à l'ensemble des collaborateurs lors de flashes bas-carbone. Les flashes prenaient la forme d'une présentation orale avec support, permettant la prise d'information des collaborateurs et des échanges. Dans un domaine actif comme celui de l'assistance à maîtrise d'ouvrage, il est à noter l'efficacité de synthétisation de l'information en éléments clés et exemples d'opérations immobilières. Confirmer cette montée en compétence peut se réaliser grâce à la sollicitation d'acteurs locaux experts en la matière (constructeurs biosourcé, architectes, représentant de filière biosourcée). En effet, ce nouveau point de vue d'expert permet aux collaborateurs d'aiguiser leur vision quant à un sujet nouveau (caractéristiques physiques, principes constructifs, réglementation) mais bien présent dans leur mission.

### 2.2.2 Production d'éléments graphiques pour la Maîtrise d'Ouvrage

La vulgarisation technique de la stratégie bas-carbone est un des nerfs de la guerre de l'actualité bâtementaire et immobilière. En effet, à une phase d'arrivée imminente de la RE2020, il est nécessaire aux acteurs de la construction de comprendre ces enjeux et s'adapter quant à l'évolution réglementaire vue plus haut. Dès lors, l'un des leviers de réponse face à cet enjeu est la production d'éléments graphiques relatant des impacts carbone de leurs projets, de leurs demandes et de leurs scénarios. C'est de ce constat qu'est venu la genèse d'un outil de production graphique carbone.

#### *Méthodologie adoptée*

De la même manière que l'outil de chiffrage carbone précédent, la base de données extraites des FDES sera utilisée et seul le potentiel de réchauffement global (kgCO<sub>2</sub>éq/UF) sera considéré.

On considère de représenter graphiquement un comparatif des impacts carbone de différents scénarios de solution technique afin de permettre à la maîtrise d'ouvrage de se rendre compte quels sont les leviers de ces scénarios qui sont les plus impactant. Cela permet d'aider la maîtrise d'ouvrage à positionner son regard critique sur les empreintes environnementales des solutions proposées.

Cet outil permet de créer un scénario de solutions techniques munies de plusieurs éléments définis par des FDES. Le fonctionnement de cet outil est le suivant :

- ❖ Comme il a été défini en amont, les FDES sélectionnées créant la base de données ont une unité fonctionnelle surfacique ou volumique. Dès lors, dans un premier menu déroulant, on peut choisir la grandeur de définition avec laquelle nous voulons travailler (metre\_carre ou metre\_cube).
- ❖ Ensuite, la base de données est divisée en deux parties, l'une comprenant des éléments dont l'unité fonctionnelle est surfacique et l'autre volumique. On choisit alors l'élément souhaité dans un second menu déroulant, dépendant du premier. Il apparaît automatiquement dans les calculs le taux carbone par rapport à son unité fonctionnelle (kgCO<sub>2</sub>éq/UF) associé à l'élément sélectionné.
- ❖ Afin de traiter les impacts carbone en kgCO<sub>2</sub>éq, il est nécessaire de rentrer les dimensions de l'élément sélectionné. Multiplier par le taux carbone en kgCO<sub>2</sub>éq/UF ces dimensions permet d'obtenir l'impact carbone de l'élément du scénario.
- ❖ Il est nécessaire de répéter les étapes précédentes pour obtenir l'impact carbone du scénario étudié. Ainsi, l'outil produit un tableau relatant élément par élément le scénario étudié. Il somme les impacts carbone de tous les éléments concernés pour obtenir l'impact carbone total du scénario étudié. Enfin, en moyennant chaque impact carbone, on munit un pourcentage de participation de chaque élément à l'impact carbone total du scénario.

#### *Résultats et illustration*

Dans le cadre du stage, il a été suivi de près une opération immobilière traitant de l'enveloppe de bâtiments. L'enveloppe d'un bâtiment est l'interface matérielle solide séparant l'intérieur du bâtiment et l'environnement extérieur. Par son rôle d'interface, l'enveloppe subit alors des sollicitations de son environnement (naturelles, climatiques ou anthropiques). Dès lors, les éléments de l'enveloppe d'un bâtiment doivent répondre à certains besoins [16] :

- ❖ Modérer le ressenti des variations du climat local par l'eau, l'air, le vent, la chaleur, les rayonnements solaires et au global les variations de température
- ❖ Modérer les impacts anthropiques et naturels relatant du bruit et de la lumière
- ❖ Protéger l'utilisateur aux risques (incendie, résistance aux charges, résistance sismique)



## LES PRINCIPALES SOLLICITATIONS DE L'ENVELOPPE EXTÉRIÈRE

L'enveloppe extérieure subit de nombreuses agressions du climat local et de l'environnement.

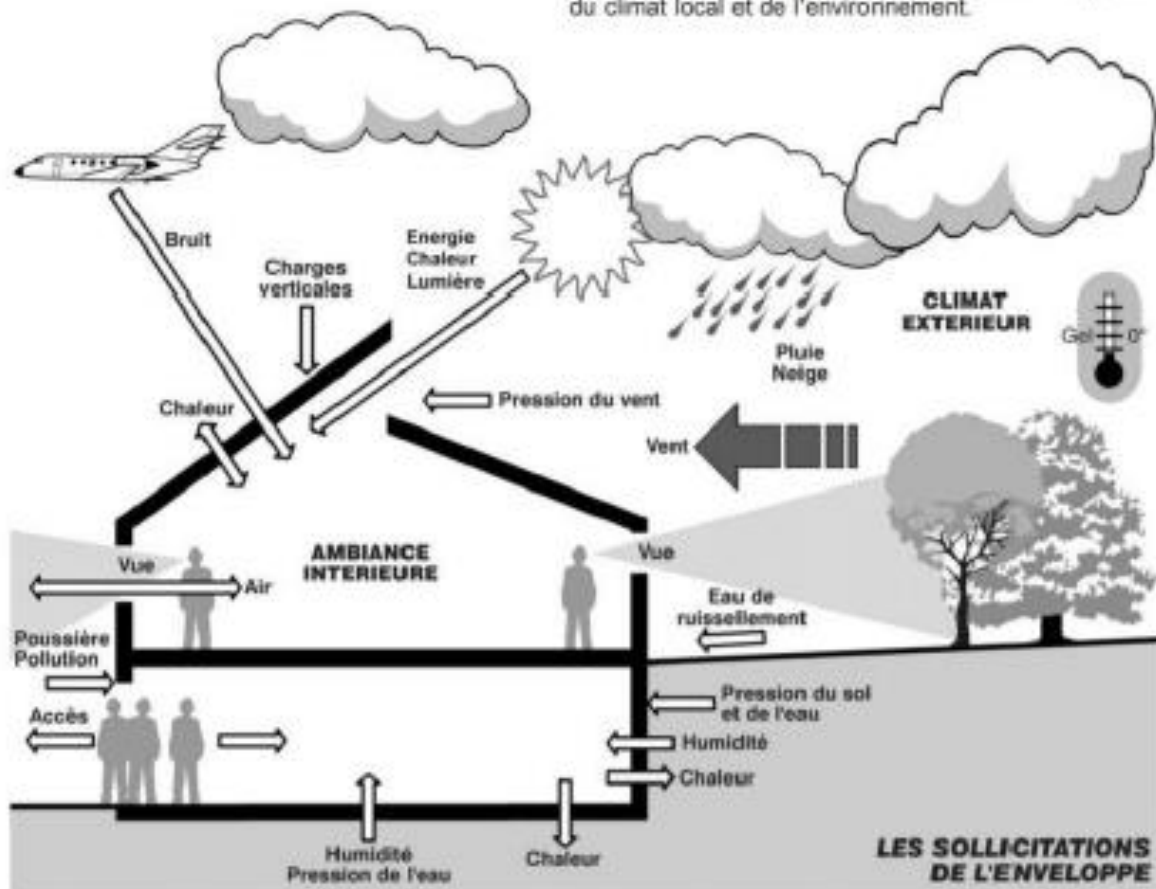


Figure 12. Les principales sollicitations de l'enveloppe extérieure

L'exemple page suivante est l'illustration d'une comparaison de 7 types de scénarios de solution technique de réhabilitation de façades en isolation thermique extérieure, avec mur à ossature bois, ou en isolation thermique par l'extérieure simple.

Ces exemples font écho à la partie suivante de mémoire étant le suivi d'une opération immobilière de réhabilitation thermique de façades d'un grand ensemble bâtiementaire.



SCENARIO 3							
Nature	Grandeur de définition	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre
	Matériaux	MOB_sapin_épicéa_non_isolé	Pare_vapeur_en_polypropylène	Panneau_fibre_de_bois_PAWAWA	Plaque_fibre_gypse	Pare_pluie_en_polypropylène	Bardage_en_lame_de_Douglas
	Nombre d'unité	1	1	1	1	1	1
Dimensions	Largeur (m)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
	Longueur (m)	12	12	12	12	12	12
	Hauteur/Épaisseur (m)						
	Volume (m3)						
	Surface (m²)	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
Impact carbone	kgCO2/unité	8,83	1,47	-14,7	27,6	1,2	1,07
	Impact carbone : kgCO2 émis	349,668	58,212	-582,12	1092,96	47,52	42,372
	Total carbone	1008,612					
	Ratio d'importance	16,09%	2,68%	-26,79%	50,30%	2,19%	1,95%
SCENARIO 4							
Nature	Grandeur de définition	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre
	Matériaux	MOB_sapin_épicéa_non_isolé	Pare_vapeur_en_polypropylène	ITE_laine_de_rouche	Placoplatre_BA13	Pare_pluie_en_polypropylène	Bardage_en_acier
	Nombre d'unité	1	1	1	1	1	1
Dimensions	Largeur (m)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
	Longueur (m)	12	12	12	12	12	12
	Hauteur/Épaisseur (m)						
	Volume (m3)						
	Surface (m²)	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
Impact carbone	kgCO2/unité	8,83	1,47	28,7	2,27	1,2	42,9
	Impact carbone : kgCO2 émis	349,668	58,212	1136,52	89,692	47,52	1698,84
	Total carbone	3380,652					
	Ratio d'importance	10,34%	1,72%	33,62%	2,66%	1,41%	50,25%
SCENARIO 5							
Nature	Grandeur de définition	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre	metre_carre
	Matériaux	Pare_vapeur_en_polypropylène	Cellomur_polystyrène	Plaque_fibre_gypse	Pare_pluie_en_polypropylène	Mortier_d_enduit_minéral	
	Nombre d'unité	1	1	1	1	1	1
Dimensions	Largeur (m)	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
	Longueur (m)	12	12	12	12	12	12
	Hauteur/Épaisseur (m)						
	Volume (m3)						
	Surface (m²)	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
Impact carbone	kgCO2/unité	1,47	14	27,6	1,2	8,73	
	Impact carbone : kgCO2 émis	58,212	554,4	1092,96	47,52	345,708	
	Total carbone	2098,8					
	Ratio d'importance	2,77%	26,42%	52,08%	2,26%	16,47%	

Figure 13. Extrait de la traduction de scénarios par l'outil

### Comparaison scénarii

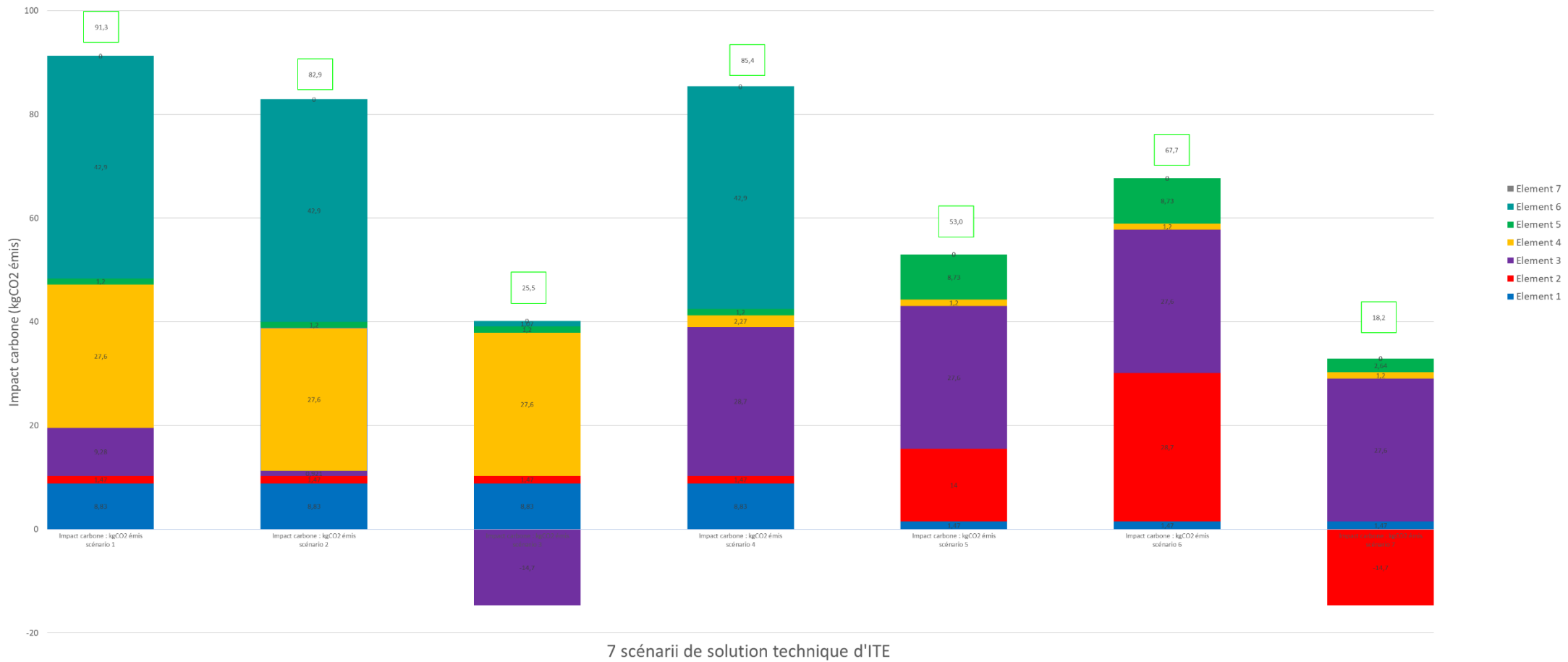


Figure 14. Descriptif des impacts carbone de 7 scénarii de solution technique de façade avec totaux des impacts carbone

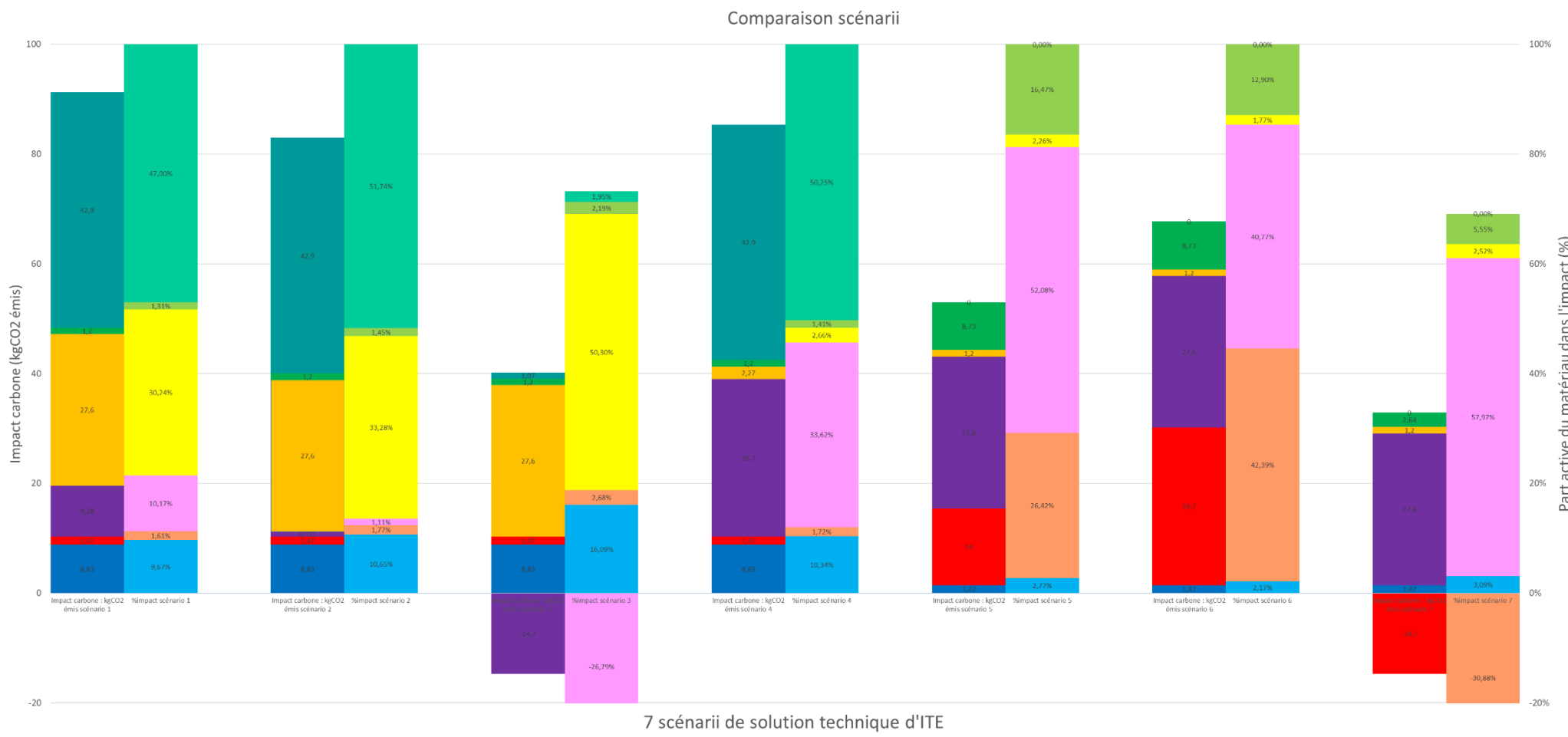


Figure 15. Descriptif des impacts carbone de 7 scénarii de solution technique de façade, pour 1m<sup>2</sup> (histogrammes de gauche foncés), muni de leur pourcentage (histogrammes de droite clairs)

