



**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU
MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION :
IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX.**

CHAMBÉRY - FRANCE

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL BÂTIMENT ET TRAVAUX PUBLICS**

Présenté et soutenu publiquement le **30 Janvier 2023** par

Clotaire Stive NOUBISSIE YAMENI (n° d'inscription : 20190046)

**Encadrant 2iE : Dr. Césaire HEMA, Enseignant et Chef de Département Génie Civil,
Institut 2iE**

**Maître de stage : Mme Delphine COTE, Conductrice de travaux principale chez Eiffage
Construction Réhabilitation Centre - Est**

Structure (s) d'accueil du stage : EIFFAGE CONSTRUCTION – REHABILITATION
CENTRE - EST

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr Malicki ZOROM

Membres : Dr Yasmine TRAORE

M. Iliassou NOUHOUN SALOU

Citation

« N'attendez jamais l'autorisation de qui que ce soit pour croire en vous-même, pour penser, pour agir, pour accomplir votre destin. Ceux qui ne croient pas en vous aujourd'hui, seront ceux qui demain, voudront en vain vous manger dans la main. »

Kemí SEBA

Dédicace

A LA

FAMILLE

BRAUN

(Ingo, Irís, Jana...)

Remerciements

Je voudrais tout d'abord, remercier le **Dieu miséricordieux**, qui sans lui rien ne serait possible.

L'INSTITUT 2iE d'Ouagadougou, pour la formation académique que j'ai reçu au sein de cette école d'ingénieurs de grande renommée africaine et internationale ;

L'INSA DE LYON, qui m'a accueilli pour mon échange académique ERASMUS. Je reste très satisfait de la qualité d'enseignements que j'ai reçus ;

Mon encadreur pédagogique, **Dr. Césaire HEMA**, pour sa disponibilité et ses remarques pertinentes ;

Ensuite, **M. Arab HASSAOUI, Directeur d'Eiffage Construction Réhabilitation Centre - Est**, de m'avoir accepté au sein de l'entreprise pour mon stage de fin d'études (PFE).

Mes remerciements vont également à l'endroit de :

M. Bertrand FINCK, Directeur d'Exploitation chez Eiffage Construction Réhabilitation Centre - Est, pour son altruisme. Qui m'a donné l'opportunité ici d'intégrer une entreprise de très grande renommée internationale ;

Mme Delphine COTE, Conductrice de travaux principal chez Eiffage Construction Réhabilitation Centre - Est, pour sa disponibilité à me confier des missions sur le chantier, son encadrement, son professionnalisme, son humilité et surtout son sens de l'humour. Sans oublier tous mes collaborateurs sur le chantier (Yassine, Antonis, Yakub, Céline ...),

La **Famille BRAUN**, pour leur confiance et générosité,

Mes **Parents et sœurs**, pour tous leurs encouragements,

Tous mes Amis de par le monde,

Et enfin, à tout le **Peuple africain !!**

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX

SOMMAIRE

Citation	i
Dédicace	ii
Remerciements	iii
SOMMAIRE	iv
Abréviations et sigles	vi
Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Résumé	x
Abstract	xi
Introduction générale.....	1
Chapitre I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL ET DU PROJET.....	3
I.) PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL.....	3
1. Historique.....	3
2. Secteur d'activité et chiffres clés du groupe	3
3. Localisation des agences du groupe Eiffage	4
4. Présentation de l'entreprise ECRCE.....	4
5. Valeurs de ECRCE	5
6. Organisation du groupe Eiffage	6
II.) PRESENTATION DU PROJET	7
1. Contexte et justification du projet.....	7
2. Objectifs.....	10
3. Données de base et état des lieux.....	10
Chapitre II. ETAT DE L'ART SUR L'ACV.....	13
I.) DEFINITION DE L'ACV.....	13

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

II.)	ENJEUX DE L'ACV.....	14
1.	Du point de vue climatique	14
2.	Du point de vue énergétique	20
III.)	STRATÉGIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'ACV EN FRANCE ET DANS LE MONDE	22
1.	Stratégie nationale bas carbone (SNBC).....	22
2.	Les raisons de l'ACV	24
3.	L'ACV en France.....	25
Chapitre III.	MATERIEL ET METHODOLOGIE	28
I.)	MATERIEL.....	28
❖	Le logiciel TOTEM.....	28
II.)	MÉTHODE.....	29
1.	Collecte des données d'entrées	30
2.	Définition des différents scénarios.....	31
3.	Mode de calcul du CO2	31
Chapitre IV.	RESULTATS ET DISCUSSIONS	33
I.)	RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS.....	33
1.	Scénario 1 : Bâtiment avec matériaux isolant existant : Polystyrène extrudé	33
2.	Scénario 2 : Bâtiment avec matériaux isolant : laine de roche	36
3.	Scénario 3 : optimisation	38
II.)	ANALYSE COMPARATIVE ET DISCUSSION	40
1.	Comparaison entre les scénarios	40
	Conclusion générale et perspectives.....	44
	Bibliographie.....	47
	Annexes.....	49

Abréviations et sigles

PFE	: Projet de fin d'études
ACV	: Analyse du Cycle de Vie
AIE	: Agence Internationale pour l'Énergie
AEE	: Agence Européenne pour l'Environnement
CCAG	: Cahier des Charges Administratives Générales
CCTP	: Cahier des Charges Techniques Particulières
CSPS	: Coordonnateur de la Sécurité et de la Protection Sociale
CIRR	: Comité d'Innovation des Routes et Rues
DTU	: Document Technique Unifié
DOE	: Dossier des Ouvrages Exécutés
EC	: Eau Chaude
ECRCE	: Eiffage Construction Réhabilitation Centre-Est
EF	: Eau Froide
EPI	: Équipements de Protection Individuelle
GPA	: Garantie de Parfait Achèvement
GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GES	: Gaz à Effet de Serre
IDRRIM	: Institut Des Routes, des Rues, et des Infrastructures pour la Mobilité
I4CE	: Institute for Climate Economics
LTECV	: Loi à la transition énergétique pour la croissance verte
OPR	: Opérations Préalables à la Réception
PPSPS	: Plan Particulier de la Sécurité et de la Protection Sociale
RFCT	: Rapport Final de Contrôle Technique
SDES	: Services des Données et Études Statistiques
SNBC	: Stratégie Nationale bas Carbone
VIC	: Visite d'Inspection Commune
VMC	: Ventilation Mécanique Contrôlée
VRD	: Voies et Réseaux Divers

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

Liste des figures

Figure 1 – Eiffage construction.....	3
Figure 2 – Groupe Eiffage.....	4
Figure 3 – Présence du Groupe Eiffage dans le monde	4
Figure 4 – Clients d’Eiffage Construction Réhabilitation Centre - Est.....	5
Figure 5 - Organigramme EIFFAGE Construction Cent - Est	6
Figure 6 - Plan de situation du projet [Source : Eiffage].....	8
Figure 7 – Vue 3D du projet [Source : Architecte]	9
Figure 8 – Organigramme des travaux et mode de règlement	9
Figure 9 – Photo avant travaux.....	11
Figure 10 – Plan de masse du projet	12
Figure 11 – Schéma du cycle de vie et impacts environnementaux	13
Figure 12 – Évolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2019.....	15
Figure 13 - Évolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine depuis 1900 [Source : Météo – France].....	15
Figure 14 - Projection de la météo en France à l’horizon 2050 [Source_ Météo France].....	16
Figure 15 – Phénomène de l’effet de serre [Source : Auteur].....	17
Figure 16 – Répartition des émissions mondiales de GES par gaz [Source : GIEC_2014].....	18
Figure 17 – Chiffre clé du climat [Source : I4CE].....	19
Figure 18 – Répartition des émissions de CO ₂ par secteur en France_SNBC [Source : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire].....	19
Figure 19 - Répartition sectorielle des émissions de CO ₂ dans le monde [Source : AIE_2020].....	19
Figure 20 – Répartition par source des émissions de GES dans l’UE entre 1990 et 2018.....	20
Figure 21 - Réserves ultimes – découvertes cumulées, passées et à venir, de pétrole récupérable [Source : UVED].....	21
Figure 22 – Estimation de la consommation d’énergies renouvelables et réserves d’énergies fossiles [source _ BP Statistical Review of World Energy 2009]	21
Figure 23 – Trajectoire à l’horizon 2050 [Source : SNBC].....	23
Figure 24 – Présentation des avantages externes et internes de l’ACV	25
Figure 25 – Évolution de la réglementation sur l’ACV en France	26
Figure 26 – Bâtiments avec ACV en France	27
Figure 27 – Présentation du logiciel TOTEM (Aide à l’ACV).....	29
Figure 28 – cadre méthodologique pour conduire une ACV.....	30
Figure 29 – Récapitulatif des données d’entrées et modélisation sur le logiciel TOTEM	33
Figure 30 – Visualisation du matériau polystyrène extrudé.....	34

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

<i>Figure 31 - Score environnemental par partie d'ouvrage _ [scénario 1]</i>	35
<i>Figure 32 - Impact par catégorie d'éléments_1</i>	35
<i>Figure 33 – Visualisation du matériau Laine de roche</i>	36
<i>Figure 34 - Score environnemental par partie d'ouvrage _ [scénario 2]</i>	37
<i>Figure 35 – Impact par catégorie d'éléments_2</i>	37
<i>Figure 36 – Matériaux constitutifs du plancher</i>	38
<i>Figure 37 – Illustration de réalisation d'un plancher</i>	38
<i>Figure 38 - Matériaux constitutifs des murs extérieurs</i>	39
<i>Figure 39 - Impact par catégorie d'éléments_3</i>	39
<i>Figure 40 - Impact énergie et matériaux</i>	40
<i>Figure 41 - Impact par étape du cycle de vie</i>	43

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 – Descriptif des matériaux par éléments.....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 2 - Descriptif des matériaux par éléments.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 3 - Récapitulatif impact énergie et matériaux.....</i>	<i>40</i>

Résumé

L'objet de cette étude qui a eu lieu au sein de l'entreprise Eiffage Construction Réhabilitation Centre – Est, est de faire l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) complet du bâtiment en réhabilitation (les deux tours du Mâconnais R+18) dans la ville de Chambéry en France et de proposer un choix de matériaux biosourcés qui permet de réduire le poids carbone conformément aux différentes exigences que présentent les constructions durables. Partant spécifiquement de la collecte de données d'entrée, de la définition des différents scénarios et de la présentation du mode de calcul du CO₂.

La mise en application de l'ACV dans les constructions, permet ici de répondre aux enjeux climatiques et énergétiques, d'atteindre les objectifs de la COP 21 et accords internationaux. C'est donc dans ce sens que le bailleur social CRISTAL HABITAT, dont la principale activité est de racheter ou construire des habitations et de les mettre au service des populations vulnérables moyennant une rémunération, a décidé de réhabiliter son patrimoine immobilier parmi lesquels les deux tours du Mâconnais afin de les mettre aux normes standard de la construction et d'améliorer leurs performances énergétiques et environnementales.

Pour pouvoir évaluer l'impact carbone du bâtiment, différents scénarios ont été appliqués, en se servant de l'outil numérique d'aide à l'ACV « TOTEM ». Ce qui a permis de réduire d'environ **47%** le poids carbone du bâtiment en optimisant par l'utilisation des matériaux biosourcés tels que le chanvre comme isolant pour les murs extérieurs et d'un plancher bois en profilé FJI 350 au détriment du béton très énergivore.

Mots clés

- 1. Analyse du Cycle de Vie,**
- 2. Matériaux biosourcés,**
- 3. Enjeux climatiques, environnementaux et énergétiques,**
- 4. Impact carbone.**

Abstract

The purpose of this study, which took place within the company Eiffage Construction Réhabilitation Center – Est, is to carry out a complete Life Cycle Analysis (LCA) of the building in rehabilitation (the two towers of Mâconnais R+18) in the city of Chambéry in France and to offer a choice of biosourced materials that reduce the carbon weight in accordance with the different requirements of sustainable constructions. Starting specifically from the collection of input data, the definition of the different scenarios and the presentation of the CO2 calculation method.

The application of LCA in constructions makes it possible here to respond to climate and energy issues, to achieve the objectives of COP 21 and international agreements. It is therefore in this sense that the social landlord CRISTAL HABITAT, whose main activity is to buy or build homes and put them at the service of vulnerable populations in return for remuneration, has decided to rehabilitate its real estate assets, including the two towers du Mâconnais in order to bring them up to standard construction standards and improve their energy and environmental performance.

To be able to assess the carbon impact of the building, different scenarios were applied, using the digital LCA tool "TOTEM". This made it possible to reduce the carbon weight of the building by around 47% by optimizing the use of biosourced materials such as hemp as insulation for the exterior walls and a wooden floor in FJI 350 profile to the detriment of very energy-intensive.

Key words

1. Life cycle analysis,
2. Biosourced materials,
3. Climate, environmental and energy issues,
4. Carbon impact.

Introduction générale

Il apparaît à l'heure actuelle que le secteur du bâtiment entraîne d'importants impacts environnementaux. En effet, il représente à lui seul plus de 40 % de la consommation d'énergie primaire française[1]. Lors de la phase de construction, il entraîne une consommation très élevée de ressources (granulats, ciment, métaux) ; il produit d'importantes quantités de déchets inertes mais également de polluants (émissions de dioxyde de carbone, de particules fines et de composés organiques volatils).

Pour évaluer correctement ces différents impacts environnementaux induits par le secteur de la construction, des outils d'évaluation sont nécessaires. Parmi ces méthodes, l'analyse de cycle de vie s'est imposée depuis plusieurs années comme une approche analytique intéressante pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit. Originellement centrée sur les matériaux et produits de construction, cette approche a été étendue à l'échelle du bâtiment entraînant l'apparition de nombreux outils d'évaluation. Depuis les premières phases de son développement, l'approche ACV a donc continué d'être améliorée. Les bases de données d'inventaire de cycle de vie qui regroupent les caractéristiques environnementales de produits, biens et services, documentent un nombre de substances (consommées ou émises dans l'environnement) de plus en plus élevées[2].

Face donc aux défis environnementaux et énergétiques, le bailleur social CRISTAL HABITAT a pris la ferme résolution de réhabiliter tout son patrimoine immobilier datant des années 1970, parmi lesquels les deux tours du Mâconnais situé dans la ville de Chambéry en France. L'évaluation du poids carbone des matériaux constitutifs des bâtiments qui est aujourd'hui au centre de toutes les préoccupations, permet ici de s'intéresser au poids carbone des éléments, de l'extraction de la matière jusqu'à l'exploitation pendant 50 ans, dans le cycle de vie complet du bâtiment.

Afin de satisfaire le besoin du bailleur social, qui est l'Analyse du Cycle de Vie complet des deux tours du Mâconnais bâtiment R+18 en réhabilitation et de choisir un matériau biosourcé pour l'isolation des bâtiments. C'est donc dans ce cadre, que j'ai effectué un stage de plus de 6 mois au sein de l'entreprise Eiffage Construction Réhabilitation Centre Est. Du 11 Juillet 2022 au 25 Janvier 2023.

Le résultat de mes différentes recherches est consigné dans ce présent mémoire et présenté comme suit :

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

- Au chapitre premier, la présentation de la structure d'accueil et du projet proprement dit,
- Au chapitre deuxième, l'état de l'art de l'analyse du cycle de vie. Dans lequel on ressortira les enjeux de l'ACV du point de vue climatique et énergétique ; les raisons de l'ACV ; les stratégies de mise en œuvre de l'ACV ; l'histoire de l'ACV en France et dans le monde,
- Au chapitre troisième, le matériel utilisé et la méthodologie adoptée pour la réalisation de l'ACV du projet,
- Et enfin, au chapitre quatrième, les résultats de la méthodologie adoptée et une discussion des résultats obtenus en fonction des différents scénarios.

