



HAL
open science

Identification et analyse des leviers concernant le respect de la réglementation environnementale 2020 (RE 2020) pour les bâtiments tertiaires à usage de bureaux

Thibault Depoisier-Ruaud

► To cite this version:

Thibault Depoisier-Ruaud. Identification et analyse des leviers concernant le respect de la réglementation environnementale 2020 (RE 2020) pour les bâtiments tertiaires à usage de bureaux. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2023. dumas-04446039

HAL Id: dumas-04446039

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04446039v1>

Submitted on 8 Feb 2024

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

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

Copyright



«

Travail de fin d'études

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

Année 2022-2023

Voie d'approfondissement : Bâtiment

Soutenu le 18 septembre 2023

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Mohamed El Mankibi
- Maître de TFE : Lise Gierczak
- Expert : Flavia Barone

Par

Thibault DEPOISIER-RUAUD

Identification et analyse des leviers concernant le respect de la RE 2020 pour les bâtiments tertiaires à usage de bureaux

Organisme d'accueil
EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES



Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Depoisier-Ruaud		
Prénom	Thibault		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	EIFFAGE CONSTRUCION CONFLUENCES, 3 Rue Hrant Dink Bâtiment Hélianthe, 69002 Lyon		
Nom du Tuteur	Gierczak		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Identification et analyse des leviers concernant le respect de la RE 2020 pour les bâtiments tertiaires à usage de bureaux		
Titre (anglais)	Identification and analysis of levers for compliance with RE 2020 for tertiary office buildings		
Résumé (français)	<p>La réglementation environnementale de 2020 est devenue applicable à partir du 1er juillet 2022 pour les bâtiments tertiaires destinés à des activités de bureau. Cette nouvelle réglementation, qui fait suite à la RT 2012 et s'inscrit dans la lignée de l'expérimentation E+/C-, a pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'améliorer l'efficacité énergétique, de promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables, de garantir le confort thermique et de favoriser la gestion durable des ressources. Dans ce contexte, cette étude vise à identifier les facteurs qui influencent la conformité aux exigences de cette réglementation, afin de s'assurer du respect des futurs projets d'une entreprise générale de construction. Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur un cas d'étude concret : le siège social de l'entreprise AREA. Plusieurs variations de ce projet ont été examinées à la lumière de l'ensemble des exigences de la RE 2020 en utilisant les logiciels Vizcab (pour l'analyse de l'impact carbone) et ClimaWin 2020 (pour les modélisations thermiques).</p>		
Résumé (anglais)	<p>The 2020 environmental regulation became applicable from July 1, 2022 for tertiary buildings intended for office activities. This new regulation, which follows on from the RT 2012 and is in line with the E+/C- experiment, aims to reduce greenhouse gas emissions, improve energy efficiency, promote the use of renewable energies, guarantee thermal comfort and encourage sustainable resource management. Against this backdrop, this study aims to identify the factors influencing compliance with the requirements of these regulations, in order to ensure that future projects by a general construction company are compliant. To do this, we used a concrete case study: the AREA company headquarters. Several variations of this project were examined in the light of all RE 2020 requirements, using Vizcab (for carbon impact analysis) and ClimaWin 2020 (for thermal modelling).</p>		
Mots-clés (français)	RE 2020, Bureaux, Analyse du cycle de vie, Performance énergétique		
Mots-clés (anglais)	RE 2020, Offices, Life cycle analysis, Energy performance		
Termes géographiques (français)			
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.

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. À ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

Remerciements

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers Lise Gierczak, Animatrice Qualité et Environnement, dont l'orientation a été un guide essentiel tout au long de mon travail. Sa maîtrise technique et son expérience terrain ont grandement enrichi mes réflexions et ont contribué de manière significative à la réalisation de mon travail.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à l'ensemble du personnel d'EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES, avec une mention particulière pour Loïc AUDRAN, Emma COLLETINI et Grégoire FRITSCH.

Je n'oublie pas d'exprimer ma reconnaissance envers Anne-Laure CHARTON, dont l'assistance dans la modélisation thermique et la prise en main des logiciels réglementaires a été d'une aide précieuse.

Pierre ARROUZE et Mathieu DESEAUBLIAUX méritent également mes remerciements les plus chaleureux, non seulement pour avoir mis à ma disposition les outils logiciels nécessaires, mais aussi pour leur soutien constant tout au long de mon travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude envers Flavia BARONE, dont l'expertise en tant que membre du jury d'évaluation a enrichi le processus, ainsi qu'envers Mohammed EL MANKIBI, président de ce jury, pour sa participation et sa direction.

Ces collaborations et ce soutien ont été des piliers essentiels dans la réussite de mon projet, et je vous adresse à tous mes remerciements les plus sincères.

Sommaire

Notice analytique	2
Déclaration de travail personnel.....	3
Sommaire	5
Liste des illustrations.....	7
Liste des tableaux.....	8
Introduction générale.....	10
1. Revue de littérature.....	11
1.1 Normes environnementales et des critères de performance de la RE2020.....	11
1.1.1 Contexte général	11
1.1.2 Historique des réglementations en France	12
1.1.3 Label E+/C-	16
1.1.4 Introduction de la RE2020.....	20
1.2 Méthodologie de calcul pour les bâtiments tertiaires à usage de bureau.....	22
1.2.1 Besoins bioclimatiques (Bbio)	22
1.2.2 Consommation en énergie primaire totale (Cep).....	24
1.2.3 Consommation en énergies primaires non renouvelables (Cep,nr)	26
1.2.4 Indicateur carbone de la consommation d'énergie (Icénergie).....	27
1.2.5 Indicateur carbone de la construction (Icconstruction)	28
1.2.6 Méthode de l'analyse de cycle de vie	30
1.2.7 Degré-heure d'inconfort (DH)	32
2. Identification et analyse des leviers pour le respect de la RE2020	33
2.1 Conception bioclimatique	34
2.1.1 Isolation de l'enveloppe et ponts thermiques.....	34
2.1.2 Perméabilité à l'air de l'enveloppe.....	37
2.1.3 La compacité.....	38
2.1.4 L'inertie thermique.....	40
2.1.5 Dimensionnement et répartition des ouvertures	41
2.1.6 Dispositifs de protections solaires	42
2.2 Efficacité énergétique	43
2.2.1 Systèmes de chauffage.....	44
2.2.2 Systèmes de refroidissement.....	45
2.2.3 Récupération de chaleur	46
2.3 Installation photovoltaïque.....	47
2.4 Impact carbone des matériaux.....	48

2.4.1	Fiches environnementales	48
2.4.2	Emploi de matériaux biosourcés	51
3.	Application et analyse des leviers à un cas d'étude	53
3.1	Situation initiale	53
3.1.1	Exigences de moyens	54
3.1.2	Exigences de résultats.....	55
3.2	Modification de l'enveloppe	56
3.2.1	Isolation par l'extérieur	57
3.2.2	Mise en place de dispositif de protection solaire.....	60
3.2.3	Béton bas-carbone	61
3.3	Mise en place de sources d'énergie renouvelables	64
3.3.1	Installation de panneaux solaires.....	64
3.4	Optimisation de l'impact carbone du projet.....	65
	Conclusion.....	68
3.5	Présentation des différentes variantes retenues	68
3.5.1	Variante « AREA 2022 ».....	69
3.5.2	Variante « AREA 2025 ».....	70
3.5.3	Variante « AREA 2025 biosourcée »	71
3.6	RE 2020 et labels, une approche complémentaire.....	72
3.7	Prise de recul.....	73
3.8	Conclusion générale	73
4.	Références bibliographiques	74
	Annexes.....	77

Liste des illustrations

Figure 1 : Problème et impacts du changement climatique.....	10
Figure 2 : Historique des réglementations thermiques en France.....	13
Figure 3 : Méthode de calcul de la SHONRT	14
Figure 4 : Coefficients de conversion en énergie primaire	15
Figure 5 : Classification énergétique E+/C-.....	17
Figure 6 : Principe de calcul en ACV classique	18
Figure 7 : Usages pris en compte dans le calcul de Eges.....	19
Figure 8 : Classification carbone E+/C-	20
Figure 9 : Évolution des exigences de la RE 2020 dans le temps	22
Figure 10 : Module de cycle de vie du système	30
Figure 11 : Coefficient de pondération en fonction de l'année	31
Figure 12 : Répartition des déperditions thermiques d'un immeuble non isolé.....	34
Figure 13 : Positionnement du Bbio par rapport au Bbiomax	36
Figure 14 : Emplacement des fuites typiques d'un bâtiment.....	38
Figure 15 : Étude de l'influence de la compacité sur les besoins en chauffage	39
Figure 16 : Déphasage temporel et atténuation de l'amplitude de l'onde thermique	41
Figure 17 : Consommation de chauffage en fonction de la disposition et de l'orientation des baies	42
Figure 18 : Apports solaires en fonction de la saison en pourcentage	43
Figure 19 : Carte de l'ensoleillement en France	48
Figure 20 : Répartition de données de la base INIES	49
Figure 21 : Comparatif de l'impact carbone de différents carreaux en grès cérame	50
Figure 22 : Indicateur Iconstruction initial.....	50
Figure 23 : Indicateur Iconstruction final.....	51
Figure 24 : Proportion de CO2 stocké en fonction de la nature des matériaux biosourcés	51
Figure 25 : Comparaison de différents isolants classique et biosourcés	52
Figure 26 : Projet de construction du siège d'AREA à Jonage.....	53
Figure 27 : Caractéristiques thermiques du nouveau vitrage	54
Figure 28 : Résultats RE2020 du projet AREA	55
Figure 29 : Indicateur Iconstruction, du projet AREA	56
Figure 30 : Impact carbone en fonction de l'isolation par l'extérieur des murs choisie (kg CO2 eq).....	59
Figure 31 : Comparatif des empreintes carbonées en kg CO2 eq/m3 d'un béton C25/30 XC1 pour la région de Lyon.....	62
Figure 32 : Ecart en pourcentage des émissions de CO2 du béton par rapport au béton C25/30 « classique »	63
Figure 33 : Ecart en pourcentage sur l'indicateur Iconstruction par rapport au béton C25/30 « classique »	63
Figure 34 : Surcoût associé à la mise en œuvre de béton bas carbone.....	64
Figure 35 : Répartition et orientation des zones d'installations photovoltaïques.....	64
Figure 36 : Répartitions des données environnementales les plus impactantes.....	66
Figure 37 : Répartition des données environnementales en fonction du type de déclaration.....	67
Figure 38 : Variante relative à l'optimisation de l'impact carbone du projet.....	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des différents types de fiches environnementales.....	19
Tableau 2 : Coefficients de transformation de l'énergie finale utilisée en énergie primaire.....	25
Tableau 3 : Coefficients de transformation de l'énergie finale utilisée en énergie primaire non renouvelable	26
Tableau 4 : Facteur d'émission (DES).....	28
Tableau 5 : Décomposition des différents lots pour le calcul de l'indicateur Iconstruction	29
Tableau 6 : Valeurs forfaitaires pour un bâtiment à usage de bureau.....	32
Tableau 7 : Exigence DH_maxcat en fonction de la catégorie pour les bureaux	33
Tableau 8 : Etude de l'influence de l'isolation sur Cep,nr et Icénergie	37
Tableau 9 : Besoins énergétiques annuels pour les 3 formes	40
Tableau 10 : Synthèse de l'impact de protection solaire sur l'indicateur DH	43
Tableau 11 : Étude de l'influence du système de chauffage concernant Cep et Cep,nr	44
Tableau 12 : Étude de l'influence du système de climatisation concernant Cep et Cep,nr.....	45
Tableau 13 : Étude de l'influence du % d'ENR employé	46
Tableau 14 : Influence de l'installation de panneaux photovoltaïques sur Cep,nr	47
Tableau 15 : Influence de l'isolation du plancher sous-dalle par l'extérieur	57
Tableau 16 : Influence de l'isolation des murs extérieurs	58
Tableau 17 : Etude de l'influence de l'ITE de la toiture	60
Tableau 18 : Etude de l'influence des protections solaires.....	61
Tableau 19 : Résultats RE 2020 du projet d'installation photovoltaïque	65
Tableau 20 : Synthèse des résultats de la variante "AREA 2022".....	69
Tableau 21 : Synthèse des résultats de la variante "AREA 2025".....	70
Tableau 22 : Synthèse des résultats de la variante "AREA 2025 biosourcée"	71

Glossaire

GIÉC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

GES : Gaz à Effet de Serre

RE 2020 : Réglementation Environnementale 2020

RT 2012 : Réglementation Thermique 2012

ELAN : Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique

RT 1974 : Réglementation Thermique 1974

RT 1982 : Réglementation Thermique 1982

RT 1988 : Réglementation Thermique 1988

RT 2000 : Réglementation Thermique 2000

RT 2005 : Réglementation Thermique 2000

Bbio : Besoin bioclimatique

Cep : Consommation en énergie primaire

Cep,nr : Consommation en énergie primaire non-renouvelable

E+/C- : Énergie Positive et Réduction Carbone

PCE : Produit de Construction et Équipement

BEPOS : Bâtiment à Énergie Positive

EGES : Émissions de Gaz à Effet de Serre

DIES : Durée d'Inconfort d'Été Statistique

ACV : Analyse du Cycle de Vie

$I_{c_{\text{énergie}}}$: Impact sur le changement climatique des consommations d'énergie sur la vie du bâtiment

$I_{c_{\text{construction}}}$: Impact sur le changement climatique des composants sur la vie du bâtiment

DH : Degré-Heure

AICVF : Association des Ingénieurs et techniciens en Climatologie, Ventilation et Froid

PAC : Pompe à Chaleur

Introduction générale

Cela fait maintenant 30 ans que le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), une organisation internationale, a pris en charge l'évaluation scientifique et objective des connaissances sur les **changements climatiques** actuels. La mission principale de ce groupement est d'analyser les causes et conséquences de ces changements, mais également de mettre en place des mesures adaptatives ainsi que des stratégies d'atténuation pour faire face à leur progression. Le 23 mars 2023 a été publié le 6^{ième} rapport du GIEC après plus de 6 ans de rédaction, ce dernier constituera la base des connaissances scientifiques lors de la prochaine conférence sur les changements climatiques qui se tiendra du 30 novembre au 12 décembre 2023 à Dubaï. Plusieurs prévisions ont été effectuées dans ce dernier compte tenu des connaissances actuelles. Le GIEC a ainsi identifié qu'une augmentation de la température mondiale d'au moins **1,5 °C** est inévitable en raison des émissions de gaz à effet de serre, et ce quel que soit le scénario envisagé¹. Cette augmentation est largement attribuable aux activités humaines avec notamment la production de gaz à effet de serre (GES) lors de l'utilisation de combustibles fossiles. Une augmentation de 1.5 °C peut paraître négligeable, cependant les bouleversements bioclimatiques qui sont à prévoir sont préoccupants comme une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques exceptionnels. Ces modifications soudaines entraîneront des répercussions importantes. Elles augmenteront l'insécurité alimentaire, causeront une baisse de la disponibilité des ressources en eau et conduiront à des déplacements forcés de groupes de personnes (voir Figure 1). C'est pourquoi, afin de répondre à l'urgence de la situation, il est nécessaire d'atteindre une **neutralité carbone** concernant les émissions de dioxyde de carbone tout en réduisant les émissions des autres GES. Cela permettra d'induire une réduction rapide et brutale de la quantité de GES présent dans l'atmosphère et de ce fait stabiliser le climat.

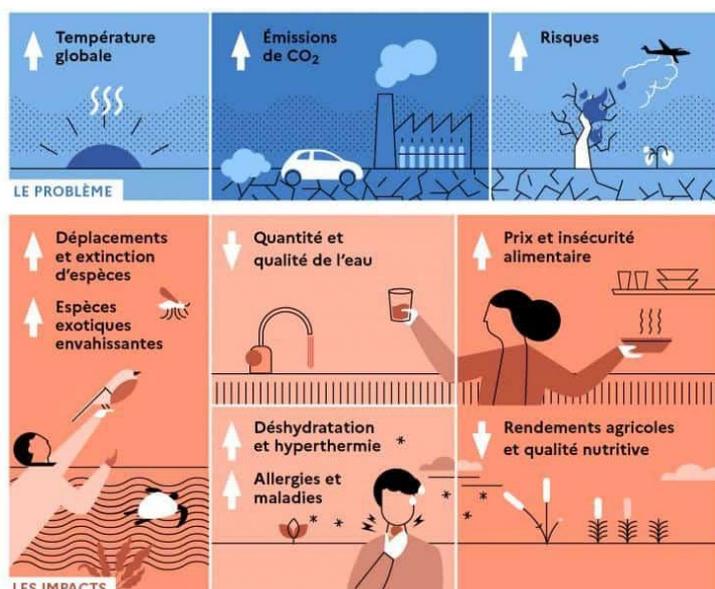


Figure 1 : Problème et impacts du changement climatique

Source : MTE/DICOM, <https://www.interieur.gouv.fr/ministere/secretariat-general/delegation-a-l-information-et-a-la-communication>

Afin de faire face à ces défis, il est primordial d'entreprendre au niveau mondial des mesures préventives et correctives dans l'ensemble des secteurs dans le but de réduire nos émissions de gaz à effet de serre et ainsi d'endiguer ce phénomène. En effet, déjà au XIX^e siècle, le philosophe naturaliste américain Henry

¹ « Publication du 6e rapport de synthèse du GIEC ». Ministères Écologie Énergie Territoires, <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>. Consulté le 9 juillet 2023.

David Thoreau, dans son ouvrage *La moelle de la vie : 500 Aphorismes* affirmait : « À quoi bon avoir une maison si l'on n'a pas de planète acceptable où la mettre ? »². Cette citation fait parfaitement écho à la situation actuelle du secteur du bâtiment en France. Ce dernier est en effet responsable de près de 23 % **des émissions de GES**³ et contribue donc fortement au réchauffement climatique. Afin de pouvoir poursuivre ses activités de manière pérenne, le secteur du bâtiment doit en conséquence prendre des mesures radicales pour réduire son empreinte carbone et essayer ainsi d'inverser la tendance actuelle.

C'est dans ce contexte que le gouvernement français a mis en place depuis le 1^{er} janvier 2022 pour les maisons individuelles et logement collectif et depuis le 1^{er} juillet 2022 pour les bâtiments de bureaux et enseignement une nouvelle réglementation environnementale, la réglementation environnementale 2020 (RE 2020). Cette dernière vient succéder à la réglementation thermique 2012 (RT2012) et définit de nouveaux objectifs ambitieux pour que le secteur du bâtiment soit en mesure de faire face à l'urgence climatique.

1. Revue de littérature

1.1 Normes environnementales et critères de performance de la RE2020

1.1.1 Contexte général

La réglementation thermique RT 2012 a été mise en place pour donner suite à la tenue en 2007 du Grenelle de l'environnement. Lors de ce dernier, plusieurs objectifs ont été établis pour la France, dont celui de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 75% en 2050 par rapport à 1990⁴. La RT 2012 est constituée de trois leviers clés : garantir une efficacité énergétique minimale des bâtiments, en fixant une consommation maximale d'énergie conventionnelle et en introduisant un confort d'été dans les bâtiments non climatisés.

Cependant, aujourd'hui, le secteur du bâtiment représente toujours 44 % de l'énergie consommée en France, loin devant le secteur des transports (31,3 %) ⁵. Par ailleurs, le secteur du bâtiment produit chaque année plus de 120 millions de tonnes de dioxyde de carbone, un gaz à effet de serre, ce qui équivaut à près d'un quart des émissions nationales. Afin d'atteindre les objectifs de neutralité carbone de la France en 2050, ce secteur doit connaître dans les années à venir une révolution non seulement énergétique, mais également environnementale. Pour répondre à ces nouveaux enjeux, la loi Évolution du Logement, de l'Aménagement et du Numérique (ELAN) prévoit l'instauration en 2022 d'une nouvelle réglementation environnementale s'appliquant aux bâtiments neufs, la RE 2020. Cette dernière fait suite à **l'expérimentation E+/C-** dont la visée était de tester la construction de bâtiments plus efficaces en termes d'énergie et moins émetteurs de gaz à effet de serre en impliquant toutes les parties prenantes de la construction. L'ambition de la RE 2020 est de « poursuivre l'amélioration de la performance énergétique et du confort des constructions, tout en diminuant leur impact carbone »⁶. Contrairement aux précédentes

² Thoreau, Henry David. *La moelle de la vie: 500 aphorismes*. Traduit par Thierry Gillyboeuf, Éd. Mille et une nuits, 2006.