### Comparaison scénarii

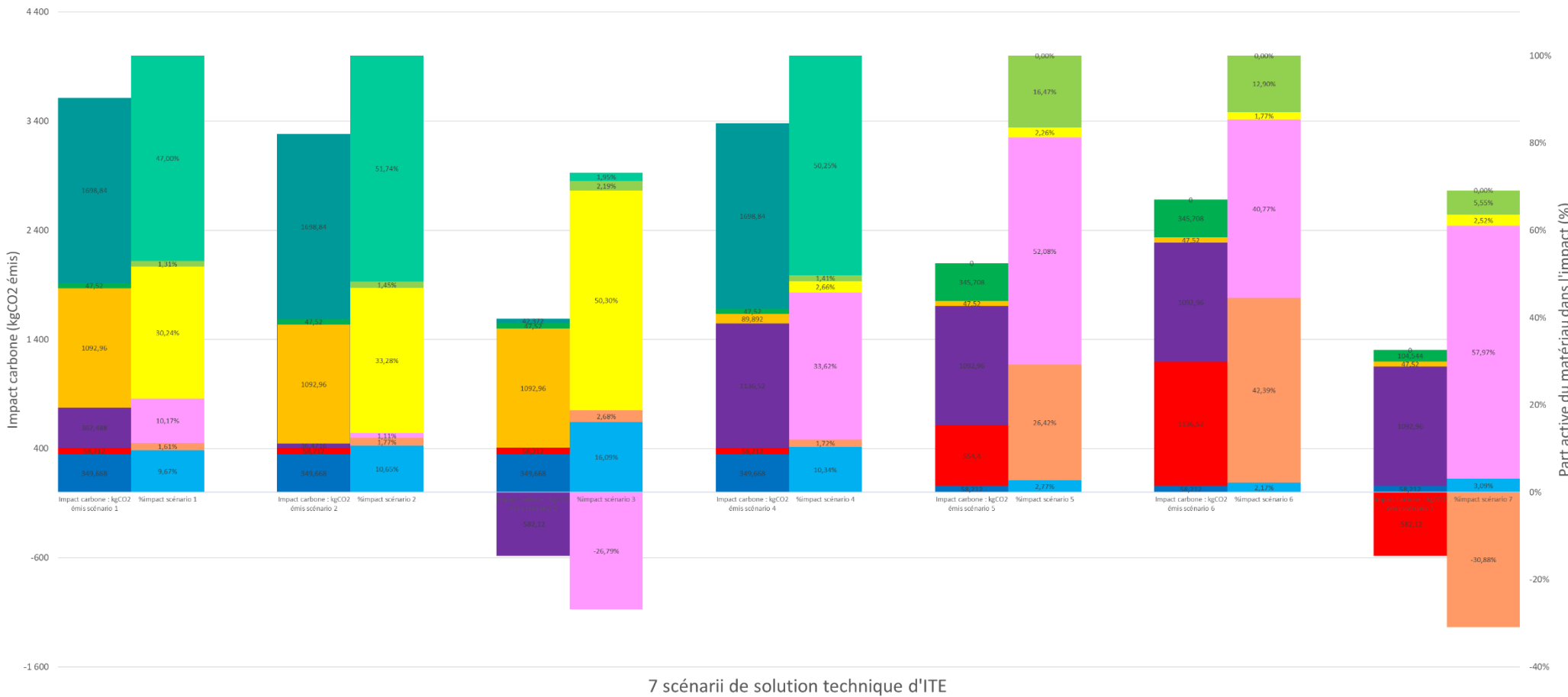


Figure 16. Descriptif des impacts carbone de 7 scénarii de solution technique de façade (histogrammes de gauche foncés), muni de leur pourcentage (histogrammes de droite clairs)

Il est à noter qu'un des leviers de décision sur le choix des matériaux est celui de la temporalité de l'impact carbone. En effet, dans une FDES, l'impact carbone est décomposé temporellement, selon les étapes de vie de l'élément. Ces impacts temporels traduisent les phénomènes physiques de l'élément lors de sa vie. Il est alors intéressant de représenter graphiquement ces impacts temporels dans un diagramme de flux, permettant à la maîtrise d'ouvrage d'observer comment se décompose l'impact carbone de sa solution technique, selon les éléments mis en jeu et leur temporalité carbone.

Ces diagrammes de flux sont des diagrammes de Sankey, la méthodologie de ce type de diagramme permet de sommer les flux, ici les flux d'impact carbone, selon la période du cycle de vie. Cependant, par définition, on ne peut sommer dans ces diagrammes les impacts carbone positifs et négatifs entre eux. Dès lors, par scénario, on réalise un diagramme de flux des impacts carbone (positifs) et un diagramme de flux des gains carbone (impacts négatifs).

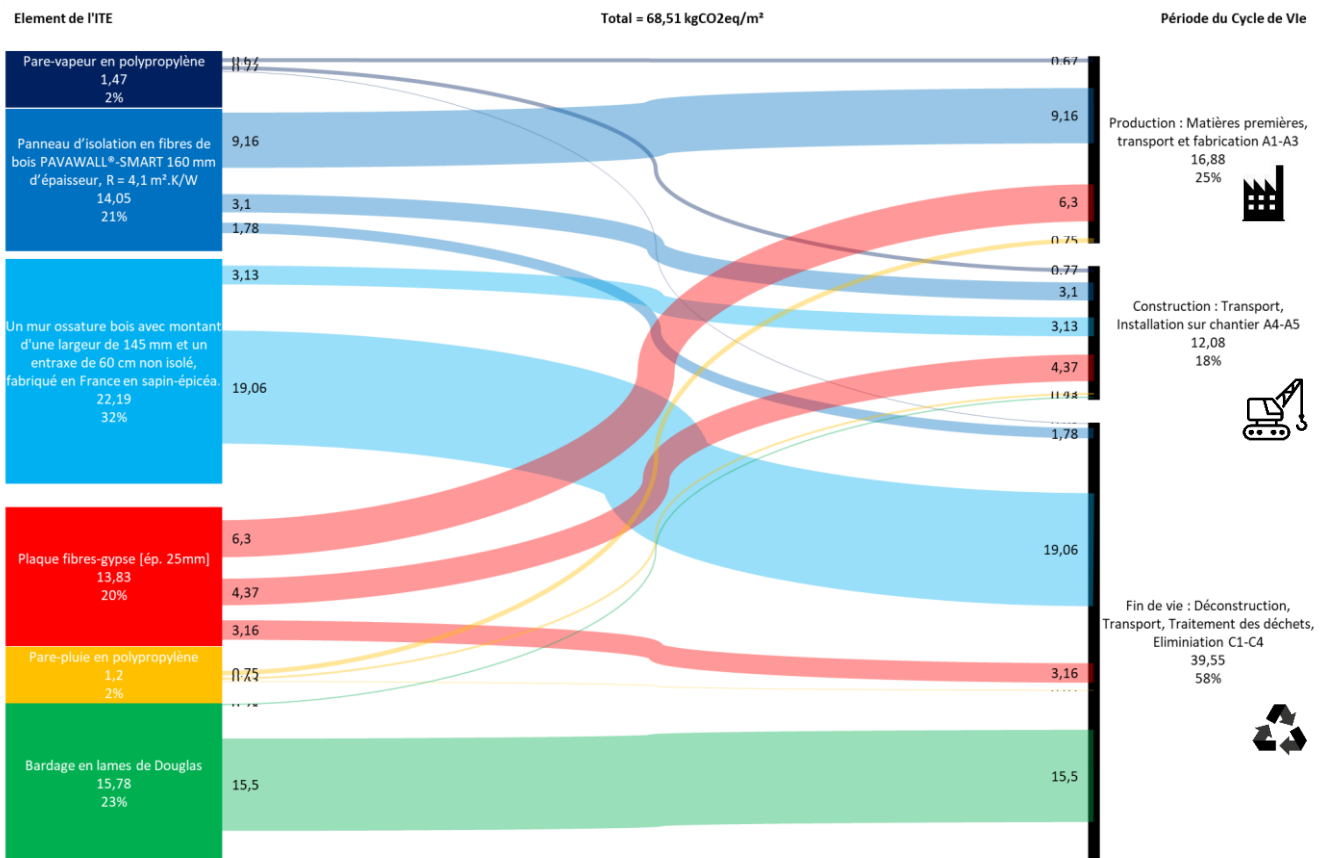


Figure 17. Diagramme de flux d'impact carbone d'1 m² de solution technique en Mur à Ossature Bois (MOB), laine de bois et bardage en bois.

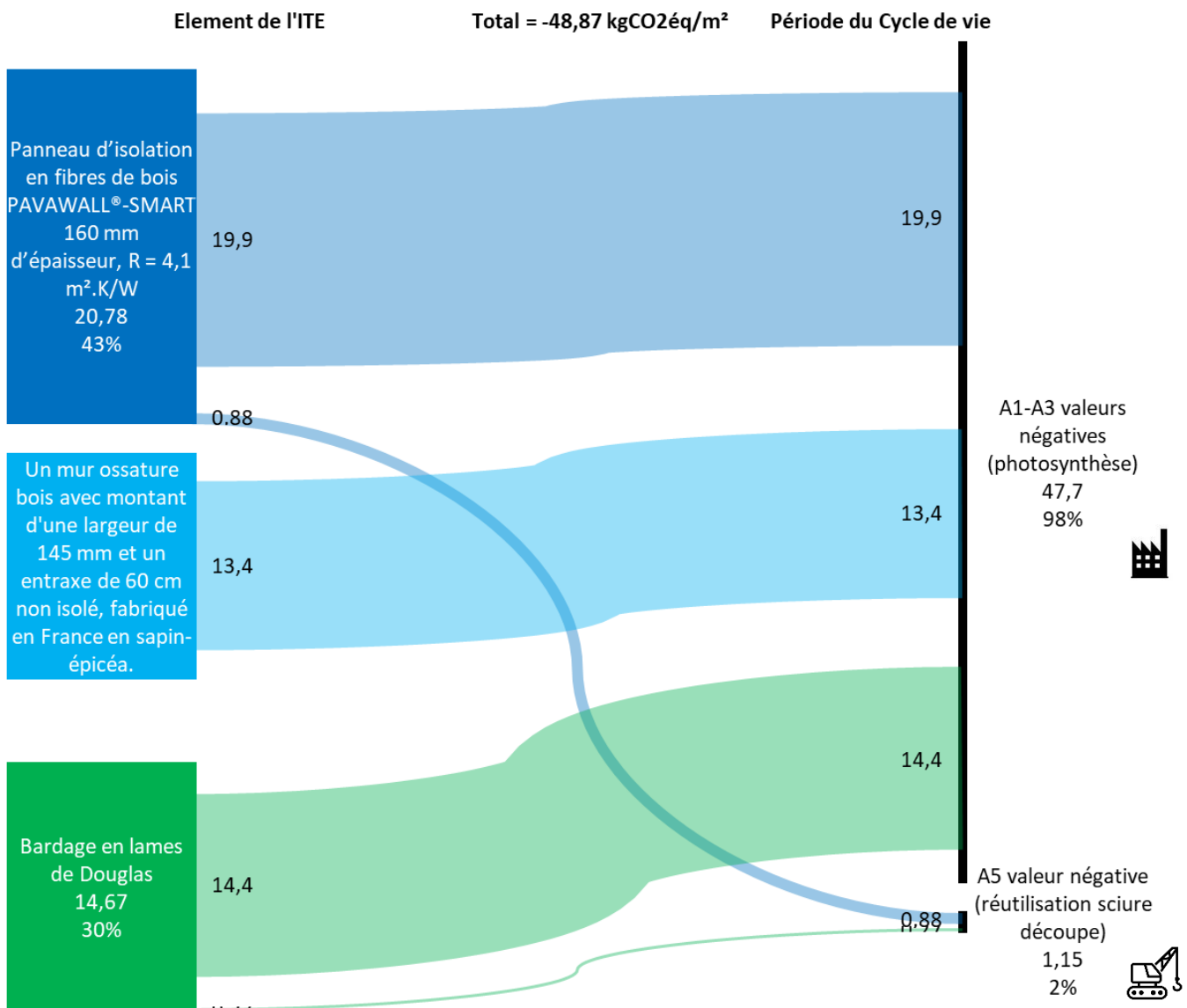


Figure 18. Diagramme de flux de gains carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, laine de bois et bardage en bois.

La lecture de ces diagrammes fonctionne de la même manière. A gauche se trouvent les éléments de la solution technique proposée, à droite se trouvent les étapes de vie comprenant un impact carbone non nul (c'est pourquoi une majeure partie des modules est absente de ces diagrammes). Les flux carbone décrivent la distribution selon les étapes de vie des impacts carbone de chaque élément.

Il est alors obligatoire d'observer ces deux diagrammes en simultanément, illustrant l'impact des transports de matière, des phénomènes physiques (photosynthèse, carbonatation du béton) et du rythme carbone des éléments. Par exemple, le bardage en lames de Douglas est un puits de carbone fort en début de vie, du fait de l'essence du Douglas. Cependant, étant biosourcé, ce bardage relâchera le carbone emmagasiné lors de sa fin de vie et destruction (généralement par combustion).

Ainsi, l'aide à la décision se fait en mettant en exergue les flux les plus épais, soit les impacts carbone les plus importants. La maîtrise d'ouvrage peut alors décider le remplacement de l'élément dans le scénario, voire le changement du scénario.

S'il persiste des difficultés de lecture par la maîtrise d'ouvrage, il est possible de juxtaposer à ces diagrammes le graphe suivant, plus classique.

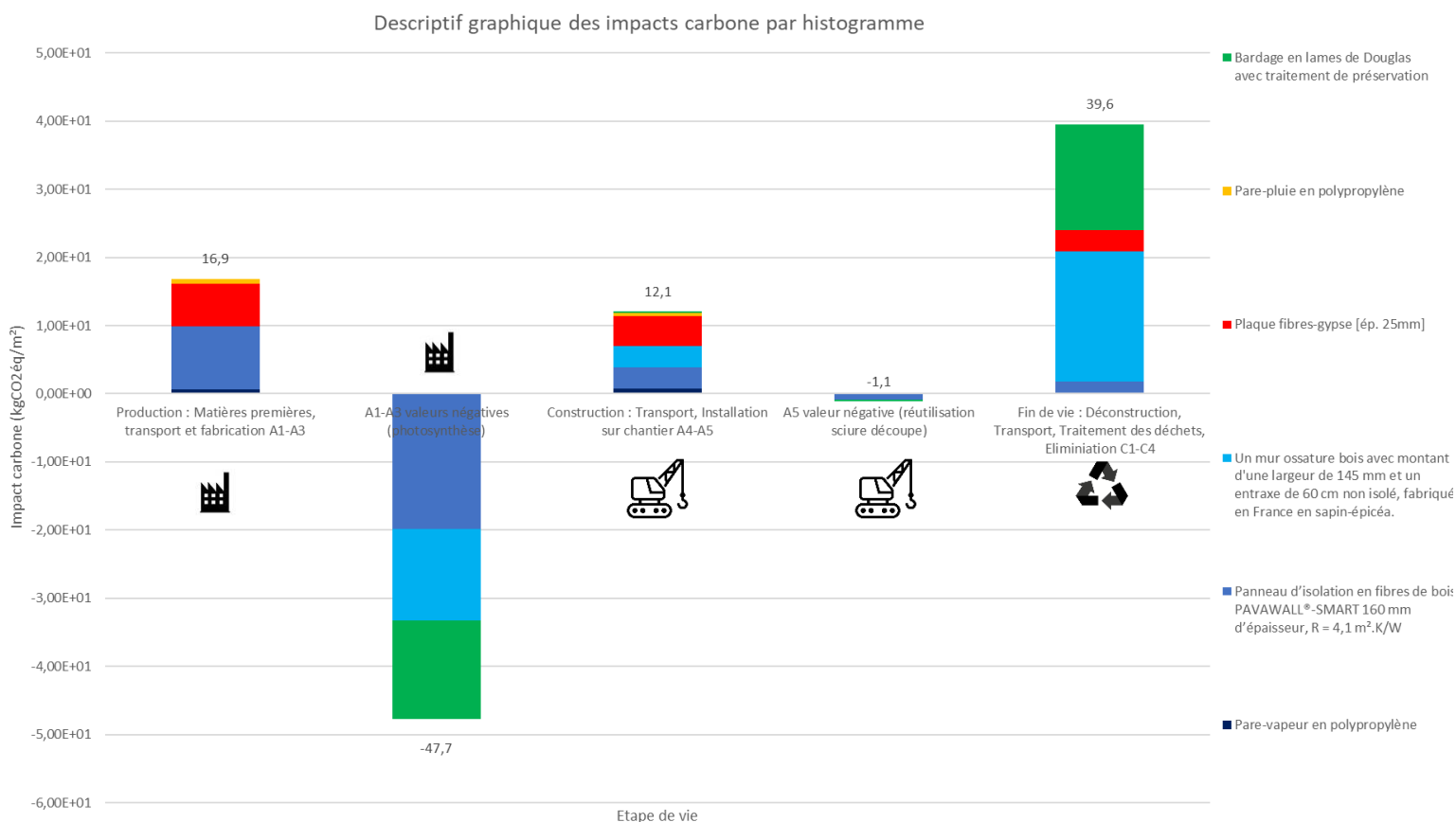


Figure 19. Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, laine de bois et bardage en bois.