Chapitre I. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL ET DU PROJET

I.) PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCEUIL

1. Historique

Eiffage est un groupe de construction et de concessions français, fondé en 1993 par la fusion de SAE (Société Auxiliaire d'Entreprises) et de l'entreprise familiale Fougerolle, créé en 1844 par Philippe Fougerolle, maçon originaire de la creuse.

Le groupe exerce aujourd'hui dans de nombreux domaines des travaux publics : construction, infrastructures, concessions et énergie. Il s'agit du troisième groupe de constructions et de concessions français, derrière Vinci et Bouygues, et du cinquième groupe européen.

Depuis 1844, le groupe accompagne des chantiers qui changent la vie des hommes et qui donnent corps à des réalisations souvent emblématiques.



Figure 1 – Eiffage construction

2. Secteur d'activité et chiffres clés du groupe

Le groupe Eiffage est constitué de 4 branches et 8 métiers :

- ☐ Construction (Eiffage construction, Eiffage Immobilier, Eiffage Aménagement),
- ☐ Infrastructure (Eiffage Route, Eiffage Génie Civil, Eiffage Métal),
- ☐ Énergie Systèmes,

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

Concessions (Eiffage Concessions, Eiffage Autoroutière en France)

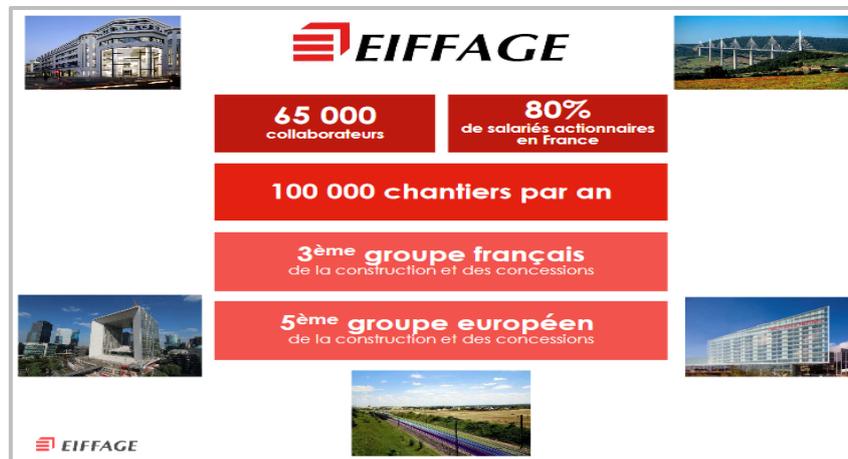


Figure 2 – Groupe Eiffage

3. Localisation des agences du groupe Eiffage

Eiffage est implanté de façon permanente dans plusieurs pays en Europe, en Afrique ainsi que sur le continent américain et asiatique.

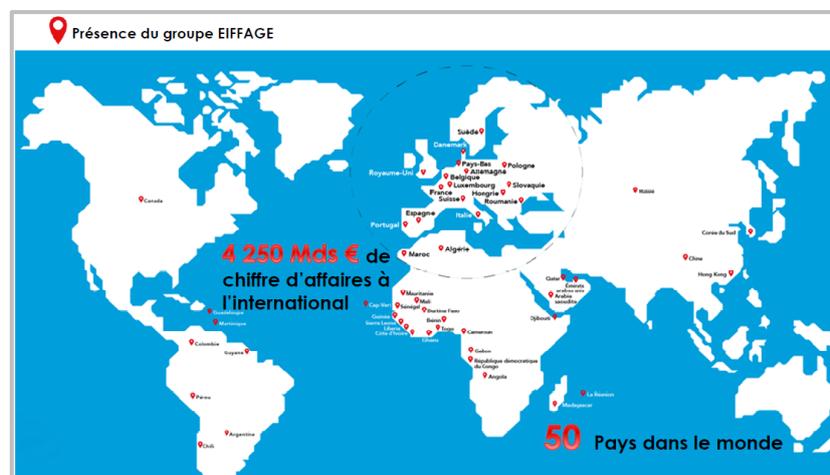


Figure 3 – Présence du Groupe Eiffage dans le monde

4. Présentation de l'entreprise ECRCE

Rattaché à la direction d'Eiffage construction Centre – Est, mon stage PFE se déroule au sein la branche réhabilitation qui, le 1^{er} Avril 2015, se sépare d'Eiffage construction Rhône pour former une entreprise générale de bâtiment, la société par action simplifiée : Eiffage Construction et Réhabilitation Centre – Est, dont le siège est implanté à Lyon (69) dans le

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

département du Rhône. Cette entité répond aux appels d'offres de marchés de travaux ou de conceptions – réalisations, dans le cadre de 2 grandes familles de chantiers, à savoir : la réhabilitation classique notamment dans les sites occupés, les sites à tiroirs ou les sites vides. Ainsi que la réhabilitation du patrimoine historique. Avec une moyenne de 15 chantiers en cours sur la région, d'un montant moyen de 3 millions d'euros par chantier.

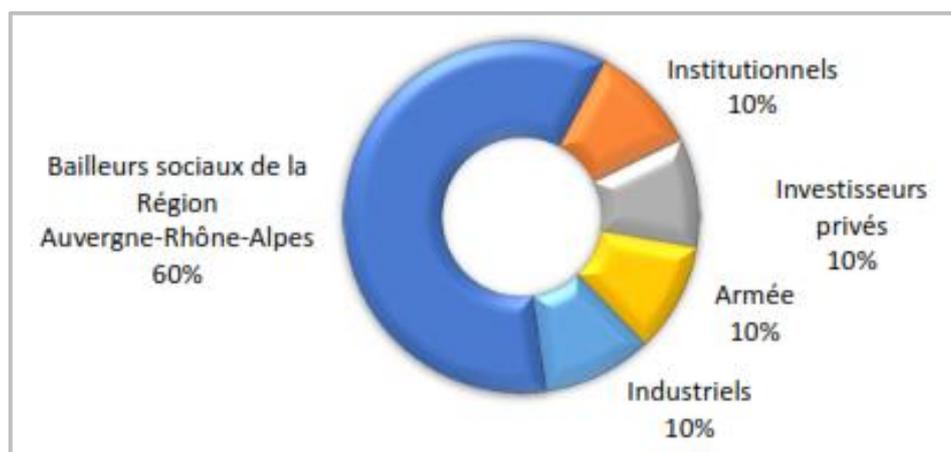


Figure 4 – Clients d'Eiffage Construction Réhabilitation Centre - Est

5. Valeurs de ECRCE

La SAS Eiffage Construction Réhabilitation Centre – Est, est axé autour de six (06) valeurs qui sont :

- L'exemplarité,
- La responsabilité,
- La lucidité,
- La confiance,
- La transparence,
- Le courage et la pugnacité.

Ces six valeurs forment un tout cohérent et chacune trouve sa pleine pertinence en interagissant avec les autres. Être collaborateur d'Eiffage, c'est vivre et faire vivre ces valeurs.

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

6. Organisation du groupe Eiffage

Avec un chiffre d'affaire estimé à 4.1 milliards d'euros et 3.9 milliards d'euros de carnets de commande, EIFFAGE Construction est le 3^e plus grand groupe dans le domaine du BTP en France et 5^e en Europe, en termes de chiffres d'affaire. Eiffage Construction, société du groupe Eiffage, regroupe l'ensemble de ses activités de construction : bâtiment, immobilier, aménagement urbain, maintenance et travaux services. L'entreprise comprend dix directions régionales en France. Il est composé de plusieurs entreprises, parmi lesquelles Eiffage Construction Réhabilitation Centre – Est, qui est une société par action simplifiée (SAS) dont le siège est à Lyon – confluence, dans lequel j'ai effectué mon stage PFE.

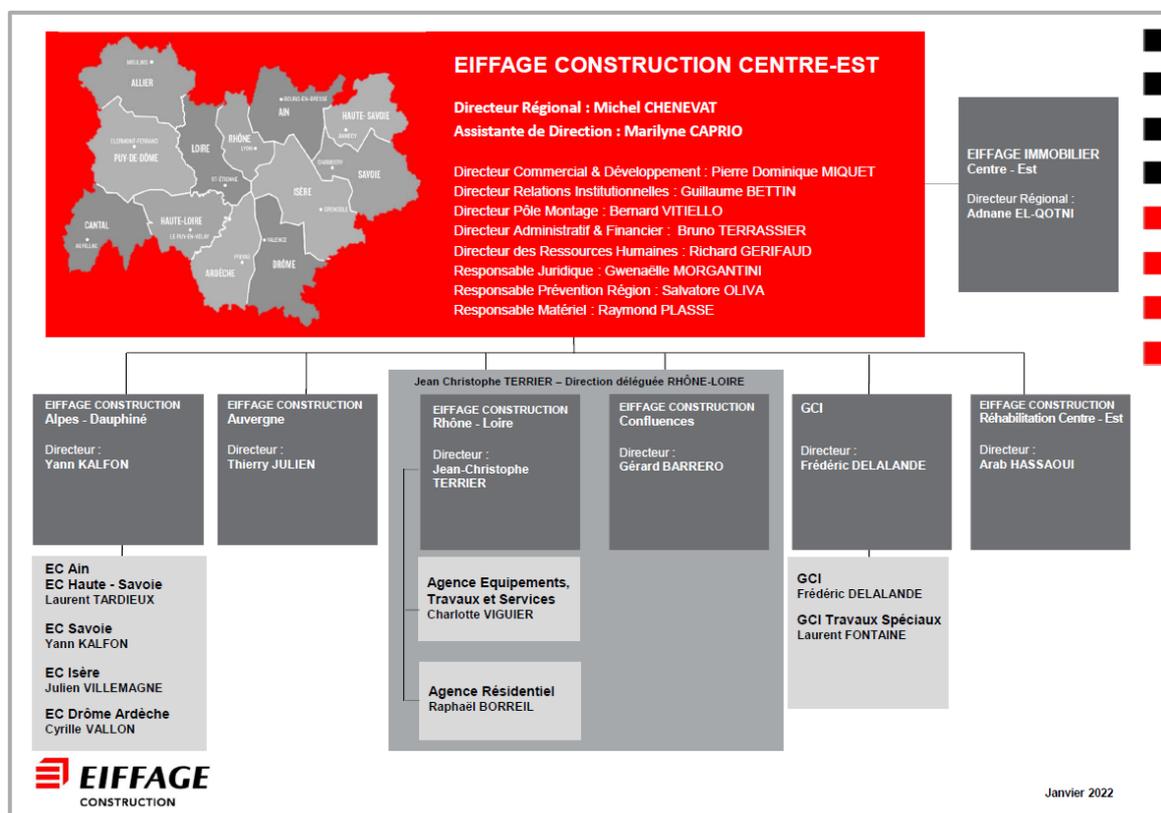


Figure 5 - Organigramme EIFFAGE Construction Cent - Est

II.) PRESENTATION DU PROJET

1. Contexte et justification du projet

Au vu des enjeux climatiques et énergétiques, le bailleur social CRISTAL HABITAT, dont la principale activité est de racheter ou construire des habitations et de les mettre aux normes standard de la construction, a décidé de réhabiliter les deux tours du Mâconnais afin d'améliorer leurs performances énergétiques et environnementales. L'objectif étant également de soumettre certains logements au label HSS (Habitat Sénior Services).

a) Description du projet

Le projet porte sur 2 immeubles R+18 mis en service en 1971, classés patrimoine du XXème siècle :

- Le Crêt de l'aigle – 109 logements,
- La Dent de l'Ours – 121 logements,
- 5 niveaux de parking souterrain, accessible par les 2 tours,
- Des espaces communs extérieurs.

Le programme des travaux prévoit :

- Rénovation énergétique (façades / murs ext / panneaux solaires / réseaux chauffage/eau chaude/eau froide/ bâtiment connecté) ;
- Restructuration de 30 logements sur la Tour de la Dent de l'Ours ;
- Réhabilitation intérieure des logements (sanitaires, électricité, peinture, revêtement de sol...);
- Réhabilitation des parties communes (restructuration des halls d'entrée, amélioration de la gestion des accès, accessibilité, remplacement des ascenseurs...);
- Séparation du parking sous terrain des 2 tours (rendre indépendants les accès au parking et son utilisation – sécurisation) ;
- Résidentialisation des 2 tours et aménagement global des espaces extérieurs (requalification, privatisation, appropriation des espaces extérieurs par les habitants...).

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

- Assurer la ventilation et le chauffage électrique de tous les logements.

Le chantier est réalisé en sites occupés et a pour budget 12.5 million d’euros.

La procédure de passation du marché est un Appel d’offres ouvert et l’ensemble du projet est subdivisé en trois (03) lots. Eiffage construction réhabilitation Centre- Est, est en charge des lots 2 et 3. Le lot 1 – l’entreprise GONTHIER. (Voir **Annexe 2**)

La phase chantier est assurée par l’entreprise EIFFAGE Construction. Elle ordonne, pilote, coordonne les travaux. C’est également elle qui organise les réunions hebdomadaires de chantier, rédige et diffuse les comptes rendus de réunion. Une partie des travaux a été sous-traité par l’entreprise Eiffage.

Durée prévisionnelle des travaux est de 24 mois dont 5 mois de préparation :

b) Localisation du projet

Le projet se situe dans la ville de **CHAMBÉRY** (270 et 352 rue du Mâconnais) située dans le quart Sud-Est de la France, département de la Savoie en région Auvergne-Rhône-Alpes et à environ 520 km au Sud - Est de Paris.

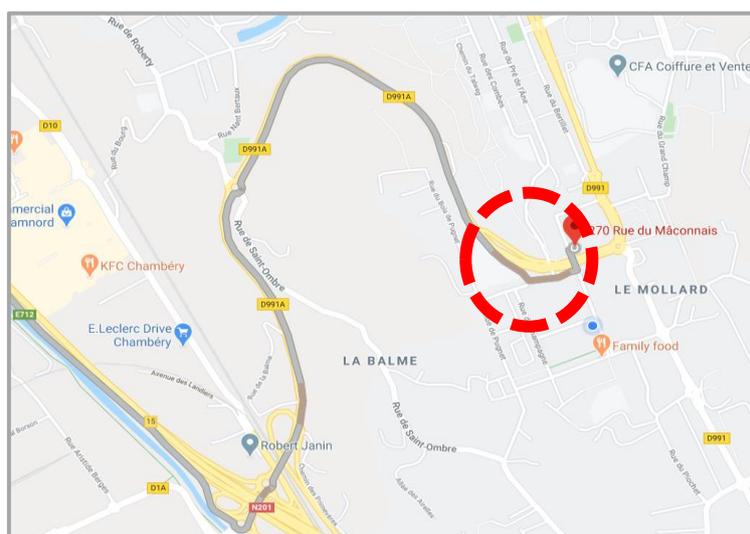


Figure 6 - Plan de situation du projet [Source : Eiffage]

c) Vue 3D des deux Tours

L'ouvrage final après réhabilitation sera présenté comme suit. (Voir figure 12) ci-dessous.



Figure 7 – Vue 3D du projet [Source : Architecte]

d) Organigramme des travaux exécutés

Le contrat de sous-traitance est établi entre l'entreprise mandataire, les entreprises sous-traitantes et le maître d'ouvrage, qui paie directement les sous-traitants, tel que schématisé ci-dessous.