³ « Énergie dans les bâtiments ». *Ministères Écologie Énergie Territoires*, <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>. Consulté le 9 juillet 2023.

⁴ Article 1, LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, DEVX0811607L

⁵ « Énergie dans les bâtiments ». *Ministères Écologie Énergie Territoires*, <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>. Consulté le 9 juillet 2023.

⁶ « Réglementation environnementale RE2020 ». *Ministères Écologie Énergie Territoires*, <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>. Consulté le 10 juillet 2023.

réglementations thermiques mises en œuvre dans le passé, la RE 2020 prévoit un déploiement progressif avec un durcissement des exigences au fil du temps afin de s'assurer que les objectifs sur le long terme soient atteints tout en facilitant son application lors de son lancement. De plus, la réglementation thermique 2012 (RT 2012) a été renforcée par la réglementation environnementale 2020 (RE 2020) afin d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en augmentant les critères relatifs aux besoins bioclimatiques et à l'efficacité de l'isolation, indépendamment du système de chauffage utilisé. Par ailleurs, l'impact carbone du bâtiment est désormais évalué sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, ce qui permet de situer dans le temps les émissions générées. Enfin, le réchauffement climatique est pris en compte à travers l'intégration du confort d'été dans la réglementation. De ce fait, les bâtiments devront dorénavant résister à des épisodes de chaleurs plus fréquents et plus intenses.

Introduite dans le décret du 1^{er} mars 2022 et complétée par les arrêtés du 4 août et du 9 décembre 2021 qui concernaient les logements individuels et collectifs, la RE 2020 est entrée en vigueur le 1^{er} juillet 2022 concernant les bâtiments tertiaires et d'enseignements primaires et secondaires. Notre étude s'intéressera ici uniquement aux bâtiments tertiaires à usage de bureaux. Etant donné la situation géographique des projets EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES, on se placera en zone climatique H1c dans le cadre de la mise en application des leviers identifiés sur un exemple concret. Cependant, dans le cadre de l'identification de ces derniers, on étudiera différentes zones climatiques afin d'étendre le cadre de l'étude et de pouvoir exploiter davantage d'études existantes.

1.1.2 Historique des réglementations en France

La réglementation environnementale 2020 (RE 2020) est venue succéder à la réglementation thermique 2012, définissant ainsi des objectifs plus ambitieux et exigeant pour la filière construction en France. Cependant, l'État français a depuis longtemps commencé à réglementer ce secteur en mettant en place la RT 1974 à la suite du premier choc pétrolier de 1973 qui a engendré une prise de conscience concernant la consommation des énergies fossiles. Son objectif était déjà de limiter la consommation énergétique des bâtiments neufs résidentiels en vue de réduire de 25 % la consommation énergétique de ces derniers⁷. Pour donner suite au second choc pétrolier de 1979, l'État français entreprend de réduire encore la dépense énergétique des bâtiments résidentiels de 20 % par rapport aux objectifs de la précédente réglementation grâce à l'instauration de la RT 1982. Par la suite, la RT 1988 étend les objectifs de la RT 1982 aux bâtiments non résidentiels tout en définissant des exigences minimales relatives à l'enveloppe et aux systèmes installés. L'entrée en vigueur de la RT 2000 introduit le concept de confort d'été et accentue encore les efforts demandés au secteur du bâtiment avec une réduction de l'empreinte énergétique de 20 % par rapport la RT 1988 pour les logements et de 40 % pour les bâtiments tertiaires⁸. La RT 2005 induit quant à elle une prise en compte du bio climatisme et des sources d'énergies renouvelables tout en augmentant les exigences avec une réduction de la consommation énergétique des bâtiments neufs et extensions fixée à 15 %⁹.

⁷ « Historique des Réglementations Thermiques ». Bureau d'études thermiques RT2012 en ligne, <https://www.e-rt2012.fr/explications/generalites/precedentes-reglementations-thermiques/>. Consulté le 9 juillet 2023.

⁸ Bâtiment (CTB), Cahiers Techniques du. REGLEMENTATION RT 2000 : ce qui va changer en 2003 - Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB). Mai 2003, <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/reglementation-rt-2000-ce-qui-va-changer-en-2003.31330>.

⁹ « Historique des Réglementations Thermiques ». Bureau d'études thermiques RT2012 en ligne, <https://www.e-rt2012.fr/explications/generalites/precedentes-reglementations-thermiques/>. Consulté le 9 juillet 2023.

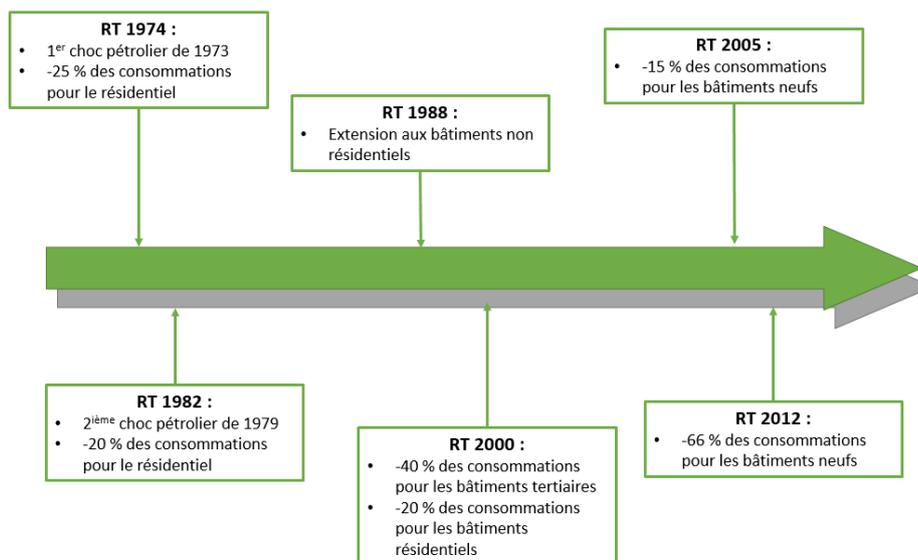


Figure 2 : Historique des réglementations thermiques en France

Source : ECIE, https://www.ecie.fr/reglementation_thermique_2005

Enfin, depuis 2011, une nouvelle réglementation thermique, la RT 2012 est entrée en vigueur concernant les bâtiments résidentiels situés en zone ANRU (Agence Nationale pour la Rénovation Urbaine) qui correspondent à des quartiers faisant l'objet de rénovations urbaines, ainsi qu'aux bâtiments d'enseignements et enfin aux bâtiments tertiaires. Par la suite, en 2013, cette réglementation a été étendue aux bâtiments résidentiels situés hors zone (ANRU)¹⁰.

La RT 2012 fixe ainsi trois exigences concernant les performances énergétiques des bâtiments auxquels elle s'applique :

- **Besoin bioclimatique conventionnel, Bbio**, dont l'unité est un nombre de points et qui permet de valoriser la conception du bâtiment de manière indépendante des systèmes énergétiques avec l'exigence suivante : $B_{bio} \leq B_{bio_{max}}$;
- **Consommation conventionnelle d'énergie primaire, Cep**, exprimée en $kWh_{EP}/(m^2 \cdot an)$ qui quantifie la consommation en énergie primaire des systèmes installés avec l'exigence suivante : $Cep \leq Cep_{max}$;
- **Confort d'été** grâce à l'indicateur de Température Intérieur Conventionnel (**TIC**) qui vise à assurer des conditions de vie agréables aux occupants durant la période estivale avec l'exigence suivante en pour la catégorie CE1 (bâtiments dont la conception peut être réalisée sans climatisation) : $T_{ic} \leq T_{ic_{ref}}$, en revanche les consommations associées devront être compensée d'une diminution de la consommation générale du bâtiment.

Avant de spécifier le détail du fonctionnement du calcul de chacune de ses exigences, il est nécessaire de préciser les surfaces utilisées pour le calcul des exigences de la RT 2012. En effet, le critère Cep est calculé par unité de surface, on va donc dans ce paragraphe spécifier la surface de référence utilisée pour le calcul. Cette dernière est appelée **SHON_{RT}** (Surface Hors Œuvre Nette) et correspond à la surface totale du plancher de chaque niveau de la construction après avoir déduit les surfaces des locaux ne possédant pas de systèmes de chauffage¹¹. Ces locaux correspondent aux pièces suivantes :

- Les combles non aménageables ou aménageables, mais non aménagés pour l'habitation ou autres activités ;

¹⁰ « Réglementation thermique RT2012 ». Ministères Écologie Énergie Territoires, <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-thermique-rt2012>. Consulté le 9 juillet 2023.

¹¹ Article R112-2 du Code de l'urbanisme

- Les loggias, toitures terrasses, balcons, vérandas non chauffées et les surfaces non closes situées en rez-de-chaussée ou aux niveaux supérieurs ;
- Les emplacements de stationnement.

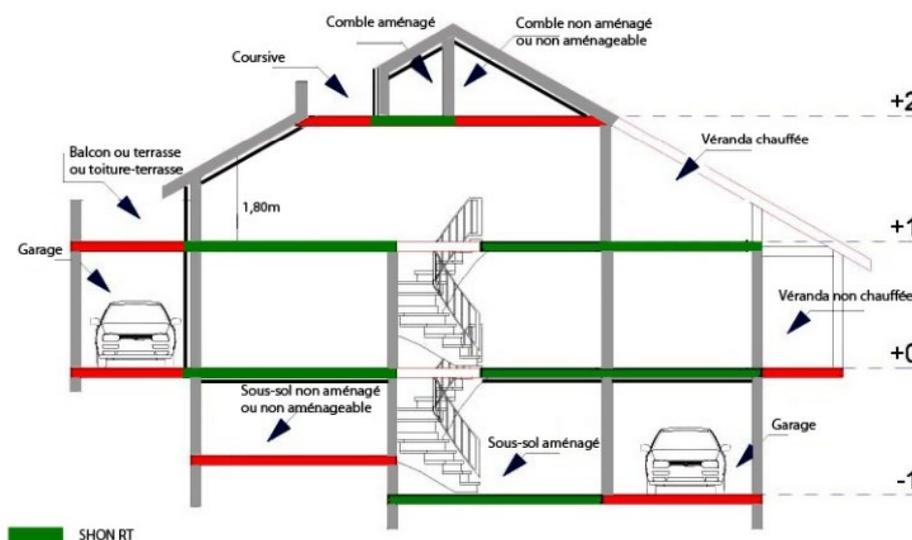


Figure 3 : Méthode de calcul de la SHON_{RT}

Source : DREAL Pays de la Loire, <https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/>

Par ailleurs, il est également important de définir les catégories de bâtiments utilisées dans la RT 2012 concernant l'exigence relative au confort d'été. D'abord, la catégorie CE2 regroupe les bâtiments dans lesquels un système de refroidissement actif est présent. En outre, les bâtiments dans lesquels il est nécessaire d'installer des systèmes de refroidissement du fait de contraintes par rapport à l'ouverture des fenêtres sont également présents dans cette catégorie :

- Les bâtiments soumis à des bruits extérieurs importants (aéroports et voies rapides) ;
- Les bâtiments où les règles de sécurité empêchent l'ouverture des fenêtres comme pour les immeubles de grande hauteur (IGH).

Les bâtiments qui ne sont pas concernés par les deux critères précédents appartiennent à la catégorie CE1

▪ **Besoins bioclimatiques (Bbio)**

L'exigence Bbio tend à valoriser la **conception bioclimatique**, c'est-à-dire une conception qui vise à tirer parti des conditions climatiques locales dont la visée est d'optimiser le confort des occupants tout en réduisant la consommation énergétique du bâtiment. Celle-ci prend en considération les besoins suivants : le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Afin de respecter la RT 2012, l'indicateur Bbio de notre projet est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$B_{bio_{projet}} = 2 \times (B_{chauffage} + B_{refroidissement}) + 5 \times B_{éclairage}$$

- Les besoins de chauffages sont calculés en sommant les déperditions thermiques liées aux matériaux de construction et au renouvellement de l'air auxquels on retire les apports gratuits liés à l'occupation et aux appareils ménagers ;
- Les besoins d'éclairage dépendent de l'exposition du bâtiment et de l'orientation et du positionnement des surfaces vitrées ;
- Les besoins de refroidissements sont pondérés en fonction du niveau d'exposition aux bruits (BR), de l'implantation géographique et de la qualité de l'air.

Afin de respecter la RT 2012, l'indicateur projet Bbio doit être inférieur à une valeur seuil qui s'obtient à partir de la formule suivante :

$$B_{\text{bio}_{\text{max}}} = B_{\text{bio}_{\text{maxmoyen}}} \times (M_{\text{bgéo}} + M_{\text{balt}} + M_{\text{bsurf}})^{12}$$

- $B_{\text{bio}_{\text{maxmoyen}}}$: exigence moyenne définie en fonction du type d'occupation et de la catégorie du bâtiment ;
- $M_{\text{bgéo}}$: coefficient de modulation dépendant de la localisation (zone climatique) ;
- M_{balt} : coefficient de modulation lié à l'altitude du bâtiment ;
- M_{bsurf} : coefficient de modulation selon la surface du bâtiment pour les maisons individuelles ou accolées¹³.

▪ **Consommation conventionnelle d'énergie (Cep)**

Le coefficient C_{ep} représente la **consommation en énergie primaire** de notre projet en prenant en compte les systèmes suivants :

- Le chauffage y compris les auxiliaires ;
- Le refroidissement y compris les auxiliaires ;
- La production d'eau chaude sanitaire (ECS) y compris les auxiliaires ;
- L'éclairage ;
- Les auxiliaires de ventilation.

À cela, il convient de déduire l'énergie électrique qui est produite à l'aide de sources d'énergies renouvelables (panneaux solaires, pompe à chaleur, etc.). Afin de prendre en compte les pertes liées à la production, au transport et à la transformation, il est nécessaire de convertir la consommation en énergie finale facilement accessible en consommation en énergie primaire¹⁴ à l'aide des coefficients suivant :



Figure 4 : Coefficients de conversion en énergie primaire

Source : Green Habitat, <https://www.greenhabitat.fr/la-reglementation/>

Ainsi, dans le but de se conformer à la réglementation, notre coefficient $C_{\text{ep}_{\text{projet}}}$ doit être inférieur à l'exigence $C_{\text{ep}_{\text{max}}}$ qui est fournie par la réglementation en fonction de la zone climatique, de la catégorie du bâtiment et de la surface de référence ($SHON_{\text{RT}}$) selon la formule suivante :

$$C_{\text{ep}_{\text{max}}} = 50 * M_{\text{c}_{\text{type}}} * (M_{\text{c}_{\text{géo}}} + M_{\text{c}_{\text{alt}}} + M_{\text{c}_{\text{surf}}} + M_{\text{c}_{\text{GES}}})^{15}$$

- $M_{\text{c}_{\text{type}}}$: coefficient de modulation variant en fonction du type de bâtiment ou de la partie spécifique du bâtiment, ainsi que de sa catégorie CE1/CE2 ;
- $M_{\text{c}_{\text{géo}}}$: coefficient de modulation dépendant de la localisation géographique ;
- $M_{\text{c}_{\text{alt}}}$: coefficient de modulation selon l'altitude ;
- $M_{\text{c}_{\text{surf}}}$: pour les bâtiments de commerce et les établissements sportifs, coefficient de modulation selon la surface du bâtiment ou de la partie de bâtiment ;

¹² Article 12, JO n°1 du 1^{er} janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>

¹³ Ibid.

¹⁴ Article 14, JO n°1 du 1^{er} janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>

¹⁵ Article 14, JO n°1 du 1^{er} janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>

- M_{GES} : coefficient de modulation selon les émissions de gaz à effet de serre des énergies utilisées¹⁶.

Il convient de préciser qu'une majoration de $12 \text{ kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$ est imposée pour les bâtiments résidentiels.

- **Température intérieure conventionnelle (TIC)**

Seuls les bâtiments de catégorie CE1 sont concernés par cette exigence. Le coefficient Tic_{projet} est exprimé en °C et correspond à la température opérative en période d'occupation calculée lors d'un jour chaud d'été conventionnel, lui-même associé à une période de forte chaleur de cinq jours de référence. Afin de respecter la réglementation, il est nécessaire que $Tic_{projet} \leq Tic_{ref}$ ¹⁷.

En conclusion, l'évolution des réglementations thermiques en France, depuis la RT 1974 jusqu'à la RT 2012, témoigne de l'engagement constant de l'État français en faveur de la réduction de la consommation énergétique des bâtiments. Les exigences de la RT 2012, telles que le Bbio, la Cep et le confort d'été, visent à promouvoir une conception bioclimatique et à favoriser l'efficacité énergétique. Cependant, il est important de souligner que les enjeux environnementaux continuent d'évoluer, et de nouveaux défis se profilent. Ainsi, l'entrée en vigueur du label E+/C- vient renforcer cette dynamique en encourageant les bâtiments à tendre vers un bilan énergétique positif (E+), c'est-à-dire produisant plus d'énergie qu'ils n'en consomment, tout en limitant leur impact carbone (C-). Ce label représente une avancée significative dans la transition vers des bâtiments à énergie positive et bas-carbone, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la préservation de l'environnement.

1.1.3 Label E+/C-

Une expérimentation a été lancée en novembre 2016 par l'État et les acteurs de la construction afin d'être en mesure de respecter leur engagement de produire des bâtiments à énergie positive et bas-carbone. Cette expérimentation fait suite à l'entrée en vigueur de la loi de transition énergétique qui prévoit la mise en place à l'horizon 2020 d'une nouvelle réglementation environnementale ambitieuse (RE 2020) qui vise à réduire l'empreinte carbone du secteur du bâtiment. C'est ainsi qu'a été introduit le **label E+/C-** qui est uniquement délivré par 5 organismes accrédités par l'État (Céquami, Certivea, Cerqual, Prestaterre certifications, Promotelec Services) et qui vise à préparer l'arrivée de la RE 2020. Le label E+/C- évalue les bâtiments non seulement sur leurs performances énergétiques, notamment grâce aux indicateurs de la RT, mais également sur les émissions de carbone depuis sa conception jusqu'à sa démolition. Afin d'évaluer ces deux aspects, 4 indicateurs ont été introduits :

- BEPOS (Bâtiment à Énergie Positive) : cet indicateur évalue la performance énergétique du bâtiment et s'exprime comme l'indicateur Cep de la RT 2012 en $\text{kWh}_{EP}/(\text{m}^2.\text{an})$;
- Eges : cet indicateur caractérise les émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, ce dernier est exprimé en $\text{kgCO}_{2eq}/\text{m}^2(\text{SDP})$ où SDP est la surface de plancher ;
- $Eges_{PCE}$: cet indicateur évalue les émissions de GES liés aux Produits de Construction et Équipement (PCE), il est également exprimé en $\text{kgCO}_{2eq}/\text{m}^2(\text{SDP})$.
- DIES (Durée d'Inconfort d'Été Statistique) : cet indicateur prend en compte la durée et l'intensité de l'inconfort ressenti par l'utilisateur en s'appuyant sur les notions de statistiques (pourcentages d'insatisfaits) et de confort adaptatif afin d'évaluer le confort d'été.

¹⁶ Ibid.

¹⁷ Article 7, JO n°1 du 1^{er} janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>

- **BEPOS (Bâtiment à Énergie Positive)**

Le bilan BEPOS est un indicateur issu d'un **bilan énergétique** sur l'ensemble des usages du bâtiment. Il permet par sa méthode de calcul d'évaluer non seulement la consommation énergétique issue de sources non renouvelables, mais également la production des sources d'énergies renouvelables. Ainsi, l'objectif est ici de favoriser le recours à des sources d'énergie renouvelables et d'encourager à une sobriété énergétique des bâtiments. Ce dernier se calcule selon la formule suivante, Bilan BEPOS = $\sum C_{ep_{nr}} - \sum P_{ep_{r,ex}}$ ¹⁸ où :

- $C_{ep_{nr}}$ est la consommation d'énergie non renouvelable ;
- $P_{ep_{r,ex}}$ est l'exportation d'énergie renouvelable ;

Les usages pris en compte pour le calcul des consommations sont les suivants :

- Le chauffage y compris les auxiliaires ;
- Le refroidissement y compris les auxiliaires ;
- La production d'eau chaude sanitaire (ECS) y compris les auxiliaires ;
- L'éclairage ;
- Les auxiliaires de ventilation.