Du fait d'une grande variabilité quant aux valeurs des impacts carbone (de 10<sup>-2</sup> à 10<sup>2</sup> dans le cas général), un faible impact carbone peut s'avérer illisible sur un histogramme, ce qui justifie l'utilisation de flux, dont la lisibilité est indépendante de la valeur associée. Enfin, on remarque qu'en sommant les totaux positifs et négatifs, on retrouve l'impact carbone total de la solution technique (p41).

## 3. Cas d'application à Saint Priest : une réhabilitation durable ?

### 3.1 Présentation de l'opération

#### 3.1.1 Contexte du projet

Est Métropole Habitat, organisme HLM rattaché à Grand Lyon la Métropole, est un bailleur social qui gère plus de 16 000 logements sur les communes de l'Est de la métropole.

Est Métropole Habitat souhaite lancer une opération de réhabilitation de 930 logements collectifs dans le quartier de Bel Air à Saint Priest. Cette volonté s'inscrit dans une stratégie à plus grande échelle d'Est Métropole Habitat d'améliorer le cadre de vie et le confort de ses locataires, tout en s'inscrivant dans la trajectoire d'amélioration de l'empreinte environnementale de son parc immobilier pour répondre, en tant qu'acteur public, aux enjeux européens et nationaux (à savoir la Stratégie Nationale Bas-Carbone, feuille de route de la France pour lutter contre le changement climatique visant la neutralité carbone en 2050), ainsi qu'à leurs retranscriptions à l'échelle de la Métropole de Lyon. À noter que ces enjeux ont été repris et amplifiés par l'État dans le cadre du Plan de Relance « France Relance », dans lequel s'inscrit cette opération.

Ces enjeux, pour répondre à l'urgence de réduire les émissions de gaz à effet de serre de ce secteur, impliquent une accélération et une massification de la rénovation énergétique, d'où le changement d'échelle initié par Est Métropole Habitat lors de l'opération de réhabilitation de 1000 logements dans le quartier du Mas du Taureau, à Vaulx-en-Velin. Ce changement d'échelle s'inscrit par ailleurs dans une approche à l'échelle européenne au travers du programme Energie Sprong. Il s'agira ainsi, de continuer de faire évoluer cette massification, fort du retour d'expérience d'Est Métropole Habitat sur la première opération pilote au Mas du Taureau, dans une démarche d'innovation et d'amélioration continue, propre aux valeurs d'Est Métropole Habitat.

Au-delà de la nécessité d'aller vite en industrialisant la rénovation thermique via le recours à des murs préfabriqués, il s'agit bien entendu de limiter l'impact et les nuisances de ces travaux sur les occupants (travaux réalisés en site occupé), et d'en profiter pour améliorer le confort des résidents (amélioration de leur quotidien et baisse de leurs charges locatives), ainsi que l'image et l'architecture de ces grandes ensembles construits dans les années 70.

#### 3.1.2 Objectifs d'Est Métropole Habitat

- **Une réhabilitation de qualité :** Faire une réhabilitation de qualité, architecturalement et techniquement, qui vise à améliorer le confort (pendant et après travaux) et à diminuer les charges des locataires.
- **Massifier la réhabilitation :** Réhabiliter un nombre de logements important (930) dans un délai restreint.

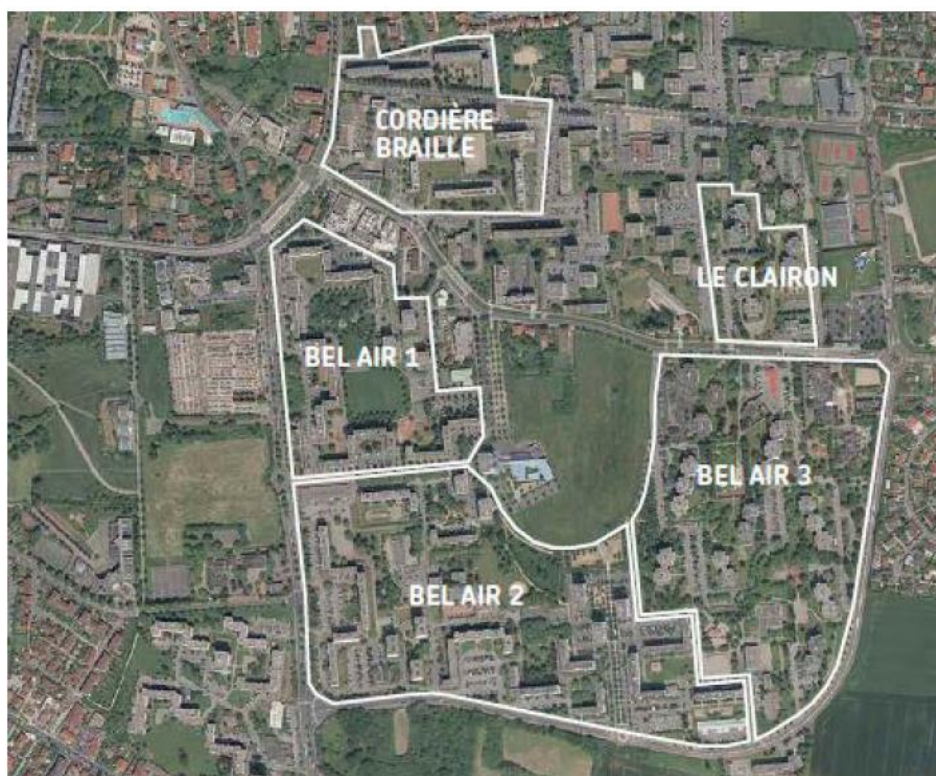


- **Adapter le mode d'organisation :** Expérimenter un mode d'organisation adapté à ce type d'opérations de massification afin de garantir le bon déroulé du projet, pour les équipes en interne, les partenaires et surtout pour les locataires.

## 3.2 Présentation du périmètre

Le plateau de Bel air comprend un quart de la population de la commune de Saint Priest. Construit entre 1968 et 1970, ce quartier de 100 ha regroupe 3 800 logements, dont 2 800 logements sociaux, pour 11 000 habitants.

Le quartier de Bel Air est divisé en 6 sous-quartiers. Bel Air fait partie de la géographie prioritaire de la politique de la ville (QPV) depuis 1989, le périmètre inclut Cordière - Braille, Bel Air 1 et Bel Air 2.



*Figure 20. Plan Guide du quartier Bel Air, Saint-Priest*

Le projet de Bel Air est structurant à l'échelle urbaine pour la ville de Saint Priest et s'inscrit dans un patrimoine existant de près de 3 800 logements représentatif des constructions de logements sociaux des années 70.

### 3.2.1 Périmètre bâtementaire

Les 930 logements à réhabiliter sont localisés sur les sous-quartiers Bel Air 1 et Bel Air 2. Ces logements sont repartis au sein de 8 résidences et représentent au total 28 bâtiments. Ces bâtiments, pour la gestion de son patrimoine, ont été repartis suivant 3 secteurs par Est Métropole Habitat.

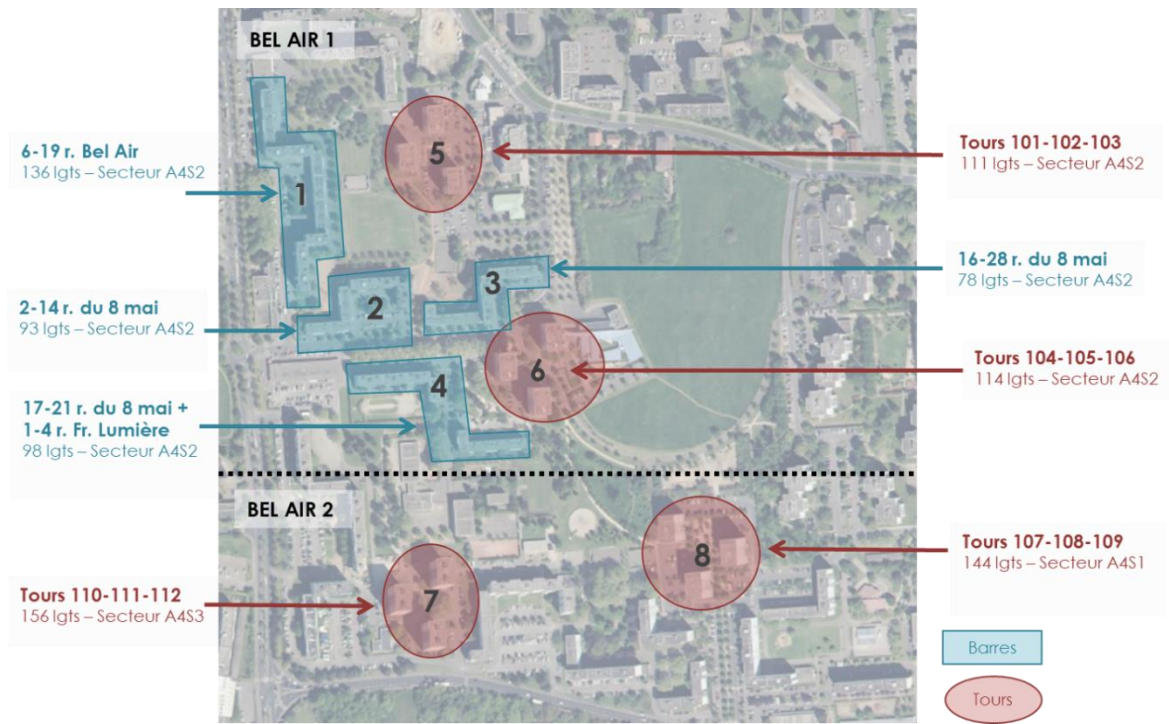


Figure 21. Plan par adresse, secteur et typologie

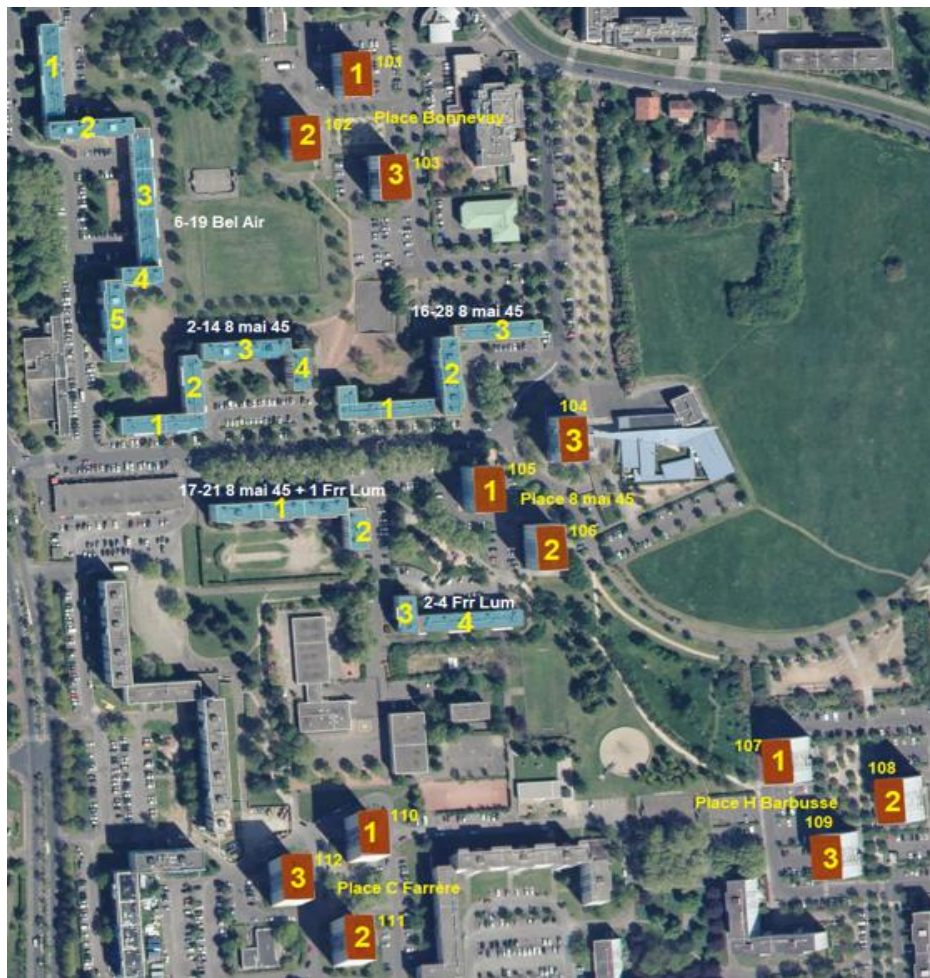


Figure 22. Vue satellite des 28 bâtiments de l'opération



### 3.3 Hypothèses

Les bilans carbone réalisés fondent leur calcul sur la méthodologie d'ACV statique, du fait de la méthodologie de l'outil.

Il a été énoncé plus haut qu'il est aisé de comparer cette opération avec son opération test mère : la réhabilitation de 1000 logements au Mas du Taureau à Vaulx-en-Velin. Ainsi, l'entreprise VOXOA Conseils ayant été Assistant à la Maîtrise d'ouvrage pour EMH sur cette opération, il a été possible de récupérer les plans de coupe des façades proposées en phase d'Avant-Projet Défini.

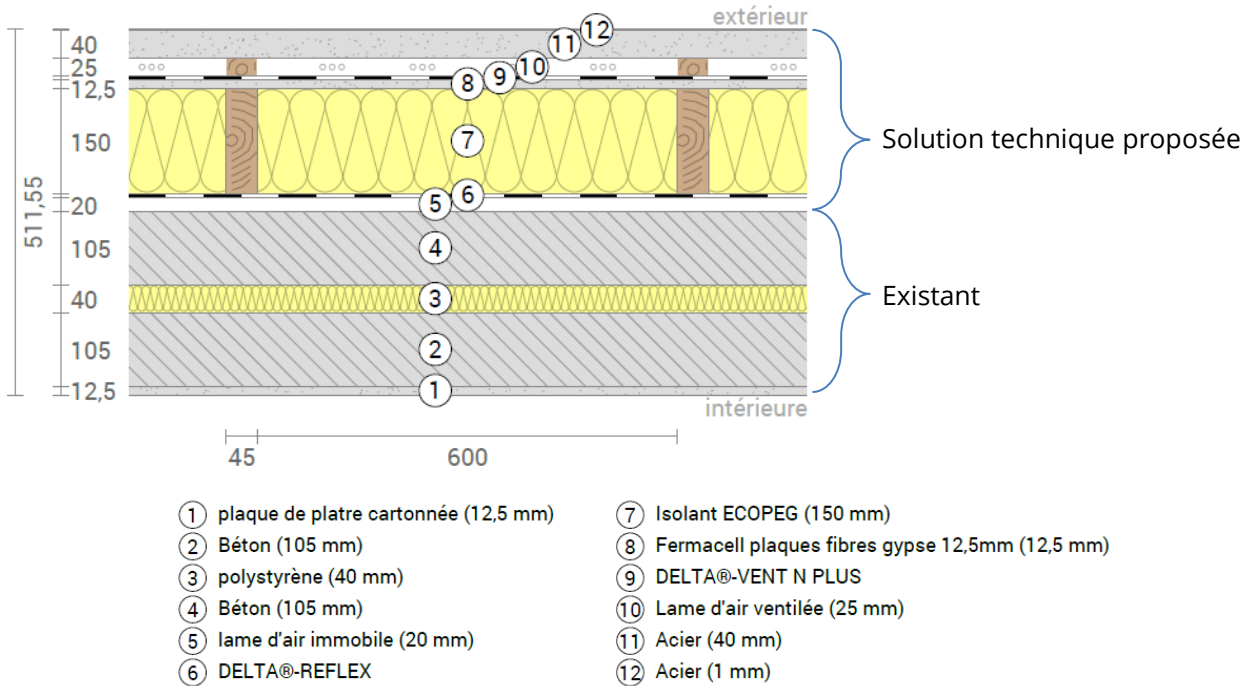


Figure 23. Plan en coupe d'une solution technique proposée en MOB, pour l'opération du Mas du Taureau

Ainsi, sur un mur existant typique des années 70, on retrouve une plaque de plâtre cartonnée (1), une première épaisseur de béton (2), un isolant en polystyrène (3) et une seconde couche de béton (4). Au total, l'existant est formé d'un mur en béton comprenant un isolant polystyrène en son âme et un revêtement intérieur en plâtre.