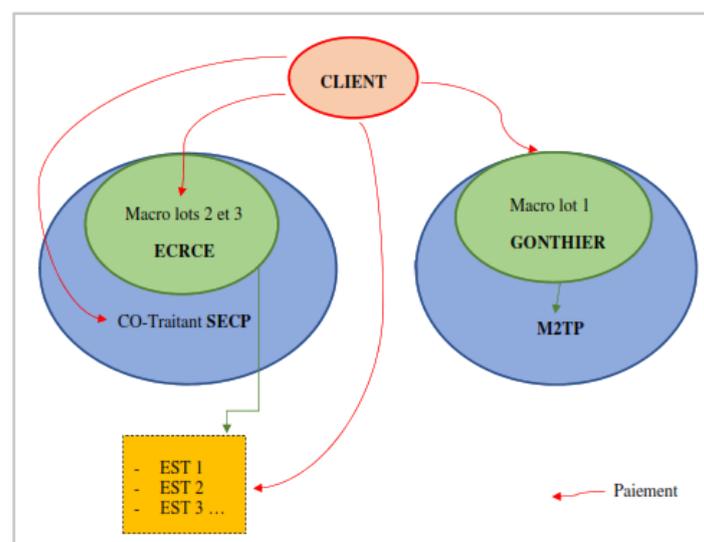


Figure 8 – Organigramme des travaux et mode de règlement

2. Objectifs

L'objectif général de ce présent mémoire est **de faire l'analyse du cycle de vie complet du bâtiment et de proposer un choix de matériaux biosourcés qui permettra de réduire le poids carbone conformément aux différentes exigences que présentent les constructions durables.**

De manière spécifique, il s'agit de :

- Collecter les données d'entrées,
- Définir les différents scénarios possibles,
- Calculer le bilan carbone pour chaque scénario,
- Faire une analyse comparative des différents scénarios et de proposer le matériau biosourcé à faible impact carbone.

3. Données de base et état des lieux

a) Données de base

- Bâtiment en rénovation ;
- Surface de plancher brute (SDPB) = 500 m², qui comprend :
 - La somme des surfaces de plancher de chaque niveau, mesurées à la face extérieure des murs extérieurs,
 - Les pièces chauffées et non chauffées,
 - Les escaliers, ascenseurs, puits techniques et ouverture de plancher,
- Année de construction du bâtiment = 1971
- Année de rénovation du bâtiment = 2020 ;
- Nombre d'étage (y compris RDC) = 19 ;
- Volume chauffé = 1195.65 m³ ;
- Nombre d'utilisateur ≈ 456 (soit en moyenne 3 habitants / logements. Pour un total de 8 logements par étages) ;
- Durée de vie du bâtiment = 50 ans, en France ;
- Avec pertes de ventilation ;
- Fonction / typologie du bâtiment :

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

- Résidentiel type immeuble,
- À usage public, multi locataire,
- Avec soin de santé et Centre médico psychologique (CMP).
- Nature des matériaux existants ;

e) État des lieux

La réhabilitation des tours du mâconnais s'inscrit dans le cadre du « grand projet de ville » des années 90, qui a apporté au quartier de nombreux équipements dont certains rayonnent au-delà du quartier. Dans les années 2000, le « projet de rénovation urbaine » a permis de relier les différents secteurs du quartier et d'initier une diversification de l'habitat et une requalification des espaces publics. La qualité de vie de la plupart des habitants s'est améliorée mais l'attractivité n'est pas retrouvée. Certains secteurs du quartier sont restés à la marge du projet. Plus globalement, les principaux dysfonctionnements urbains, bien qu'atténués, n'ont pas disparus.



Figure 9 – Photo avant travaux

Le projet porte sur 2 immeubles R+18 en site occupé et mis en service en 1971, classés patrimoine du XX^{ème} siècle :

- Le Crêt de l'Aigle – 109 logements
- La Dent de l'Ours – 121 logements

À cela il faut ajouter un parking sous terrains de 5 niveaux, accessible par les 2 tours, et des espaces communs extérieurs. Parallèlement, une étude globale est menée pour donner une

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

nouvelle identité à ce patrimoine afin de le valoriser et de lui rendre une image positive et attrayante. Cristal Habitat (le client) souhaite réaliser une réhabilitation globale du site car les investissements réalisés depuis sa construction ont été dans l'ensemble très ponctuels.

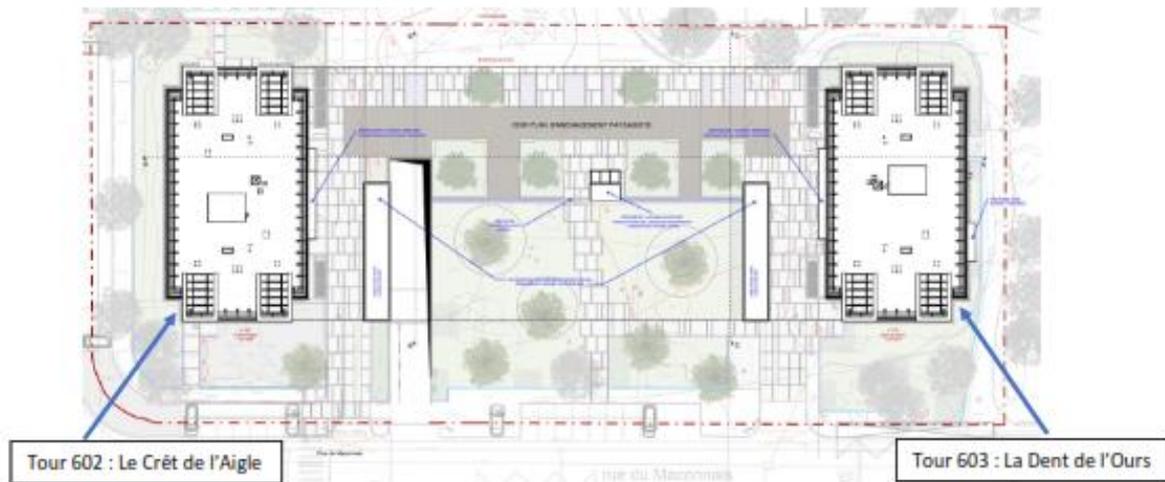


Figure 10 – Plan de masse du projet

Chapitre II. ETAT DE L'ART SUR L'ACV

I.) DEFINITION DE L'ACV

L'analyse du cycle de vie (ACV)[3] est un outil pour concevoir et optimiser les bâtiments, en permettant aux équipes d'évaluer de manière globale leurs choix architecturaux puis, plus en aval, le choix des équipements, des vecteurs énergétiques, des produits de construction, etc. Les labels, les certifications environnementales et la réglementation intègrent de plus en plus souvent cet outil de mesure de la performance environnementale qu'est l'ACV[4] : elle est par exemple aujourd'hui utilisée pour calculer le volet carbone de la réglementation environnementale RE 2020. C'est également une méthode d'évaluation normée [ISO 14 040 et 14 044] permettant de réaliser un bilan environnemental multicritère, qui vise à quantifier les impacts environnementaux d'un produit, d'un service, d'un bâtiment ou d'un quartier tout au long de son cycle de vie (Figure 11).

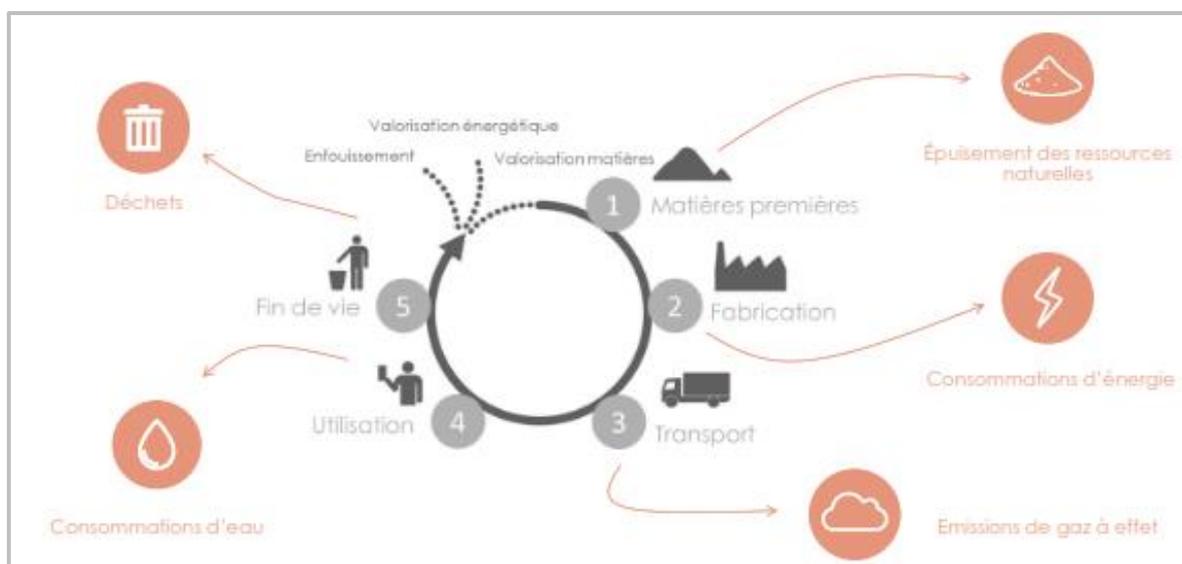


Figure 12 – Schéma du cycle de vie et impacts environnementaux [3]

II.) ENJEUX DE L'ACV

1. Du point de vue climatique

Selon le GIEC (Groupe d'Experts intergouvernemental sur l'évolution du Climat), le changement climatique qui est l'ensemble des variations climatiques en un endroit donné au cours du temps, s'est intensifié depuis 1950 en raison de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre par l'homme et s'accompagne d'un impact significatif sur les humains et la nature (augmentation des températures, montée des eaux etc.)[5].

a) Le réchauffement climatique

Appelé également réchauffement planétaire, est un phénomène qui se caractérise par l'augmentation du niveau moyen de la température à la surface de la Terre. Comme présenté par la (*Figure 12*), nous pouvons constater qu'à l'horizon 2050, le territoire français, connaîtra des canicules plus fréquentes et plus intenses de +2 à 3°C, des épisodes pluvieux moins fréquents mais plus intenses de +10 à 20 %, et des sécheresses en période estivale -10 à 20%. Les (*Figures 13, 14*), nous présente également l'évolution de la température annuelle mondiale de 1850 à 2019, qui est de plus en plus croissante. Il est donc important de prendre conscience des enjeux climatiques et d'agir efficacement contre le réchauffement climatique et faire baisser la facture énergétique des habitants. Ce qui nous permettra de préserver notre planète.

Alors, la transition énergétique[6] qui se définit par l'ensemble des changements que subissent les modèles de production, de distribution et de consommation d'énergie afin de rendre ces derniers plus écologiques, est au centre des préoccupations en Europe aujourd'hui. L'objectif est de transformer un système énergétique reposant sur des énergies fossiles vers un système énergétique reposant sur des énergies renouvelables.

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

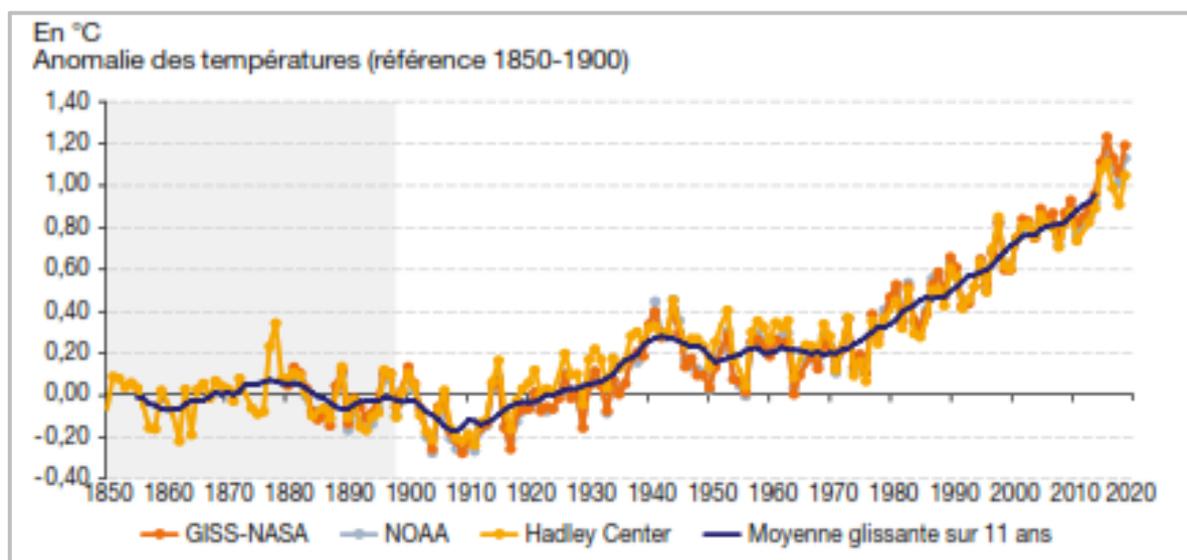


Figure 13 – Évolution de la température moyenne annuelle mondiale de 1850 à 2019[3]

Comme à l'échelle mondiale, l'évolution des températures moyennes annuelles en France métropolitaine montre un réchauffement net depuis 1900. Ce réchauffement a connu un rythme variable, avec une augmentation particulièrement marquée depuis les années 1980. En 2019, la température moyenne annuelle 13.7°C a dépassé la normale (1961 – 1990) de 1.8°C , plaçant l'année 2019 au troisième rang des années les plus chaudes depuis le XX^e siècle derrière 2018 ($+2.1^{\circ}\text{C}$) et 2014 ($+1.9^{\circ}\text{C}$). (Figure 12)

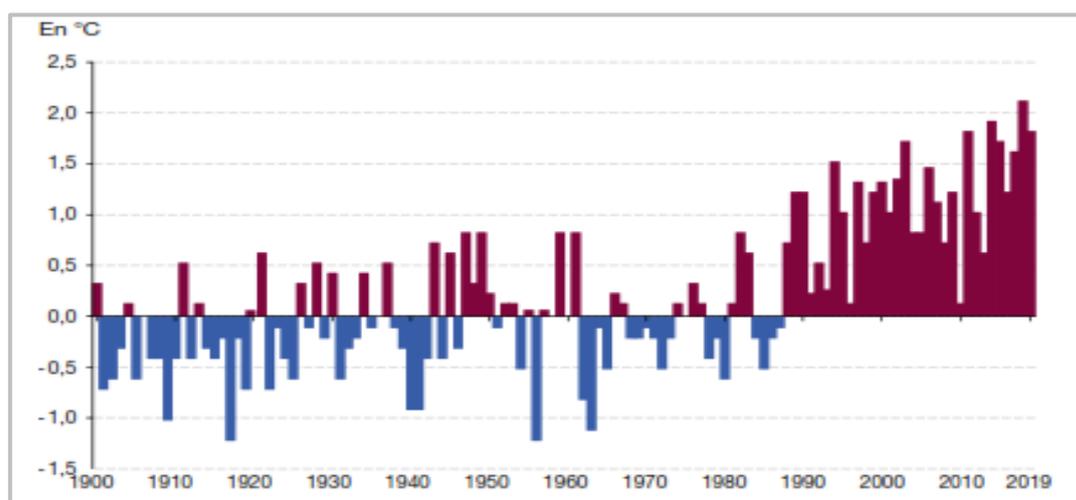


Figure 14 - Évolution de la température moyenne annuelle en France métropolitaine depuis 1900[3]

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX



b) Augmentation de l'effet de serre

Les activités humaines sont à l'origine de l'accroissement du phénomène que l'on nomme "effet de serre" (Figure 15). Ses conséquences, dont le réchauffement climatique, sont très préoccupantes pour la planète[7]. C'est pourquoi il est essentiel d'agir contre les émissions de gaz à effet de serre liées à ce phénomène. L'effet de serre est déséquilibré par les activités humaines, en particulier l'utilisation des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon). Celles-ci provoquent artificiellement l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et, par conséquent, accentuent le réchauffement de notre planète. D'où la nécessité d'une transition énergétique.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX

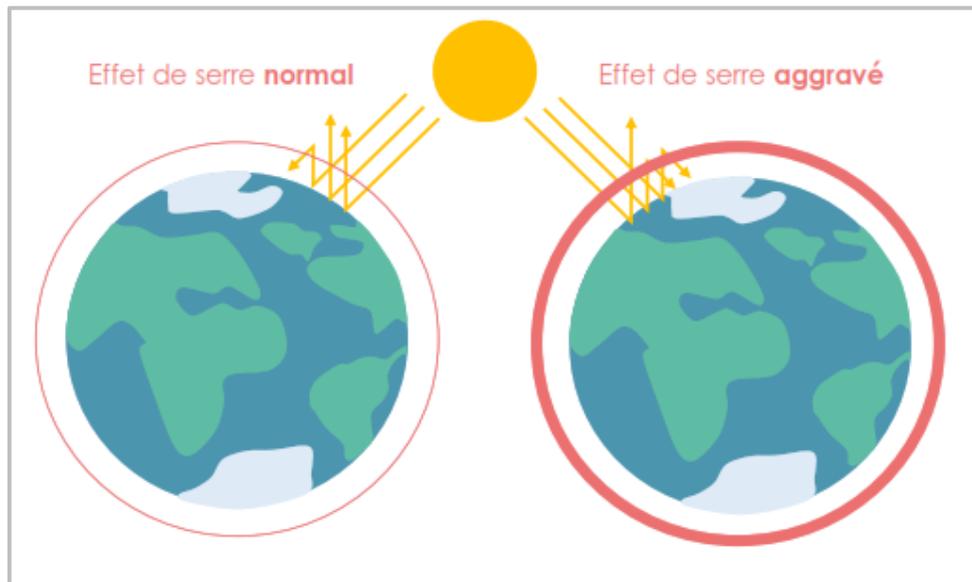


Figure 16 – Phénomène de l'effet de serre[7]

⇒ Gaz « à effet de serre »

Nous allons citer : le méthane (CH_4), les halocarbures (HFC, PFC), le protoxyde d'azote (N_2O), le dioxyde de carbone (CO_2) etc. Nous parlerons plus du CO_2 , qui est le gaz prédominant en termes d'impact environnemental pour notre planète[8].