Ainsi, quatre niveaux de performances énergétiques tous plus exigeant que celui de la RT 2012 permettent de classer la performance énergétique de notre bâtiment. Les valeurs délimitant les différents paliers dépendant de l'usage du bâtiment sont calculés à l'aide de valeurs de références puis modulées à l'aide de quatre coefficients :

- M_{park} : coefficient de modulation en fonction du nombre de places de parking ;
- M_{gcgeo} : coefficient dépendant de la zone géographique ;
- M_{gcalt} : coefficient dépendant de l'altitude ;
- M_{gcsurf} : coefficient dépendant de la surface du bâtiment.

On obtient ainsi la classification suivante :



Le bonus de constructibilité sera octroyé sur la base des niveaux 3 et 4

Figure 5 : Classification énergétique E+/C-

Source : Energie carbone, <http://www.batiment-energiecarbone.fr/>

¹⁸ Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer et Ministère du logement et de l'habitat durable, Octobre 2016, Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs, <http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/referentiel-energie-carbone-niveau-de-performance-2016-10.pdf>

- **Eges_{PCE} (Indicateur des émissions de Gaz à Effet de Serre de produits de construction et des équipements utilisés)**

La grande nouveauté du label E+/C- est d'introduire la prise en compte de **l'impact carbone** du projet de construction, et ce, durant l'intégralité de sa durée de vie. Pour ce faire, une analyse de cycle de vie statique est réalisée afin de déterminer les deux nouveaux indicateurs *Eges_{PCE}* et *Eges* label E+/C-. Le premier évalue l'impact carbone des produits de construction sur l'ensemble de leur durée de vie, la méthode de calcul est présentée dans la figure et le paragraphe ci-dessous (voir Figure 6) :

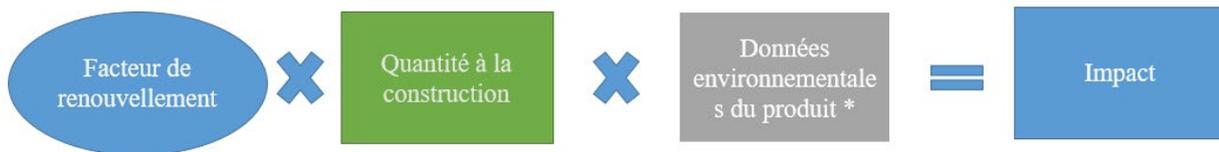


Figure 6 : Principe de calcul en ACV classique

Source : Cours de construction durable ENPTE, Myriam BAHAR

Soit PER la période d'étude en année (50 ans) et DVE la durée de vie estimée du produit en année, on introduit le facteur de renouvellement R_p défini comme :

$$R_p = \max\left(1; \frac{PER}{DVE}\right)$$

Soit $I_{p,k}^{Usage}$, l'impact carbone associé à l'usage indiqué, on peut alors calculer de manière statique l'impact carbone pendant les différentes phases du projet :

- Production

$$I_{p,k}^{Production} = Q_p * DE_p^{Production}$$

- Édification

$$I_{p,k}^{Edification} = Q_p * DE_p^{Edification}$$

- Exploitation

- **Si DVE < PER :**

$$I_{p,k}^{Exploitation} = Q_p * [DE_p^{Edification} * R_p + (R_p - 1) * (DE_p^{Production} + DE_p^{Edification} + DE_p^{Fin de vie})]$$

- **Sinon :**

$$I_{p,k}^{Exploitation} = Q_p * DE_p^{Exploitation} * \frac{PER}{DVE}$$

- Fin de vie

$$I_{p,k}^{Fin de vie} = Q_p * DE_p^{Fin de vie}$$

- Module D (Bénéfices et charges liés à la valorisation des produits en fin de vie et à l'export d'énergie)

$$I_{p,k}^{Module D} = Q_p * DE_p^{Module D}^{19}$$

Les différents types de **données environnementales** sont présentés dans le tableau ci-dessous (voir Tableau 1) :

¹⁹ Myriam BAHAR, Cours de développement durable, ENPTE, 2023

Tableau 1 : Présentation des différents types de fiches environnementales

Niveau de détail			
Méthode détaillée	DED (Données environnementales par défaut)		Ce sont des valeurs par défaut. Elles sont établies par le CSTB sur la base de FDES/PEP quand elles existent
	FDES/PEP spécifiques	Collectives	FDES/PEP réalisées par une organisation professionnelle pour une famille de produit (ex : laine de verre de résistance thermique R=XX)
		Individuelles	Propre à un produit en particulier (ex : laine de verre de marque X et de modèle Y) ou gamme de produit pour les PEP

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

▪ **Eges (Indicateur des émissions de Gaz à Effet de Serre sur l'ensemble du cycle de vie)**

Le second indicateur, Eges est calculé en sommant $Eges_{PCE}$ à l'impact carbone associé aux besoins énergétiques du bâtiment, à la consommation en eau ainsi que l'impact carbone durant la phase chantier qui comprend les besoins énergétiques ainsi que la consommation en eau. Le détail des éléments pris en compte est détaillé dans la Figure 7 ci-dessous :

		Phase de production	Phase de Construction	Phase d'exploitation	Phase de fin de vie
Contributeurs	Produits de construction et équipements				
	Consommation d'énergie				
	Chantier				
	Consommation d'eau				

Figure 7 : Usages pris en compte dans le calcul de Eges

Source : Bâtiment énergie carbone, <http://www.batiment-energiecarbone.fr/la-methode-a39.html>

Ainsi, une fois l'impact carbone de notre bâtiment calculé, il est nécessaire de calculer les deux valeurs seuils afin de classer notre projet. Ces valeurs seuils dépendent de l'usage du bâtiment, de la présence de place de parking, de l'altitude, de la zone géographique et de la surface du bâtiment. On obtient ainsi une classification concernant l'impact carbone de notre projet (voir Figure 8) :

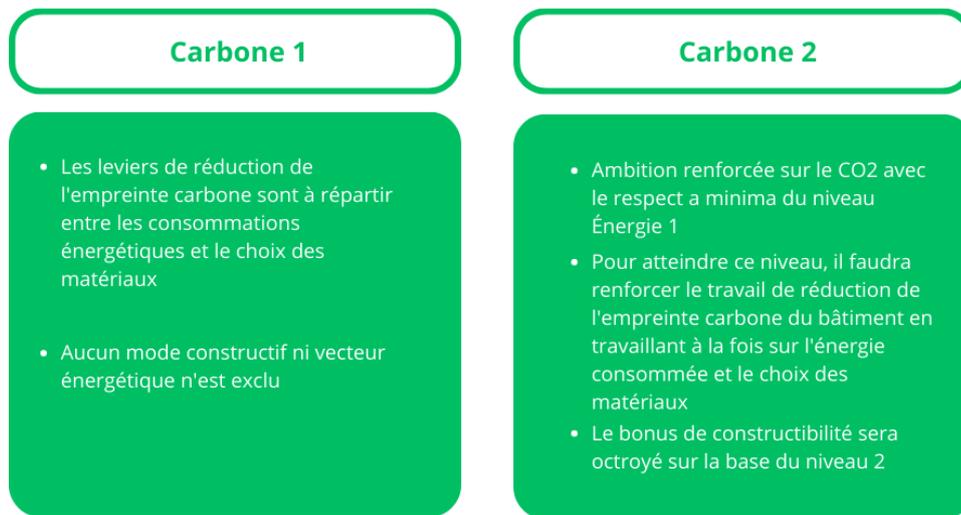


Figure 8 : Classification carbone E+/C-

Source : Energie carbone, <http://www.batiment-energiecarbone.fr/>

▪ **La DIES (Durée d'Inconfort d'Été Statistique)**

L'indicateur **DIES** prend en compte la durée et l'intensité de l'inconfort ressenti par l'utilisateur en s'appuyant sur les notions de statistiques (pourcentages d'insatisfaits) et de confort adaptatif. En effet, on définit d'abord une température limite de **confort d'été** que l'on compare à la température opérative chaque heure. Si la température limite d'inconfort est dépassée alors dans ce cas, on calcule l'écart qui nous permettra de réduire le pourcentage de personne insatisfaite. Par la suite, il faut corriger notre résultat, car la norme utilisée prévoit un pourcentage d'insatisfaite minimum de 10 % qui ne doit pas être pris en compte, on obtient ainsi la formule suivante, $DIES = \sum_h PPD_{\text{corrigé}}(h)^{20}$ où $PPD_{\text{corrigé}}$ est le pourcentage prévisible d'insatisfaite avec la correction.

Ainsi, l'expérimentation qu'est le label E+/C- a depuis 2016 permis de préparer l'entrée en vigueur de la RE 2020 en fixant des objectifs plus ambitieux que la RT 2012 pour répondre aux enjeux actuels. Le label E+/C- introduit l'évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du projet grâce à l'emploi de l'analyse de cycle de vie statique. En outre, le label E+/C- représente une avancée majeure afin de parvenir à une transition favorisant les bâtiments à haute performance énergétique en encourageant la sobriété énergétique et l'emploi d'énergies renouvelables.

1.1.4 Introduction de la RE2020

En s'appuyant sur les enseignements de l'expérimentation E+/C- et constituant une évolution de la RT 2012, les autorités ont introduit une nouvelle réglementation **RE 2020** visant une amélioration de la performance énergétique et environnementale des constructions. Contrairement au label volontaire E+/C-, la conformité à cette réglementation est une exigence obligatoire pour les projets concernés comme cela était le cas de la RT 2012. Cette décision marque une transition majeure vers une approche réglementaire destinée à promouvoir davantage l'utilisation de normes strictes pour accroître la durabilité des bâtiments. Cependant, plusieurs évolutions ont eu lieu afin d'être en mesure d'atteindre les objectifs fixés.

²⁰ Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer et Ministère du logement et de l'habitat durable, « Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs », 2016, <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27814-referentiel-label-energie-carbone-methode.pdf>

▪ Exigences de résultats

Concernant l'indice Bbio de la RT 2012, ce dernier est conservé, mais désormais l'évaluation des besoins en froid est effectuée de manière systématique et non plus seulement si le bâtiment est climatisé. Cela permet notamment de prendre en compte l'influence de la tendance actuelle du changement climatique sur le confort thermique des occupants. Par la suite, l'indicateur Cep déjà présent dans la RT 2012 et l'indicateur Cep,nr introduit dans l'expérimentation E+C- voient leur méthode de calcul évoluer. Désormais, en plus des 5 usages de la RT 2012 sont désormais pris en compte les pôles suivants :

- Éclairage et/ou ventilation des parkings ;
- Éclairage des circulations en collectif ;
- Électricité des ascenseurs et/ou escalators.

Les indicateurs carbone Eges et Eges_{PCE} ont désormais été remplacés par les indicateurs $I_{c_{\text{énergie}}}$ et $I_{c_{\text{construction}}}$ qui permettent d'analyser à l'aide d'une analyse de cycle de vie dynamique les émissions de GES durant la période d'exploitation (50 ans) ainsi que les émissions de GES dues aux produits de construction et aux équipements et à leur mise en œuvre. Enfin, le confort d'été est également présent dans la RE 2020 sous la forme de l'indicateur DH (degré-heure) qui permet d'évaluer l'écart entre la température de confort et la température du bâtiment et ainsi en déduire la durée d'inconfort des occupants. Les valeurs seuils sont déterminées en fonction des caractéristiques du bâtiment, et tous les indicateurs du projet doivent être inférieurs à ces seuils pour être considérés comme conformes, étant donné que ces indicateurs sont des exigences de résultat.

▪ Exigences de moyen

De plus, la RE 2020 introduit désormais des exigences de moyens qui doivent être prises en compte lors de la conception :

- Traitement de la perméabilité à l'air du bâtiment ;
- Traitement des ponts thermiques ;
- Mise en place d'un système de suivi de la consommation énergétique réelle du bâtiment (ou estimation pour un bâtiment résidentiel) ;
- Mise en place de protections solaires ;
- Vérification de l'étanchéité des réseaux de ventilation ;
- Obligation relative aux surfaces vitrées en résidentiel (1/6 de la surface habitable).

▪ Normes évolutives

Contrairement aux précédentes réglementations, la RE 2020 introduit une évolution temporelle de ces exigences qui seront de plus en plus strictes afin notamment de permettre aux acteurs du secteur de la construction de s'adapter à ces dernières (voir Figure 9). Cela concerne trois de ces indicateurs : $I_{c_{\text{énergie}}}$, Bbio et $I_{c_{\text{construction}}}$:

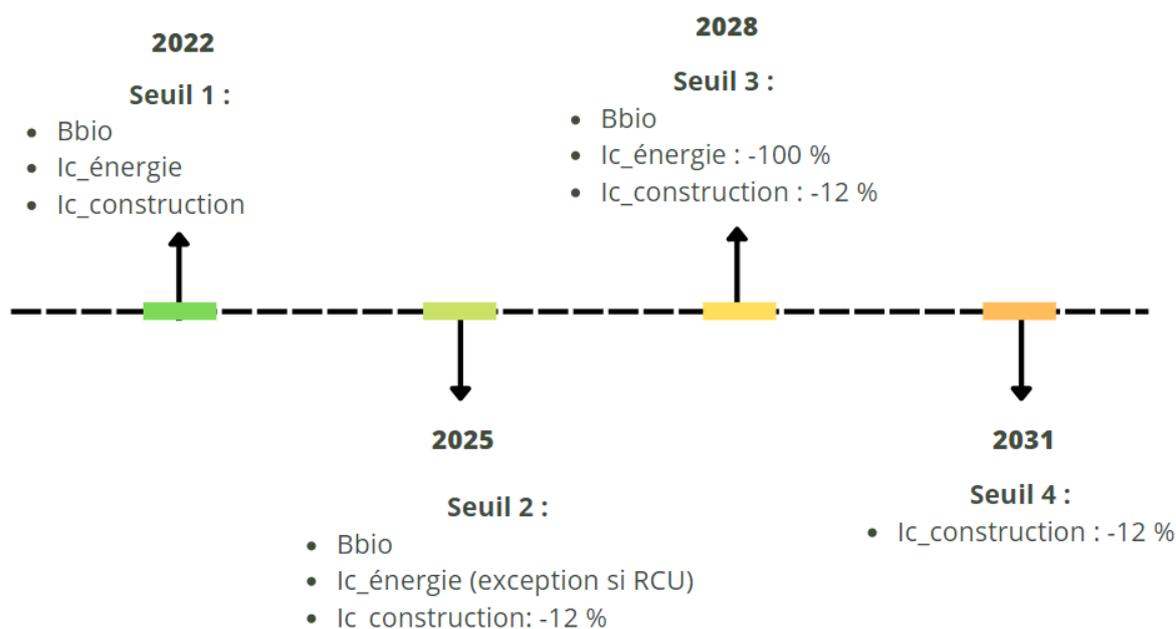


Figure 9 : Évolution des exigences de la RE 2020 dans le temps

Source : https://conseils.xpair.com/actualite_experts/retour-experience-re2020-logements-collectifs-2025.htm

Seul l'indicateur $Ic_{construction}$ connaît quatre paliers d'évolution, les indicateurs Bbio et $Ic_{énergie}$ sont uniquement concernés par trois de ces premiers.

Ainsi, la réglementation RE 2020 est une évolution majeure, avec des exigences renforcées en matière de performance énergétique et environnementale des constructions. Les résultats sont définis avec valeurs seuils à respecter, et les moyens sont introduits pour garantir la mise en place de solutions techniques et dispositifs favorables à l'efficacité énergétique.

1.2 Méthodologie de calcul pour les bâtiments tertiaires à usage de bureau

La mise en œuvre de la réglementation environnementale 2020 (RE2020) pour les bâtiments tertiaires à usage de bureau, en vigueur depuis le 1^{er} juillet 2022, a introduit de nouveaux indicateurs. Les détails concernant la méthodologie de calcul de ces indicateurs seront présentés dans la partie suivante.

1.2.1 Besoins bioclimatiques (Bbio)

L'indicateur **Bbio** permet de caractériser l'**efficacité énergétique** du bâtiment. En effet, ce dernier permet d'évaluer la sobriété du bâtiment en prenant en compte son optimisation indépendamment des systèmes énergétiques afin de subvenir à ses besoins en chauffage, climatisation et éclairage. L'indicateur Bbio du projet est calculé de la manière suivante :

$$Bbio_{projet} = 2 * (\text{Besoins en chauffage et climatisation}) + 5 * (\text{Besoins en éclairage})$$

Les besoins en chauffage sont calculés en additionnant les pertes thermiques liées au renouvellement d'air et celles qui résultent des matériaux de construction. Ensuite, on soustrait de cette somme les apports générés par les équipements ménagers, en prenant en compte le nombre d'occupants du bâtiment. Les besoins en climatisation quant à eux sont pondérés en fonction de la localisation géographique, de la qualité de l'air et du niveau de bruit. Les principaux facteurs d'influences de ce dernier

sont donc l'orientation et la répartition des baies vitrées, l'isolation, l'étanchéité à l'air, les ponts thermiques, l'inertie thermique et la compacité.

Afin de respecter la RE 2020, l'indicateur Bbio du projet doit être inférieur à une valeur seuil ($B_{bio_{max}}$) qui est calculée à partir d'une valeur $B_{bio_{maxmoyen}}$ associée à l'usage du bâtiment (96 points pour un bâtiment à usage de bureau). Cette dernière est par la suite modulée en fonction des caractéristiques du bâtiment (présence de comble, surface moyenne du logement, etc.) à l'aide de la formule suivante :

$$B_{bio_{max}} = B_{bio_{maxmoyen}} * (1 + M_{b_{geo}} + M_{b_{combles}} + M_{b_{surfmoy}} + M_{b_{surftot}} + M_{b_{bruit}})^{21}$$

Le détail de la méthode de calcul des coefficients de modulation est précisé dans le chapitre III de l'annexe de l'article R. 172-4 du décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine. La signification de ces coefficients est quant à elle détaillée ci-dessous et les tableaux permettant le calcul de ces coefficients sont présentés en Annexe 1. L'exigence $B_{bio_{maxmoyen}}$ est modulée à l'aide de coefficients dont la méthode de calcul est détaillée ci-dessous afin d'obtenir l'exigence $B_{bio_{max}}$:

- $B_{bio_{maxmoyen}}$: valeur d'exigence $B_{bio_{max}}$ pour un bâtiment moyen en fonction de l'utilisation du bâtiment ;
- $M_{b_{geo}}$: facteur de modulation en fonction de la situation géographique du bâtiment (zone géographique et altitude).
Les zones climatiques sont quant à elles définies en fonction de la localisation du projet dans le chapitre IV du décret no 2022-305 du 1^{er} mars 2022 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments de bureaux et d'enseignement primaire ou secondaire en France métropolitaine ;
- $M_{b_{combles}}$: coefficient de modulation du $B_{bio_{max}}$ selon la présence de combles aménagés dans le bâtiment ou la partie de bâtiment. Dans le cas d'un bâtiment à usage de bureaux, ce dernier est nul ;
- $M_{b_{surfmoy}}$: facteur de modulation correspondant à la surface moyenne d'habitation d'un immeuble ou d'une partie d'immeuble d'habitation. Dans le cas d'un bâtiment à usage de bureaux, ce dernier est nul ;
- $M_{b_{surftot}}$: coefficient de modulation correspondant à la surface de référence du bâtiment ou partie de bâtiment dépendant de la surface de référence et de l'année de demande du permis de construire ;
Afin de calculer le coefficient de modulation $M_{b_{surftot}}$, il est nécessaire de connaître la méthode de calcul de la surface de référence (S_{ref}) d'un bâtiment tertiaire. Dans notre cas d'étude, la surface de référence est égale à la surface utile du bâtiment. Dans un rapport réalisé par un groupe d'experts transversaux dans le but de préparer l'entrée en vigueur de la RE 2020, la surface utile (tertiaire) est définie comme : "L'addition des surfaces de planchers construits à chaque étage auxquelles sont déduites les surfaces occupées par les murs, y compris l'isolation, les cloisons fixes prévues aux plans, les poteaux, les marches et cages d'escalier, cages d'ascenseur ou de monte-charge. Leur emprise sur le plancher bas est également déduite. Les gaines et conduits, ainsi que leur emprise sur le plancher bas, Les ébrasements de portes de et les locaux techniques exclusivement dédiés au fonctionnement du bâtiment et à usage temporaire"²² ;
- $M_{b_{bruit}}$: facteur de modulation qui correspond à la charge d'un bâtiment ou d'une partie de bâtiment par le bruit de l'infrastructure de circulation autour du bâtiment²³.