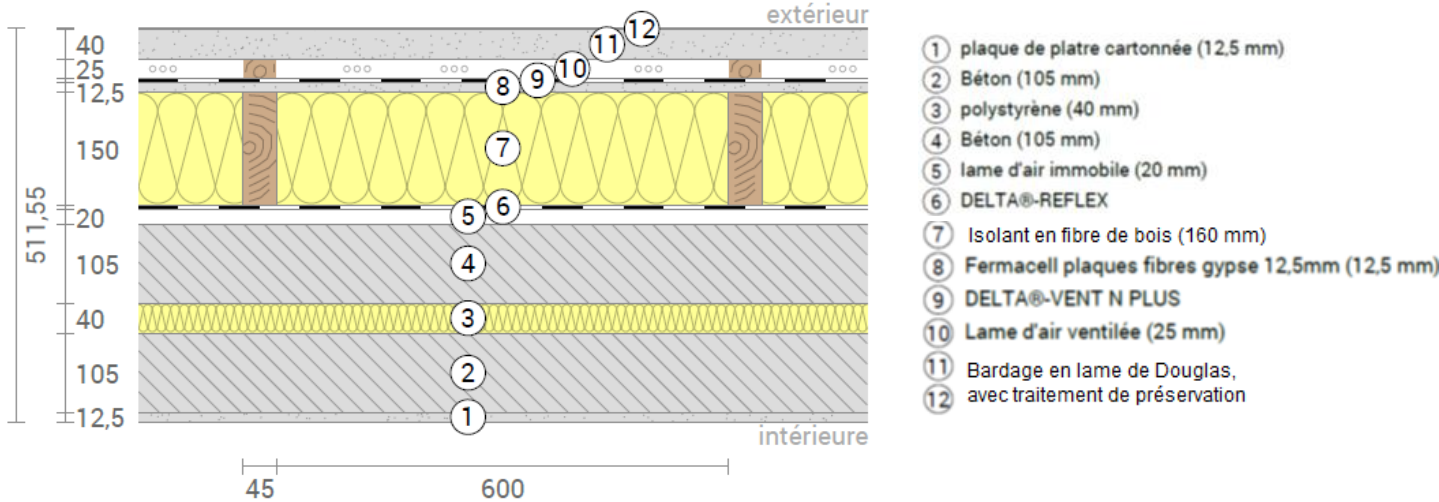
De plus, lors de sondages sur le territoire de Saint-Priest, et en particulier des sondages amiante en façades, il a été découvert par le prestataire diagnostiqueur amiante que les existants comportaient une composition semblable à celle des façades de l'opération au Mas du Taureau. En effet, il a été trouvé intégré dans les murs une lame d'air de 2cm dans laquelle se retrouve une couche de polystyrène non fixée au béton.

L'hypothèse de prendre la même base pour les murs existants, et donc pour les solutions techniques de réhabilitation thermique existe par ce constat.

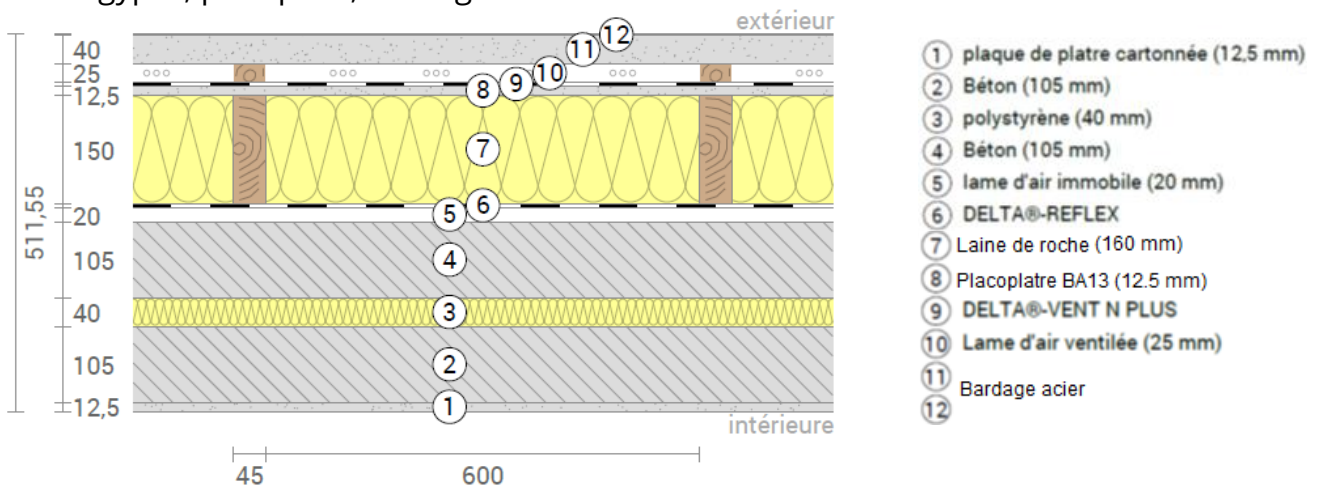
### 3.3.1 Définition des modèles

Un groupe de 5 modèles différents de MOB et d'ITE ont été sélectionnés pour l'étude. Leur composition se trouve juste en dessous :

- ❖ **Modèle 1 : MOB type biosourcé** : une option biosourcée à base de fibre de bois/bardage bois définie par 6 FDES : MOB, pare-vapeur, isolant, plaque de fibre de gypse, pare pluie, bardage bois



- ❖ **Modèle 2 : MOB type classique** : un MOB avec comme isolant soit laine de roche (160 mm), défini par 6 FDES : MOB, pare-vapeur, isolant, plaque de fibre de gypse, pare pluie, bardage acier



- ❖ **Modèle 3 :** ITE classique type polystyrène expansé Cellomur (160 mm) avec enduit minéral extérieur. Ce modèle correspond à une ITE avec pare vapeur et pare pluie, plaque de fibre de gypse, isolant et enduit minéral extérieur, soit défini par 5 FDES

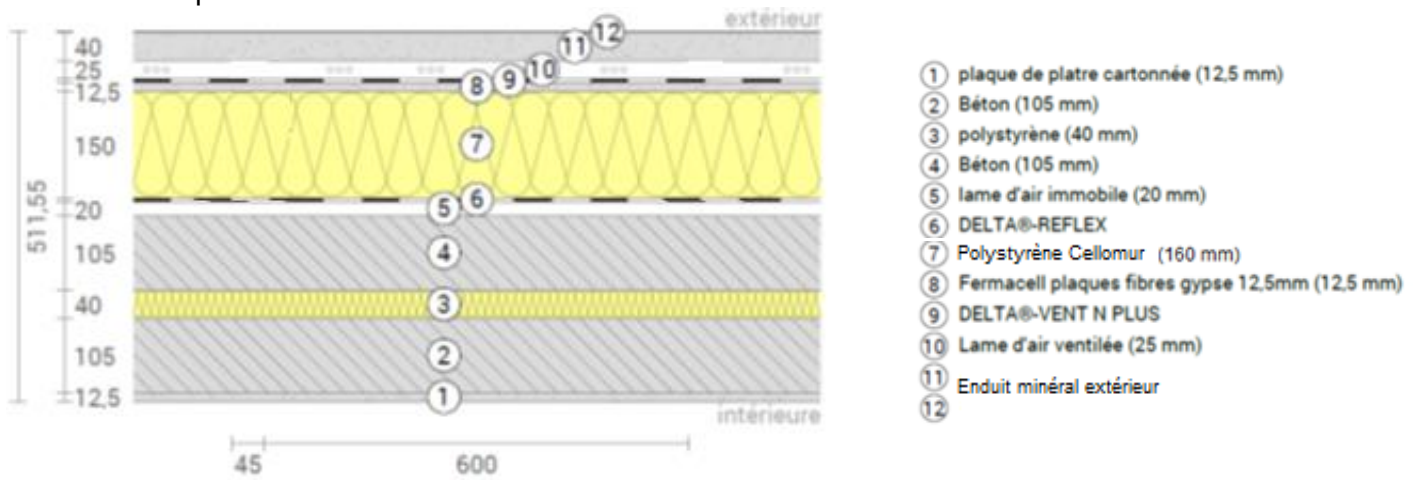


Figure 26. Plan en coupe du Modèle 3 proposé en ITE

- ❖ **Modèle 4 :** ITE classique type laine de roche (160 mm) avec enduit minéral extérieur. Ce modèle correspond à une ITE avec pare vapeur et pare pluie, plaque de fibre de gypse, isolant et enduit minéral extérieur, soit défini par 5 FDES

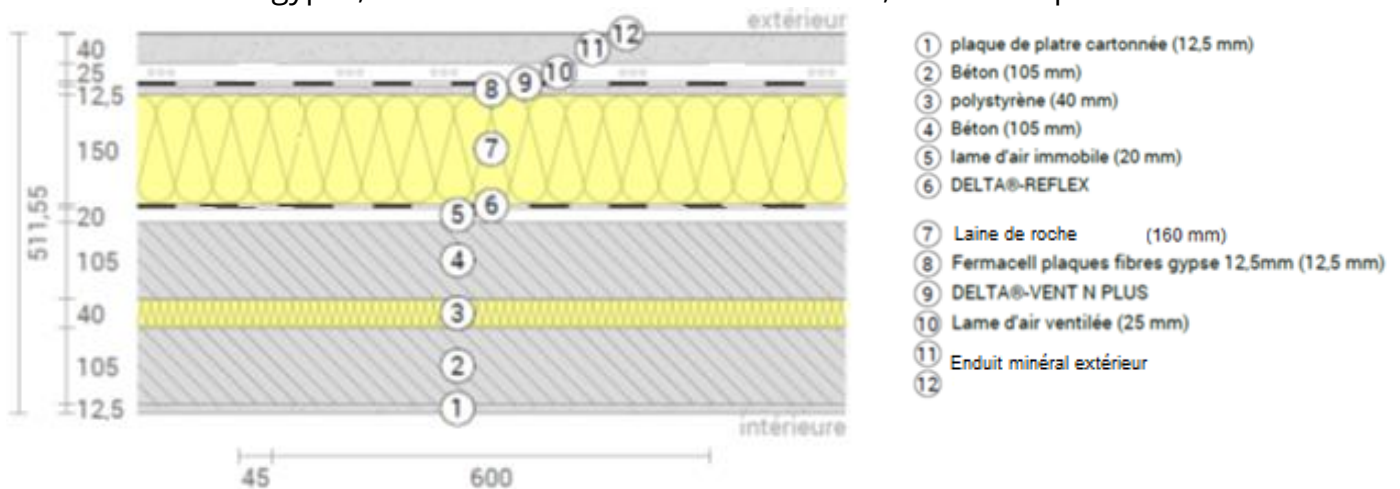


Figure 27. Plan en coupe du Modèle 4 proposé en ITE

- ❖ **Modèle 5 : ITE type biosourcée** : option avec panneaux de fibre de bois (160 mm) et enduit minéral extérieur. Ce modèle correspond à une ITE avec pare vapeur et pare pluie, plaque de fibre de gypse, isolant et enduit minéral extérieur, soit défini par 5 FDES

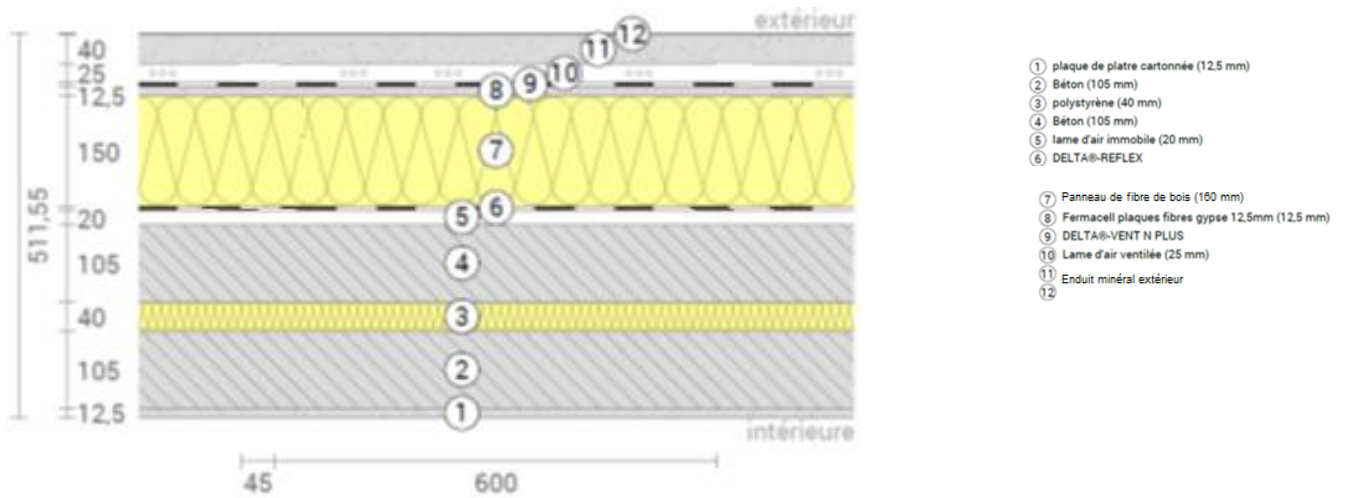


Figure 28. Plan en coupe d'une solution technique proposée en MOB, pour l'opération du Mas du Taureau

Chaque solution technique proposée se voit attribuer un impact carbone au m<sup>2</sup> :

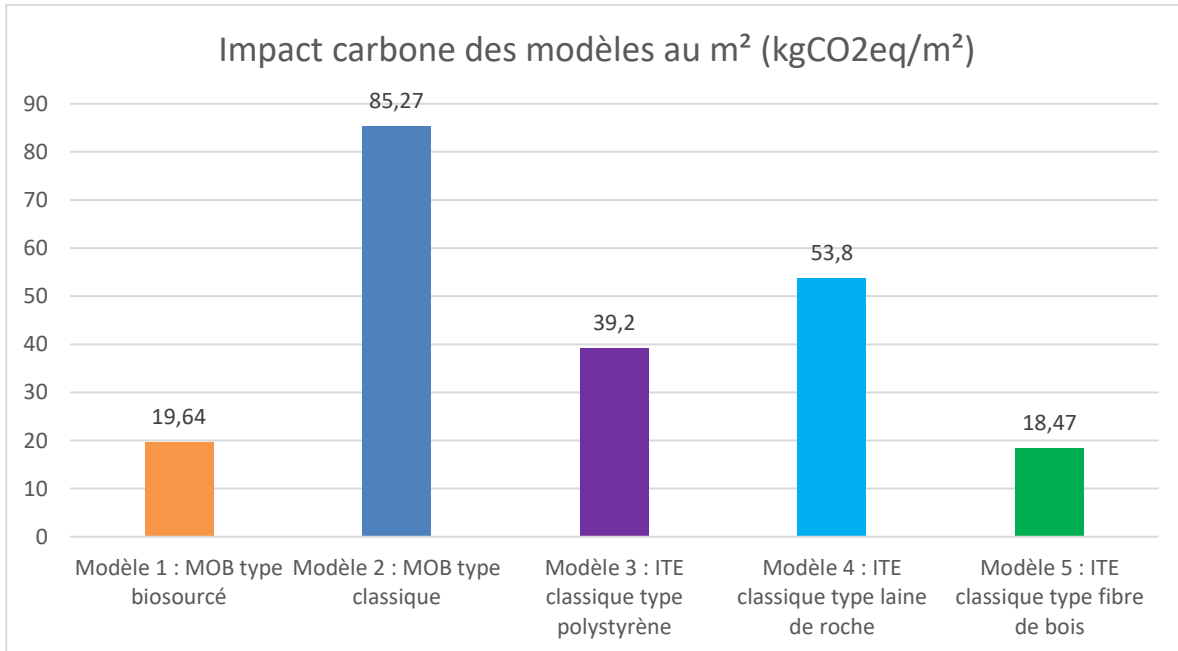


Figure 29. Impact carbone des modèles au m<sup>2</sup>

Dès la définition des modèles, on observe un impact carbone dû à la laine de roche très important, quasi le double d'une autre solution classique en polystyrène. Les panneaux de fibre de bois quant à eux ont un impact carbone négatif, ce qui justifie le faible impact carbone d'1 m<sup>2</sup> de MOB dit biosourcé ou d'1 m<sup>2</sup> d'ITE dite biosourcée

### 3.3.2 Définition des scénarios

Le bilan carbone a alors été calculé pour plusieurs combinaisons de ces modèles, soient les scénarios suivants :

- Scénario 50% ITE / 50% MOB avec remplacement 100% MEX,
  - Option avec isolant biosourcé
- Scénario 70% ITE / 30% MOB avec remplacement 100% MEX
  - Option avec isolant biosourcé
- Scénario 70% MOB / 30% ITE avec remplacement 70% MEX
  - Option isolant biosourcé
- Scénario 90% MOB / 10% ITE avec remplacement 10% MEX
  - Option isolant biosourcé

### 3.4 Analyse des résultats

Ci-dessous se trouvent les résultats des bilans carbone des différents scénarios :

	MOB et ITE en laine de roche (kgCO <sub>2</sub> eq)	MOB en laine de roche et ITE en polystyrène (kgCO <sub>2</sub> eq)	Option biosourcé : MOB et ITE en fibre de bois (kgCO <sub>2</sub> eq)
Scénario 1 : 50% ITE+50% MOB	2 941 268	2 495 968	862 845
Scénario 2 : 70% ITE+30% MOB	3 077 481	2 454 061	968 375
Scénario 3 : 30% ITE+70% MOB	2 805 055	2 537 875	757 315
Scénario 4 : 10% ITE+90% MOB	2 668 842	2 579 782	651 785

Tableau 2. Total des bilans carbone des différents scénarios

Afin d'avoir des ordres de grandeurs parlant, les impacts carbone sont ramenés au m<sup>2</sup> de façade concerné

	MOB et ITE en laine de roche (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> de façade)	MOB en laine de roche et ITE en polystyrène (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> de façade)	Option biosourcé : MOB et ITE en fibre de bois (kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> de façade)
Scénario 1 : 50% ITE+50% MOB	49,4	41,9	14,5
Scénario 2 : 70% ITE+30% MOB	51,6	41,2	16,3
Scénario 3 : 30% ITE+70% MOB	47,1	42,6	12,7
Scénario 4 : 10% ITE+90% MOB	44,8	43,3	10,9

Tableau 3. Total des bilans carbone des différents scénarios, ramenés au m<sup>2</sup> de façade

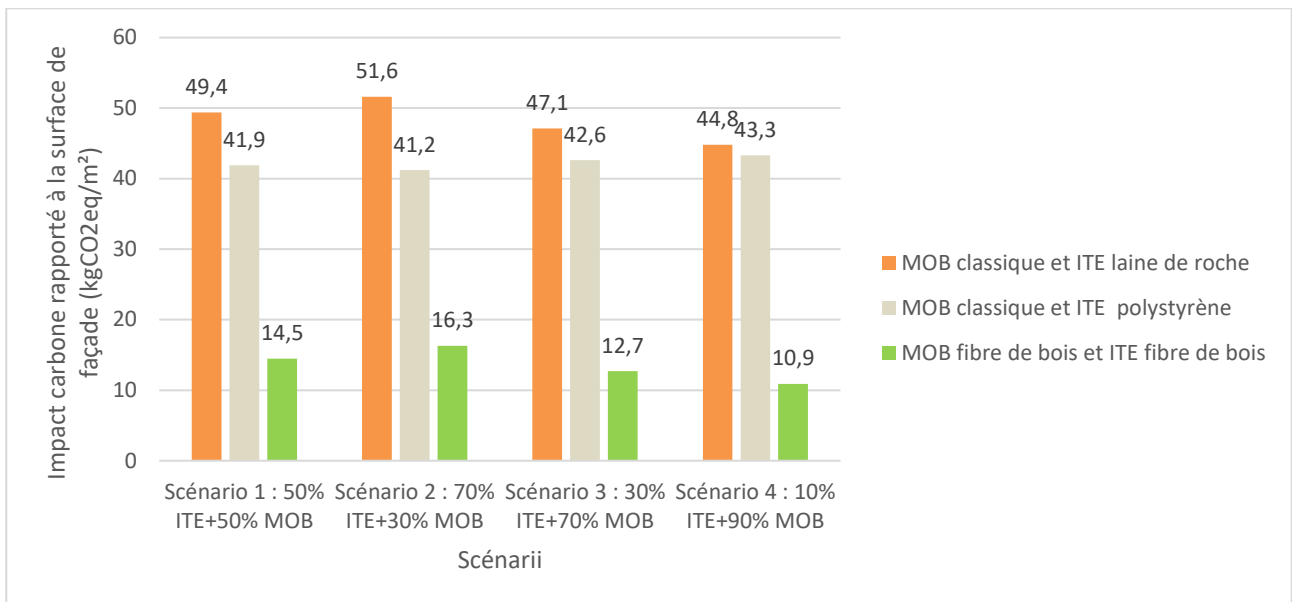


Figure 30. Total des impacts carbone des différents scénarios, rapporté à la surface de façade concernée

Les résultats obtenus sont en cohérence avec les définitions des modèles plus haut.