- Le **dioxyde de carbone (CO_2)** dont la majorité des émissions sur terre provient de la combustion des énergies fossiles comme le gaz, le pétrole et le charbon, de la déforestation et de la construction.



Dans son rapport publié 2014, le GIEC[9] présente la répartition des émissions mondiales des GES par gaz (Figure 16).

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

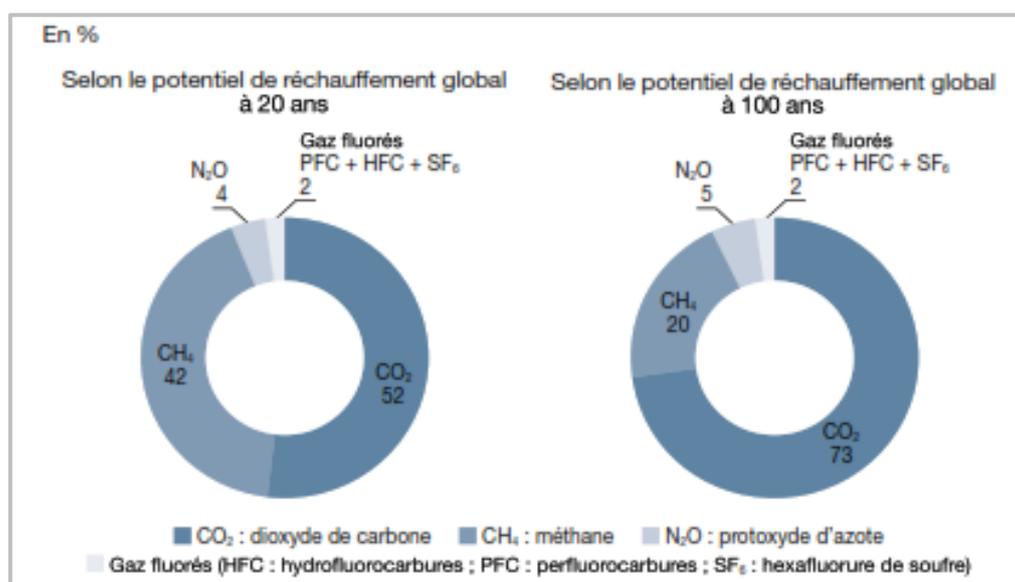


Figure 17 – Répartition des émissions mondiales de GES par gaz[5]

⇒ *Quelques chiffres clés*

Publié par les services de données et études statistiques (SDES) et le Ministère de la transition écologique et solidaire, nous pouvons observer les émissions de CO₂ par secteur, comme présenté par les (Figures 17, 18, 19). En 2018, la production d'électricité reste le premier secteur émetteur de CO₂ dans le monde, avec 41 % du total des émissions dues à la combustion d'énergie. Elle est suivie par les transports (25 %) et **l'industrie (18 %, y compris la construction)**. En Chine, l'industrie et le secteur de l'énergie (électricité et hors électricité) représentent à eux deux 83 % des émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie, contre 65 % en moyenne mondiale. Les transports ont une place plus importante aux États-Unis (36 %) et dans l'Union européenne (29 %), tout comme les secteurs résidentiels et tertiaires[10].

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

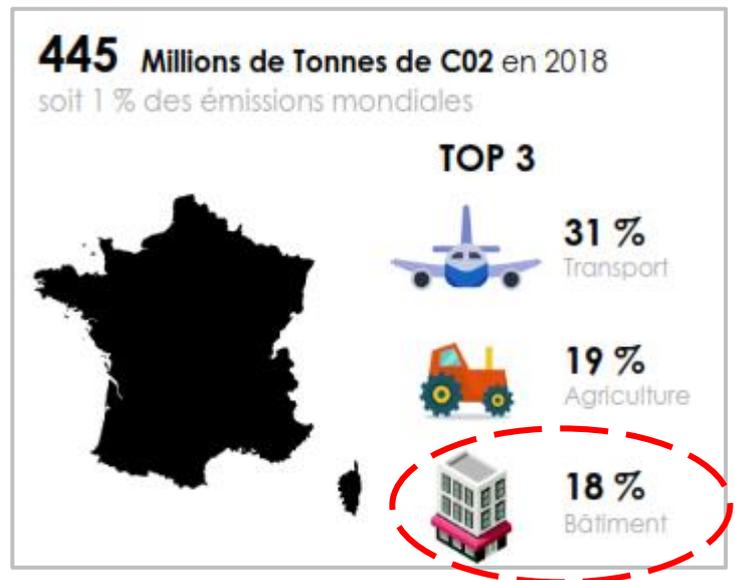


Figure 18 – Chiffre clé du climat [I4CE]

Figure 19 – Répartition des émissions de CO₂ par secteur en France_SNBC

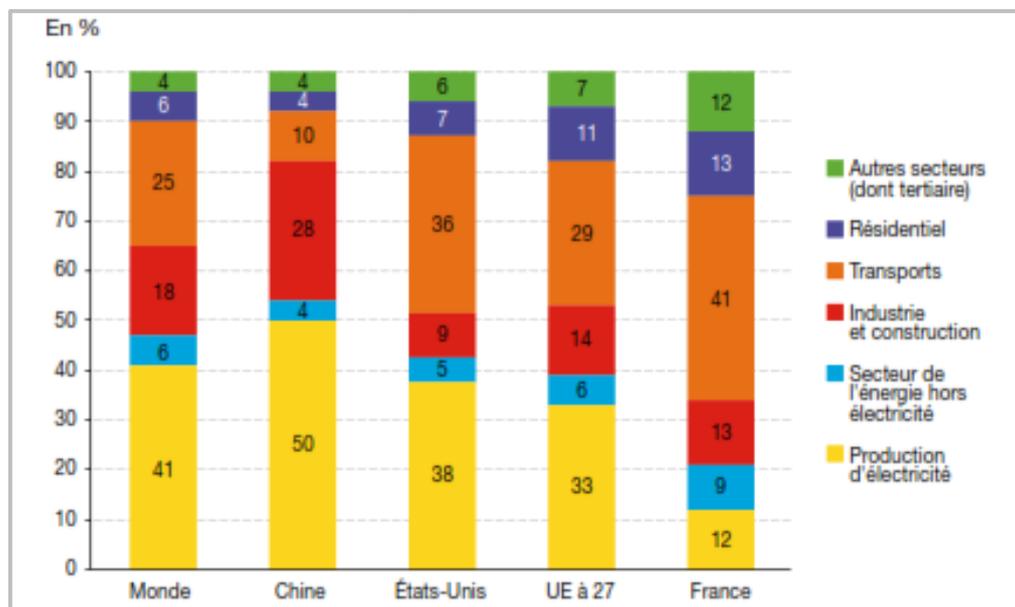


Figure 20 - Répartition sectorielle des émissions de CO₂ dans le monde [AIE]

Dans l'Union européenne, l'utilisation d'énergie reste en 2018 la principale source d'émissions de GES (77,2 %), dont 28,9 % pour l'industrie de l'énergie, notamment la production d'électricité, et 22,0 % pour les transports. Elle est suivie de l'agriculture (10,5 %) et des procédés industriels (9,1 %). Entre 2017 et 2018, les émissions totales se replient de 2,3 %. Toutes les sources sont concernées par cette baisse, avec en premier lieu

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

l'utilisation d'énergie (- 2,6 %). On observe de légères hausses dans les transports et l'industrie manufacturière, qui ont en effet été plus que compensées par les baisses dans l'industrie de l'énergie ainsi que dans le résidentiel et le tertiaire. Sur le plus long terme, les émissions ont baissé depuis 1990 dans l'ensemble de ces secteurs, à l'exception notable des transports (*Figure 20*).

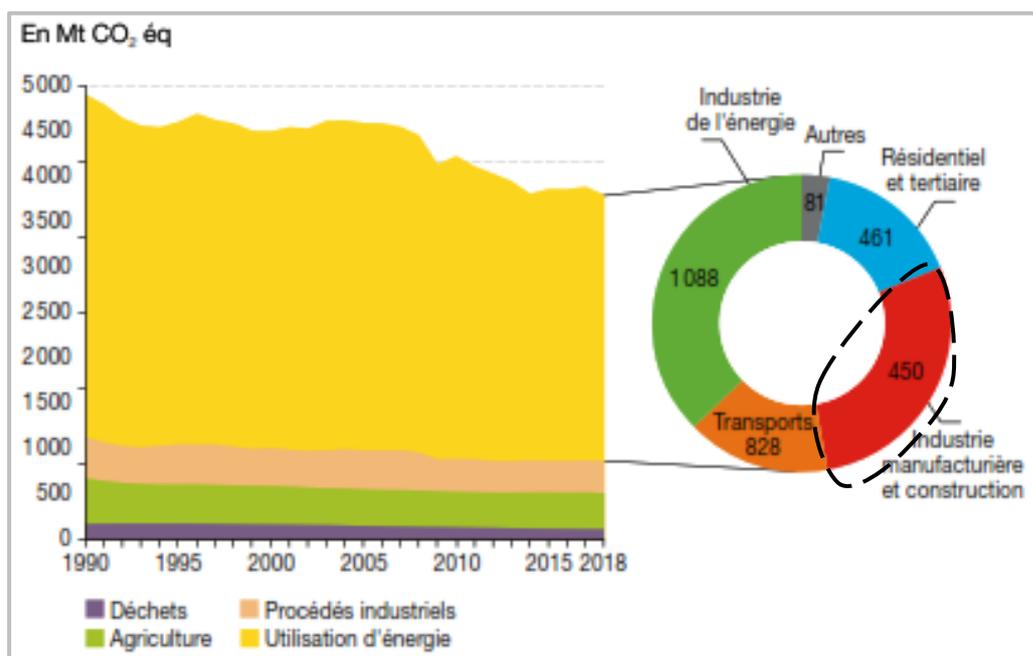


Figure 21 – Répartition par source des émissions de GES dans l'UE entre 1990 et 2018
[AEE _ 2020]

2. Du point de vue énergétique

a) Énergies fossiles et renouvelables

Le stock d'énergies fossiles s'épuise tandis que les ressources renouvelables sont disponibles (*Figure 21*). En Europe, la production et l'utilisation d'énergie représente **95% des émissions de CO₂**.

Concernent l'épuisement des ressources naturelles (notamment celles d'origine fossile). Sur la (*Figure 22*) ci-après, est illustrée à titre d'exemple, l'évolution des réserves pétrolières dans la dernière quarantaine d'années. Actuellement la moitié de ces ressources est pratiquement

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

épuisée et les réserves prouvées (ou encore à découvrir) suffiront tout au plus pour quelques dizaines d'années. [Source : UVED (Université virtuelle Environnement et Développement)].

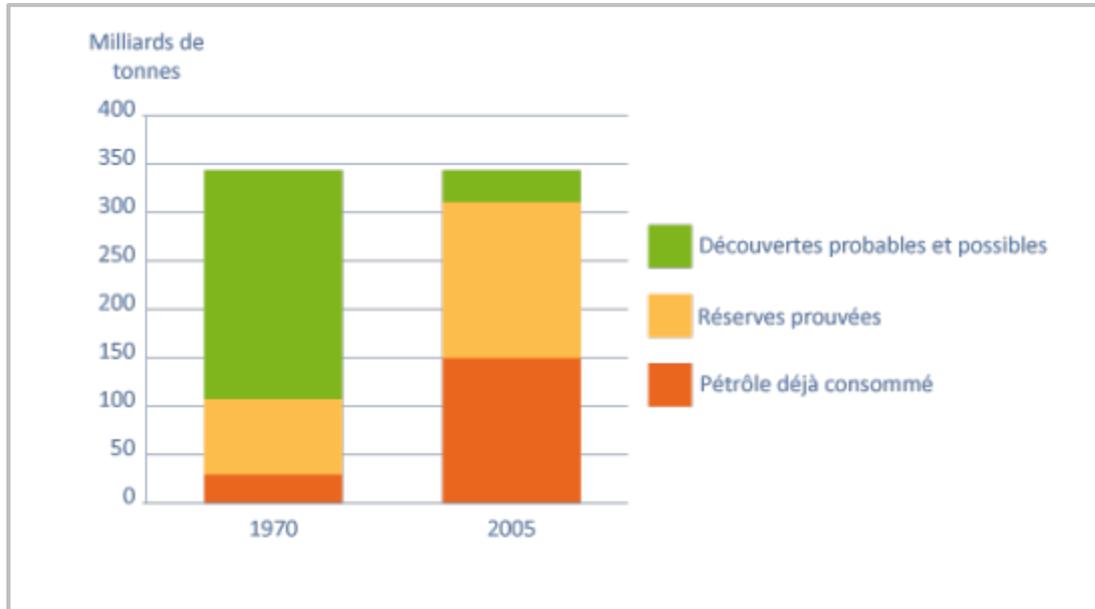


Figure 22 - Réserves ultimes – découvertes cumulées, passées et à venir, de pétrole récupérable[3]

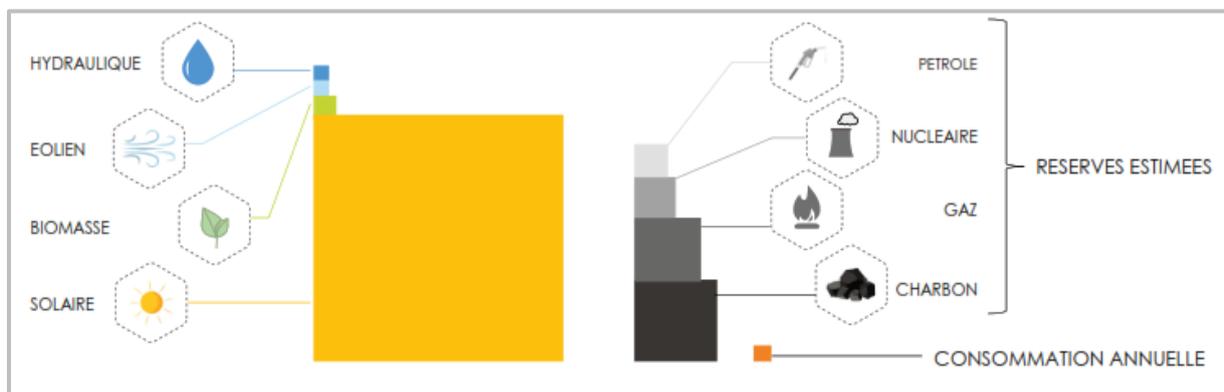


Figure 23 – Estimation de la consommation d'énergies renouvelables et réserves d'énergies fossiles[3]

Nous pouvons donc constater, qu'il est plus qu'utile d'encourager la réduction des consommations d'énergie pour préserver la ressource.