²¹ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

²² Groupe d'experts transversaux, « GE11 – Surfaces de référence », 2019, [ge11_surfaces_de_re_fe_rence_rapport_final.pdf](https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196).

²³ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

La détermination du coefficient de modulation M_{bruit} est une étape importante dans le calcul de l'indicateur, $B_{\text{bio}_{\text{max}}}$ qui permet d'évaluer non seulement les performances énergétiques du bâtiment, mais aussi la capacité de ce dernier à assurer le confort acoustique des occupants vis-à-vis des nuisances sonores extérieures. Ce coefficient dépend de plusieurs facteurs, tels que l'exposition aux bruits provenant des infrastructures de transport terrestres ou aériennes avoisinantes, ainsi que la localisation géographique du bâtiment selon les zones climatiques définies dans la RE 2020. En ce qui concerne les infrastructures terrestres, celles-ci sont classées dès lors que leur fréquentation dépasse une valeur seuil définie dans un arrêté préfectoral (décret n° 95-21 du 9 janvier 1995). Les voies de transport sont classées de 1 à 5 en fonction de niveaux sonores de référence diurnes et nocturnes, avec une exposition au bruit plus élevée pour les classes de bruit inférieures. D'autres paramètres sont également pris en compte pour évaluer l'exposition au bruit des différentes baies du bâtiment, notamment la distance minimale à partir de laquelle la baie est classée dans la catégorie d'exposition la plus faible (BR1), la vue de l'infrastructure depuis la baie et la présence d'obstacles qui peuvent masquer le bruit. La combinaison de ces facteurs permet de déterminer la catégorie d'exposition de chaque baie du bâtiment. Enfin, concernant les infrastructures de transport aérien, le facteur déterminant est la situation du bâtiment par rapport aux zones d'exposition (A, B, C, D et hors zone) de l'aéroport le plus proche, qui sont définies dans le plan d'exposition au bruit (PEB) approuvé par arrêté préfectoral²⁴. Ces zones sont facilement identifiables grâce à une carte disponible sur Géoportail, mise en place par le gouvernement.

1.2.2 Consommation en énergie primaire totale (Cep)

L'indicateur **Cep (Consommation d'énergie primaire totale)** est une mesure de la consommation d'énergie nécessaire pour le fonctionnement d'un bâtiment tout au long de sa durée de vie, depuis sa construction jusqu'à sa démolition. La consommation en énergie primaire des 6 usages de la RT2012 est toujours prise en compte dans la RE2020 :

- Le chauffage ;
- La production d'eau chaude sanitaire ;
- La climatisation ;
- La ventilation ;
- L'éclairage ;
- Les auxiliaires (pompes, ventilateurs, etc.) d'un bâtiment.

Désormais, l'indicateur prend également en compte les consommations suivantes :

- L'éclairage et/ou la ventilation des parkings ;
- L'éclairage des circulations en collectifs ;
- La consommation électrique des ascenseurs et/ou escalators.

La consommation en énergie primaire totale est exprimée en kWh_{ep}/m².an (kilowattheures d'énergie primaire par mètre carré et par an), ce qui permet de comparer les performances énergétiques de différents types de bâtiments. Lors de son calcul, seul l'énergie importée est prise en compte. Par ailleurs, en cas d'exportation d'énergie produite de manière renouvelable (panneaux photovoltaïques) cette dernière n'est pas déduite de la valeur de Cep calculée. En revanche, toute l'énergie qui est autoconsommée n'apparaît pas dans le calcul de Cep, car elle n'est pas importée. En outre, afin de prendre en compte les pertes dues au transport, à la production et à la transformation, la consommation calculée est exprimée en énergie primaire. De ce fait des coefficients pour chaque source d'énergie ont été définis dans le but d'effectuer la conversion entre la consommation en énergie finale et la consommation en énergie primaire utilisée pour le calcul de l'indicateur.

²⁴ Articles R. 147-5 à R. 147-11 du Code de l'urbanisme

Tableau 2 : Coefficients de transformation de l'énergie finale utilisée en énergie primaire²⁵

Type d'énergie importée par le bâtiment	Coefficients de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire
Bois	1
Electricité	2,3
Réseau urbain (chauffage)	1
Réseau urbain (froid)	1
Gaz méthane (naturel) issu des réseaux	1
Energie renouvelable captée sur le bâtiment ou la parcelle	0
Autres énergies	1

Source : L'article 9 de l'Arrêté du 4 août 2021, qui fait référence à l'article R. 172-6 du Code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>

De ce fait, la RE 2020 a pour objectif de réduire la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs, en favorisant les matériaux et les systèmes économes en énergie, tout en encourageant l'utilisation d'énergies renouvelables. Par ailleurs, il est à noter qu'en fonction de la valeur de l'indicateur projet DH qui est l'indicateur évaluant l'exigence de confort d'été qui sera présenté par la suite, des pénalisations peuvent être appliquées selon le régime suivant si $350 \leq DH \leq DH_{max}$ et sont calculés selon la formule suivante :

$$P_{Cep} = a * b * (DH - 350)$$

- a = 0.009 (kWhep/an.m²) dans le cadre d'un bâtiment à usage de bureau ;
- b dépend de la zone climatique et de l'altitude du bâtiment.

De la même manière que pour l'indicateur Bbio, afin de respecter la RE 2020, la consommation en énergie primaire du projet doit être inférieure à une valeur seuil qui est par la suite modulé en fonction des caractéristiques du bâtiment selon la formule suivante :

$$Cep_{max} = Cep_{maxmoyen} * (1 + Mc_{geo} + Mc_{combles} + Mc_{surfmoy} + Mc_{surftot} + Mc_{cat})^{26}$$

Le détail de la méthode de calcul des coefficients de modulation est précisé dans le chapitre III de l'annexe de l'article R. 172-4 du décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine. La signification de ces coefficients est quant à elle détaillée ci-dessous et les tableaux permettant le calcul de ces derniers sont situés en Annexe 2. Il est à noter que les coefficients de modulation sont identiques pour les valeurs de Cep_{max} , $Cep_{nr_{max}}$ et $Ic_{énergie_{max}}$.

Ensuite, la valeur seuil $Cep_{maxmoyen}$ est ajustée à l'aide de coefficients, dont la signification et la méthode de calcul sont expliquées en détail ci-dessous, afin d'obtenir l'exigence Cep_{max} . Les valeurs des coefficients de modulation et de l'exigence moyenne $Cep_{maxmoyen}$ sont fournies en détail dans l'Annexe 2.

- $Cep_{maxmoyen}$: valeur de l'exigence Cep_{max} pour un bâtiment tertiaire moyen en fonction de son usage ;

²⁵ Arrêté du 4 août 2021 portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du Code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>

²⁶ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

- $M_{c_{geo}}$: facteur de modulation en fonction de la situation géographique (zone climatique et altitude) du bâtiment ;
- $M_{c_{combles}}$: facteur de modulation selon la surface des combles réalisée dans le bâtiment, dans le cadre d'un bâtiment à usage de bureaux, ce dernier est nul ;
- $M_{c_{surfmoy}}$: coefficient de modulation relatif à la surface moyenne des logements du bâtiment ou de la partie de bâtiment, si le bâtiment est à usage de bureaux ce dernier est nul ;
- $M_{c_{surftot}}$: coefficient de modulation correspondant à la surface de référence du bâtiment ou partie de bâtiment à usage de bureaux ;
- $M_{c_{cat}}$: facteur de modulation selon la catégorie des contraintes extérieures du bâtiment, dans notre cas d'étude ce dernier est nul²⁷.

1.2.3 Consommation en énergies primaires non renouvelables (Cep,nr)

Par ailleurs, la réglementation environnementale 2020 fait également la distinction concernant la provenance des sources d'énergies grâce à l'indicateur de **consommation en énergies primaires non renouvelables** (Cep,nr). Ce dernier a pour objectif d'inciter à l'utilisation de sources d'énergies renouvelables. Le principe de calcul est identique à celui de l'indicateur de consommation en énergie primaire, car les pôles pris en compte sont les mêmes. Cependant, les coefficients de conversion en énergie primaire non renouvelables peuvent varier en fonction de la source d'énergie.

Tableau 3 : Coefficients de transformation de l'énergie finale utilisée en énergie primaire non renouvelable²⁸

Type d'énergie importée par le bâtiment	Coefficients de transformation de l'énergie entrant dans le bâtiment en énergie primaire non
Bois	0
Electricité	2,3
Réseau de chaleur urbain (chaleur)	1 - Ratio d'énergie renouvelable ou de récupération du réseau
Réseau de chaleur urbain (froid)	1
Gaz méthane (naturel) issu des réseaux	1
Energie renouvelable captée sur le bâtiment ou la parcelle	0
Autres énergies	1

Source : L'article 9 de l'Arrêté du 4 août 2021, qui fait référence à l'article R. 172-6 du Code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>

En revanche, les sources d'énergies renouvelables et de récupération sont désormais déduites dans le calcul du Cep,nr lorsque la source est le réseau de chaleur urbain.

De la même manière que pour les indicateurs détaillés précédemment, la RE 2020 fixe une valeur seuil qui est calculée à partir d'une valeur moyenne qui dépend de l'usage du bâtiment, cette dernière est par la suite modulée en fonction des caractéristiques du bâtiment selon la formule ci-dessous. La valeur de

²⁷ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

l'exigence moyenne $Cep, nr_{maxmoyen}$ et des coefficients de modulation sont identiques à ceux de Cep_{max} ou de $Ic_{\text{énergie_max}}$ sont présentés en Annexe 2.

$$Cep, nr_{max} = Cep, nr_{maxmoyen} * (1 + Mc_{geo} + Mc_{combles} + Mc_{surfmoy} + Mc_{surftot} + Mc_{cat})^{29}$$

1.2.4 Indicateur carbone de la consommation d'énergie ($Ic_{\text{énergie}}$)

L'indicateur $Ic_{\text{énergie}}$ a été introduit par la RE 2020, ce dernier mesure la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) émise par l'ensemble du cycle de vie d'un bâtiment, de la production des matériaux de construction à la fin de vie du bâtiment. Il prend ainsi en compte les émissions directes et indirectes de CO₂, y compris celles associées à la production et au transport des matériaux, à la construction, au chauffage, à la climatisation, à l'éclairage, à l'eau chaude sanitaire et à l'entretien du bâtiment. La méthode de calcul de l'indicateur carbone de la consommation d'énergie repose sur une analyse de cycle de vie (ACV) du bâtiment, qui permet d'évaluer les impacts environnementaux de chaque étape de la vie du bâtiment, de la production des matériaux à la fin de vie. Cette ACV est réalisée selon une méthode normalisée, la norme ISO 14044, qui garantit la comparabilité des résultats entre différents bâtiments. La règle de calcul est la suivante :

$$Ic_{\text{énergie}} = \sum_{ij} Cef_{ij} * DES_{ij} * f_{CO_2}(a) \text{ }^{30}$$

- Cef_{ij} : Quantité d'énergie finale i importée et consommée pour l'usage j
- DES_{ij} : Facteur d'émission de l'énergie i pour l'usage j
- $f_{CO_2}(a)$: Coefficient de pondération pour l'année a
- $Ic_{\text{énergie}}$: Indicateur carbone de consommation d'énergie (kg CO₂eq) lié à la consommation d'énergie du bâtiment sur 50 ans

²⁹ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

³⁰ Ibid.

Tableau 4 : Facteur d'émission (DES)

Type d'énergie par kWh EF PCI	kg équivalent CO2 par kilowattheure d'énergie finale en PCI
Bois, biomasse - plaquettes forestière	0,024
Bois, biomasse - Granulés (pellets) ou briquettes	0,03
Bois, biomasse - Buche	0,03
Électricité chauffage	0,079
Électricité refroidissement	0,064
Électricité ECS	0,065
Électricité éclairage tertiaire	0,064
Électricité éclairage habitation	0,069
Électricité autres usages	0,064
Gaz méthane (naturel) issu des réseaux	0,227
Gaz butane	0,272
Gaz propane	0,272
Autres combustibles fossiles	0,324

Source : L'article 10 de l'Arrêté du 4 août 2021, qui fait référence à l'article R. 172-6 du Code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>

Le RE 2020 fixe ainsi une valeur seuil qui doit être supérieure à la valeur calculée pour le projet. Cette dernière est calculée à partir d'un indicateur de consommation maximal moyen qui est modulé à l'aide de coefficient selon la formule présentée ci-dessous. Les valeurs des coefficients de modulation qui sont identiques à ceux de Cep_{max} ou de $Cep_{nr_{max}}$ ainsi que de l'exigence moyenne $Ic_{\text{énergie_maxmoyen}}$ et sont détaillés en Annexe 2.

$$Ic_{\text{énergie_max}} = Ic_{\text{énergie_maxmoyen}} * (1 + Mc_{\text{geo}} + Mc_{\text{combles}} + Mc_{\text{surfmoy}} + Mc_{\text{surftot}} + Mc_{\text{cat}})^{31}$$

Il est cependant à noter que cette valeur est évolutive dans le temps avec des valeurs qui deviennent de plus en plus faibles et donc strictes. Cette mise en place progressive permet de respecter les objectifs de réductions des émissions du CO2 du secteur du bâtiment au long terme sans pour autant rendre inapplicable ces objectifs en permettant aux filières de s'adapter.

1.2.5 Indicateur carbone de la construction ($Ic_{\text{construction}}$)

La RE 2020 introduit une nouvelle exigence concernant l'impact carbone de la construction des bâtiments à usage de bureau au moyen de l'indicateur $Ic_{\text{construction}}$. Ce dernier mesure l'impact sur le changement climatique lié aux composants du bâtiment ainsi qu'à la phase chantier de ce dernier. Cet impact est mesuré sur l'ensemble du cycle de vie de ce dernier et prend notamment en compte le stockage du carbone durant la période d'exploitation ainsi que les rejets liés à la déconstruction et la RE 2020 a mis en place une décomposition sous forme de lots afin de faciliter son calcul.

³¹ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

Tableau 5 : Décomposition des différents lots pour le calcul de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$

Lots architecturaux	Lot 1	Voiries et réseaux divers
	Lot 2	Fondations et infrastructures
	Lot 3	Superstructure et maçonnerie
	Lot 4	Couverture, étanchéité, charpente et zinguerie
	Lot 5	Cloisonnement, doublage, plafonds suspendus et menuiseries intérieures
	Lot 6	Façades et menuiseries extérieures
	Lot 7	Revêtement des sols, murs, plafonds, chape, peinture et décoration
Lots techniques	Lot 8	CVC, ECS
	Lot 9	Installations sanitaires
	Lot 10	Réseaux d'énergie (courant fort)
	Lot 11	Réseaux de communication (courant faible)
	Lot 12	Appareils élévateurs
	Lot 13	Équipement de production locale d'électricité

Source : Cours construction durable ENPTE, Myriam BAHRAR

Pareillement aux indicateurs précédents, la RE 2020 fixe une exigence maximale moyenne liée à l'usage du bâtiment appelé $I_{c_{\text{construction_maxmoyen}}}$, cette dernière est évolutive afin particulièrement de prendre en compte le manque de données de la base INIES dans le but d'estimer les émissions en CO₂ des composants. Par la suite, cette exigence moyenne est modulée en fonction des caractéristiques spécifiques du bâtiment selon l'expression suivante :

$$I_{c_{\text{construction_max}}} = I_{c_{\text{construction_maxmoyen}}} * (1 + M_{i_{\text{combles}}} + M_{i_{\text{surf}}}) + M_{i_{\text{geo}}} + M_{i_{\text{infra}}} + M_{i_{\text{vrd}}} + M_{i_{\text{ded}}} + M_{i_{\text{pv}}}^{32}$$

Le détail de la méthode de calcul des coefficients de modulation est précisé dans le chapitre III de l'annexe de l'article R. 172-4 du décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine. La signification ces coefficients est quant à elle détaillée ci-dessous et les valeurs de l'exigence moyenne $I_{c_{\text{construction_maxmoyen}}}$ et des coefficients de modulation associés sont détaillées en Annexe 3 :

- $I_{c_{\text{construction_maxmoyen}}}$: valeur moyenne de l'exigence $I_{c_{\text{construction}}}$ en fonction de l'usage du bâtiment et de l'année de demande de son permis de construire ;
- $M_{i_{\text{combles}}}$: coefficient de modulation dépendant de la surface de plancher des combles aménagés dans le bâtiment, dans le cas de bâtiments à usage de bureau ce dernier est nul ;
- $M_{i_{\text{surf}}}$: coefficient associé à la surface de référence (S_{ref}) du bâtiment ou de la partie du bâtiment
- $M_{i_{\text{vrd}}}$: coefficient dépendant de l'impact carbone de la voirie et des réseaux divers (lot 1), il est donc nécessaire de connaître la valeur de l'indice $I_{c_{\text{construction}}}$ associé au lot 1 de notre projet ;
- $M_{i_{\text{infra}}}$: coefficient dépendant de l'impact carbone des fondations et des espaces en sous-sol avec une limite d'impact de 40 kg CO₂/m² (lot 2), il est donc nécessaire de connaître la valeur de l'indice $I_{c_{\text{construction}}}$ associé au lot 2 de notre projet ;
- $M_{i_{\text{ded}}}$: coefficient dépendant de l'impact des données environnementales par défaut et des valeurs forfaitaires dans l'évaluation du bâtiment ou de la partie de bâtiments.

³² Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

En outre, concernant l'indice $I_{c_{ded}}$ qui quantifie l'impact des données forfaitaires et des valeurs par défaut dans le calcul de l'empreinte environnementale du bâtiment³³, il convient de distinguer deux situations selon la réglementation :

- si la surface d'emprise au sol est inférieure à 1000 m², $I_{c_{ded}}$ est l'impact sur le changement climatique de l'ensemble de composants associés à des données environnementales par défaut ou à des valeurs forfaitaires dans l'évaluation de l'indicateur $I_{c_{construction}}$ du bâtiment ou de la partie de bâtiment, à l'exception des composants des lots 1 et 2 au sens de l'article R. 420-1 du Code de l'urbanisme,
- si la surface d'emprise au sol est supérieure à 1000 m², $I_{c_{ded}}$ est l'impact sur le changement climatique de l'ensemble de composants associés à des données environnementales par défaut ou à des valeurs forfaitaires dans l'évaluation de l'indicateur $I_{c_{construction}}$ du bâtiment ou de la partie de bâtiment, à l'exception des composants des lots 1, 2 et 3 au sens de l'article R. 420-1 du Code de l'urbanisme,
- Mi_{geo} : coefficient associé à la localisation géographique du bâtiment pour permettre en zone chaude de mettre en place une inertie lourde (recours au béton) et un système de rafraîchissement passif ;
- Mi_{pv} : coefficient dépendant de l'impact de l'installation de panneaux photovoltaïques pour le bâtiment ou la partie de bâtiment, concernant les immeubles tertiaires ce dernier est nul³⁴.

1.2.6 Méthode de l'analyse de cycle de vie

Afin de calculer l'indicateur $I_{c_{construction}}$ de notre projet, il est nécessaire d'effectuer une ACV de ce dernier sur une période d'exploitation de 50 ans fixée par la RE 2020 en prenant en compte non seulement l'impact carbone des composants employés ($I_{c_{composant}}$), mais également du chantier ($I_{c_{chantier}}$). La méthode d'analyse de cycle de vie suit dans la RE 2020 une analyse sous forme de module tout au long du cycle d'utilisation du produit de construction, de l'équipement et du bâtiment.