On remarque un gain sur le bilan carbone de 30 à 35 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> de façade si l'on considère l'option biosourcée sur les solutions techniques classiques.

Dans les cas dits classiques : du fait de son épaisseur, c'est l'isolant qui est le plus déterminant dans les comparatifs entre laine de roche et polystyrène expansé. Ensuite ce sera le revêtement le plus déterminant, notamment du fait du type de matériau (source minérale et métallique). Néanmoins, c'est dans ces catégories où l'on retrouve une aisance sur le choix des matériaux, alors le choix du matériau est un réel levier quant au bilan carbone.

Malgré son impact carbone séduisant et sa faible transformation, le bois utilisé en structure dans les MOB compense à peine les forts impacts des isolants. C'est notamment sous la forme de bardage bois et d'isolant, dans le scénario biosourcé, que son gain carbone (justifié par la photosynthèse lors de la création de la matière première du matériau) est le plus important, que le bois est le plus efficace en termes de puits de carbone, et ce malgré une transformation de la matière première plus lourde.

En moyenne, préférer le biosourcé revient à économiser 1800 tonnes de CO<sub>2</sub>eq, soit l'équivalent de plus de 6 trajets Paris-New York d'un avion, plein de 88 passagers.



## Mise en perspective, Conclusion, Ouverture

---

Il est intéressant de prendre du recul sur ce qui a été produit. En effet, les outils fonctionnent et renvoient de possibles solutions chiffrées et/ou graphiques quant à un choix pérenne de solution technique bas-carbone. Cependant, il est à confirmer l'intérêt et l'efficacité de l'outil graphique carbone. En effet, il est nécessaire d'avoir un niveau taxonomique non nul et d'avoir des connaissances dans le domaine carbone afin de lire les graphes produits. Dès lors, une nouvelle rythmique dans les missions de support voit le jour pour l'AMO. L'AMO doit tout d'abord communiquer, vulgariser le fonctionnement carbone aux acteurs de la construction qui lui demandent conseils, et ce peu importe leur niveau de connaissances sur le domaine carbone. Même en interne, il est possible que les productions graphiques illustrant les dynamiques carbone des scénarios proposés soient difficiles à appréhender.

C'est tout l'inverse de l'outil de chiffrage carbone. Du fait qu'il utilise la structure d'un outil de chiffrage économique classique, répandu dans le domaine de la construction donc connu des acteurs du secteur, cet outil permet de donner une valeur, une limite sur les impacts carbone d'une opération. La principale force de cet outil est sa simplicité d'exécution et d'utilisation. C'est pourquoi, à termes, il est possible de le développer afin de produire des valeurs numériques d'impacts carbone de lots particuliers, ou de proposer des tranches optionnelles carbone aux scénarios de départ.

Au vu de la production réalisée et au stade de lancement de dynamique bas-carbone, on s'aperçoit des manques que peuvent avoir les outils créés et on devine les développements à venir. Tout d'abord, les bilans carbone effectués sont sur une échelle temporelle d'une DVR (c'est-à-dire au premier cycle de vie des scénarios, sans prise en compte du remplacement de chaque élément des scénarios). Sachant que les FDES des éléments utilisent ne comportent pas tous la même DVR (100 ans pour de la structure bois contre 30 ans pour les pare-pluies, pare-vapeurs), il est à définir pour chaque solution technique et pour chaque scénario la rythmique de remplacement des éléments (en se basant possiblement sur l'étape D de bénéfices et charges hors frontières des FDES). De plus, il est à rappeler que les outils réalisés sont statiques temporellement et utilisent la méthodologie de calcul de l'ACV statique. Afin de s'approcher de la méthodologie de la RE2020, il serait intéressant de produire des outils prenant en compte la pondération temporelle des impacts carbone.

Considérer la temporalité des impacts peut s'avérer être le futur nerf de la guerre des calculs carbone. Observer le comportement des molécules de GES (phénomènes de consommation de GES dans l'air) permet de fixer une distribution temporelle itérative des impacts carbone d'un scénario. Si l'on peut définir pendant la DVR l'intégralité de l'évolution des EGES d'un scénario, croiser ces données avec le comportement chimique des molécules de GES permet de connaître à l'avance sur quelle durée le scénario aura un impact [18]. Dès lors, on saura à partir de combien de décennies le projet n'aura plus d'impact environnemental.

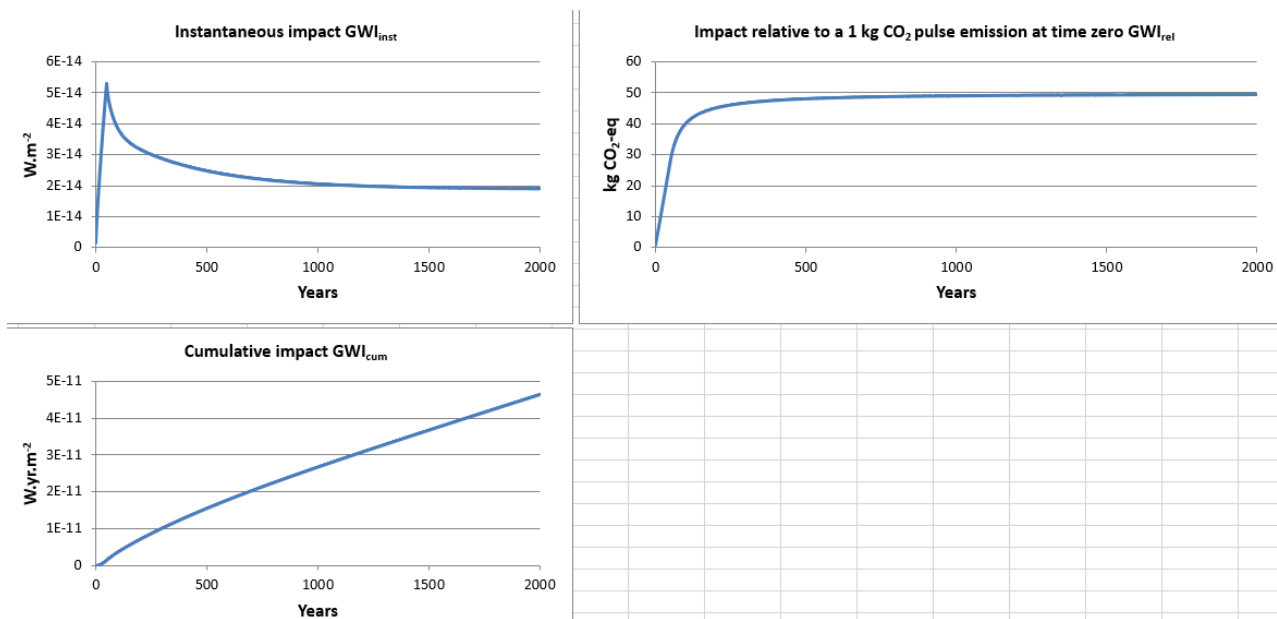


Figure 31. Impacts instantané, cumulatif et relatif à 1 kgCO<sub>2</sub> d'une émission d'1 kg CO<sub>2</sub> pendant 50 ans

Le graphe en haut à gauche correspond au forçage radiatif (variation de l'énergie transmise à l'atmosphère causée par des facteurs de forçage comme le réchauffement climatique) instantané, sans prise en compte des conséquences des années précédentes sur ce forçage. Le graphe en bas à gauche quant à lui correspond au forçage radiatif cumulatif itératif, prenant en compte le cercle vicieux des phénomènes physiques des GES et les évolutions lors des années précédentes. Enfin le graphe en haut à droite correspond au forçage radiatif cumulatif rapporté à celui d'1kgCO<sub>2</sub>, c'est pourquoi il tend vers 50 kgCO<sub>2</sub>éq (1 kg de CO<sub>2</sub> chaque année pendant 50 ans).

La réglementation jongle entre deux notions : l'énergie et le carbone, or les outils créés ne considèrent qu'une seule de ces notions. Il existe une évidente corrélation entre la consommation d'énergie et la production d'EGES (notamment via le phénomène de combustion). De plus, interpréter les impacts carbone des process de construction ou de déconstruction, de recyclage, de maintenance d'un produit n'a pas de sens si l'on ne considère pas leurs flux, d'énergie et de matière. Dès lors, créer des outils jumeaux des outils carbone, que seraient des outils d'énergie primaire ou d'énergie grise (sachant que les FDES comporte des données brutes sur l'énergie primaire des process) permettraient de traduire numériquement et graphiquement la réalité du produit dans son intégralité. C'est à ce niveau qu'on peut alors parler de sobriété. [19]

# Bibliographie

---

[1] Liz-Rejane Issberner et Philippe Léna. Anthropocène : les enjeux vitaux d'un débat scientifique [en ligne]. UNESCO, 2018 [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://fr.unesco.org/courier/2018-2/anthropocene-enjeux-vitaux-debat-scientifique>

[2] IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. *World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 pp.*

[3] Construction et performance environnementale du bâtiment [en ligne]. Ministère de la Transition Ecologique, 2020. [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/construction-et-performance-environnementale-du-batiment>

[4] Processus de pilotage. VOXOA. Document interne

[5] Les enjeux énergie et carbone pour le secteur de l'immobilier en France, évolution de la réglementation [en ligne]. Taloen, 2021 [Lecture en 05/2021]. Disponible sur <https://www.taloen.fr/ressources/6b048a57-ca6b-400a-a704-e53864643396>

[6] RE2020 : Une nouvelle étape vers une future réglementation environnementale des bâtiments neufs plus ambitieuse contre le changement climatique [en ligne]. Ministère de la Transition Ecologique, 2020. [Lecture en 07/2021]. Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/re2020-nouvelle-etape-vers-future-reglementation-environnementale-des-batiments-neufs-plus>

[7] La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone, Synthèse [en ligne]. Ministère de la Transition Ecologique, 2020. [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/SNBC-2%20synthe%CC%80se%20VF.pdf>

[8] Le fonctionnement du Label bas-carbone [en ligne]. Ministère de la Transition Ecologique, 2020. [Lecture en 08/2021]. Disponible sur [https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#scroll-nav\\_5](https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone#scroll-nav_5)

[9] Qu'est-ce que l'ACV ? [en ligne]. ADEME, 2018. [Lecture en 05/2021]. Disponible sur <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>

[10] Karibati développe l'outil aKacia [en ligne]. Karibati, 2020. [Lecture en 06/2021] Disponible sur <http://www.karibati.fr/karibatilab/akacia/>

[11] Personnalisez vos Déclarations Environnementales de produits de construction bois [en ligne]. DE Bois, 2020 [Lecture en 06/2021]. Disponible sur <https://de-bois.fr>

[12] Projet Vizcab : développement d'un outil de simulation de l'empreinte carbone du bâtiment [en ligne]. ADEME, 2018 [Lecture en 08/2021]. Disponible sur [https://librairie.ademe.fr/cadic/1982/ipme\\_vizcab.pdf](https://librairie.ademe.fr/cadic/1982/ipme_vizcab.pdf)

[13] Développement durable dans la construction AFNOR/P01E [en ligne]. AFNOR, 2019 [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://norminfo.afnor.org/structure/afnorp01e/developpement-durable-dans-la-construction/1240>

[14] INIES au-delà de la RE2020 [en ligne]. INIES, 2020 [Lecture en 07/2021]. Disponible sur [https://www.inies.fr/wp-content/uploads/2020/07/Barometre-2020\\_16PWEB2.pdf](https://www.inies.fr/wp-content/uploads/2020/07/Barometre-2020_16PWEB2.pdf)

[15] Glossaire équivalent dioxyde de carbone [en ligne]. Eurostat Statistics Explained, 2001 [Lecture en 06/2021]. Disponible sur [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon\\_dioxide\\_equivalent/fr](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Carbon_dioxide_equivalent/fr)

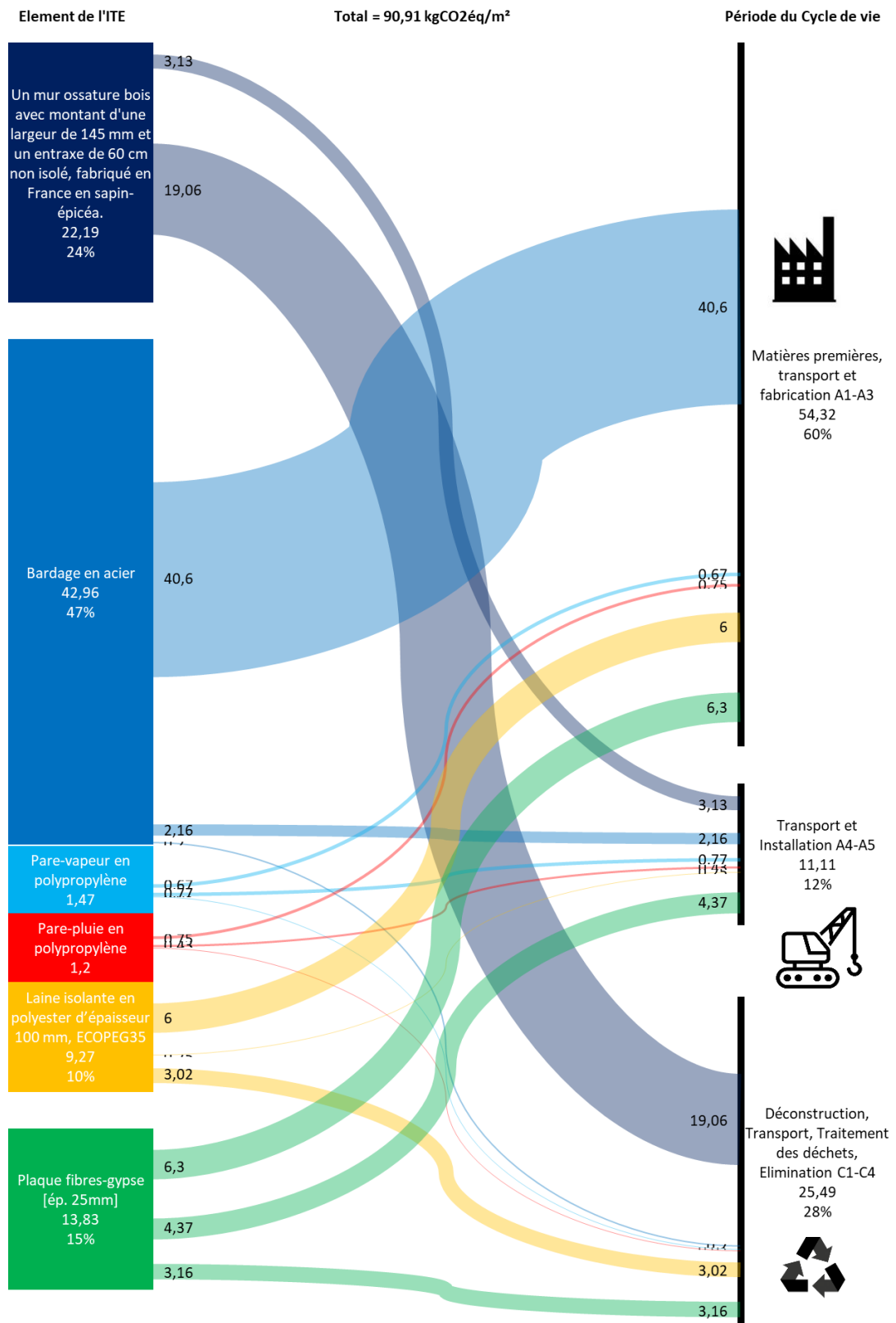
[16] La conception globale de l'enveloppe et l'énergie [en ligne]. Wallonie Energie, 2018 [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://energie.wallonie.be/fr/la-conception-globale-de-l-enveloppe-et-l-energie.html?IDC=9642&IDD=130541>