III.) STRATÉGIES DE MISE EN ŒUVRE DE L'ACV EN FRANCE ET DANS LE MONDE

1. Stratégie nationale bas carbone (SNBC)

La stratégie nationale bas carbone[11] est la feuille de route de la France pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Elle concerne tous les secteurs d'activité.

a) Les deux principales ambitions :

- Atteindre la neutralité carbone dès 2050 :



Qui consiste à équilibrer les émissions de GES et l'absorption de carbone par les écosystèmes (forêts, sols agricoles...) et par les procédés industriels (capture, stockage et réutilisation du carbone).

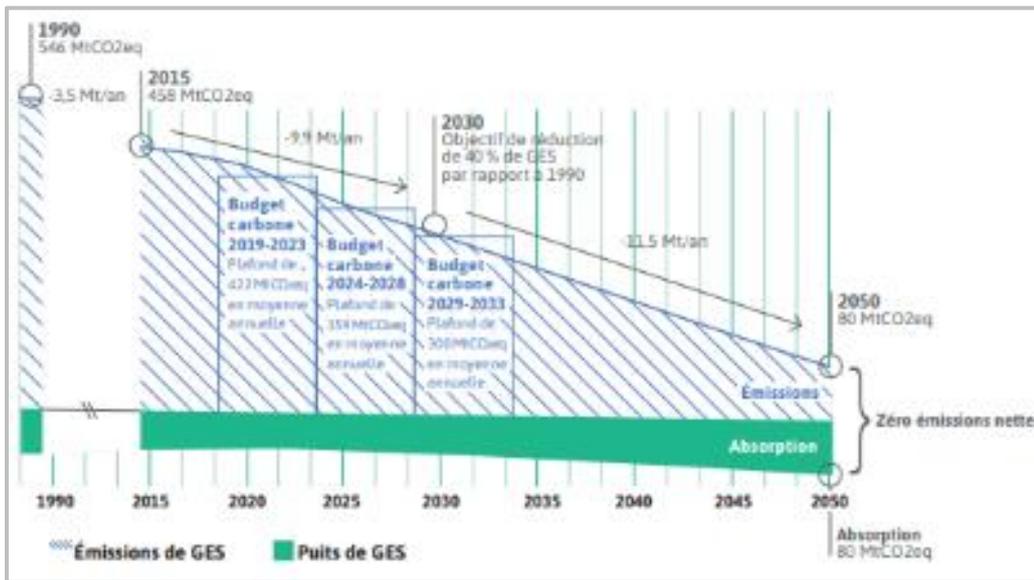
- Réduire l'empreinte carbone des français de 2.5% par an :



Réduire l'ensemble des émissions associées à la consommation des français, incluant notamment celles liées à la production et au transport des biens et des services importés.

❖ Trajectoire de la France à l'horizon 2050 (figure 28)

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**



Objectifs de réduction des émissions de GES par rapport à 2015 :

- En 2030 : - 40%
- En 2050 :
décarbonation complète

Figure 24 – Trajectoire à l’horizon 2050[11]

b) Les orientations de la SNBC pour le secteur du bâtiment

-  Concevoir avec sobriété, diminuer les besoins, améliorer l’efficacité énergétique des bâtiments ;
-  Décarboner l’énergie ;
-  Promouvoir les systèmes à faible carbone (économie circulaire, biosourcé...) ;
-  Stocker le carbone ;
-  Assurer le confort d’été ;
-  Encourager les changements de comportement ;
-  Instaurer des seuils.

2. Les raisons de l'ACV

a) Conférences et accords internationaux

- *La Conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972 à Stockholm, en Suède* : qui engagea les nations avec sa Déclaration de Stockholm et son Plan d'action. Elle donna également naissance au Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) et plaça véritablement les questions écologiques au rang des préoccupations internationales.
- *COP 21* : qui est une conférence internationale sur le climat qui réunit chaque année les pays signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). L'édition 2015 (COP21)[12] a été organisée par la France. L'Accord de Paris [13] qui a été adopté, marque un tournant dans la lutte contre le réchauffement climatique puisqu'il engage tous les pays du monde à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et à maintenir le réchauffement sous la barre des 2°C d'ici 2100. Donc, l'ACV est une stratégie d'atteinte de l'un des objectifs de la COP 21 notamment la limitation des émissions des GES, qui deviendra un calcul obligatoire dans le cadre de la future réglementation 2020 (RE 2020).
- *Agenda 2030 et ses 17 Objectifs de Développement Durable*[12],

b) Avantages externes et internes pour les entreprises

Comme présenté par la (*Figure 24*), la réalisation d'une ACV a des avantages externes et internes au sein d'une entreprise.

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

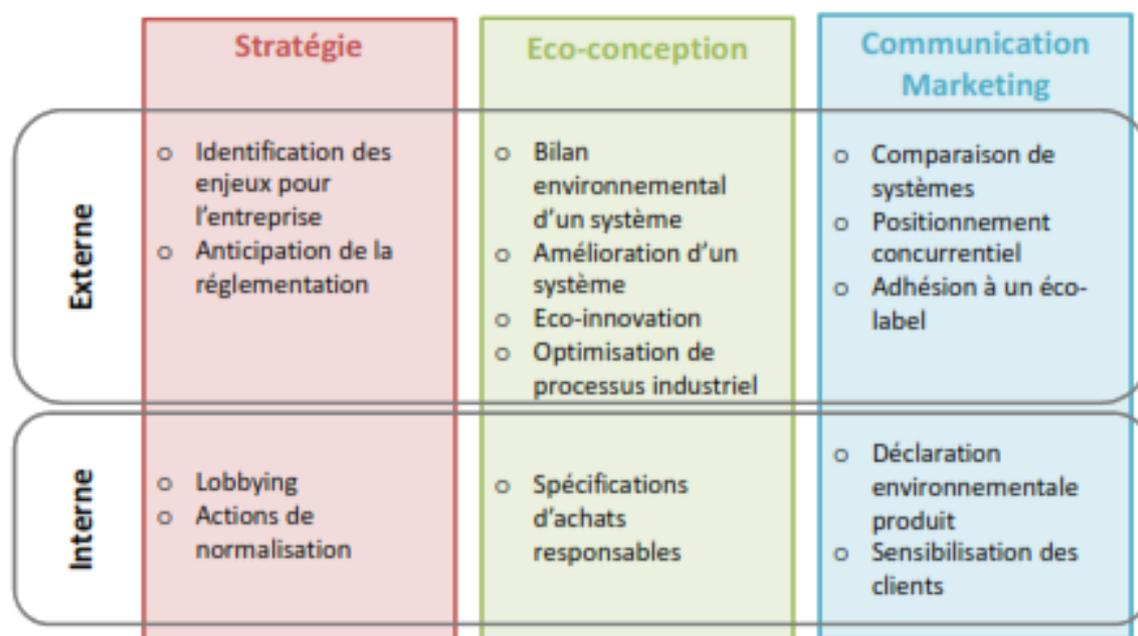


Figure 25 – Présentation des avantages externes et internes de l'ACV

3. L'ACV en France

a) Histoire

La pensée cycle de vie a été initiée dans les années 1960, lorsque le problème de l'épuisement des ressources naturelles est entré dans les consciences. Plus tard, la production des déchets s'ajoute à ce besoin d'intégration des problématiques environnementales dans la culture technoéconomique et la méthode ACV voit le jour. Une dizaine d'années plus tard (1997) une norme ISO est mise en place pour fixer un cadre à cette méthode. Depuis, la méthode connaît des améliorations et développements continus[14].

Toujours dans le souci d'amélioration de la méthode, la première norme en France sur les Analyses de Cycle de Vie est créée en 1996 : NF X30 -300. Et par la suite, le développement de réseaux impliquant des centres de recherche et industriels sur l'ACV verront le jour dans les années 2000.

b) Évolution des labels et réglementations :

- **2017**, label E+C-  préparant au calcul carbone et assurant une transition entre la RT2012 et la RE2020 ;
- **2018**, Loi ELAN  incitation aux bâtiments publics de respecter le niveau E3C1 du label E+C- ;
- **Janvier 2022**, RE2020 , nouvelle réglementation en substitution de la RT2012. Rendant obligatoire le calcul de l'impact carbone des bâtiments et le respect d'un seuil maximum règlementaire.

L'objectif de cette nouvelle réglementation environnementale des bâtiments (RE2020), est la diminution de l'impact carbone des logements individuels et collectifs, l'amélioration de leur performance énergétique, le maintien de leur fraîcheur en périodes de canicules etc. Elle fixe auprès de tous (particuliers comme professionnels du Bâtiment), des objectifs prioritaires et des normes pour favoriser l'environnement et le confort des habitants en toutes saisons. Voir (Figure 25) ci-dessous sur l'évolution de la réglementation.

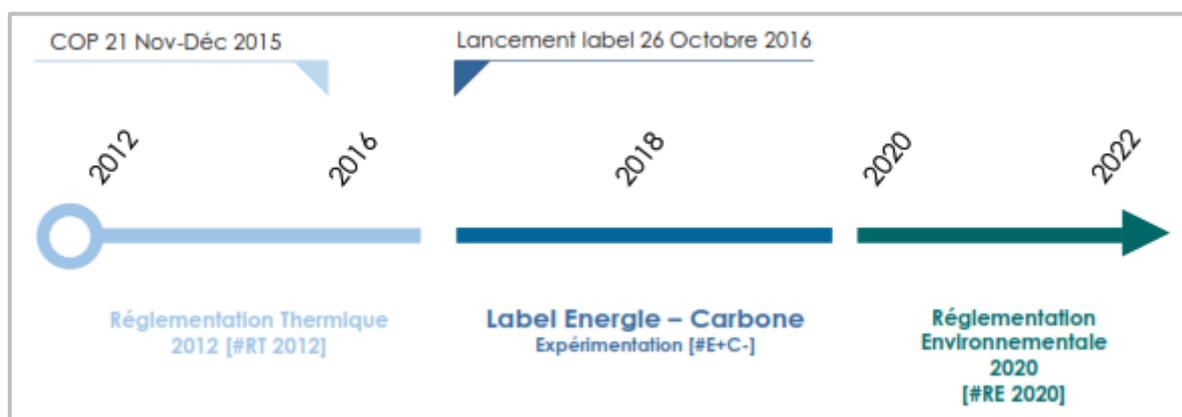


Figure 26 – Évolution de la réglementation sur l'ACV en France

Aujourd'hui, avec l'arrivée de cette nouvelle réglementation environnementale RE2020, de plus en plus de bâtiments sont soumis à l'ACV de la phase conception à la réalisation. Cette démarche est mondialement utilisée, grâce à l'implication des organismes gouvernementaux et aux efforts de diverses institutions. Les normes dédiées à l'ACV sont regroupées dans le cycle ISO 14000.

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

c) Premiers bâtiments avec ACV

La conception et la réalisation des premiers bâtiments[15] avec ACV en France sont présentés ci-dessous (*Figure 26*) :

	
<p>L'école maternelle des Boutours 1 en France, réalisé par l'Architecte de la Mairie de Rosny-sous-Bois Emmanuel PEZRE. Bâtiment à majorité en matériaux biosourcés. Le projet a été primé par l'ADEME, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise des Énergie (2013).</p>	<p>Le Groupe scolaire Stéphane HESSEL, à Montreuil en France. Réalisé par l'Architecte Christian HACKEL. Bâtiment sur deux étages, est un modèle d'architecture écologique et bioclimatique. Les matériaux de façades sont des caissons préfabriqués en bois, remplis de paille (2015)</p>

Figure 27 – Bâtiments avec ACV en France

Chapitre III. MATERIEL ET METHODOLOGIE

I.) MATERIEL

❖ Le logiciel TOTEM

Poussé par la réglementation européenne sur la performance énergétique des bâtiments (PEB), le secteur de la construction a travaillé intensément pour réduire la consommation énergétique des bâtiments au cours des dernières années. En conséquence, les performances se sont grandement améliorées. Mais les bâtiments avec les meilleures performances énergétiques nécessitent plus de matériaux (d'isolation) et ont des installations techniques plus complexes.

L'impact environnemental lié à la consommation d'énergie pendant la durée de vie d'un bâtiment récent est significativement plus faible par rapport aux bâtiments anciens mal isolés. Dans ce cas, les matériaux de construction sont responsables de la plus grande part de l'impact environnemental d'un bâtiment.

TOTEM évalue l'impact environnemental d'un bâtiment en quantifiant 12 groupes d'indicateurs d'impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie des composants dans un bâtiment. Dans l'outil TOTEM, le calcul du coût des composants est basé sur une durée de vie du bâtiment de 60 ans. Si la durée de vie des composants ou éléments est plus courte que celle du bâtiment, leur remplacement sera nécessaire pour s'assurer que le bâtiment continu à répondre à ses exigences techniques.

Les données qui permettent d'évaluer l'impact des composants sont des données génériques, issues de bases de données reconnues et régulièrement mises à jour. Depuis octobre 2020, TOTEM intègre des données spécifiques déclarées par les fabricants à travers les Déclarations Environnementales de Produits (EPD), regroupées dans la base de données développée par le SPF santé publique[16].

Les effets à impact environnemental doivent être identifiés, inventoriés et classés afin qu'une évaluation puisse être réalisée de manière scientifiquement fondée.

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

Alors, l'objectif principal du logiciel TOTEM, est de diffuser la connaissance et la compréhension de la performance environnementale des bâtiments et de faciliter le dialogue au sein du secteur de la construction. Cet outil libre d'aide à la conception, permet de calculer et de communiquer la performance environnementale des éléments de construction et des bâtiments de manière uniforme et neutre, adaptée au contexte européen. Il permet également aux acteurs de la construction d'identifier et de limiter l'impact environnemental des bâtiments dès le début de la phase de conception.

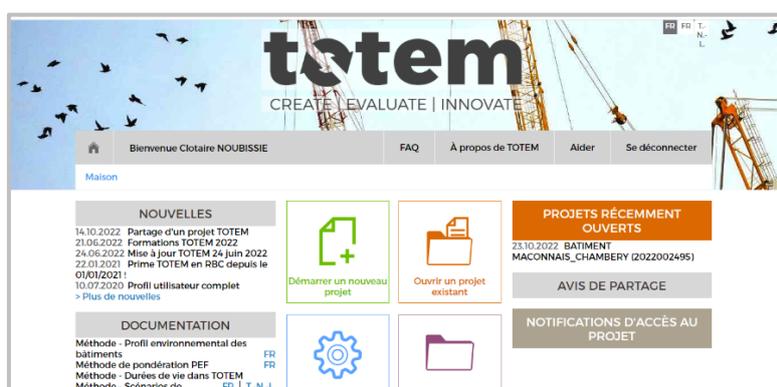


Figure 28 – Présentation de l'interface TOTEM (Aide à l'ACV)

II.) MÉTHODE

L'analyse de cycle de vie fait partie du groupe de méthodes d'analyse environnementale d'un système[2]. Elle démarre par la définition des objectifs et du champ de l'étude (voir figure 28). Puis, la modélisation du système est entreprise. Elle se poursuit par une étape de collecte des données qui aboutit au calcul d'un inventaire regroupant les différents flux de ressources consommées, d'émissions de substances générées et de production de déchets. La dernière étape concerne l'évaluation des impacts environnementaux. Elle nécessite le regroupement des flux de l'inventaire au sein de catégories d'impacts puis, chaque flux est pondéré à l'aide de facteurs de caractérisation. Plusieurs indicateurs d'impacts peuvent ensuite être calculés comme le réchauffement climatique global, l'épuisement de ressources, la toxicité humaine ou l'écotoxicité. À chaque étape de la modélisation d'un système par analyse de cycle de vie, la phase d'interprétation reste fondamentale. Elle peut, en effet, entraîner la redéfinition des objectifs de l'étude. Par nature, la réalisation d'une ACV est donc itérative[16].