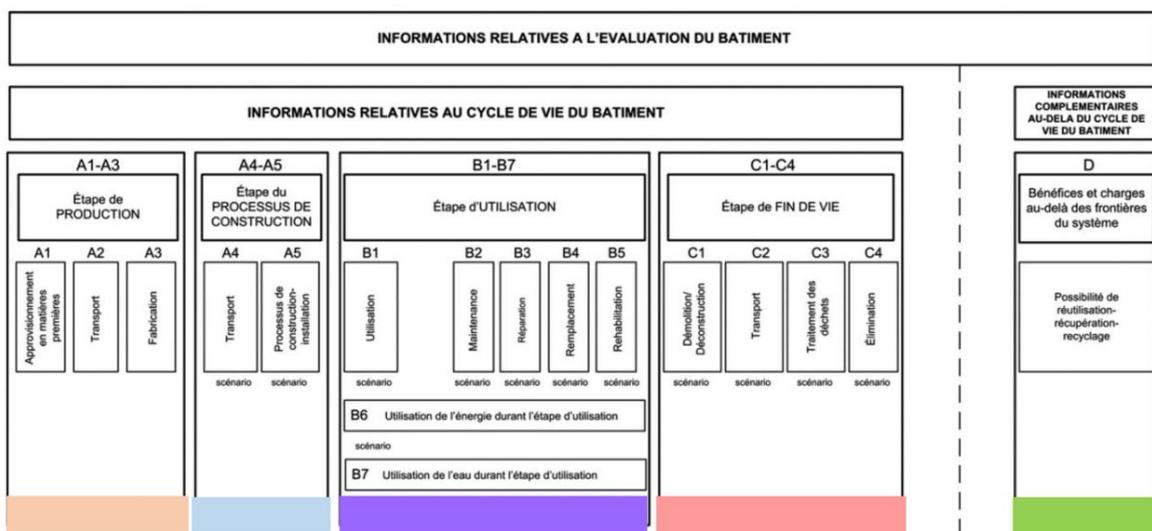


Figure 10 : Module de cycle de vie du système

Source : Source: Norme NF EN 15804-A1

³³ RE 2020 : un nouveau décret fixe les exigences de performance. <https://www.alterea.fr/le-lab/re-2020-nouveau-decret-fixe-exigences-performance>. Consulté le 2 août 2023.

³⁴ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

Avec l'entrée en vigueur de la RE 2020, contrairement à la méthode de calcul décrite précédemment, utilisée pour les calculs d'impact carbone dans le cadre du label E+/C-. L'analyse de cycle de vie dynamique mise en place par la RE 2020 prend en compte la date de l'émission ou de captation des GES grâce à un coefficient de pondération. Ce dernier, compte tenu du contexte climatique actuel, rend plus dommageable les émissions qui ont lieu tôt et au contraire valorise la captation de CO2 qui a lieu tôt dans le cycle de vie du bâtiment.

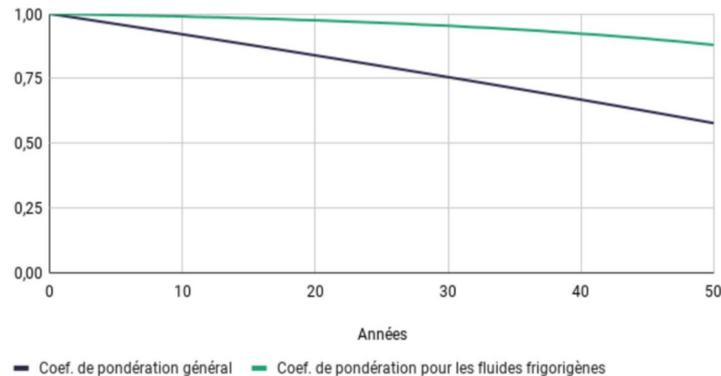


Figure 11 : Coefficient de pondération en fonction de l'année

Source : Vizcab, <https://blog.vizcab.io/fr/acv-statique-vs-acv-dynamique>

D'après la Figure 11 ci-dessus, le coefficient de pondération (f_{CO_2}) associé à l'année 0 vaut 1 de ce fait, on obtient les relations suivantes :

- Production

$$I_{p,k}^{Production} = Q_p * DE_p^{Production}$$

- Édification

$$I_{p,k}^{Edification} = Q_p * DE_p^{Edification}$$

- Exploitation

$$I_{p,k}^{Exploitation} = Q_p * \sum_{a=1}^{PER} \left(\frac{DE_p^{Exploitation} * f_{CO_2}}{DEV} \right)$$

- Fin de vie

$$I_{p,k}^{Fin\ de\ vie} = Q_p * DE_p^{Fin\ de\ vie} * f_{CO_2}(PER)$$

- Module D

$$I_{p,k}^{Module\ D} = Q_p * DE_p^{Module\ D} * f_{CO_2}^{35}$$

Par ailleurs, selon l'usage du bâtiment ainsi que le lot ou sous lot concerné, des valeurs forfaitaires peuvent être appliquées afin de décrire l'impact de l'ensemble des composants de ces derniers. Dans le cas de notre étude qui s'intéresse aux bâtiments à usages de bureaux, on a :

³⁵ Myriam BAHAR, Cours de développement durable, ENTPE, 2023

Tableau 6 : Valeurs forfaitaires pour un bâtiment à usage de bureau

Phase du cycle de vie	Impact sur le changement climatique par phase du cycle de vie du bâtiment (kg éq. CO2/m2)				
	Production	Edification	Exploitation	Fin de vie	Module D
Lot ou sous-lot					
8.1 (Equipements de production chaud/ froid hors cogénération)	13	0	46	1	0
8.3 (Systèmes d'émission)	13	0	46	1	0
8.4 (Traitement de l'air et éléments de désenfumage)	11	0	38	1	0
8.5 (Réseaux et conduits)	7	0	23	0	0
10 (Réseaux d'énergie/ courant fort)	57	0	54	4	0
11 (Réseaux de communication/ courant faible)	8	0	7	0	0

Source : Article 7 de l'arrêté du 6 avril 2022 modifiant les arrêtés pris en application des articles R. 122-22 à R. 122-25 et R. 172-1 à R. 172-9 du Code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045571217>

En raison du manque actuel de données environnementales détaillées sur l'impact des différents composants, les valeurs forfaitaires sont utilisées pour évaluer ces éléments. Cependant, il est plus difficile d'agir sur ces valeurs forfaitaires car elles sont basées sur des estimations générales. Par conséquent, il devient important d'identifier les lots non forfaitaires ayant le plus grand impact afin de garantir la conformité de notre projet avec la réglementation environnementale 2020.

1.2.7 Degré-heure d'inconfort (DH)

L'indicateur confort d'été de la RE 2020 correspond à un critère de confort thermique en période estivale. Il permet d'évaluer la capacité d'un bâtiment à maintenir une température intérieure acceptable en été, en évitant les surchauffes et les inconforts pour les occupants. Cet indicateur est calculé en prenant en compte plusieurs paramètres, tels que l'orientation et l'inertie du bâtiment, les apports solaires, les systèmes de ventilation et de rafraîchissement, etc. Il s'exprime en degrés heure (°C.h) au-delà d'un seuil de température de confort.

Il est d'abord nécessaire de réaliser une simulation selon un scénario météo auquel a été ajouté une séquence caniculaire qui dépend donc de la zone climatique dans laquelle est situé le bâtiment étudié afin de calculer la température opérative du bâtiment dans chaque zone thermiquement homogène. La période d'occupation du bâtiment doit également être renseignée, car l'incrément de l'indicateur degré-heure d'inconfort se fait uniquement lorsque le bâtiment est occupé. Par la suite, il faut calculer la température de confort adaptatif qui est de 26 °C la nuit, mais varie entre 26 et 28 °C en journée. Enfin, on applique la formule suivante afin d'obtenir le nombre de degrés heure d'inconfort :

$$DH = \sum \max(0; T_{\text{opérative}} - T_{\text{confort adaptatif}})^{36}$$

La RE 2020 fixe ensuite une limite maximale de degré-heure à ne pas dépasser qui dépend du type de bâtiment et de ses caractéristiques ($DH_{\text{max}} = DH_{\text{max cat}}$) avec :

³⁶ Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>

Tableau 7 : Exigence DH_maxcat en fonction de la catégorie pour les bureaux

	Catégorie 1, sauf parties de bâtiments climatisés en zones H2d et H3	Catégorie 1 climatisé, en zone H2d et H3	Catégorie 2	Catégorie 3
DH_maxcat	1150	2400	2600	Pas de seuil

Source : Décret n° 2022-305, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045288020>

Dans le but de connaître la catégorie de notre bâtiment, il faut d'une part, avoir connaissance de sa zone climatique. Par ailleurs, le régime de classification est le suivant concernant les contraintes extérieures :

Catégorie 3 :

- Cas 1 :
 - Un système de climatisation est nécessaire,
 - L'usage de la zone est bureau,
 - Les règles d'hygiène et de sécurité interdisent l'ouverture de toutes les baies du local donnant sur l'extérieur.
- Cas 2 :
 - Un système de climatisation est nécessaire,
 - L'usage de la zone est bureau,
 - La zone est située dans un immeuble de grande hauteur au sens de l'article R. 146-3 du Code de la construction et de l'habitation.

Catégorie 2 :

- La zone n'est pas de catégorie 3,
- Un système de climatisation est nécessaire,
- Les baies du local sont exposées au bruit BR2 ou BR3,
- Le bâtiment est construit en zone climatique H2d ou H3 à une altitude inférieure à 400m.

Catégorie 1 :

- La zone ne correspond pas aux catégories 2 ou 3³⁷.

De ce fait, plusieurs cas de figure se présentent :

- Si $DH > DH_{max}$: le bâtiment ne respecte pas la RE 2020,
- Si $350 \leq DH \leq DH_{max}$: la RE 2020 est respectée, mais ajout d'un forfait refroidissement au Cep afin d'inciter à l'atteinte du seuil bas avec des leviers passifs,
- Si $DH < 350$: la RE 2020 est respectée.

Le forfait de pénalisation a été présenté dans la partie 1.2.2 relative à la consommation en énergie primaire totale (Cep)

Ainsi, la RE 2020 impose des exigences plus élevées en matière de performances énergétiques et environnementales tout en fournissant des outils de calculs et de modélisations précises afin d'évaluer les performances des bâtiments vis-à-vis de ces dernières.

2. Identification et analyse des leviers pour le respect de la RE2020

L'objectif de cette section consiste à identifier et analyser les mécanismes permettant de garantir la conformité à la réglementation RE 2020 pour les projets tertiaires à usage de bureaux EIFFAGE

³⁷« Vizcab, solutions pour la transition environnementale du bâtiment ». *Vizcab*, <https://vizcab.io/>. Consulté le 10 juillet 2023.

CONSTRUCTION CONFLUENCES. Il est important de souligner que dans le cadre de l'étude de cas, certains mécanismes ne seront pas pris en compte ultérieurement. En effet, la majorité des appels d'offres obtenus se concentrent exclusivement sur des projets de construction et ne concernent pas la conception-construction. Néanmoins, nous présentons certains leviers afin d'anticiper les durcissements futurs des exigences de la RE 2020 qui pourraient exiger une utilisation accrue de leviers liés à la conception du bâtiment. L'étude des systèmes énergétiques et leurs impacts en termes de consommations énergétiques et d'impact carbone ont tout de même été réalisés bien que les possibilités d'une entreprise comme EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES d'agir sur ces derniers restent assez limitées.

2.1 Conception bioclimatique

Comme défini précédemment, ce critère est évalué d'abord à travers l'indicateur Bbio de la RE 2020 qui permet, indépendamment des systèmes énergétiques mis en place, d'évaluer la qualité de la **conception bioclimatique** du bâtiment. En agissant sur les besoins en chauffage et de climatisation, il y aura également une influence sur les indicateurs Cep, Cep,nr et Ic_{énergie}.

2.1.1 Isolation de l'enveloppe et ponts thermiques

Une étude réalisée par l'ADEME en 2010 dont le cas d'étude était un **immeuble non isolé** des années 1960 avec des parois en béton, des toitures terrasses et des planchers bas sans isolation, on observe ainsi des déperditions à travers l'enveloppe selon la répartition suivante (voir Figure 12) :

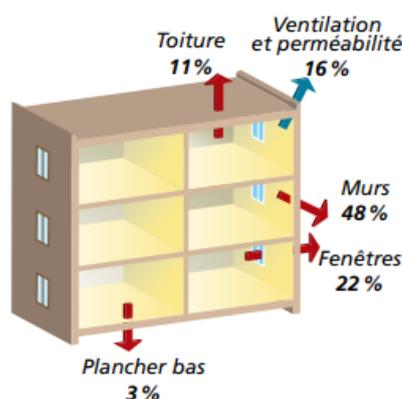


Figure 12 : Répartition des déperditions thermiques d'un immeuble non isolé

Source : ADEME, Rénovation thermique d'un immeuble de 1960, chauffé au gaz

Dans notre cas d'étude, l'analyse révèle que **l'isolation des parois** et **l'absence de traitement des ponts thermiques** du bâtiment sont responsables de plus de la moitié (62 %) des pertes de chaleur de l'enveloppe, ces pôles de déperdition présentent donc un domaine essentiel de pertes thermiques à prendre en considération pour améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment. C'est pourquoi déjà la RT 2012 fixait des valeurs limites dépendant de la zone climatique concernant les différents éléments de l'enveloppe (voir tableau 25) afin d'assurer des niveaux de performances minimales qui sont détaillés en Annexe 4.

Cependant, la RE2020 ne fixe pas **d'exigences minimales** concernant les **résistances thermiques** des éléments de l'enveloppe excepté dans l'article 21 de l'arrêté du 4 août 2021³⁸ qui concerne uniquement les parois séparant des zones à occupation discontinue : bureaux, enseignement secondaire (partie jour)

³⁸ Article 21, Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>

et primaire et les zones à occupation continue : maison individuelle, logement collectif et enseignement secondaire (partie nuit). Pour ces dernières, la résistance thermique minimale fixée est de $2.77 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ³⁹ ce qui correspond à l'exigence de la RT 2012 détaillée dans l'Annexe 4. De plus, la réglementation énergétique 2020 (RE 2020) impose dorénavant deux exigences relatives au traitement des ponts thermiques pour les bâtiments tertiaires utilisés comme bureaux. Conformément à cette réglementation, pour être en conformité, l'une de ces deux exigences doit être remplie :

- La température de surface au nu de l'isolant doit être supérieur à $15 \text{ }^\circ\text{C}$ en conditions hivernales,
- Le ratio $\Psi \leq 0.33 \text{ W}/(\text{m}^2[\text{Sref}]\cdot\text{K})$ et $\Psi_9 \leq 0.6 \text{ W}/(\text{ml}\cdot\text{K})$.

Le ratio Ψ , exprimé en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, représente la quantité totale de pertes de chaleur dues aux ponts thermiques présents dans le bâtiment, normalisée par sa surface. **Le coefficient de transmission thermique linéique moyen Ψ_9** se réfère spécifiquement au coefficient de transmission thermique moyen associé aux liaisons entre les planchers intermédiaires et les murs adjacents qui donnent sur l'extérieur ou sur des locaux non chauffés⁴⁰.

Ainsi, on a pu observer que l'enveloppe d'un bâtiment constitue un pôle de déperdition important, or, l'indicateur Bbio intègre dans son calcul les besoins de chauffage du bâtiment. De ce fait, en agissant sur l'enveloppe thermique du bâtiment afin de réduire les déperditions, l'énergie nécessaire afin de maintenir une température de confort sera moins importante.

▪ **Etude de l'impact sur Bbio**

Une simulation menée par l'Association des ingénieurs et techniciens spécialisés en climatique, ventilation et froid (AICVF) a étudié deux cas de bâtiments de bureaux : le bâtiment A de petite surface (493 m^2) et le bâtiment B de plus grande surface (4125 m^2). Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons uniquement au bâtiment de superficie plus importante qui correspond davantage à la typologie des projets EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES.

Les simulations ont été réalisées en utilisant une configuration de **référence (STD-2020)** ainsi qu'une seconde configuration avec une **enveloppe optimisée** et une structure en ossature bois (**Opti-FOB**). Les caractéristiques de ces deux configurations sont détaillées dans l'Annexe 5. Les résultats concernant l'exemple de bâtiment de bureau dont la surface est égale à 4125 m^2 sont présentés dans la Figure 13, on constate par ailleurs que ces simulations ont été réalisées en faisant varier la zone climatique du bâtiment, car elle influence la valeur limite de l'exigence ($B_{\text{bio}_{\text{max}}}$).

On constate une **diminution moyenne des besoins en chauffage de 22%** avec le renforcement de l'isolation des parois et le traitement des ponts thermiques. Par ailleurs, il est pertinent de relever que les besoins en climatisation ont connu une augmentation indépendamment de la zone climatique étudiée. Cette hausse peut être attribuée à divers facteurs, tels que la disposition des espaces intérieurs ou encore les apports internes liés à l'occupation et aux équipements. Étant donné que l'indicateur Bbio tient compte à la fois des besoins de chauffage et de climatisation dans son calcul, il est crucial d'analyser conjointement ces deux variables.

Néanmoins, l'amélioration de l'isolation du bâtiment ainsi que le traitement des ponts thermiques ont entraîné une **réduction de la valeur de l'indicateur Bbio**, indépendamment de la zone climatique étudiée. Ainsi, suite au traitement des ponts thermiques et à l'amélioration de l'isolation réalisée dans le

³⁹ Article 15, JO n°1 du 1^{er} janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>

⁴⁰ Cegibat, GRDF. « RT 2012 : les grands principes ». *Cegibat.fr*, <https://cegibat.grdf.fr/reglementation-energetique/grands-principes-rt2012>. Consulté le 10 juillet 2023.

cas du bâtiment (Opti-FOB), le critère 2025 de l'indicateur $Bbio_{max}$, qui n'était pas respecté initialement dans la configuration STD-2020, est désormais atteint.

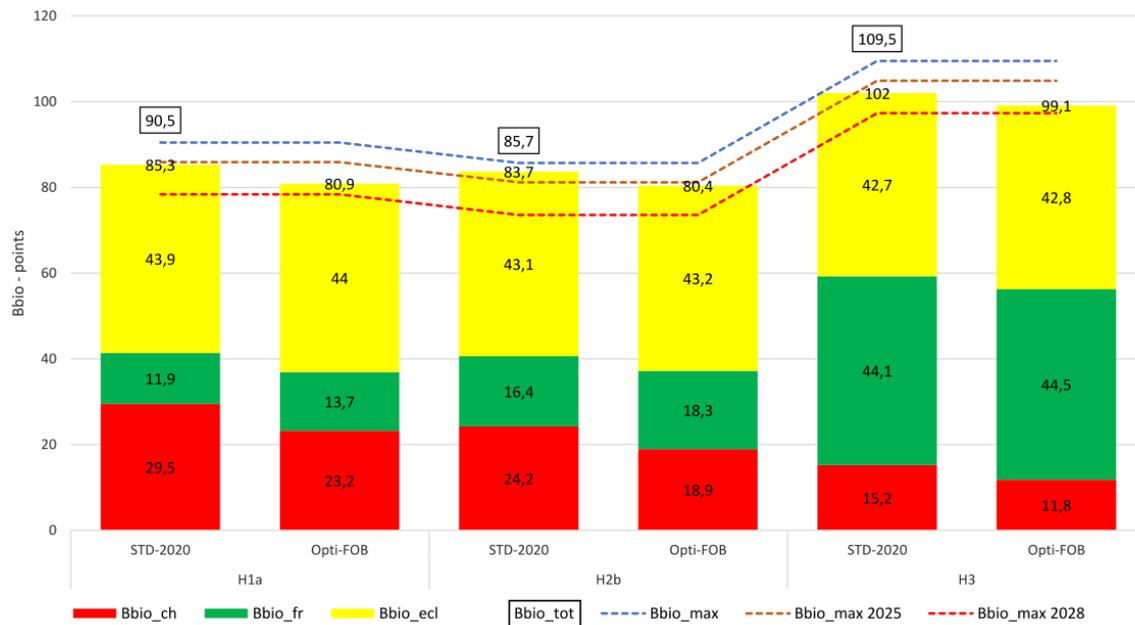


Figure 13 : Positionnement du Bbio par rapport au $Bbio_{max}$

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

Comme pour le Bbio, les consommations énergétiques liées aux besoins de chauffage et de climatisation sont prises en compte dans le calcul des indicateurs **Cep** et **Cep,nr** pour évaluer la performance énergétique globale du bâtiment. Comme évoqué précédemment, l'amélioration des propriétés thermiques de l'enveloppe du bâtiment a entraîné une réduction des besoins de chauffage. Toutefois, cette amélioration a également conduit à une **légère augmentation des besoins en climatisation**. Par conséquent, il est nécessaire de mener une étude approfondie pour évaluer l'impact relatif de ces deux aspects sur les consommations énergétiques globales du bâtiment et examiner les effets résultants sur les indicateurs Cep et Cep,nr. Cette analyse nous permettra de mieux appréhender les implications des améliorations apportées à l'enveloppe du bâtiment sur sa performance énergétique globale. Des simulations ont également été effectuées par l'AICVF afin d'étudier pour différents systèmes énergétiques les consommations en énergies primaires totales et non renouvelables associées.