[17] Quelle est l'empreinte carbone d'un vol en avion ? [en ligne]. Freeze by Carbo, 2021 [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://www.hellocarbo.com/blog/calculer/empreinte-carbone-avion/>

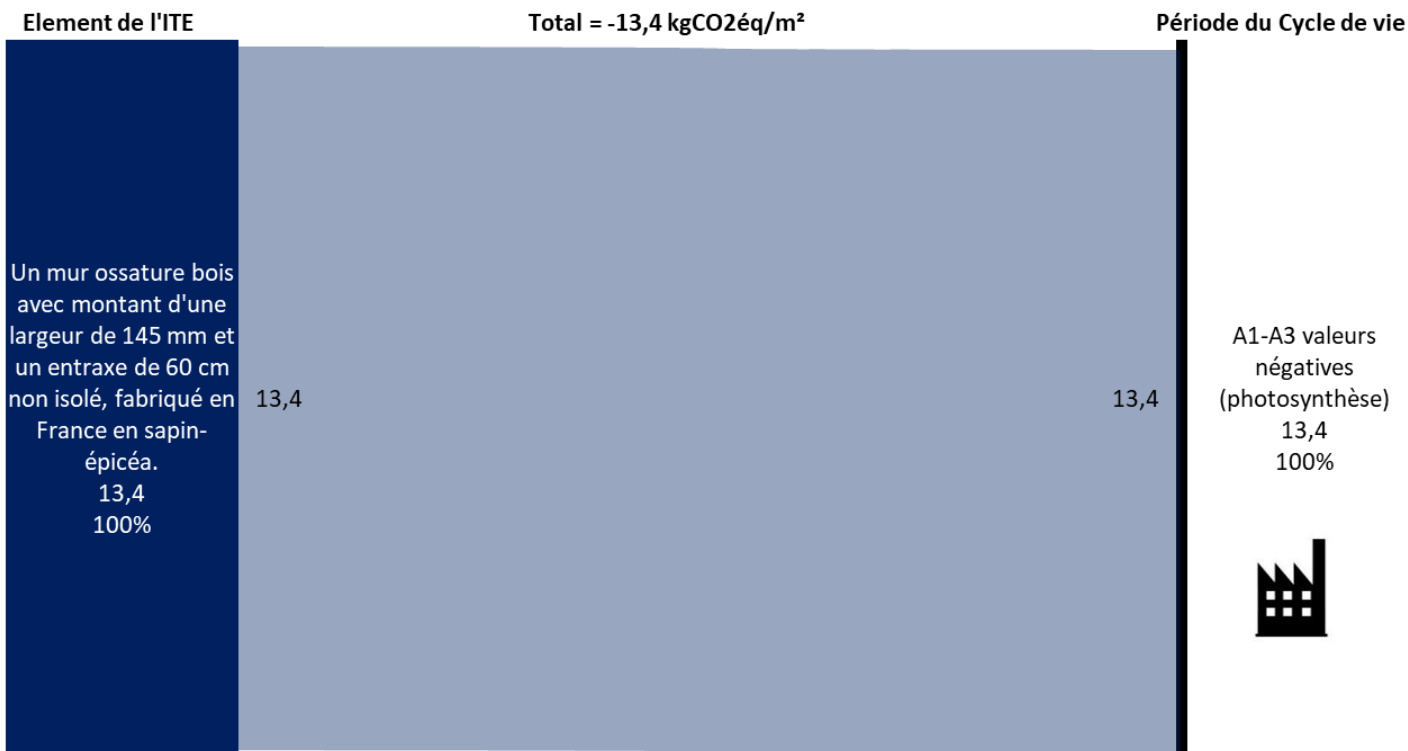
[18] Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. [Annie Levasseur, Pascal Lesage, Manuele Margni, Louise Deschênes, and Réjean Samson]. *Environmental Science & Technology* 2010 44 (8), 3169-3174.

[19] Energie grise vs bilan carbone, faut-il choisir ? [en ligne]. Flores, 2017 [Lecture en 08/2021]. Disponible sur <https://flores-amo.fr/energie-grise-bilan-carbone/>

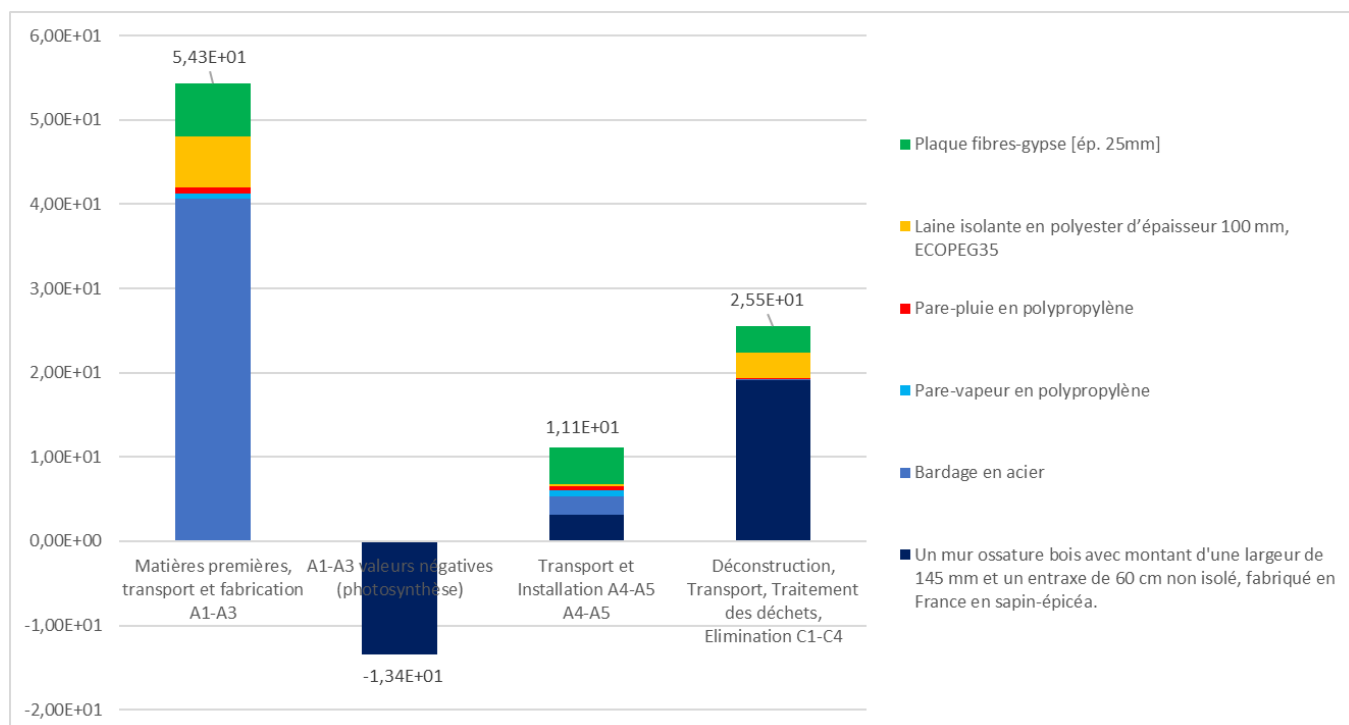
# Annexes



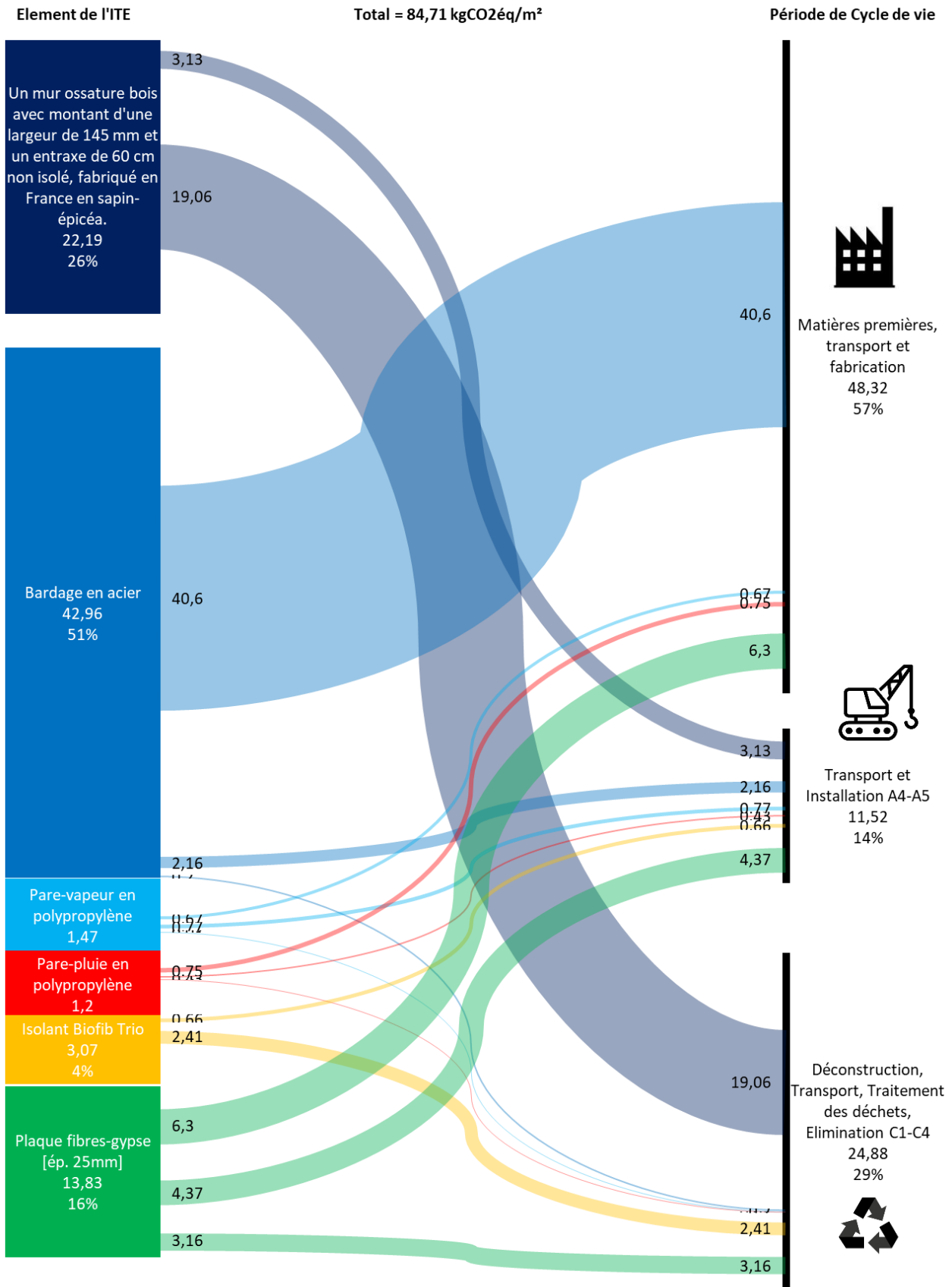
Annexe 1 : Diagramme de flux d'impacts carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant ECOPEG35 (isolant à base de bouteilles en plastique) et bardage en acier.



Annexe 2 : Diagramme de flux de gains carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant ECOPEG35 (isolant à base de bouteilles en plastique) et bardage en acier.

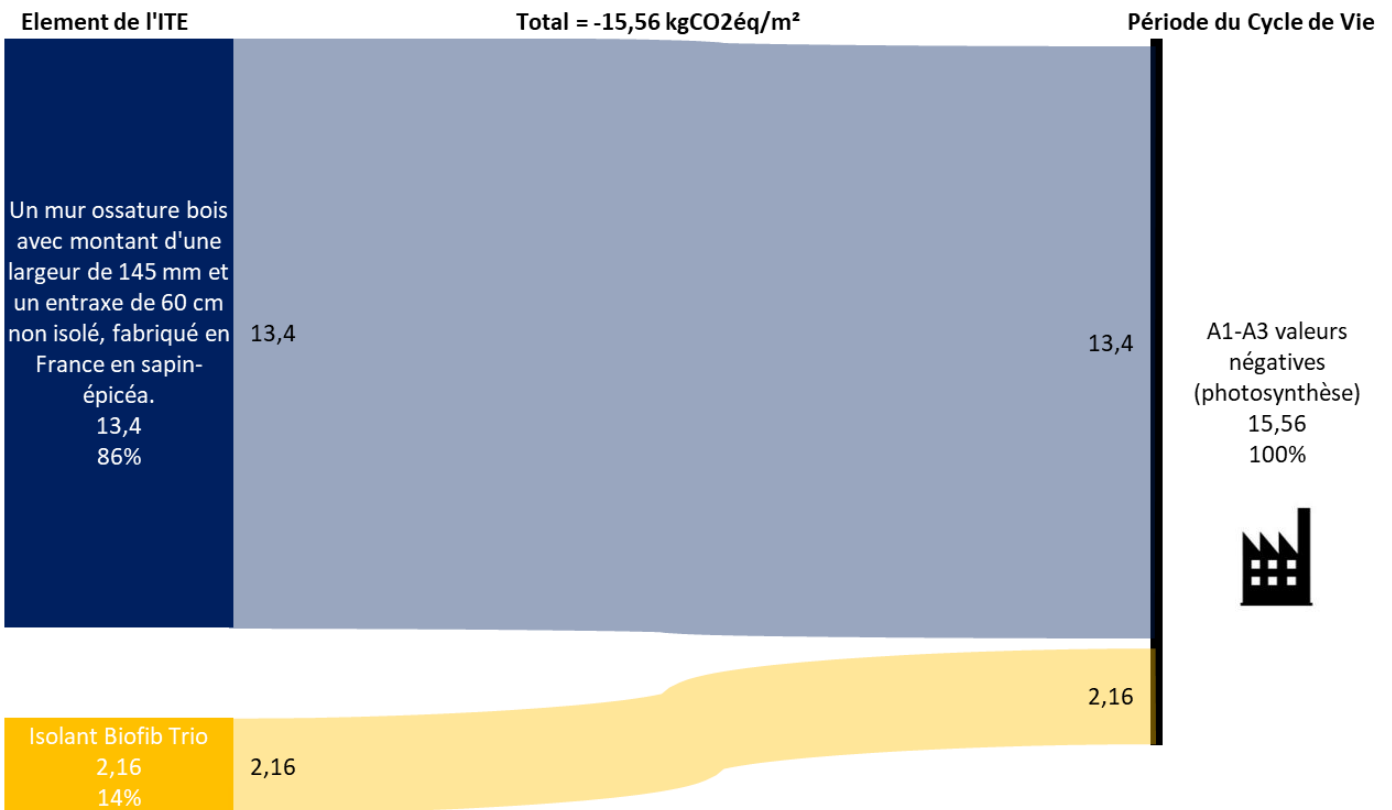


Annexe 3 : Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant ECOPEG35 (isolant à base de bouteilles en plastique) et bardage en acier.

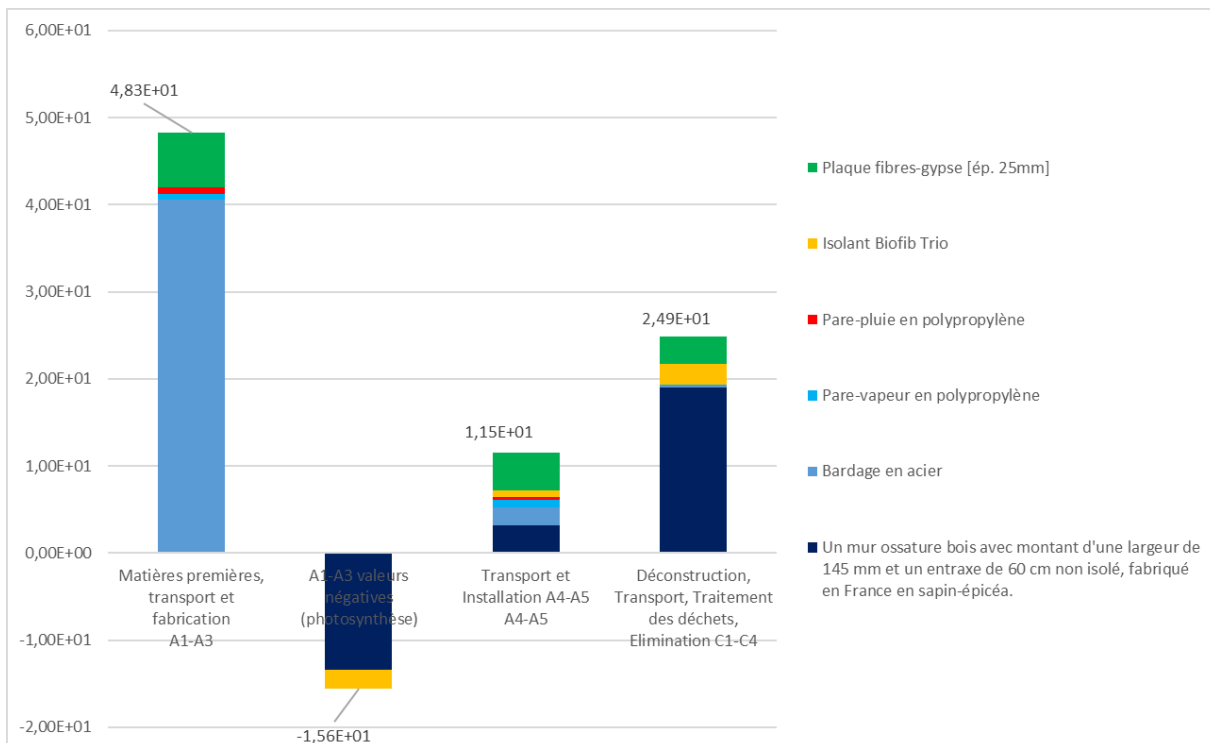


Annexe 4 : Diagramme de flux d'impacts carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant Biofib Trio (isolant à base de chanvre, lin et coton) et bardage en acier