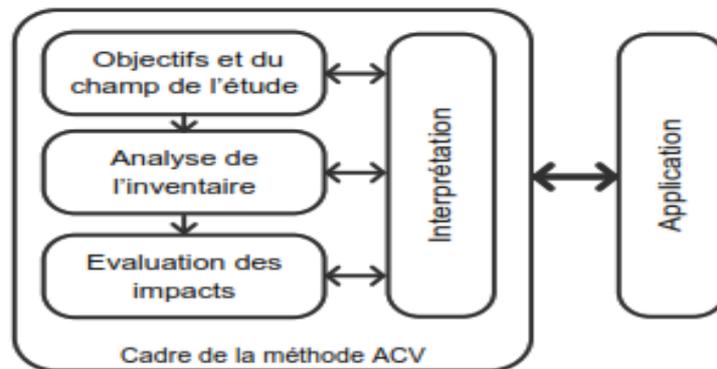


Figure 29 – cadre méthodologique pour conduire une ACV d'après la norme ISO 14040[2]

1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

L'objectif de cette étude est de faire l'ACV complet des deux tours du Maconnais bâtiment R+18 en réhabilitation. Cette étude se limite uniquement sur l'impact carbone des matériaux à savoir l'isolation des murs extérieurs, notamment la phase d'exploitation des matériaux jusqu'à la fin du cycle de vie.

2. Collecte des données d'entrées

Pour obtenir les données d'entrées me permettant de mener à bien mon étude, j'ai dû me rapprocher des responsables de Cristal Habitat (Maitre d'ouvrage), notamment les agents de résidence et le responsable projet. Ma présence constante sur le chantier, m'a permis également de tisser des liens forts avec des locataires retraités qui vivent dans le quartier et occupent le bâtiment depuis plusieurs années. Procédant donc à une campagne de sondage auprès de ces derniers, j'ai pu obtenir les informations nécessaires à l'avancement de mon projet de recherche, telles que :

- Année de rénovation,
- Année de construction,
- Nombre d'utilisateur,
- Surface de plancher brute,
- Durée du cycle de vie du bâtiment,
- Volume chauffé,
- Nature des matériaux existants...

Il n'est pas à oublier toute la documentation du chantier et la revue documentaire.

3. Définition des différents scénarios

a) Scénario 1 : Bâtiment avec matériaux isolant existant : Polystyrène extrudé

Pour avoir toutes les informations sur le matériau constitutif du bâtiment existant (avant travaux), je me suis rapproché des entreprises qui ont été en charge des travaux de démolition. J'ai également pris connaissance des photos avant travaux et du rapport d'état des lieux.

b) Scénario 2 : Bâtiment avec matériaux isolant : laine de roche

Très visible sur le bâtiment en réhabilitation, le matériau isolant laine de roche, est celui qui a été adopté par le client pour les travaux de façades, afin d'améliorer le confort thermique du bâtiment. Je suis donc parti sur la base de ce matériau qui a été utilisé pour l'ensemble des façades. Phase des travaux à laquelle j'ai assisté.

c) Scénario 3 : optimisation

Après plusieurs simulations avec des matériaux différents et à l'aide du logiciel TOTEM, j'ai opté pour le matériau isolant qui présente un faible poids carbone. Notamment l'isolant en chanvre et un plancher en bois de type profilé FJI 350. Qui est la solution que je propose pour réduire l'impact environnemental du bâtiment.

4. Mode de calcul du CO2

On dresse l'inventaire des flux entrants et sortants, en prenant en compte les aspects énergétiques et matériels. Chaque flux doit être relié à chaque étape du cycle de vie. Les données sont déduites des facteurs d'activités, des facteurs d'émissions et de diverses banques de données.

À l'aide du logiciel TOTEM, qui est un outil d'aide à l'ACV, j'ai rentré les données de base. Me servant également de mes cours de structures biosourcés acquis pendant mon échange académique à l'INSA, pour avoir une approche scientifique et analytique. J'ai procédé à plusieurs simulations en fonction des différents scénarios et en modifiant chaque type de

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

matériaux. Le résultat retenu est le matériau avec un faible score environnemental. La faisabilité de la solution adoptée a été également prise en compte.

Pour le calcul de l'impact carbone, le logiciel TOTEM tient compte :

❖ **Des indicateurs environnementaux**, décrits dans les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) du produit ou matériau fourni par le fabricant que l'on retrouve dans la base de données INIES. Ces indicateurs environnementaux comprennent :

- Le facteur de caractérisation, issus de la base de donnée du cycle de vie.
- Le facteur d'impact, qui se calcule comme suit :

$$\text{Facteur d'Impact}_i = \sum_{j=1..N_{\text{Flux}}} \text{Flux}_j \times \text{Facteur de caractérisation}_{j,i}$$

Flux = quantités de matière, eau, énergie etc. entrant et sortant du périmètre d'étude durant toutes les étapes de vie du produit.

Le **calcul de l'impact CO₂**, se fait suivant la formule ci-dessous, intégré au logiciel :

$$\text{Impact}_i = \text{CUF} \times \sum_{j=1..N_{\text{Flux}}} \text{Flux}_j \times \text{Facteur d'Impact}_{j,i}$$

CUF = coefficient d'unité fonctionnelle :

$$\text{CUF} = \frac{1}{\text{nombre d'UF effectuées pdt Durée de Vie}}$$

Il est à rappeler que toutes les formules suscitées sont directement intégrées au logiciel d'aide à l'ACV TOTEM qui est connecté à la base INIES nécessitant une connexion internet.

Chapitre IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

I.) RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Afin d'obtenir les résultats des différents scénarios, une première étape est requise ; l'entrée des données de base et modélisation du bâtiment dans le logiciel TOTEM, telle que présentée sur la (figure 34) ci-dessous. Et qui permettra d'obtenir le score environnemental pour chaque scénario, suivant les parties d'ouvrage susceptible d'être réhabilitées (isolation des murs, plancher, fenêtres, portes etc.).

Bâtiments							
AJOUTER UN NOUVEAU BÂTIMENT				AJOUTER UN BÂTIMENT À PARTIR DE LA BIBLIOTHÈQUE			
Nom	Année de construction	Année de rénovation	Surface brute de plancher	Nombre d'étages (y compris le rez-de-chaussée)	Inclure les pertes de ventilation ?	Volume chauffé	nombre d'utilisateurs
Scénario 2 _ Mur Laine de roche		2020	500 m ²	19	Oui	1 195,65 m ³	456
Scénario 1 _ Mur Polystyrène extrudé	1971	2020	500 m ²	19	Oui	1 195,65 m ³	456
Scénario 3 _ Optimisation		2020	500 m ²	19	Oui	1 195,65 m ³	456

Figure 30 – Récapitulatif des données d'entrées et modélisation sur le logiciel TOTEM

1. Scénario 1 : Bâtiment avec matériaux isolant existant : Polystyrène extrudé

La visualisation du matériau isolant polystyrène extrudé est présentée par la (Figure 30), la description des différents éléments constitutifs par le (Tableau 1), le poids carbone par parties d'ouvrage et l'impact carbone du scénario 1 présenté par les (Figures 31 et 32).

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

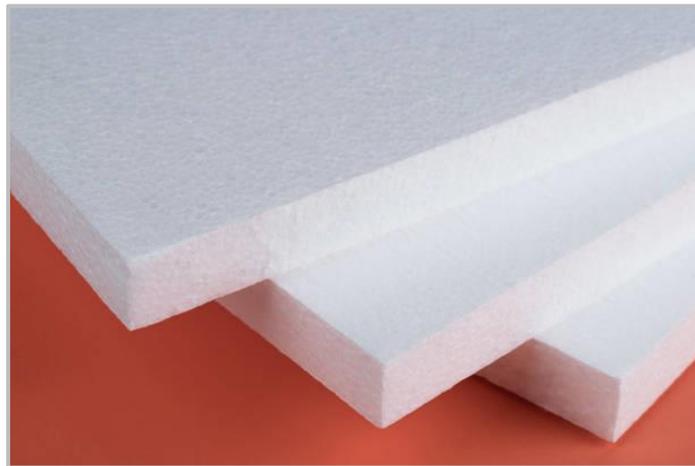


Figure 31 – Visualisation du matériau polystyrène extrudé

Éléments	Descriptif du matériau
Mur extérieur	Panneau XPS (Polystyrène extrudé) collé et fixé avec des chevilles Coulé sur site_Béton armé Enduit épais_Plâtre
Fenêtre extérieure	Profilés_Bois dur tropical ($U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$) Vitre_Double vitrage - remplissage
Porte extérieure	Panneau bois vitrage
Porte intérieure	Panneau_bois Chêne $U = 1,58 \text{ W/m}^2\text{K}$
Sol plancher	Enduit épais_Plâtre Coulé sur site_Béton armé Carreaux rigides_Céramique émaillée
Toiture	Feuille d'étanchéité couche en fibre de verre bitumineux Béton cellulaire Enduit épais

Tableau 1 – Descriptif des matériaux par éléments

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

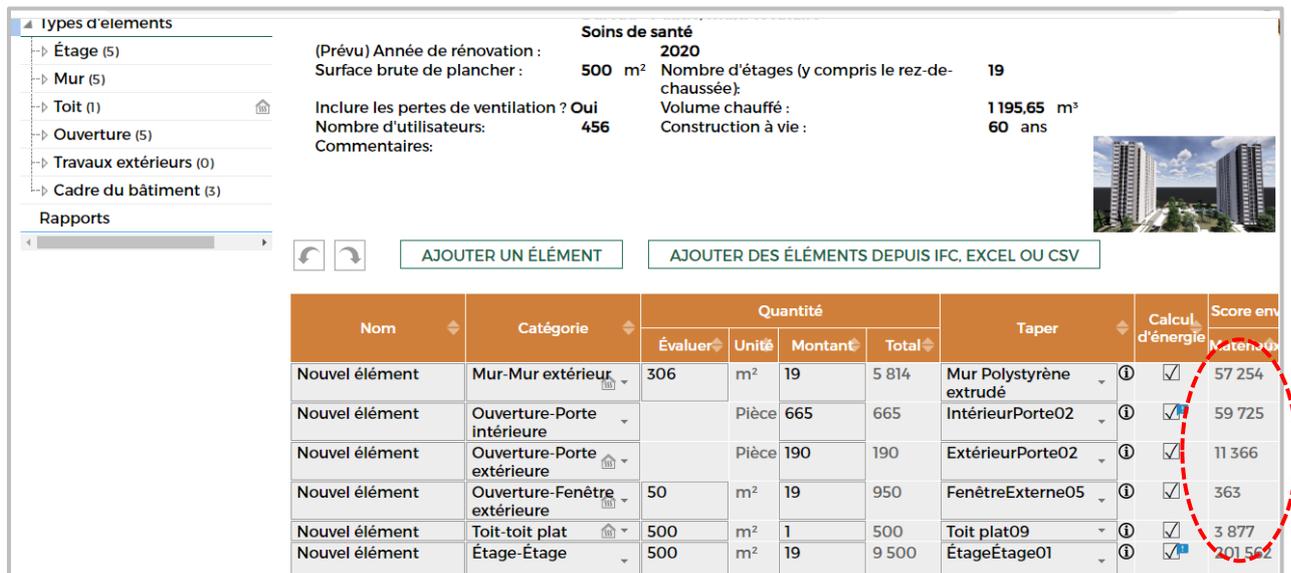


Figure 32 - Score environnemental par partie d'ouvrage

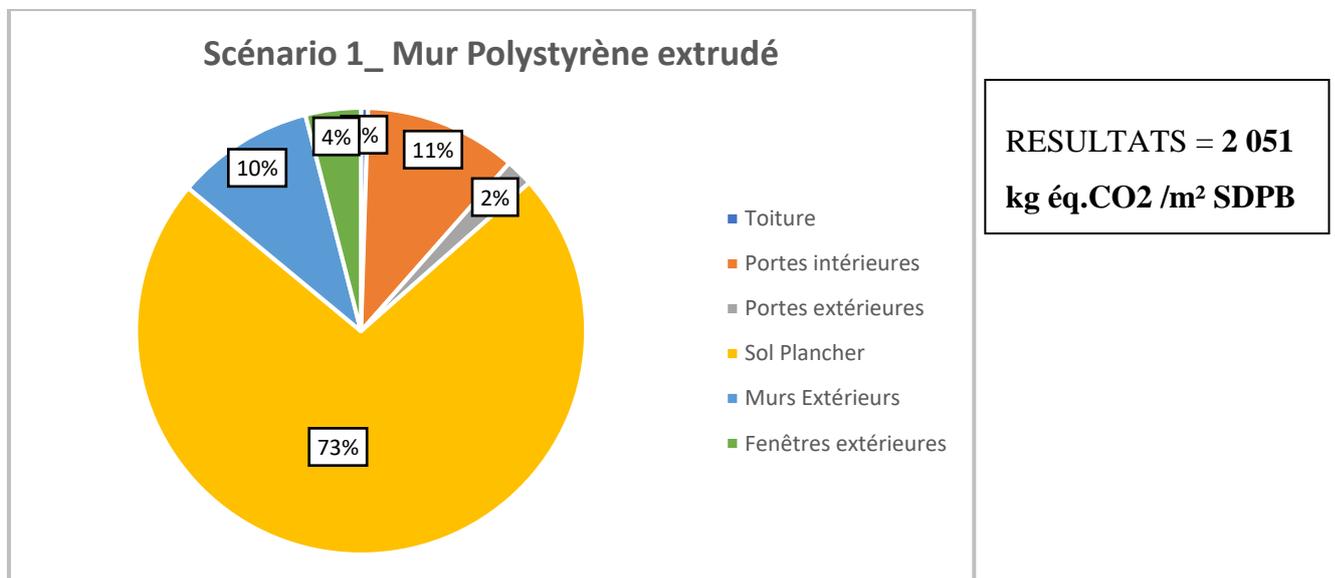


Figure 33 - Impact par catégorie d'éléments_1

2. Scénario 2 : Bâtiment avec matériaux isolant : laine de roche

La visualisation du matériau isolant laine de roche est présentée par la (Figure 33), la description des différents éléments constitutifs par le (Tableau 2), le poids carbone par parties d'ouvrage et l'impact carbone du scénario 1 présenté par les (Figures 34 et 35).