- **Etude de l'impact sur Cep, Cep,nr et $I_{C_{energie}}$**

On s'intéressera ici au bâtiment de surface importante (4125 m²) dans le cas où le système énergétique mis en place est une **PAC air/eau** qui est la situation de référence de l'étude. De ce fait les valeurs de Cep et Cep,nr sont identiques car aucune source d'énergie renouvelable n'est employée. De plus, l'AICVF a pris la décision de ne comparer les valeurs de **Cep** et **Cep,nr** qu'à l'exigence Cep, nr_{max} car il s'agit de l'exigence la plus contraignante puisque qu'elle ne prend pas en compte la production énergétique issue de sources renouvelables. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau ci-dessous (voir Tableau 8) et le détail des résultats des simulations est présent dans les Annexes 6 et 7

Tableau 8 : Etude de l'influence de l'isolation sur Cep,nr et Ic_{énergie}

Configuration	Zone climatique	Cep,nr ch (kWhep/m ²)	Cep,nr fr (kWhep/m ²)	Cep,nr_max - Cep,nr (kWhep/m ²)	IcEnergie ch (kg CO ₂ _{eq} /m ²)	IcEnergie fr (kg CO ₂ _{eq} /m ²)	Ic _{énergie} _max - IcEnergie (kg CO ₂ _{eq} /m ²)
SD-2020	H1a	16	7,9	3,5	22	9	125
	H2b	12	10,6	1,1	16	12	117
	H3	7,8	22,9	4,2	11	26	139
Opti-FOB	H1a	12,7	9,9	4,6	17	11	127
	H2b	9,5	12	1,9	13	13	119
	H3	6,2	23,2	5,5	9	26	141

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

Il y a par conséquent une **corrélation** entre l'**optimisation de l'enveloppe** du bâtiment et les indicateurs **Cep** et **Cep,nr**, puisque cette dernière a entraîné une baisse des consommations en chauffage pour toutes les zones climatiques de l'étude. Une légère hausse de la consommation énergétique associée à la climatisation entre la configuration STD-2020 et Opti-FOB est également à noter dans l'ensemble des cas. Cependant, les indicateurs Cep et Cep,nr sont tout de même en baisse lorsque l'on étudie le bilan global.

La **hausse de la consommation de climatisation** peut être expliquée par plusieurs facteurs. L'amélioration de l'isolation peut entraîner une accumulation de chaleur à l'intérieur du bâtiment, nécessitant ainsi davantage de climatisation. Par ailleurs, dans les zones climatiques comme H3, caractérisées par un climat méditerranéen avec des températures extérieures élevées en été, une augmentation de l'isolation peut avoir un impact moins important sur les besoins en climatisation, car elle permet de réduire les variations de température intérieure. D'autres facteurs, tels que l'orientation et la disposition des surfaces vitrées, joueront également un rôle dans ce phénomène, mais leur étude sera réalisée ultérieurement.

Par ailleurs, l'indicateur **Ic_{énergie}** suit les mêmes évolutions que les indicateurs Cep et Cep,nr (voir Tableau 8) ce qui est cohérent, car ce dernier est associé aux émissions de CO₂ des consommations énergétiques. De ce fait, si la source d'approvisionnement reste inchangée, une baisse de la consommation entraînera une baisse des émissions de CO₂ associées. Par conséquent, malgré l'augmentation des émissions associées à l'utilisation de la climatisation suite à l'amélioration de l'isolation, l'impact global de cette approche demeure néanmoins favorable pour tous les cas étudiés.

L'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe et le traitement des ponts thermiques des bâtiments de bureaux permet de réduire les déperditions thermiques, les besoins en chauffage et la consommation énergétique associée, tout en favorisant le confort d'été. Cependant, il est essentiel de trouver un équilibre entre l'efficacité énergétique et les besoins en climatisation pour assurer une performance globale optimale du bâtiment.

2.1.2 Perméabilité à l'air de l'enveloppe

L'étanchéité à l'air de l'enveloppe du bâtiment permet de caractériser la quantité d'air non contrôlée qui peut entrer ou sortir du bâtiment à travers les fissures, les joints et les autres zones non étanches de l'enveloppe du bâtiment. Les fuites d'air correspondent à des **infiltrations** qui sont localisés au niveau de l'ensemble des joints entre les murs et le sol, au plafond, au niveau des cadres des fenêtres, au niveau des portes, au niveau des localisations de sorties des installations électriques, ou encore au niveau des canalisations et des sorties de ventilation (voir Figure 14).

Concernant la perméabilité à l'air, la RE 2020 fixe des **exigences de moyens** concernant les bâtiments dont la surface est inférieure à 3000 m² et qui ne sont pas classés en tant qu'immeuble de grande hauteur

(IGH). Les bâtiments qui sont concernés par cette exigence doivent pouvoir justifier d'une valeur d'unité de perméabilité à l'air qui est appelé **Q4Pa-surf** exprimé en $\text{m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$ inférieur à $1.7.\text{m}^3/(\text{h}.\text{m}^2)$. Afin d'obtenir cette valeur de référence on mesure d'abord la perméabilité à 50 Pa, par la suite des paliers sont réalisés pour réduire la différence de pressions. Cette valeur caractérise le débit de fuite pour une différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur égale à 4 Pa que l'on divise par la surface de parois déperditives en excluant les planchers bas. Afin de réaliser ces mesures, les opérateurs doivent pouvoir justifier de la possession d'un certificat Qualibat 8711 pour les bâtiments.

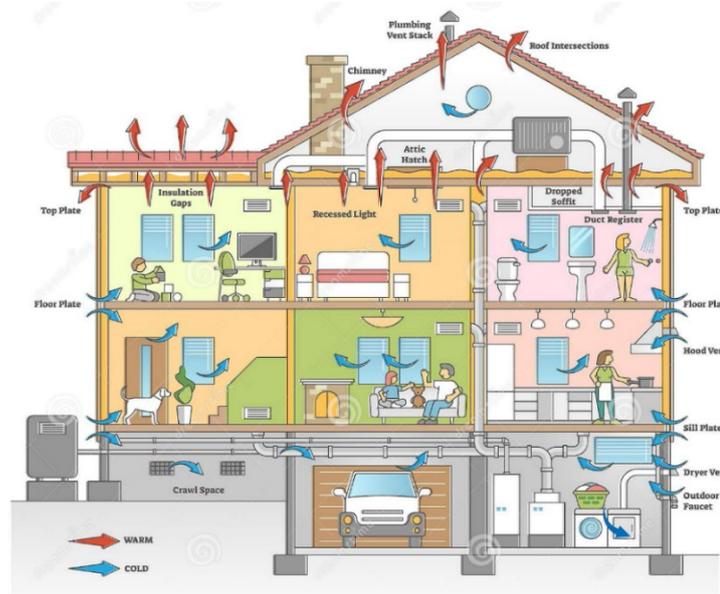


Figure 14 : Emplacement des fuites typiques d'un bâtiment

Source : Dreamstime

Une faible perméabilité à l'air de l'enveloppe du bâtiment entraînera des **pertes de chaleur** pendant les périodes hivernales dues à des **infiltrations d'air froid**. Cela se traduira par une augmentation des besoins en chauffage et de la consommation d'énergie, car le système de chauffage devra compenser les pertes de chaleur causées par ces fuites d'air. En période estivale, ce sont les **infiltrations d'air chaud** qui vont augmenter les besoins et les consommations associées à la climatisation à cause des infiltrations d'air chaud provenant de l'extérieur.

De ce fait, comme vu précédemment, afin d'assurer la conformité de notre bâtiment vis-à-vis des critères Bbio, Cep et Cep,nr, il est important d'être en mesure de traiter en amont les fuites détectées afin de **limiter les déperditions** de chaleur en hiver et **les infiltrations** de chaleur en période estivale. Par ailleurs, la perméabilité à l'air va également intervenir dans l'indicateur du confort d'été de la même manière que l'isolation de l'enveloppe en limitant les infiltrations d'air chaud et les fluctuations de températures. Ainsi, le recours à la climatisation sera réduit et le nombre d'heures d'inconfort mesuré par l'indicateur DH sera plus faible.

2.1.3 La compacité

La compacité d'un bâtiment se définit comme le rapport entre son volume et la surface totale des parois extérieures, incluant le toit, les murs et le plancher. Plus ce rapport est élevé, plus le volume intérieur du bâtiment est optimisé en termes de flux conductifs à travers les parois extérieures car cela **réduira les surfaces déperditives**. Par conséquent, en augmentant la compacité d'un bâtiment, on peut améliorer son efficacité énergétique en réduisant les besoins de chauffage et de climatisation, ainsi que la consommation énergétique associée à ces besoins.

De plus, il est préférable de regrouper les zones de même température afin de réduire les déperditions thermiques. Dans le cas où certaines zones produiraient un surplus de chaleur indésirable (comme une salle de serveurs), il est judicieux de les adjoindre à des zones nécessitant de l'énergie supplémentaire.

Une étude réalisée en 2006 par l'Université de Louvain a comparé la consommation de chauffage de bâtiments de même volume, mais ayant différentes compacités. Les caractéristiques de la simulation sont les suivantes :

- U-mur = 0.5 W/(m². K)
- U-fenêtre = 3.6 W/(m².K)
- U-toit = 0.3 W/(m².K)

Les résultats de l'étude, ainsi que les différentes configurations architecturales, sont présentés de manière détaillée dans la Figure 15. Il y a en effet une **diminution des besoins en chauffage** avec l'augmentation de la compacité du bâtiment de 25 % entre le bâtiment le plus compact et le cas le plus défavorable. Cependant, plus un bâtiment est compact, moins il pourra bénéficier de l'éclairage naturel. En effet, un bâtiment compact aura moins de façade extérieure par définition, réduisant ainsi les opportunités de réaliser des ouvertures. Par ailleurs, les pièces d'un bâtiment compact auront tendance à être plus profondes, ce qui empêche la lumière naturelle de pénétrer à l'intérieur de ces dernières, ce qui exercera une influence sur les besoins en éclairage.

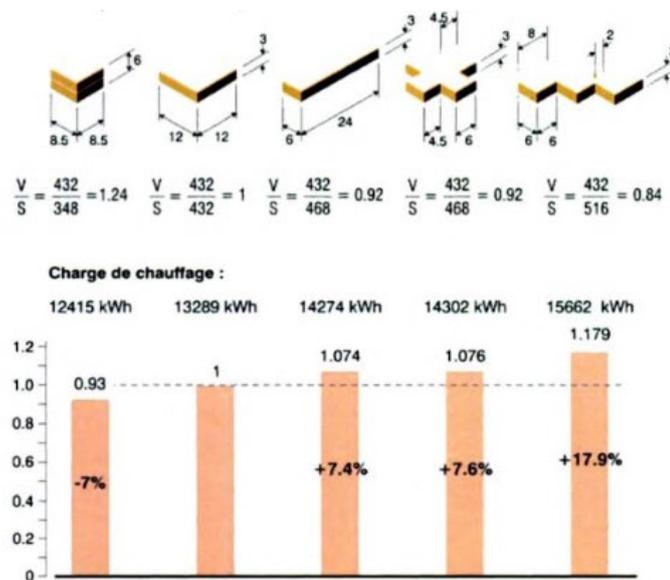


Figure 15 : Étude de l'influence de la compacité sur les besoins en chauffage

Source : Gratia, Elisabeth et André De Herde, *Thermique des immeubles de bureaux*, Presses université de Louvain, 2006

Une étude similaire a été réalisée en 2012, portant sur trois bâtiments de surfaces et volumes identiques, mais de compacité différente. Le cas 1 représente le bâtiment ayant la compacité la plus élevée, tandis que le cas 3 correspond à celui ayant la compacité la plus basse. Les plans relatifs aux différents cas sont présentés en Annexe 8. Contrairement à l'étude précédente, ces chercheurs ont étudié l'impact de la compacité non seulement sur les besoins en chauffage, mais également sur les besoins en climatisation. Les résultats de leur étude sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Besoins énergétiques annuels pour les 3 formes⁴¹

	Cas 1	Cas 2	Cas 3
Chauffage (KWh)	9180	10290	11710
Climatisation (KWh)	11060	11530	11160
Besoins totaux (KWh)	20240	21820	22870
Énergie économisée (%)	-	-7.81	-12.99

Ainsi, comme pour l'étude précédente, une compacité importante permet de diminuer non seulement les besoins en chauffage, mais également **les besoins en climatisation**. Dans le calcul de l'indicateur Bbio, les besoins de chauffage et de climatisation sont pondérés avec un facteur 2, tandis que les besoins en éclairage sont pondérés avec un facteur 5. La prise en compte de l'influence de la compacité sur **les besoins en éclairage** est donc primordiale, car ces derniers ont un facteur très important.

De même, les indicateurs Cep et Cep,nr prennent en compte les consommations associées au chauffage, à la climatisation et à l'éclairage. Par conséquent, bien que les études précédentes aient souligné une diminution des besoins de chauffage et de climatisation avec l'augmentation de la compacité, il est important de trouver un équilibre afin de permettre la pénétration de la lumière naturelle dans l'ensemble du bâtiment.

2.1.4 L'inertie thermique

L'inertie thermique d'un bâtiment peut se définir comme la lenteur avec laquelle un bâtiment va voir sa température évoluer afin d'atteindre celle de son environnement. Cela correspond ainsi en clair à la capacité qu'a un bâtiment à **stocker de la chaleur ou de la fraîcheur** et de **retarder sa transmission** (voir Figure 16). Ainsi, un bâtiment ayant une forte inertie thermique aura une température intérieure naturellement plus stable et ceux malgré les variations de la température extérieure.

⁴¹ A. Boursas et Z. Mehri, Etude de l'impact de la compacité du bâtiment sur la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel, Université de Constantine, 2012

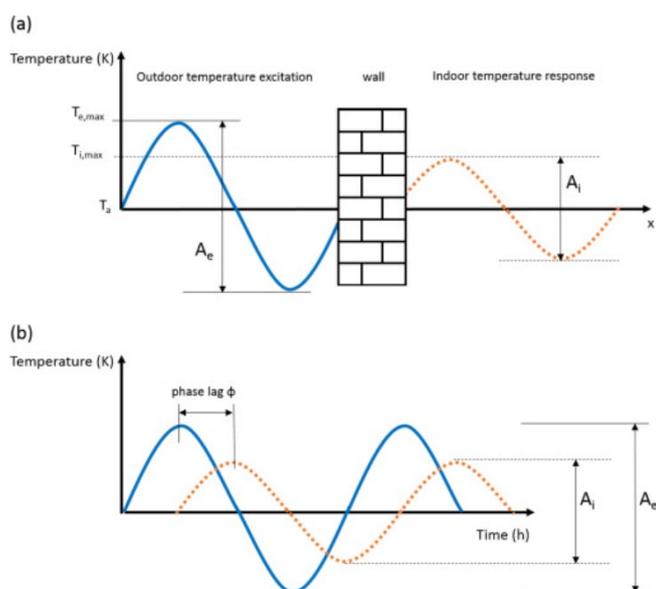


Figure 16 : Déphasage temporel et atténuation de l'amplitude de l'onde thermique⁴²

L'inertie thermique d'un bâtiment dépend notamment de trois caractéristiques principales :

- Diffusivité thermique des matériaux qui composent l'enveloppe, il s'agit de la capacité d'un matériau à transmettre rapidement une variation de température. Elle s'exprime en m^2/s selon la formule suivante : $a = \left(\frac{\lambda}{\rho C}\right)$ avec λ la conductivité thermique, ρ la masse volumique et C la chaleur spécifique du matériau
- Effusivité thermique qui témoigne de la capacité de stockage thermique d'un matériau qui s'exprime en $J \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1} \cdot s^{-\frac{1}{2}}$ selon la formule suivante : $b = (\lambda \cdot \rho \cdot C)^{\frac{1}{2}}$ où ρ , λ et C ont la même définition que précédemment
- Possibilités d'échanges thermiques des matériaux aux interfaces intérieurs et extérieurs

L'impact prédominant de l'inertie thermique se situe sur les besoins et la consommation de **refroidissement** et le **confort d'été** qui sont évalués par les indicateurs B_{bio} , $C_{ep,nr}$, C_{ep} et DH . En effet, un bâtiment possédant une inertie importante est en mesure durant les journées en période estivale de réduire les fluctuations importantes de températures en stockant les gains solaires dans l'enveloppe. Cela est d'autant plus efficace que les bâtiments tertiaires à usage de bureaux sont souvent dotés d'une proportion importante de surfaces vitrées et ont donc des apports solaires importants. Puis, avec l'arrivée de la nuit, la température extérieure va progressivement diminuer, on est alors en mesure de refroidir le bâtiment en employant la ventilation naturelle avant de renouveler ce cycle.

2.1.5 Dimensionnement et répartition des ouvertures

Lors de la conception d'un bâtiment, le **dimensionnement et la répartition des surfaces vitrées** sont des critères essentiels afin d'assurer une conception énergétique satisfaisante ainsi que le confort de l'utilisateur. En effet, les surfaces vitrées permettent à l'éclairage naturel de pénétrer au sein des locaux. Cependant, elles influencent également directement les apports solaires reçus par le bâtiment, et donc les besoins en chauffage, éclairage et climatisation. La répartition des fenêtres est également importante afin de permettre de refroidir passivement le bâtiment en utilisant la **ventilation naturelle**. Une simulation a été réalisée en faisant varier la quantité des surfaces vitrées grâce à 3 ratios surface vitrée/surface habitable (RVS) et en disposant ces dernières en fonction de l'orientation des façades. Dans cette étude,

⁴² Verbeke, Stijn, et Amaryllis Audenaert. « Thermal Inertia in Buildings: A Review of Impacts across Climate and Building Use ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, février 2018, p. 2300-18, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>.

seule la consommation de chauffage a été étudiée pour le mois d'octobre (mi-saison) ainsi que le mois de janvier (hiver). Les résultats sont présentés dans la Figure 17 ci-dessous :

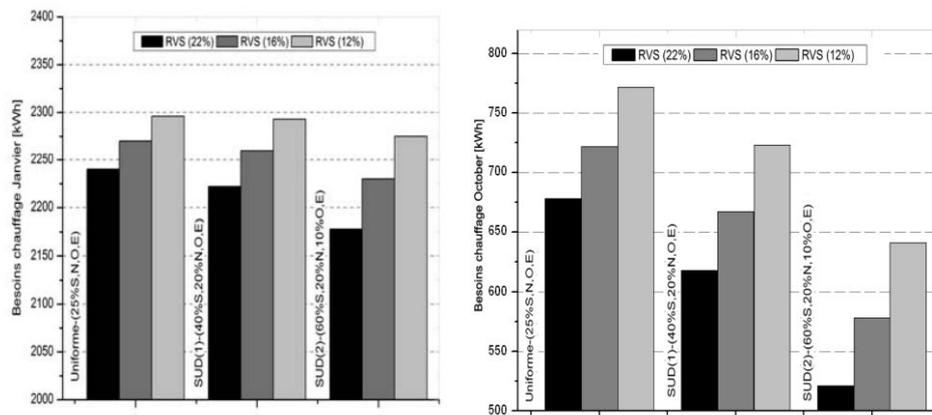


Figure 17 : Consommation de chauffage en fonction de la disposition et de l'orientation des baies⁴³

Le choix de la disposition et de l'orientation des surfaces vitrées a donc un impact considérable sur la **consommation de chauffage, avec une réduction de 10 à 15 %** de cette dernière. Ainsi, plus les surfaces sont réparties sur la façade sud tout en minimisant le ratio RVS, plus les besoins en chauffage sont faibles.

Il convient cependant de nuancer ces résultats, car une quantité de surfaces vitrées trop faible n'apportera que très peu **d'éclairage naturel** et augmentera donc les besoins associés à l'éclairage du bâtiment. Cependant, il convient de privilégier une orientation de la façade vers le sud afin de profiter des apports solaires en période hivernale, tout en limitant ces derniers durant la période estivale. En outre, il est également préférable d'éviter une orientation est-ouest. Dans ce cas, les ouvertures sont alors directement exposées et compte tenu de l'angle d'incidence, il est alors difficile de protéger ces dernières⁴⁴.