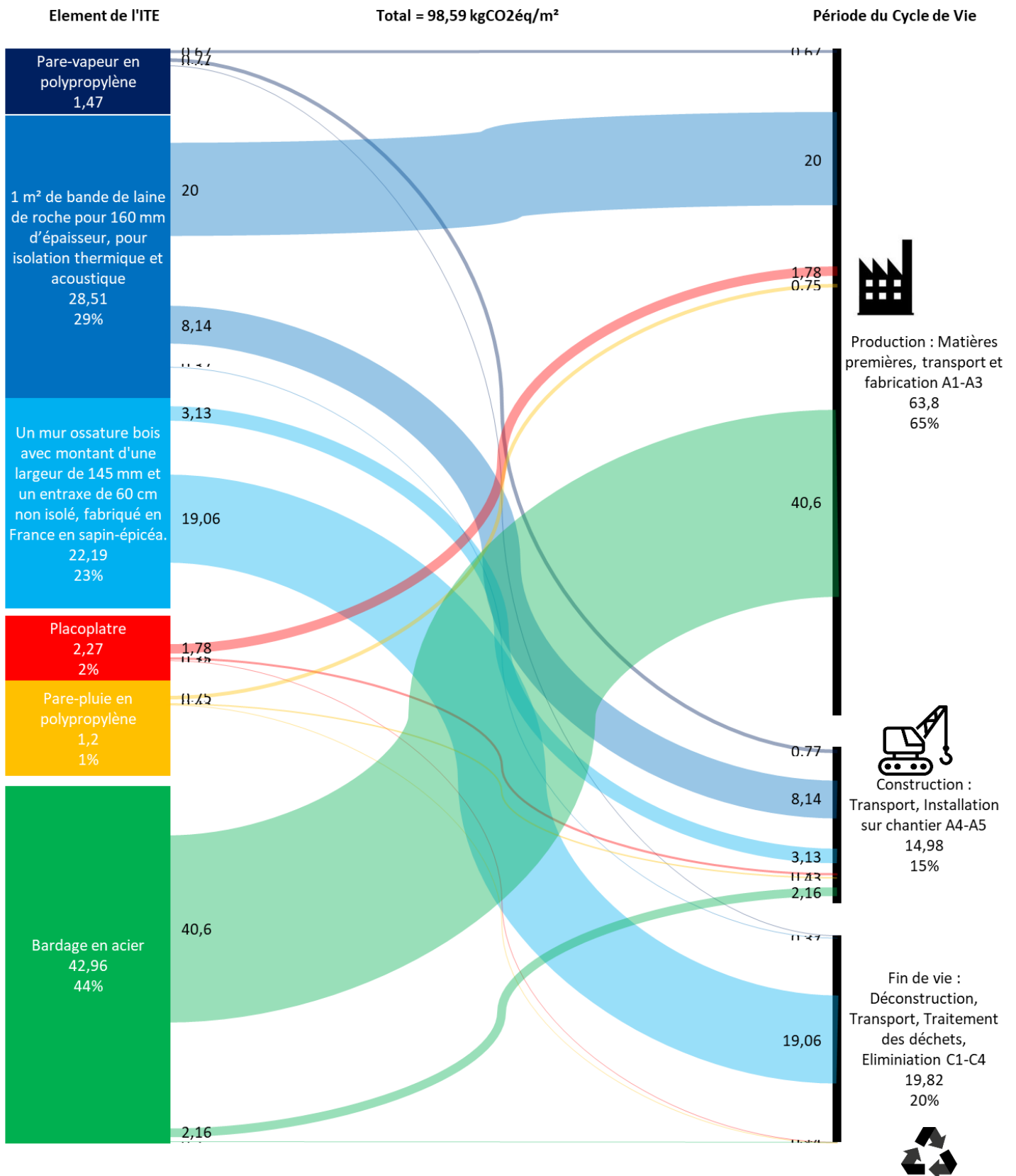




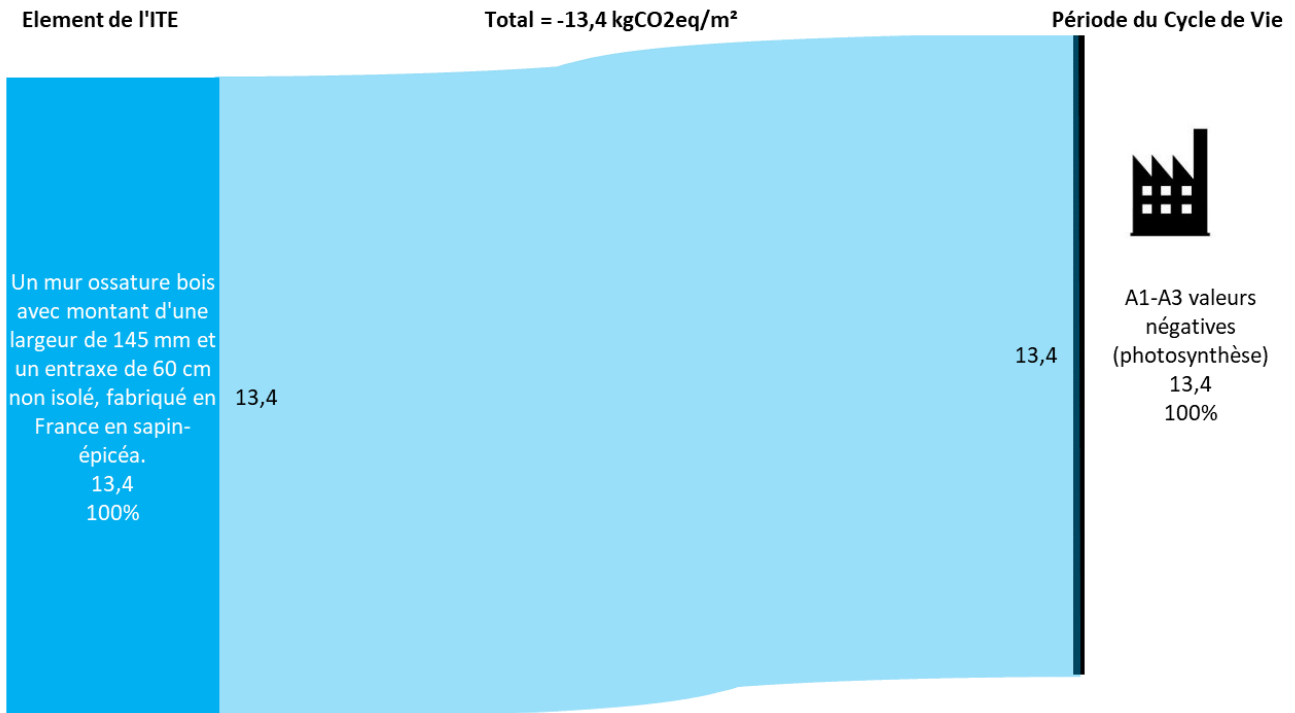
Annexe 5 : Diagramme de flux de gains carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant Biofib Trio (isolant à base de chanvre, lin et coton) et bardage en acier.



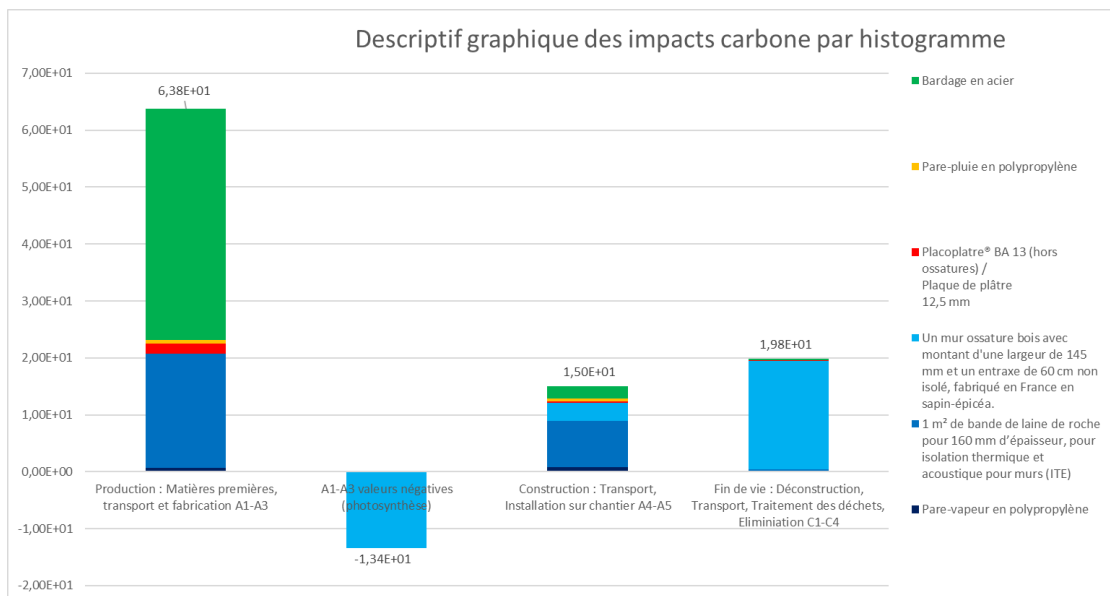
Annexe 6 : Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant Biofib Trio (isolant à base de chanvre, lin et coton) et bardage en acier.



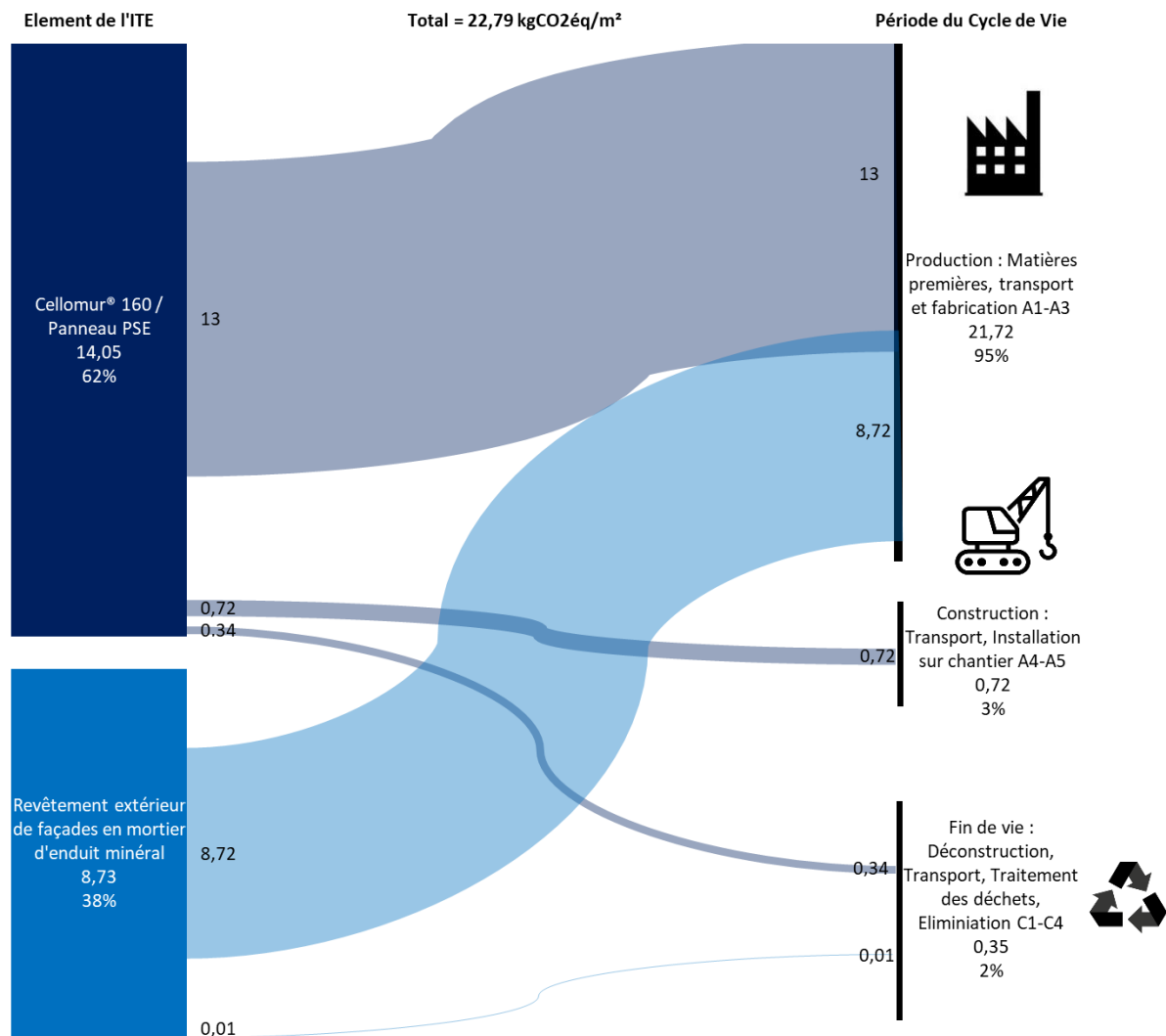
Annexe 7 : Diagramme de flux d'impacts carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant en laine de roche et bardage en acier



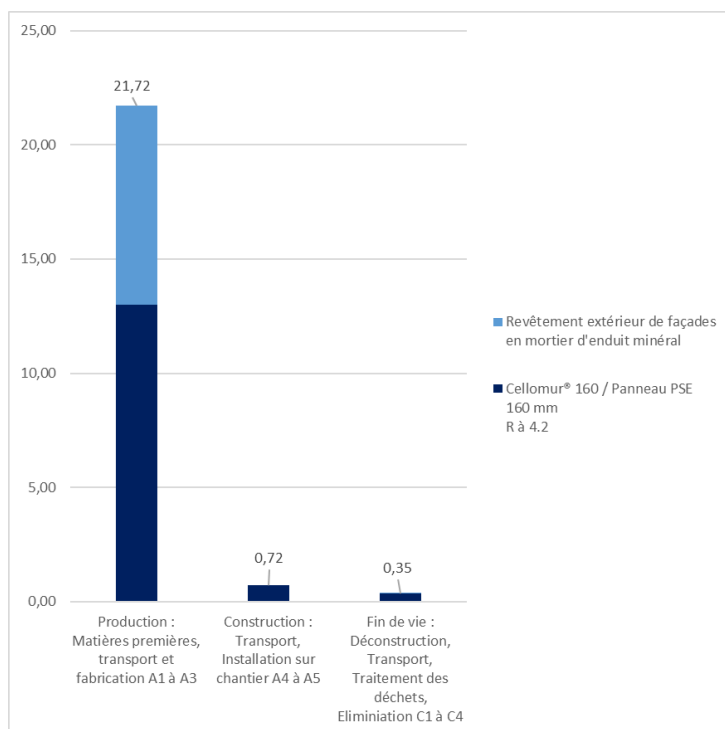
Annexe 8 : Diagramme de flux de gains carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant en laine de roche et bardage en acier



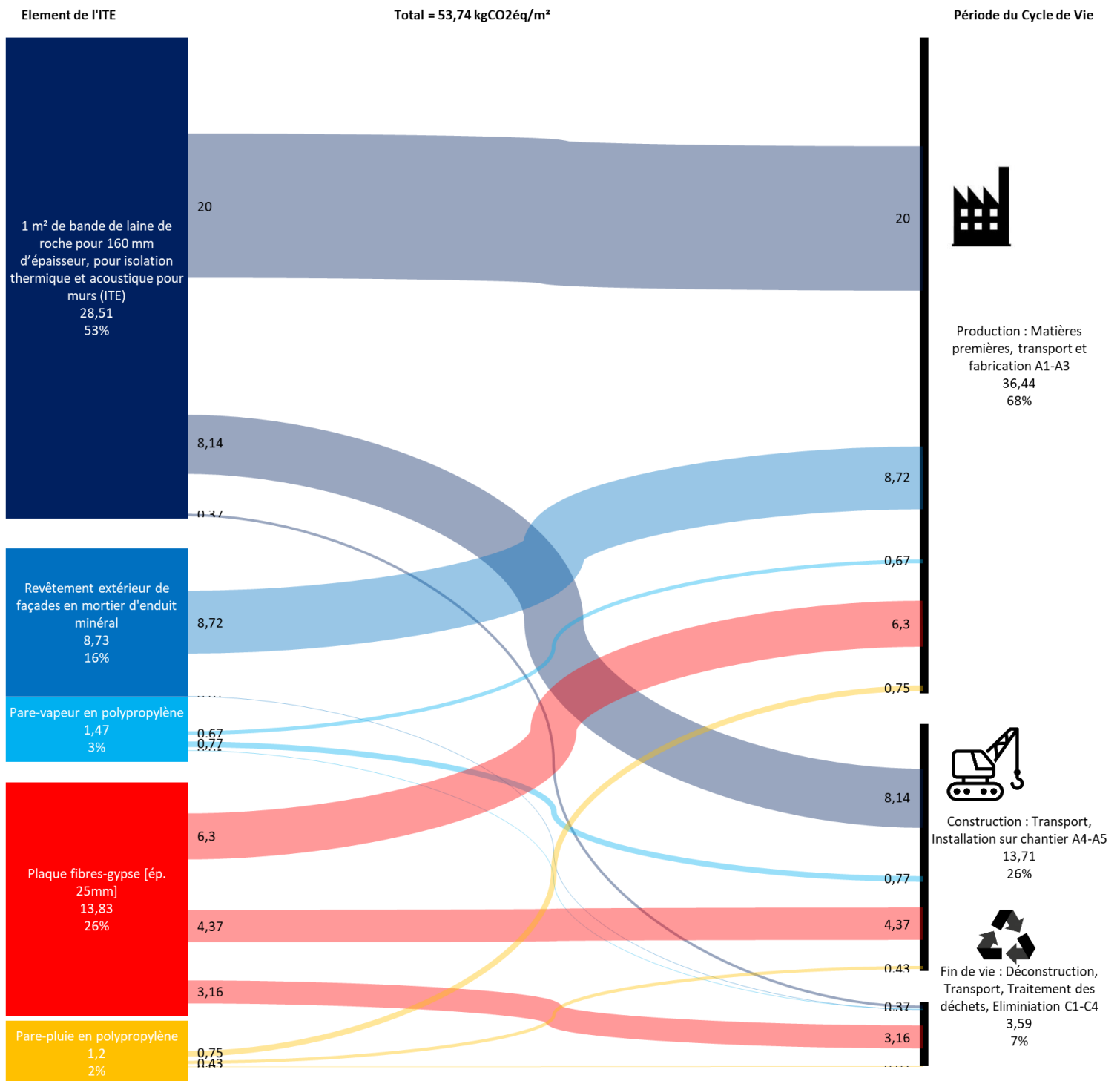
Annexe 9 : Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en MOB, isolant en laine de roche et bardage en acier.