Figure 34 – Visualisation du matériau Laine de roche

Eléments	Descriptif du matériau
Mur extérieur	Laine de roche
Fenêtre extérieure	Panneau PVC double vitrage
Porte extérieure	Panneau PVC double vitrage
Porte intérieure	Panneau_bois Chêne
Sol plancher	Enduit épais_Plâtre Coulé sur site_Béton armé revêtement souples_Linoléum

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

Toiture	Feuille d'étanchéité couche en fibre de verre bitumineux Béton cellulaire Enduit épais
---------	--

Tableau 2 - Descriptif des matériaux par éléments

Scénario 1 _ Mur Polystirène

Types d'éléments

- Étage (5)
 - Étage au niveau (2)
 - FloorOnGrade14
 - FloorOnGrade03
 - Étage (3)
 - ÉtageÉtage01
 - ÉtageÉtage24
 - ÉtageÉtage02
 - Grenier (0)
 - Étage au-dessus de l'espace
- Mur (3)
- Toit (1)
- Ouverture (5)
 - Travaux extérieurs (0)
 - Cadre du bâtiment (3)
- Rapports

Fonction - typologie : **Résidentiel**
- Immeuble résidentiel -
Bureau - Public, multi-locataire
Soins de santé

(Prévu) Année de rénovation : **2020**
Surface brute de plancher : **500 m²**
Inclure les pertes de ventilation ? **Oui**
Nombre d'utilisateurs : **456**
Commentaires:

Nombre d'étages (y compris le rez-de-chaussée): **19**
Volume chauffé : **1 195,65 m³**
Construction à vie : **60 ans**

12.11.2022 13:20:50 par
Clotaire NOUBISSIE

Nom	Catégorie	Quantité			Taper	Calcul d'énergie	Score en matériaux
		Évaluer	Unité	Montant			
Nouvel élément	Ouverture-Fenêtre extérieure	50	m ²	19	950	FenêtreExterne03	31 189
Nouvel élément	Ouverture-Porte extérieure		Pièce	190	190	ExtérieurPorte02	11 366
Nouvel élément	Mur-Mur extérieur	306	m ²	19	5 814	ExterneMur21	52 677
Nouvel élément	Ouverture-Porte intérieure		Pièce	665	665	IntérieurPorte02	59 725
Nouvel élément	Toit-toit plat	500	m ²	1	500	Toit plat09	3 877
Nouvel élément	Étage-Étage	500	m ²	19	9 500	ÉtageÉtage02	142 000

Figure 35 - Score environnemental par partie d'ouvrage

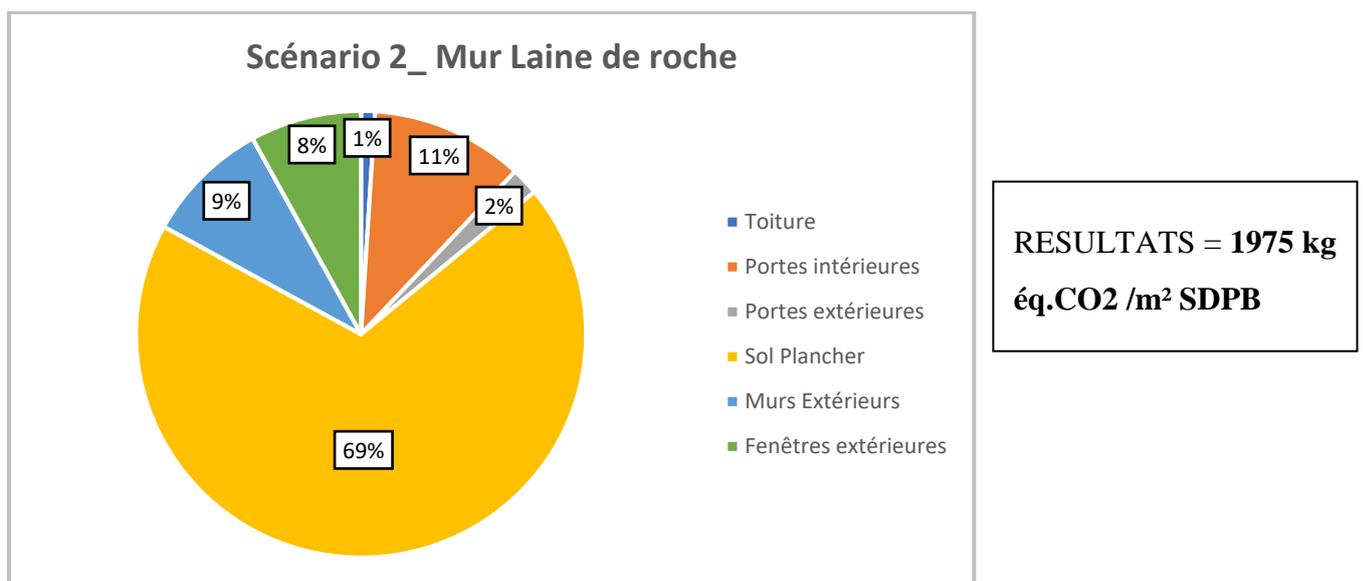


Figure 36 – Impact par catégorie d'éléments_2

3. Scénario 3 : optimisation

Pour optimiser l'impact carbone de notre bâtiment, nous avons décidé d'agir sur la partie d'ouvrage la plus prépondérante qui est le sol plancher des étages et en agissant également sur les matériaux constitutifs des murs extérieurs. Ci-dessous, la composition en termes de matériaux de ces parties d'ouvrages :

❖ Sol - plancher

- C9 : Dalle souple | Linoléum (2.5 mm) collé
- C8 : Panneau | plâtre vissé (2x12.5 mm) | vissé
- C7 : Panneau | OSB (18 mm) | vissé ;
- C6 : Couche composé [lame d'air non ventilée - matelas laine de roche fixé par serrage | Profilé FJI 350 – bois résineux, fibre de bois (500 mm – entraxe 500 mm)] ;

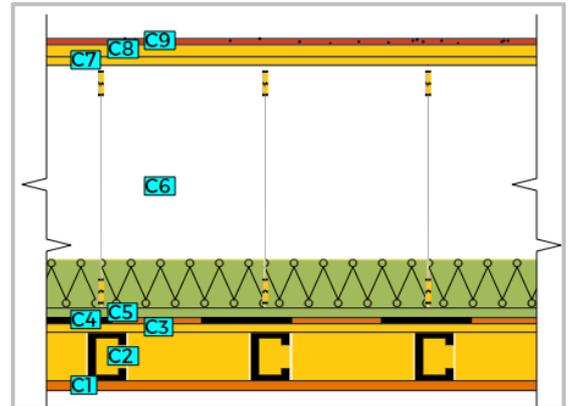


Figure 37 – Matériaux constitutifs du plancher



Figure 38 – Illustration de réalisation d'un plancher
en Profilé FJI 350

- C5 : Bloc caoutchouc ;
- C4 : Feuille d'étanchéité | PP – PEBD (0.22 mm) agrafé
- C3 : Panneau | OSB (18 mm) | vissé ;
- C2 : Profilés | Aciers galvanisés | vissé | pour plafond suspendu ;
- C1 : Panneau laine de roche (20 mm) | cloué | pour plafond suspendu – sur structure portante métallique.

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

❖ **Mur extérieur : avec matériau isolant – le chanvre**

- C1 : Enduit épais | Enduit traditionnel (7 mm) | sur isolement | mécanique ;
- C2 : Panneau | fibre de bois (18mm) | vissé, $\lambda = 0.07 \text{ W/m K}$;
- C3 : Couche composée [Profilé FJI 250 avec $\lambda = 0.159 \text{ W/m K}$ |bois lamellé – OSB (360 mm – entraxe 500 mm) | incluant sablière ; Flocons | cellulose (360 mm) - chanvre | pour remplir entre poutre TJI | insufflé sur site ; avec $\lambda = 0.04 \text{ W/m K}$;
- C4 : Panneau | OSB (18 mm) | vissé, avec $\lambda = 0.13 \text{ W/m K}$;
- C5 : Feuille d'étanchéité | PP – PE (0.22 mm) | scotché ;
- C6 : Lattes | bois résineux (47x22 mm) | cloué | non traité ;
- C7 : Bloc | plâtre (501x50x666 mm) | collé ;
- C8 : Films | peinture acrylique | sur enduit en plâtre.

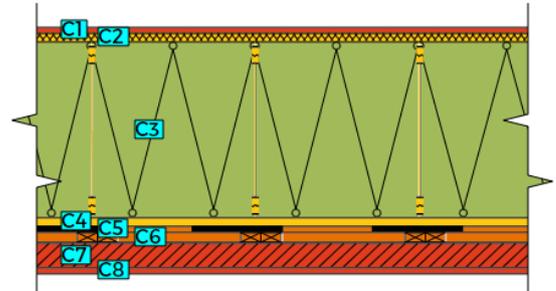
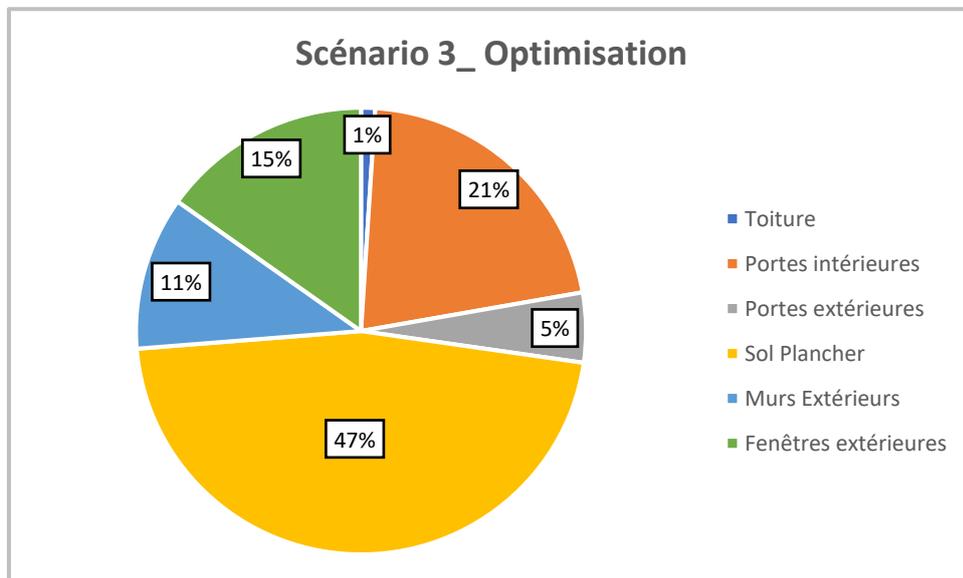


Figure 39 - Matériaux constitutifs des murs extérieurs



**RESULTATS = 1 091
kg éq.CO2 /m² SDPB**

Figure 40 - Impact par catégorie d'éléments_3

II.) ANALYSE COMPARATIVE ET DISCUSSION

1. Comparaison entre les scénarios

L'évolution des impacts environnementaux pour chaque scénario est présentée par la (Figure 40) et le (Tableau 3) qui présente un récapitulatif en terme d'impact énergie et matériau.

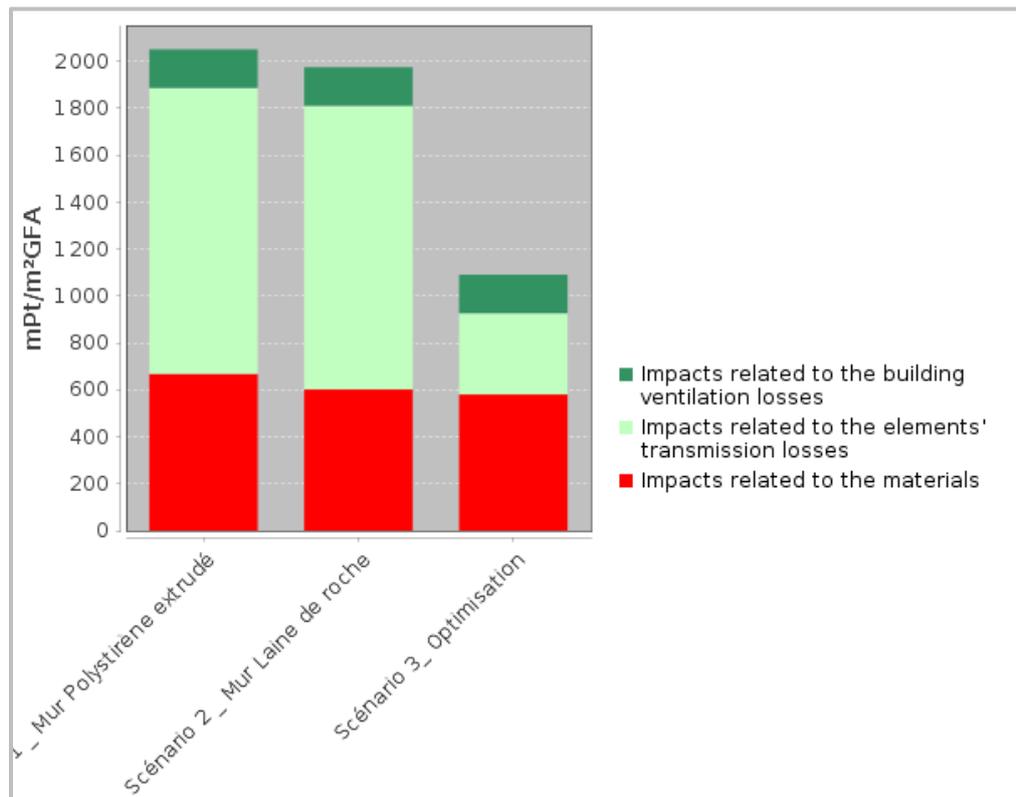


Figure 41 - Impact énergie et matériaux

	Énergie [mPt/m²GFA]		Matériaux [mPt/m²GFA]	Total [mPt/m²GFA]
	Ventilation	Transmission		
Scénario 1 - Mur Polystyrène extrudé	164	1218	668	2051
Scénario 2 - Mur Laine de roche	164	1209	602	1975
Scénario 3 - Optimisation	164	346	580	1091

Tableau 3 - Récapitulatif impact énergie et matériaux

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

	Matériaux isolants	Avantages	Inconvénients
Scénario 1	Polystyrène extrudé (isolant existant)	<ul style="list-style-type: none"> - Très bonne qualités isolantes ; - Conductivité thermique faible ; - Légèreté, pose aisée, résistance à la compression et à la vapeur d'eau ; - Durée de vie de plus de 50 ans 	<ul style="list-style-type: none"> - Produit dérivé du pétrole ; - Matériau polluant et non biosourcé ; - Importante quantité d'énergie pour la transformation ; - Faible résistance au feu ; - Absence de propriétés d'isolation phonique
Scénario 2	Laine de roche (choix du client)	<ul style="list-style-type: none"> - Excellent propriétés thermiques et phoniques ; - Incombustible ; - Matériau 100% naturel et non polluant écologique - Invulnérabilité aux termites et à l'humidité. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie assez courte. À partir de 10 ans, on considère que ce matériau entame sa dégradation et perd de ses performances et qui doit être changé au bout de 15 ans ; - Périssable,
Scénario 3	Chanvre (optimisation)	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure durée de vie que la laine de roche ; - Non périssable, ce qui allonge sa durée de vie ; - Sa production nécessite peu de pesticides et d'herbicides et il libère peu de toxines dans le sol et l'écosystème ; - Conçu à base de fibre 100% naturelle ; - Isolant écologique et éco responsable ; - Production non nocive et 	<ul style="list-style-type: none"> - La production de chanvre nécessite plus d'azote

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

		bilant énergie grise faible	
--	--	-----------------------------	--

Tableau 4 – Comparaison des différents matériaux pour chaque scénario

❖ **Interprétation et discussion des résultats du scénario 1 :**

Le résultat obtenu soit 2 051 kg éq.CO₂/m² SDPB (*Figure 32*), permet de constater qu’avec le matériau existant (polystyrène extrudé pour les murs extérieurs et le plancher en béton armé avec un revêtement céramique très prépondérant soit 73%), n’est pas du tout favorable à la réduction de l’impact carbone du bâtiment.

❖ **Interprétation et discussion des résultats du scénario 2 :**

En réévaluant l’impact carbone du bâtiment avec les nouveaux matériaux utilisés actuellement sur le chantier, tels que la laine de roche pour les murs extérieurs et le revêtement de sol souple pour le plancher en béton armé, le résultat de la simulation permet d’obtenir un score environnemental qui diminue de **3.7%** par rapport à la valeur obtenue avec les matériaux existants (*Figure 35*), qui n’est pas du tout considérable du point de vue environnemental.