2.1.6 Dispositifs de protections solaires

Une fois que les surfaces vitrées du bâtiment ont été correctement dimensionnées en termes de quantité et de répartition, il est essentiel de mettre en œuvre des dispositifs de protection solaire pour garantir un confort d'été satisfaisant pour les occupants. L'absence de tels dispositifs risque de provoquer une **surchauffe du bâtiment**, ce qui aura un impact sur les besoins et la consommation de climatisation, ainsi que sur le confort des occupants.

Comme le montre la Figure 18, les apports solaires varient considérablement tout au long de l'année. Afin de tirer parti des avantages qu'ils offrent pendant les périodes de demi-saison et en hiver, il est essentiel de mettre en place des dispositifs de protection solaire, tout en veillant à maintenir **le confort thermique** des occupants pendant la saison hivernale. Ces dispositifs permettent de réguler l'entrée de chaleur solaire excessive pendant l'été, tout en permettant de profiter des **apports solaires** bienvenus en période plus froide. Cela contribue à optimiser le confort intérieur, à réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation et à améliorer l'efficacité énergétique globale du bâtiment.

⁴³ T. Catalina, J. Virogne, JJ. Roux et E. Blanco, Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation, 2009

⁴⁴ Ademe, Guide – Confort d'été, 2011, <https://www.saint-etienne.fr/sites/default/files/Guide%20ADEME%20-%20Le%20confort%20d'%C3%A9t%C3%A9.pdf>

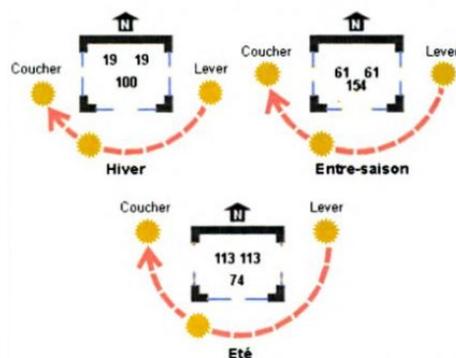


Figure 18 : Apports solaires en fonction de la saison en pourcentage

Source : Gratia, Elisabeth, et André De Herde. Thermique des immeubles de bureaux. Presses univ. de Louvain, 2006.

L'AICVF a également étudié l'impact de différents facteurs sur le confort d'été du bâtiment tertiaire A dont les caractéristiques sont présentées en Annexe 5, et ce, dans différentes zones climatiques (H1a, H2b et H3). Bien que notre zone climatique de référence (H1c) n'ait pas été étudiée lors de ces tests de sensibilité, on peut remarquer plusieurs tendances. La mise en place de dispositifs de protection solaire (double vitrage à contrôle solaire, casquettes et brise-soleil orientables) a un effet positif sur l'indicateur DH qui évalue le confort thermique (voir Tableau 10).

Tableau 10 : Synthèse de l'impact de protection solaire sur l'indicateur DH

Zone Climatique	Situation initiale (DH)	Casquette (DH)	Brise-soleil orientable (DH)	Double vitrage avec protection solaire (DH)
H1a	544	454	460	454
H2b	756	654	643	622
H3	2176	1950	2103	-
Impact moyen (%)	-	-13%	-12%	-17%

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

La mise en place de dispositifs de protection solaire présente un effet bénéfique en **réduisant le nombre d'heures d'inconfort thermique** pendant la période estivale. Toutefois, pour la zone H3, l'installation de double vitrage avec protection solaire n'a pas été spécifiquement étudiée dans notre cas d'étude et nous ne sommes donc pas en mesure d'analyser ce cas.

Dans le cas étudié, ces solutions garantissent le respect du seuil haut climatisé de l'indicateur DH, mais elles ne permettent pas d'atteindre seul le seuil bas de cet indicateur. Par conséquent, l'utilisation d'un système de rafraîchissement restera nécessaire. Néanmoins, la consommation requise pour maintenir une température confortable sera réduite grâce à la mise en œuvre des dispositifs de protection solaire, ce qui impactera favorablement les indicateurs Bbio concernant les besoins en climatisation, ainsi que les indicateurs Cep et Cep,nr qui sont liés à la consommation énergétique de la climatisation.

En somme, bien que l'installation de protection solaire ne suffise pas à elle seule à atteindre le seuil bas de l'indicateur DH, elle contribue significativement à **l'optimisation de la performance énergétique** du bâtiment en réduisant la demande énergétique associée à la climatisation.

2.2 Efficacité énergétique

L'évaluation de la sobriété énergétique du bâtiment est assurée par les critères relatifs à la consommation en énergies primaires totales (Cep) et à la consommation en énergies primaires non renouvelables (Cep,nr). Dans cette partie, nous allons donc étudier l'influence de différents types de systèmes énergétiques afin d'observer leurs impacts sur ces différents critères. Notre objectif est de prendre des décisions éclairées pour notre cas d'étude afin d'identifier les systèmes les plus vertueux vis-à-vis des exigences de la RE 2020.

2.2.1 Systèmes de chauffage

Comme vu précédemment, la consommation énergétique associée aux systèmes de chauffage constitue une part importante de la consommation énergétique des bâtiments de bureau, représentant en moyenne plus de **50 % de la consommation énergétique globale**⁴⁵. Cependant, ce pourcentage peut varier en fonction des conditions climatiques. La RE 2020, dans la continuité de la RT 2012, évalue la consommation énergétique des bâtiments au moyen de l'indicateur Cep, tout en introduisant également un nouvel indicateur, Cep,nr, afin d'encourager le recours aux énergies renouvelables.

Les deux principaux éléments qui vont influencer ces indicateurs sont, d'une part, **le type d'énergie** utilisé, qui correspond à un coefficient permettant de convertir la consommation en énergie finale à la consommation en énergie primaire. Et d'autre part, **le coefficient de performance de l'installation**, qui témoigne de son efficacité. Dans cette partie, nous étudierons donc l'impact du système installé sur les indicateurs Cep et Cep,nr. L'Association des ingénieurs et techniciens spécialisés en climatique, ventilation et froid a réalisé une étude afin de tester l'influence de différents systèmes de chauffage sur les indicateurs Cep et Cep,nr. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 11 : Étude de l'influence du système de chauffage concernant Cep et Cep,nr

Zone climatique	Système de chauffage installé	Cep	% de Cep_max	Cep,nr	% de Cep,nr_max
H1a	DRV rev	17	21%	17	23%
	PAC air/eau rev	16	19%	16	22%
	PAC eau/eau	11,1	13%	11,1	15%
	Ch gaz	17,2	21%	17,2	24%
	RCU 0 % ENR	18,2	22%	18,2	25%
	Effet Joule	41,3	50%	41,3	57%
H2b	DRV rev	13,1	17%	13,1	19%
	PAC air/eau rev	11,8	15%	11,8	17%
	PAC eau/eau	8,8	11%	8,8	13%
	Ch gaz	13,9	18%	13,9	20%
	RCU 0 % ENR	14,6	19%	14,6	21%
	Effet Joule	33,4	43%	33,4	48%
H3	DRV rev	9,1	10%	9,1	11%
	PAC air/eau rev	7,8	9%	7,8	10%
	PAC eau/eau	9,1	10%	9,1	11%
	Ch gaz	9,1	10%	9,1	11%
	RCU 0 % ENR	9,7	11%	9,7	12%
	Effet Joule	21,8	24%	21,8	27%

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

De ce fait, le système de chauffage à effet joule est nettement défavorable concernant les indicateurs Cep et Cep,nr, ce qui est cohérent compte tenu du fait que le coefficient de performance (COP) de ces systèmes est proche de 1 ce qui signifie que pour chaque unité d'énergie électrique consommée par le générateur, une seule unité d'énergie thermique est produite.

En outre, le coefficient associé à la conversion en énergie primaire de l'électricité est le plus défavorable (voir Tableau 2), avec une valeur de 2.3. En comparaison, les autres sources d'énergie ont un coefficient de 1 concernant l'indicateur Cep et des coefficients égaux ou plus faibles relativement à l'indicateur Cep,nr (voir Tableau 3). Ce type de système semble donc très désavantageux concernant les critères Cep et

⁴⁵ Su, Shu, et al. « How Can Energy Saving Culture of a Company Influence Energy Behaviors and Consumptions in Its Offices? A Simulation and Optimization Model ». Journal of Building Engineering, vol. 58, octobre 2022, p. 105011, <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105011>.

Cep,nr. Les autres systèmes ont un impact comparable sur les deux exigences, il conviendra cependant d'observer l'impact des autres postes de consommation (ventilation, éclairage, climatisation) afin de s'assurer du respect vis-à-vis de la RE 2020.

2.2.2 Systèmes de refroidissement

La climatisation représente également une part importante dans la facture énergétique du tertiaire. Avec le contexte climatique actuel, le recours à la climatisation risque en outre d'augmenter dans les années à venir afin d'assurer le **confort thermique** des occupants. L'AICVF a également réalisé des tests de sensibilité vis-à-vis de différents systèmes de refroidissement. Les résultats de cette étude sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 12 : Étude de l'influence du système de climatisation concernant Cep et Cep,nr

Zone climatique	Système de refroidissement installé	Cep	% de Cep_max
H1a	DRV rev	6,9	8%
	PAC air/eau	7,9	10%
	PAC eau/eau	8,4	10%
	Groupe froid	6,5	8%
	RFU	10,3	13%
H2b	DRV rev	9,2	12%
	PAC air/eau	10,6	14%
	PAC eau/eau	11,1	14%
	Groupe froid	8,6	11%
	RFU	13,7	18%
H3	DRV rev	18,2	20%
	PAC air/eau	22,9	25%
	PAC eau/eau	18,2	20%
	Groupe froid	19	21%
	RFU	29,6	33%

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

Ainsi, parmi les systèmes étudiés, le système à débit de réfrigérant variable semble être le plus avantageux en termes de consommation énergétique. Il s'agit en outre d'un système qui est particulièrement adapté au petit tertiaire neuf ($S_{ref} < 5000 \text{ m}^2$)⁴⁶, il a également l'avantage d'être réversible ce qui permet en période hivernale de chauffer les locaux avec le même système. Les systèmes de pompes à chaleur sont également très performants, dans notre cas d'étude la PAC air eau réversible avait un COP de 3.06, quant à la PAC eau/eau, son coefficient de performance était de 3.29.

Ces valeurs sont standards pour chaque type de PAC, ce qui signifie qu'en installant une pompe à chaleur disposant d'un meilleur **coefficient de performance** (COP) il est possible de réduire encore l'impact des consommations de climatisation sur les indicateurs Cep et Cep,nr. Il est observé que les écarts entre les valeurs de consommation d'énergie primaire pour les différents systèmes de climatisation restent **relativement faibles** excepté concernant le réseau de froid urbain (RFU). En conséquence, les avantages potentiels liés au choix d'un système de climatisation spécifique sont moins significatifs que ceux observés concernant les systèmes de chauffage, précédemment étudié.

⁴⁶ Système DRV | Guide Bâtiment Durable. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/systeme-drv>. Consulté le 6 juillet 2023.

2.2.3 Récupération de chaleur

Comme souligné précédemment, il convient d'approfondir l'étude concernant l'emploi du réseau de chaleur urbain afin de chauffer les bâtiments tertiaires à usage de bureaux. En effet, lorsque le réseau de chaleur urbain n'utilise pas une part issue de sources d'énergie renouvelable, on a pu observer que son impact concernant les indicateurs était comparable aux autres systèmes étudiés. Cependant, lorsque l'unité de production de chaleur est une chaufferie, celle-ci peut employer une part de combustibles issus de la biomasse (bois, résidus agricoles et cultures énergétiques). Une autre solution est l'emploi de la géothermie profonde en exploitant, lorsque cela est possible, les nappes aquifères profondes. Enfin, la chaleur fatale associée à la combustion de déchets peut également être exploitée. Ainsi, la part d'énergie issue de sources renouvelables va évoluer. Par ailleurs, l'utilisation d'un réseau de chaleur urbain est intéressante car, dans le cadre de la réglementation, ce facteur va influencer la valeur de l'exigence $I_{c_{\text{énergie_max}}}$ en augmentant cette dernière de 40 % pour le seuil 2025.

Tableau 13 : Étude de l'influence du % d'ENR employé

Zone climatique	Système de chauffage installé	Cep,nr	% de Cep,nr_max
H1a	RCU 0 % ENR	18,2	25,0%
	RCU 25 % ENR	13,65	18,8%
	RCU 50 % ENR	9,1	12,5%
	RCU 75 % ENR	5,5	7,6%
H2b	RCU 0 % ENR	14,6	21,2%
	RCU 25 % ENR	10,95	15,9%
	RCU 50 % ENR	7,3	10,6%
	RCU 75 % ENR	4,4	6,4%
H3	RCU 0 % ENR	8,8	12,8%
	RCU 25 % ENR	6,6	9,6%
	RCU 50 % ENR	4,9	6,1%
	RCU 75 % ENR	2,9	3,6%

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

L'utilisation d'un réseau de chaleur urbain ou une part de l'énergie utilisée provient de sources renouvelables peut permettre, dans certains cas, d'assurer le respect vis-à-vis de la RE 2020 concernant le critère Cep,nr. Cependant, cette solution ne peut pas s'appliquer vis-à-vis du critère Cep, car ce dernier prend en compte la consommation globale d'énergie. Ainsi, si un tel système n'assure pas le respect de la réglementation vis-à-vis de Cep, il conviendra alors de changer le système de chauffage. De ce fait, l'emploi de systèmes de récupération de chaleur peut permettre, dans certains cas, d'assurer le respect vis-à-vis de Cep,nr, si le respect de Cep est déjà assuré. Il est essentiel de considérer la spécificité de la zone climatique dans l'étude afin d'évaluer la conformité de la solution envisagée avec la réglementation en vigueur.

Lors de cette étude, nous avons examiné grâce aux tests de sensibilité réalisés par l'AICVF sur un bâtiment tertiaire, que l'influence des systèmes de chauffage et de refroidissement était importante relativement aux exigences concernant la consommation en énergie primaire et la consommation en énergie primaire non renouvelable (Cep,nr). Les résultats ont montré que les systèmes de chauffage à effet joule et le réseau de chaleur urbain sans énergie renouvelable étaient fortement défavorables concernant les indicateurs Cep et Cep,nr, tandis que d'autres systèmes tels que les pompes à chaleur et les systèmes de refroidissement à débit de réfrigérant variable étaient plus performants. De plus, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables et la récupération de chaleur peuvent contribuer à améliorer la conformité par rapport aux critères énergétiques. Enfin, bien que les systèmes de climatisation aient un impact moins important, il est tout de même possible de diminuer la consommation en énergie primaire en sélectionnant le modèle le plus adapté.

2.3 Installation photovoltaïque

La RE 2020 tend à encourager les acteurs de la construction à employer des systèmes de production d'électricité ayant recours à des sources d'énergie renouvelables. Elle introduit notamment l'indicateur Cep,nr qui exclut la consommation électrique provenant de l'autoconsommation issue de la production d'une source d'énergie renouvelable, comme les panneaux photovoltaïques. Dans le cadre de bâtiments de bureaux, l'installation de panneaux solaires afin d'assurer une partie ou la totalité de la consommation d'électricité se développe, notamment avec l'instauration de financements de la part de l'État pour encourager leur installation. Cela est rendu possible par l'arrêté du 9 mai 2017, qui introduit la prime à l'autoconsommation pour les entreprises. Le montant de cette prime dépend de la puissance de l'installation ainsi que de la date de raccordement.

L'AICVF a également réalisé une simulation concernant un bâtiment de bureau de grande surface (Bâtiment B). Dans cette étude, les composants de l'enveloppe ont été changés afin de respecter l'exigence $B_{bio,max}$ (Opti-FOB), et les caractéristiques de son enveloppe sont présentées dans l'Annexe 5. Cette étude a été menée dans 3 zones climatiques (H1a, H2b et H3), et 4 situations ont été étudiées : une première sans panneau solaire installé, puis 3 configurations avec respectivement 50 %, 75 % et 100 % du toit recouvert de panneaux photovoltaïques. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 14 : Influence de l'installation de panneaux photovoltaïques sur Cep,nr

Zone climatique	H1a	H2b	H3
Cep,nr 0 % PV (kWhep/m ² .an)	68,2	65,9	74,7
Cep,nr 50 % PV (kWhep/m ² .an)	57,1	55,1	57,4
Impact PV 50 % (%)	-16%	-16%	-23%
Cep,nr 75 % PV (kWhep/m ² .an)	53,7	51,3	52,2
Impact PV 75 % (%)	-21%	-22%	-30%
Cep,nr 100 % PV (kWhep/m ² .an)	50,4	47,6	46,6
Impact PV 100 % (%)	-26%	-28%	-38%
Cep,nr_max	72,8	69	80,2

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

Ainsi, déjà dans la situation initiale, compte tenu des caractéristiques de l'enveloppe, le bâtiment satisfaisait à l'exigence concernant la consommation en énergie primaire non renouvelable (Cep, nr). Cependant, cette étude nous montre l'impact en fonction de la surface de panneaux solaires installée sur l'indicateur Cep,nr. Plus on installe de panneaux solaires, plus l'indicateur Cep,nr de notre bâtiment diminue, ce qui est cohérent, car plus la surface est grande, plus la quantité d'électricité produite sera importante.

La part de l'énergie autoconsommée étant comptée comme nulle lors de la conversion de l'énergie finale en énergie primaire, l'indicateur Cep,nr du bâtiment sera donc plus faible. En outre, concernant les zones climatiques H1a et H2b, la baisse de l'indicateur Cep,nr associée à l'installation de panneaux solaires est comparable. Par ailleurs, dans la zone climatique H3 qui correspond à un climat méditerranéen, l'impact de l'installation de panneaux solaires est nettement plus fort. Cela s'explique, car la production d'une installation photovoltaïque dépend notamment de l'ensoleillement de la localisation géographique choisie. La figure ci-dessous présente la carte d'ensoleillement de la France et permet ainsi de prévoir la production électrique d'une installation photovoltaïque (voir Figure 19) :

CARTE D'ENSOLEILLEMENT

Il y a suffisamment de soleil, même au nord de la France, pour envisager l'installation d'un CESI.

Nombre d'heures d'ensoleillement annuel

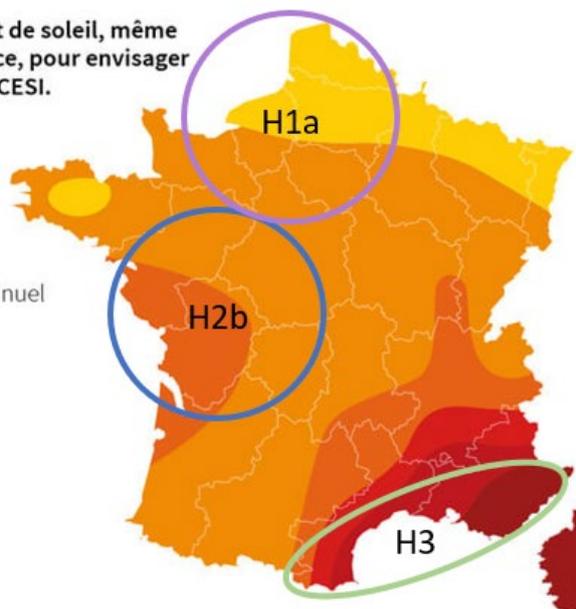


Figure 19 : Carte de l'ensoleillement en France

Source : ADEME, <https://agirpouurlatransition.ademe.fr/particuliers/maison/travaux/chauffer-leau-soleil>

Il est donc cohérent que l'impact associé à l'installation de panneaux photovoltaïques dans les zones H1a et H2b soit presque identique, étant donné que ces zones bénéficient d'une durée d'ensoleillement similaire. De plus, étant donné que notre exemple d'application se situe dans la zone climatique H1c du département du Rhône, où l'ensoleillement est supérieur à celui des zones H1a et H2b, on peut supposer que l'impact de l'installation de panneaux photovoltaïques sera plus important. Il serait intéressant, à la lumière des résultats de cette étude, d'analyser les impacts de l'implantation de panneaux solaires photovoltaïques sur notre bâtiment tout en prenant évidemment en compte l'impact carbone associé à cette installation.