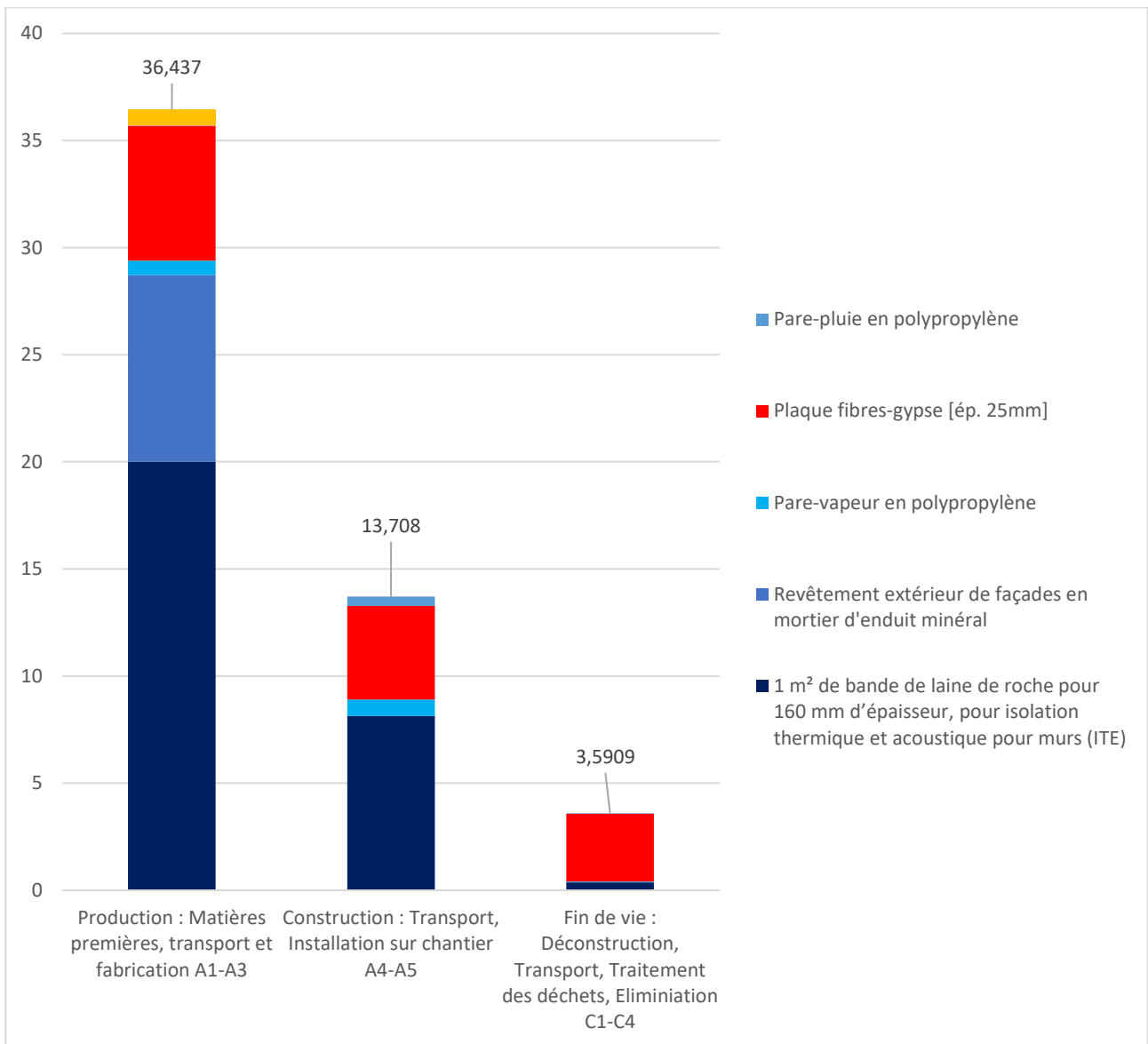
Annexe 10 : Diagramme de flux d'impacts carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en ITE, isolant polystyrène et enduit minéral



Annexe 11 : Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en ITE, isolant polystyrène et enduit minéral



Annexe 12 : Diagramme de flux d'impacts carbone d'1 m² de solution technique en ITE, isolant polystyrène et enduit minéral, avec prise en compte des pare-pluies et pare-vapeurs

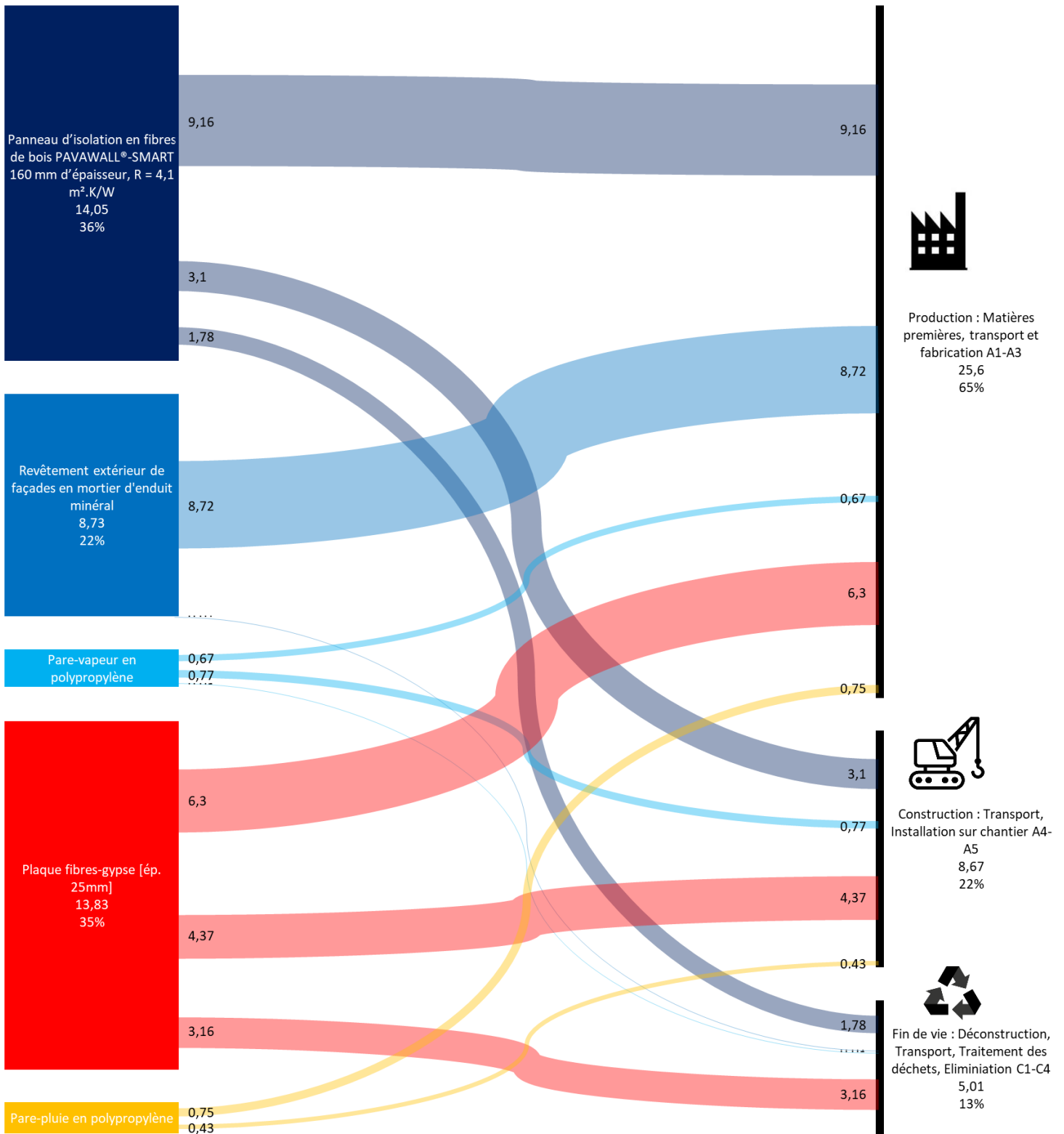


Annexe 13 : Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en ITE, isolant polystyrène et enduit minéral, avec prise en compte des pare-pluies et pare-vapeurs

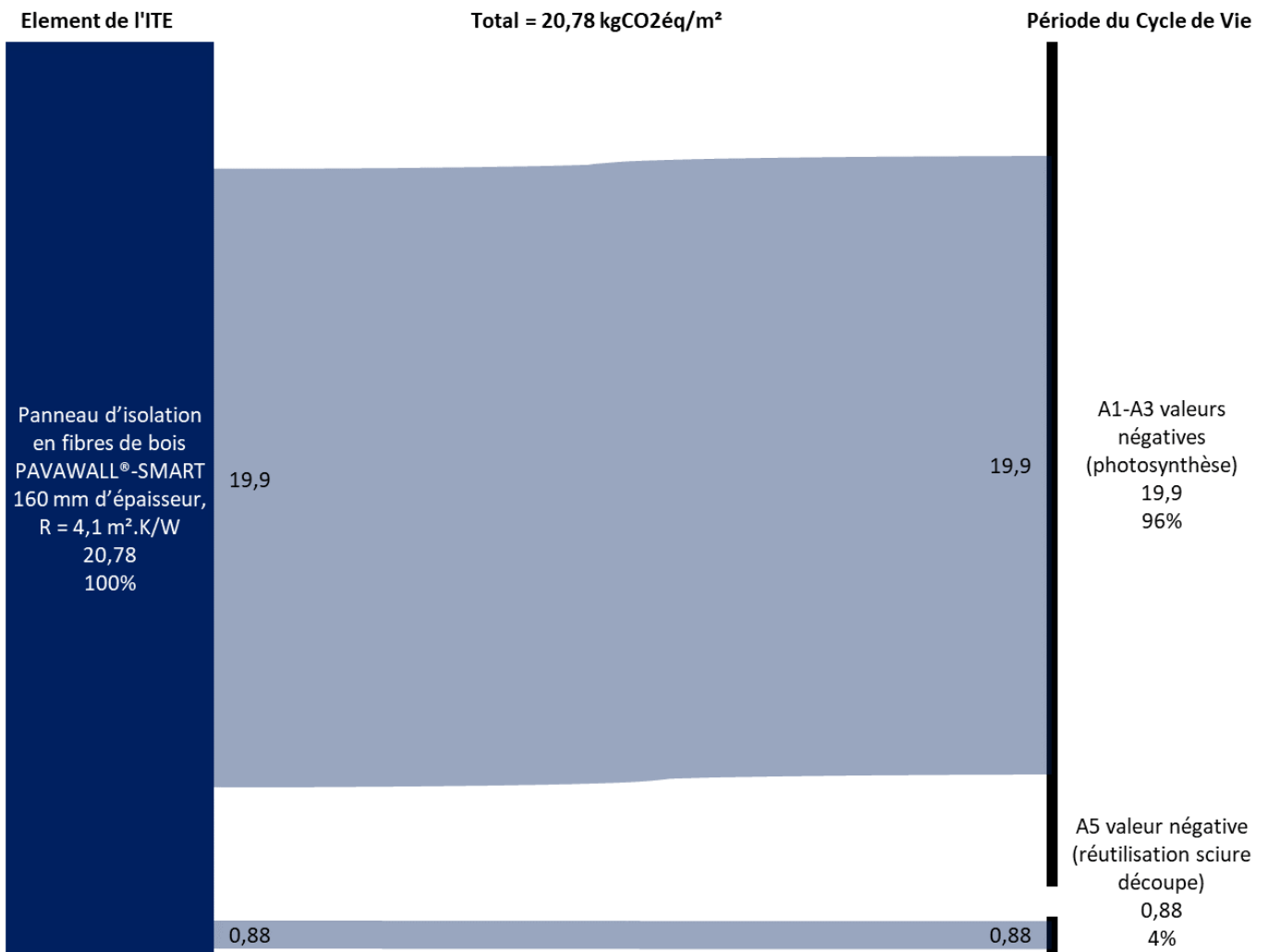
Element de l'ITE

Total = 39,27 kgCO2eq/m²

Période du Cycle de Vie

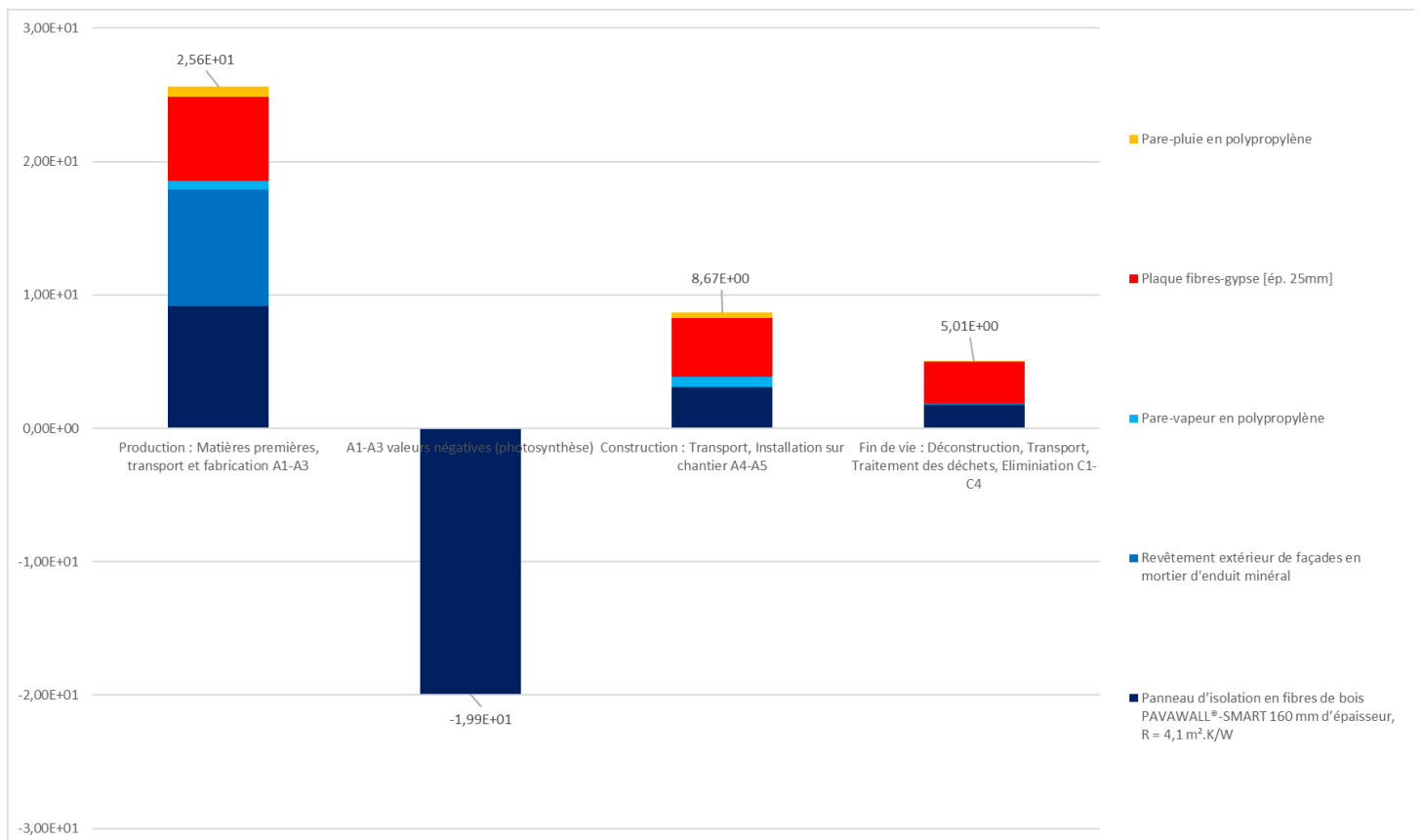


Annexe 14 : Diagramme de flux d'impacts carbone d'1 m² de solution technique en ITE, isolant en laine de bois et enduit organique, avec prise en compte des pare-pluies et pare-vapeurs



Annexe 15 : Diagramme de flux de gains carbone d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en ITE, isolant en laine de bois et enduit organique, avec prise en compte des pare-pluies et pare-vapeurs





Annexe 16 : Descriptif graphique des impacts carbone (positifs et négatifs) par histogramme d'1 m<sup>2</sup> de solution technique en ITE, isolant en laine de bois et enduit organique, avec prise en compte des pare-pluies et pare-vapeurs