❖ **Interprétation et discussion des résultats du scénario 3 :**

En agissant sur les parties d’ouvrages prépondérantes, la simulation nous permet d’obtenir une réduction de l’impact carbone de **46.8%** par rapport à celle obtenue avec les matériaux existants (*Figure 39*). Par conséquent, les matériaux choisis sont propices à la réduction de l’impact carbone de notre bâtiment.

Dans le graphique ci-dessous (*Figure 40*), l’impact de tous les éléments du bâtiment (score environnemental) total divisé par la surface de plancher brute du bâtiment, est additionné par cycle de vie. Cette évaluation démontre que les composants du bâtiment ont un impact significatif dans leur phase de production, de construction, d’utilisation ou de fin de vie, permettant à l’utilisateur d’aborder une étape spécifique du cycle de vie.

Ce qui permet d’évaluer :

ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS – BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

- l'impact total du bâtiment, exprimé en millipoints (mPt) ou équivalent de CO₂ par mètre carré de surface de plancher brute (GFA), qui peut aider à comparer différents bâtiments ;
- l'importance relative de l'impact matériel et énergétique de l'impact total par bâtiment ;
- l'impact énergétique d'un élément est calculé sur la base de la consommation d'énergie pour le chauffage résultant des pertes de transmission ;
- l'impact énergétique d'un bâtiment s'exprime sous une forme simplifiée comme la somme de :
 - les pertes de transmission de chaque élément,
 - les pertes de ventilation du bâtiment. Ces pertes sont entre autres calculées en fonction du volume du bâtiment et de la valeur par défaut d'étanchéité à l'air prise en compte dans le logiciel $PEB = 12m^3 / (h.m^2)$,
 - le volume du bâtiment est calculé en utilisant la formule standard (surface brute de plancher x 3 m).

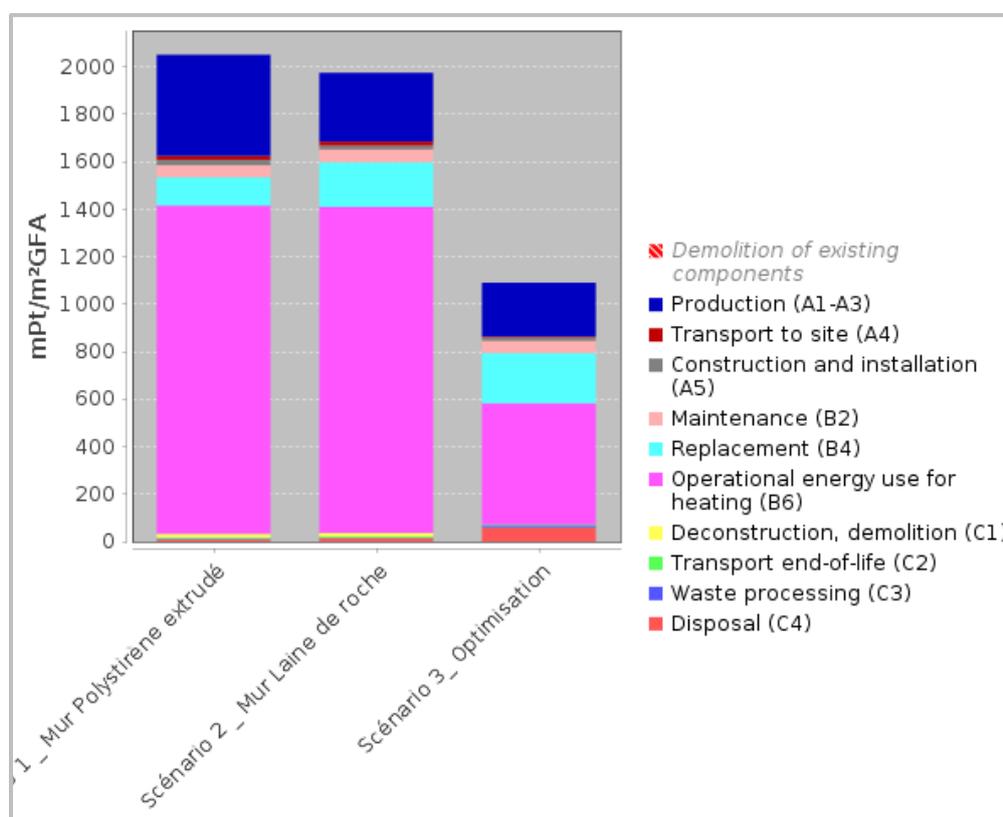


Figure 42 - Impact par étape du cycle de vie

Conclusion générale et perspectives

Au terme de ce projet de recherche très enrichissant, dont l'objectif était de faire l'analyse du cycle de vie complet du bâtiment (les deux tours du Mâconnais R+18) à Chambéry et de proposer un choix de matériaux biosourcés qui permettra de réduire l'impact carbone conformément aux différentes exigences que présentent les constructions durables. Partant spécifiquement de la collecte de données d'entrée, de la définition des différents scénarios et de la présentation du mode de calcul du CO₂.

Alors, tout au long de nos recherches, nous avons pu noter que, l'aspect amélioration de la performance environnementale et énergétique du bâtiment à l'époque de sa conception et construction en 1971, n'a pas été pris en compte. Ce qui justifie qu'à cette époque les enjeux climatiques et énergétiques n'étaient pas encore au centre des préoccupations.

Au vu des différents scénarios qui ont été appliqués, nous avons pu réduire d'environ 47% le poids carbone du bâtiment en optimisant par l'utilisation des matériaux biosourcés tels que le chanvre comme isolant pour les murs extérieurs et d'un plancher bois en profilé FJI 350 au détriment du béton très énergivore.

Dans une économie qui se veut de plus en plus circulaire et face à tous les impératifs environnementaux, l'usage des matériaux biosourcés devient une évidence. Le nombre de marchés publics recherchant des prestataires à faible impact carbone va augmenter de manière exponentielle dans le but d'atteindre l'objectif européen « zéro carbone » en 2050 dans les constructions. Les pouvoirs publics en sont de plus en plus conscients, un vent nouveau souffle sur les marchés publics. En effet, la règle du moins-disant a jusqu'ici été scrupuleusement appliquée dans le choix d'un prestataire. Mais dans un contexte de relance économique où injecter de l'argent dans l'économie locale est primordial, le recours à de la sous-traitance locale et l'usage de matériaux biosourcés sont devenus des critères faisant peser la balance d'un côté ou d'un autre. Il est à rappeler que, cette tendance ne se limite pas aux seuls marchés publics, c'est toute la filière BTP qui va devoir changer de paradigme, changer ses pratiques pour construire plus durable.

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**



**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**



Bibliographie

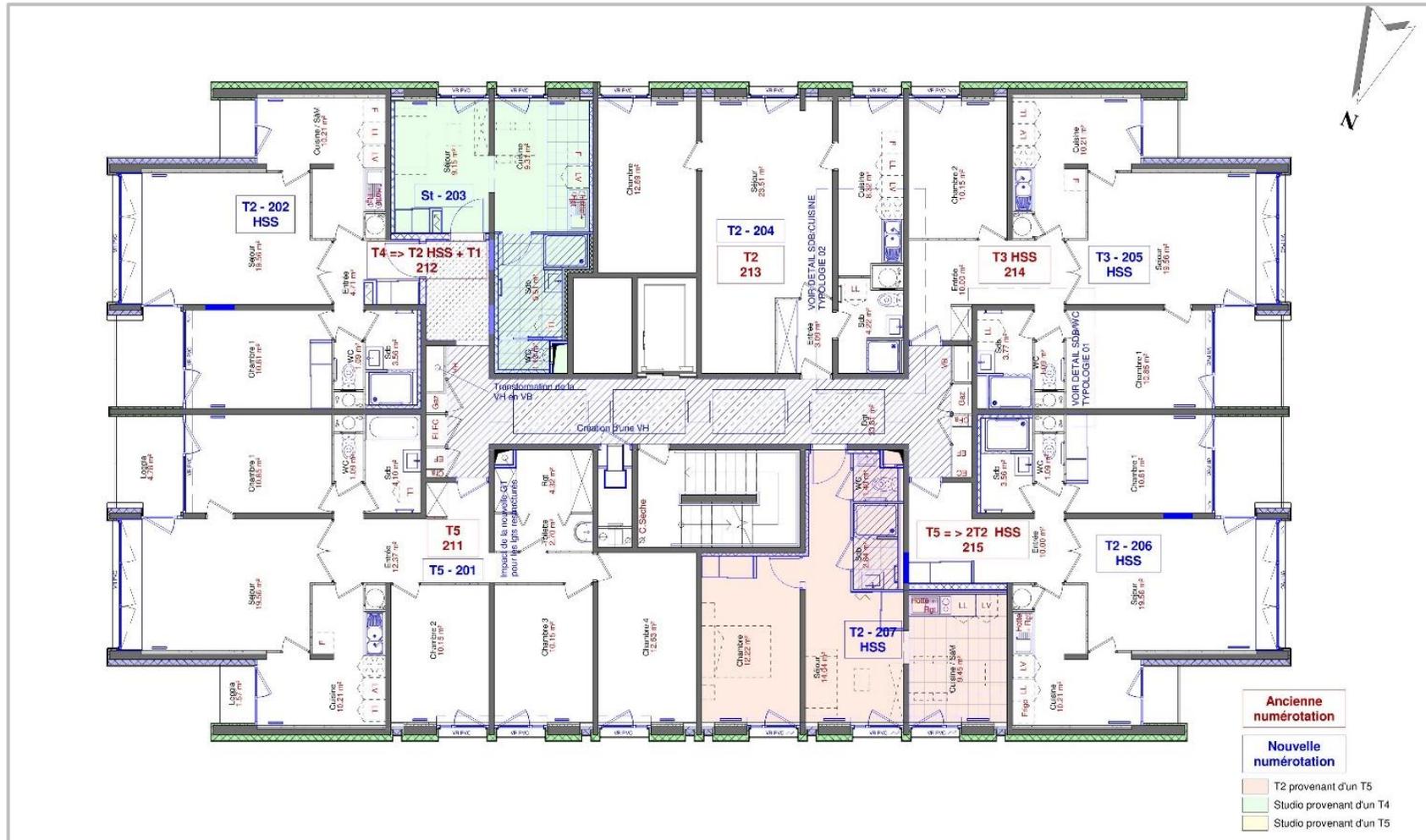
- [1] C. R. de Trautenberg, L. Galsomiès, and Y. Martinet, 'Références bibliographiques', in *Références bibliographiques*, EDP Sciences, 1970, pp. 161–164. doi: 10.1051/978-2-7598-1063-5.c019.
- [2] L. Tiruta-Barna, 'Verrous de l'application de l'ACV au bâtiment, nouvelles approches et perspectives', *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 2, Art. no. 2, Mar. 2022, Accessed: Feb. 01, 2023. [Online]. Available: <https://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/2837>
- [3] 'Cours ACV- INSA LYON, 2019.pdf'.
- [4] *Analyse de Cycle de Vie du bâtiment (ACV) : impact environnemental des matériaux*, (2020). Accessed: Jul. 17, 2022.
- [5] B. Bates, Z. W. Kundzewicz, J. Palutikof, and S. Wu, 'Le changement climatique et l'eau'.
- [6] B. Cassoret and B. Lalonde, *Transition énergétique*. De Boeck Supérieur, 2020.
- [7] M. Semar and A. Mrbencherrat, 'l'effet de serre', Working Paper, Jul. 2010. Accessed: Feb. 02, 2023. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/1066>
- [8] F. Lecomte, P. Broutin, and E. Lebas, *Le captage du CO2: des technologies pour réduire les émissions de gaz à effet de serre*. Editions TECHNIP, 2009.
- [9] Rapport, 'Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat'. Jul. 01, 2022. Accessed: Jul. 14, 2022.
- [10] P. Criqui, 'Effet de serre : quelques scénarios', in *Futuribles*, 2006, no. 315, p. 65. Accessed: Feb. 02, 2023. [Online]. Available: <https://shs.hal.science/halshs-00007694>
- [11] J. Boutang and M. Tuddenham, 'L'ambitieux objectif français de la neutralité carbone nette en 2050', *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, vol. 89, no. 1, pp. 34–38, 2018, doi: 10.3917/re1.089.0034.
- [12] L. 2030 en France, '17 Objectifs de développement durable', *L'Agenda 2030 en France*, Aug. 14, 2022. <https://www.agenda-2030.fr/17-objectifs-de-developpement-durable/> (accessed Aug. 14, 2022).
- [13] 'Conférence de Paris de 2015 sur les changements climatiques', *Wikipédia*. Mar. 28, 2022. Accessed: Jul. 14, 2022.
- [14] L. Tiruta-Barna, 'Verrous de l'application de l'ACV au bâtiment, nouvelles approches et perspectives', *Academic Journal of Civil Engineering*, vol. 40, no. 2, Art. no. 2, Mar. 2022, Accessed: Feb. 02, 2023. <https://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/2837>

**ANALYSE DU CYCLE DE VIE (ACV) DES DEUX TOURS DU MACONNAIS –
BÂTIMENT R+18 EN REHABILITATION : IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES
MATERIAUX**

- [15] ‘Les Bâtiments Biosourcés en ville’, *Vegetale*. http://www.vegetal-e.com/fr/les-batiments-biosources-en-ville_339.html (accessed Dec. 12, 2022).
- [16] ‘Méthodologie | Guide Bâtiment Durable’.
<https://www.guidebatimentdurable.brussels/totem-outil-belge-ameliorer-performance-environnementale-materiaux/methodologie> (accessed Feb. 02, 2023).

Annexes

Annexe 1 : Vue en plan des étages courants



Annexe 2 : Panneau de chantier



Cristal Habitat
ENGAGÉ POUR VOS PROJETS

MAÎTRE D'OUVRAGE
1 place du Forum
Chambéry
04 79 71 99 99
www.cristal-habitat.fr








REHABILITATION RESTRUCTURATION RESIDENTIALISATION DES TOURS DU MACONNAIS rue du Mâconnais - Chambéry





- LOT 1 - TERRASSEMENTS / VRD / AMÉNAGEMENTS EXTERIEURS / ESPACES VERTS
GONTHIER ESPACES VERTS
12, avenue Daniel Rops
73160 Cognin
- CO-TRAITANTS
M2TP
3, rue du Marais
73190 Challes-les-Eaux
- **SOLS BETON**
458, rue du Mont Blanc
74540 St Félix
- MACRO LOT 2 - CLOS / COUVRE
EIFFAGE CONSTRUCTION REHABILITATION CENTRE EST
3, rue Hrant Dink
69285 Lyon
- MACRO LOT 3 - SECOND OEUVRE - LOTS TECHNIQUES
EIFFAGE CONSTRUCTION REHABILITATION CENTRE EST
3, rue Hrant Dink
69285 Lyon
- CO-TRAITANT
SECP
3, rue Pierre Sémard
69520 Grigny

- BET ACOUSTIQUE
VENATHEC / ACOUPLUS
23, boulevard de l'Europe
54503 Vandoeuvre les Nancy
- ARCHITECTE
AEA ARCHITECTES
15, allée Gluck
68069 Mulhouse
- ARCHITECTE ASSOCIÉ
TAO ARCHITECTES
41, avenue Henri Barbusse
69100 Villeurbanne
- BET STRUCTURE, FLUIDES, THERMIQUE
MATTE
119, boulevard Stalingrad
69100 Villeurbanne
- BET VRD
MMO
Immeuble l'Orion
245, avenue des Massettes
73190 Challes-les-Eaux
- ECONOMISTE
ALPHA PROCESS
15, allée Gluck
62299 Mulhouse
- SOUS-TRAITANT
SQUARE PAYSAGE
183, route de Saint Hilaire
38660 Le Touvet
- CONTROLE TECHNIQUE
BUREAU VERITAS
812, route de Plaimpalais
73230 St Alban-Leyse
- CSPS
BUREAU VERITAS
812, route de Plaimpalais
73230 St Alban-Leyse