2.4 Impact carbone des matériaux

Depuis plusieurs années, outre la consommation énergétique des bâtiments, **l'empreinte carbone** des matériaux de construction ainsi que celle de leur mise en œuvre est devenue un sujet central afin de rendre le secteur du bâtiment plus durable. En effet, sous l'impulsion de groupements écologiques dans les années 1990, la prise en compte des caractéristiques environnementales des bâtiments a progressivement gagné en importance dans un contexte public, suscitant un débat croissant. Face à l'absence d'approches scientifiques afin de quantifier cet aspect, des acteurs publics comme le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) ont développé un outil afin de quantifier de manière rigoureuse l'impact environnemental d'un projet sur l'ensemble de sa durée de vie, il s'agit de **l'analyse de cycle de vie**. Cette méthode est utilisée dans le cadre du calcul de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ de la RE 2020.

2.4.1 Fiches environnementales

La RE 2020 prend en compte cet impact à travers l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ qui évalue la quantité de CO₂ émise pendant le chantier ainsi que celle associée aux matériaux de construction. La méthode de calcul a été détaillée précédemment et repose notamment sur des fiches environnementales disponibles sur la base INIES. Ces fiches se présentent sous plusieurs types (voir Tableau 1). À l'heure actuelle, la base INIES

est encore en développement, et de nouvelles fiches sont régulièrement ajoutées. Dans le cadre de l'analyse de cycle de vie, plusieurs catégories de données environnementales peuvent être utilisées :

- FDES (Fiches de Données Environnementales et Sanitaires) qui peuvent être spécifiques à un produit ou collectives, regroupant plusieurs produits possédant les mêmes caractéristiques. Elles fournissent des données concernant les émissions de gaz à effet de serre, la consommation énergétique ou la pollution de l'eau. Au 31 août 2022, 17 % des fiches FDES étaient collectives et 83 % individuelles.
- PEP (Profils Environnementaux de Produits) qui peuvent également être spécifiques à un produit ou collectifs. Ils évaluent non seulement les impacts environnementaux des produits, mais également des données socio-économiques, ce qui permet de réaliser des études plus larges. Au 31 août 2022, seuls 8 % des fiches PEP étaient collectives et 92 % individuelles.
- DED (Données Environnementales par Défaut), élaborées par les acteurs publics, ces dernières ont été développées afin de fournir des informations environnementales pour faciliter l'élaboration des analyses cycle de vie.

Au 31 octobre 2022, les données de la base INIES se répartissaient de la façon suivante :

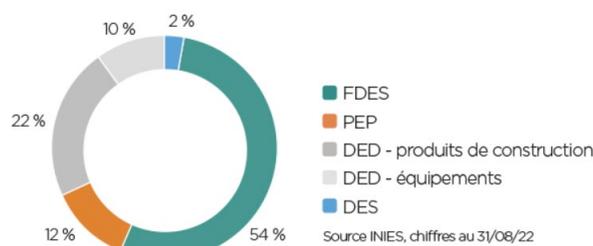


Figure 20 : Répartition de données de la base INIES

Source : Base INIES, <https://www.inies.fr/les-chiffres-cles-2022/>

Il y a de ce fait une prédominance des fiches FDES, ce qui témoigne d'un effort de l'ensemble des acteurs de la filière pour fournir des fiches spécifiques permettant d'évaluer de manière précise les impacts environnementaux des produits de la construction. Bien que les données environnementales par défaut représentent toujours un tiers des fiches de référence, les acteurs de la construction se sont mobilisés afin d'améliorer le référencement des produits de construction. Ainsi, au cours de l'année 2022, la base INIES a vu son nombre de fiches FDES augmenter de près de 29 %, et l'augmentation était de 14 % pour les PEP⁴⁷.

À l'heure actuelle, une des difficultés rencontrées par les bureaux d'études chargés de la réalisation des ACV est le manque de données concernant certaines catégories de produits. Par exemple, concernant le lot 7 relatif au revêtement des sols, à la peinture et aux produits de décoration, les DED représentent 26 % des fiches. En fonction de la catégorie de la fiche, l'impact carbone peut être fortement variable. J'ai donc réalisé une étude concernant les sous-lots sols durs, sols souples et les faux plafonds, car ce sont des lots sur lesquels il est facilement possible pour une entreprise comme EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES, en tant que maître d'œuvre, d'intervenir afin de modifier les choix des matériaux. Cette étude se trouve en Annexe 9 et a été réalisée sur la base de 4 projets tertiaires. Sa visée était de connaître l'état actuel du référencement des produits employés par EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES, ainsi que d'identifier des leviers concernant ces derniers. Ainsi, concernant les sols souples, les fiches environnementales relatives à la moquette sont toutes collectives et très peu de fiches FDES individuelles existent à l'heure actuelle. En outre, à l'heure actuelle, certains produits sont inscrits dans le CCTP, mais

⁴⁷ Oury, Nadège. « Les chiffres clés 2022 ». INIES, 24 novembre 2022, <https://www.inies.fr/les-chiffres-cles-2022/>.

en phase d'exécution, d'autres sont installés et ces derniers ne sont pas toujours référencés. Enfin, concernant les sols durs, seuls certains fabricants ont fait produire des fiches FDES qui ne couvrent souvent que les carreaux. Ainsi, il est nécessaire d'employer des DED concernant les plinthes et les faiences, par exemple. En outre, nous avons pu observer des disparités concernant l'impact carbone de produits similaires en fonction du type de fiche employé. Ce comparatif a été réalisé au moyen d'ECOSOURCE, qui est une solution développée par EIFFAGE permettant de comparer l'impact carbone de différents produits. Les résultats de ce comparatif concernant un carreau en grès cérame sont présentés dans la Figure 21 ci-dessous :

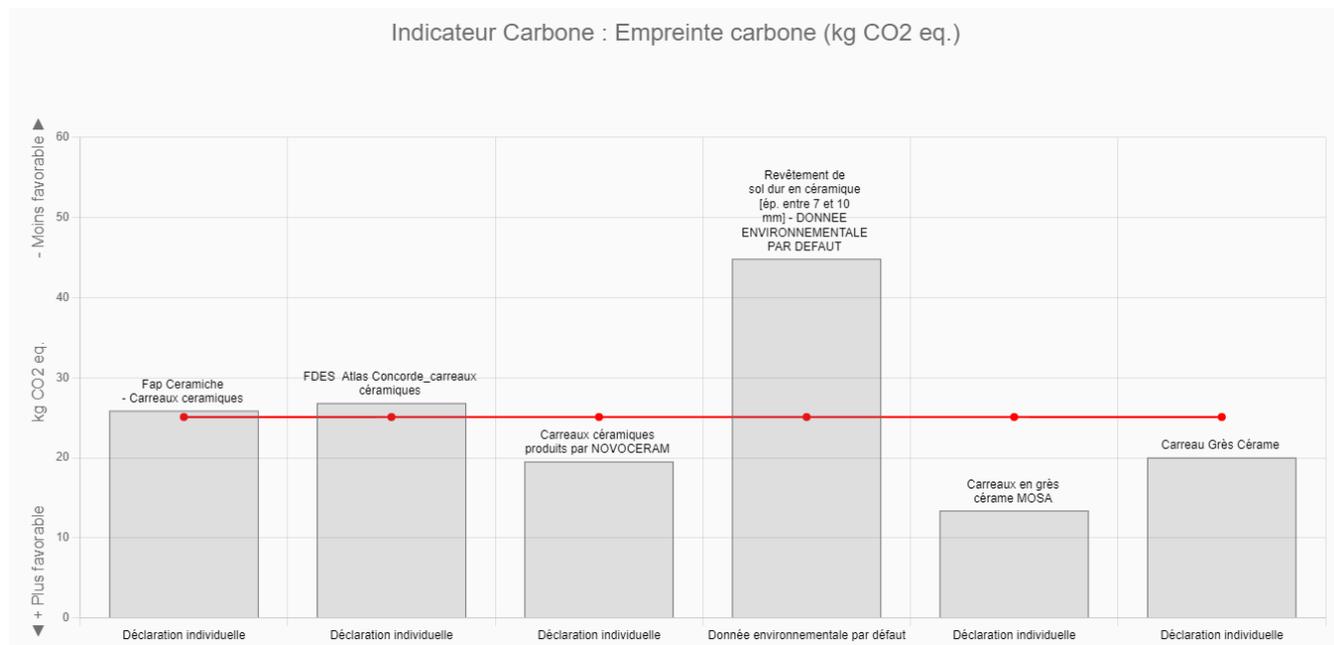


Figure 21 : Comparatif de l'impact carbone de différents carreaux en grès cérame

Source : ECOSOURCE ; <https://ecosource.eiffage.com/comparison/>

De ce fait, la DED relative à ce produit est nettement défavorable concernant l'empreinte carbone, par ailleurs, il y a des disparités concernant les fiches FDES en fonction du fabricant. Il est donc préférable de choisir en amont des produits référencés dans la base INIES afin de ne pas pénaliser le projet concernant l'ACV. Enfin, dans le cadre d'un projet de bureau en R+5 à Lyon, EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES a fait réaliser par un bureau d'étude (C+POS) une ACV afin d'évaluer l'empreinte carbone du projet vis-à-vis de la RE 2020. Lors de la saisie des données environnementales des composants, voici la répartition des fiches utilisées :

- 2 fiches FDES individuelles ;
- 18 fiches FDES collectives ;
- 48 fiches DED ;
- 6 lots forfaitaires.

La Figure 22 détaille la valeur de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ du projet avec la saisie des données environnementales initiales :

	Projet Kg eq CO2/m ²	Seuil 2022 Kg eq CO2/m ²
IC construction	1 013	968

Figure 22 : Indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ initial

Source : Etude ACV Bellecombe, C+POS

Ainsi, avec les données actuelles, le projet ne satisfaisait pas à l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ de la RE 2020. Afin de diminuer l'impact carbone du projet, plusieurs modifications ont été entreprises concernant le béton, le bardage, les moquettes, les menuiseries, les planchers techniques et les ascenseurs. Ces dernières sont

détaillées en Annexe 10. Hormis la référence du béton qui a été changée, les autres produits ont des caractéristiques similaires aux données initiales. La seule variable qui a évolué est le type de fiche utilisée pour l'ACV, les DED où les FDES collectives ont ainsi été remplacées par des FDES individuelles qui ont un impact plus faible. De ce fait, le bureau d'études a de nouveau calculé l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ qui est présenté sur la Figure 23 :

	Projet Kg eq CO2/m ²	Seuil 2022 Kg eq CO2/m ²
IC construction	801	968

Figure 23 : Indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ final

Source : Etude ACV Bellecombe, C+POS

En conséquence, l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ du projet a connu une baisse d'environ 22%, ce qui permet désormais de satisfaire l'exigence $I_{c_{\text{construction_max}}}$ de l'année 2022 avec une marge de 10%. L'étude réalisée ici se concentre uniquement sur le seuil fixé pour l'année 2022, qui est l'exigence que le bâtiment doit respecter. Cependant, il convient de noter que l'exigence $I_{c_{\text{construction_max}}}$ deviendra de plus en plus stricte à l'avenir. Compte tenu de la marge actuelle par rapport au critère de 2022, il sera difficile pour le projet, dans son état actuel, de respecter les futures exigences.

La RE 2020 prend en compte l'impact environnemental des matériaux de construction et des émissions de CO₂ liées au chantier à travers l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$. L'étude utilise des fiches environnementales de la base INIES, comprenant des fiches FDES, PEP et DED. Les fiches FDES individuelles et collectives sont largement utilisées, mais il reste encore des fiches DED par défaut. L'analyse de cycle de vie montre l'importance de choisir des produits référencés dans la base INIES pour réduire l'empreinte carbone. Des modifications ont été apportées à un projet spécifique, ce qui a permis de respecter les exigences de 2022, mais il sera difficile de satisfaire les futures exigences avec la marge actuelle.

2.4.2 Emploi de matériaux biosourcés

Les matériaux biosourcés sont des matériaux obtenus à partir de sources organiques renouvelables qui peuvent être d'origine animale ou végétale. La particularité de ces matériaux est que durant leur durée de vie, ils sont capables de capter les émissions de CO₂ qui peuvent être notamment produites par les autres matériaux de construction. Ce phénomène est appelé la séquestration du CO₂ et dépend notamment des propriétés des matériaux. Une étude réalisée en 2019 présente la capacité de certains matériaux biosourcés à capter du carbone durant leur durée de vie (voir Figure 24) :

Matériau biosourcé	Proportion massique de carbone à l'état sec (Valeur proposée à partir des données de la littérature) C%	Masse de CO ₂ prélevé dans l'atmosphère par kg de bois [kg CO ₂]		
		Etat sec	12% de teneur en eau	20% de teneur en eau
Paille de blé	44%	1,61	1,44	1,34
Fibres de chanvre et de lin				
Chênevotte de chanvre, anas de lin, miscanthus	47%	1,72	1,54	1,44
Bois feuillu	48%	1,76	1,57	1,47
Bois résineux	50%	1,83	1,63	1,53

Figure 24 : Proportion de CO₂ stocké en fonction de la nature des matériaux biosourcés

Source : Lecompte 2019

Les quantités de CO₂ séquestrées par les différents matériaux biosourcés présentent peu de variations en fonction de leur nature. Cependant, des facteurs tels que l'humidité peuvent limiter leur capacité à

stocker le CO₂, ce qui met en évidence une spécificité importante de ces matériaux. Étant donné leur origine organique, ils nécessitent des méthodes de construction spécifiques afin de préserver leurs propriétés et éviter toute détérioration. Ainsi, notamment si l'isolation ou le traitement n'est pas réalisé correctement, on peut observer une dégradation de leur performance vis-à-vis de la séquestration du CO₂ due à la présence d'humidité. L'emploi de ces matériaux est donc particulièrement intéressant car dans son calcul, l'indicateur $I_{c, construction}$ prend en compte les émissions de CO₂ émises durant l'ensemble du cycle de vie du matériau. En comparaison à un matériau traditionnel, les émissions de CO₂ seront donc moins importantes, car la méthode de calcul prendra en compte l'ensemble du CO₂ capté par ces derniers durant leur phase de durée de vie. Afin d'illustrer ce propos, on se propose d'étudier l'exemple de différents isolants pour cloison : deux d'origine biosourcée (la laine de chanvre et de lin) et deux traditionnels (la laine de roche et la laine de verre). Pour pouvoir comparer ces produits, on a fixé la résistance thermique à 5 m²·K/W afin d'avoir des matériaux possédant les mêmes caractéristiques. Cette comparaison a été réalisée avec ECOSOURCE et les fiches utilisées sont toutes des données environnementales par défaut (voir Figure 25) :

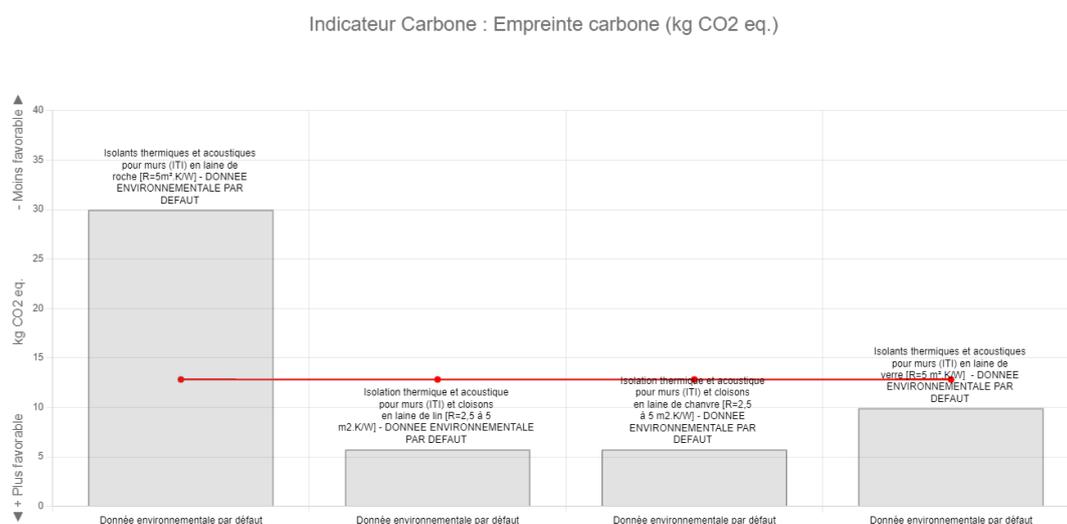


Figure 25 : Comparaison de différents isolants classique et biosourcés

L'isolant à base de laine de roche est donc celui qui présente l'impact carbone le plus défavorable. La laine de verre reste tout de même deux fois supérieure aux deux autres isolants biosourcés. Cette différence s'explique par le fait que l'empreinte carbone associée à la durée de vie d'un composant biosourcé est nulle ou négative, rendant leur utilisation nettement avantageuse pour limiter l'empreinte carbone d'un projet.

La comparaison a été effectuée à l'aide de données environnementales par défaut. Cependant, il existe des données spécifiques pour les isolants en laine de chanvre et de lin qui montrent un impact carbone négatif. Néanmoins, ces données sont liées à des plaques d'épaisseurs variables, ce qui les a exclues de cette comparaison.

Les matériaux biosourcés sont dérivés de sources renouvelables et ont la capacité de capturer les émissions de CO₂ pendant leur durée de vie. Leur utilisation dans la construction offre une solution intéressante pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments. Cependant, une manipulation adéquate et la préservation de l'humidité sont cruciales pour leur efficacité. Les matériaux biosourcés représentent ainsi des solutions écologiques pour limiter l'impact environnemental des projets de construction.

En conclusion, l'empreinte carbone des matériaux de construction est devenue un enjeu central pour rendre le secteur du bâtiment plus durable. L'analyse de cycle de vie, basée sur des fiches environnementales de la base INIES, permet de quantifier rigoureusement l'impact environnemental d'un

projet. Les matériaux biosourcés, issus de sources renouvelables, ont la capacité de capturer les émissions de CO₂, en faisant une option attrayante pour réduire l'empreinte carbone des constructions. Toutefois, une manipulation adéquate est essentielle pour préserver leurs propriétés et éviter tout impact négatif lié à l'humidité. L'utilisation de produits référencés dans la base INIES peut également contribuer à réduire l'empreinte carbone des projets de construction. En somme, l'emploi de matériaux biosourcés offre des solutions écologiques pour limiter l'impact environnemental du secteur du bâtiment.

3. Application et analyse des leviers à un cas d'étude

Notre cas d'étude est le projet de construction du nouveau siège de la société AREA, le bâtiment est un R+2 qui se compose de deux ailes presque symétriques et d'une partie centrale qui joint les deux appelée HUB que l'on peut voir sur la Figure 26 ci-dessous :



Figure 26 : Projet de construction du siège d'AREA à Jonage

Source : <https://gd-air.fr/projet/futur-siege-social-darea-aprr-jonage/>

Les travaux ont débuté le 1er décembre 2021 et le bâtiment a été livré le 28 février 2023. Le projet « AREA » est donc un bâtiment tertiaire à usage de bureau qui n'était pas soumis à la RE 2020 mais à la RT 2012, car son permis de construire a été demandé avant le 1er juillet 2022.

Le bâtiment est certifié BREEM Very good, et il y a par rapport eu une volonté de limiter l'impact carbone du gros œuvre en utilisant des bétons plus vertueux. Ce projet, étant donné sa typologie, constitue un cas d'étude idéal car il dispose d'un seul usage, est d'une taille standard en comparaison avec les autres projets tertiaires d'EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES, et a été construit juste avant l'entrée en vigueur de la RE2020. On s'intéressera ici uniquement aux modifications réalisables par une entreprise générale de construction comme EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES afin de rendre le projet RE 2020.

3.1 Situation initiale

Nous allons ici analyser le bâtiment sous l'angle de la RE 2020 à l'aide du logiciel ClimaWin 2020 et Vizcab. Afin de de se conformer à la réglementation en vigueur, le bâtiment doit respecter certaines valeurs seuils associées à des indicateurs (**exigences de résultats**), en plus de satisfaire à des **exigences de moyens**.

3.1.1 Exigences de moyens

A l'issue de la saisie de l'ensemble des éléments de l'enveloppe du bâtiment en accord avec les informations issues de la modélisation RT 2012 existante, nous avons pu observer que notre bâtiment ne respectait pas en l'état plusieurs exigences de moyen de la RE 2020.

D'abord, nous avons reçu une notification concernant la non-conformité d'un type de menuiserie. Lors de sa conception, les éléments de l'enveloppe du bâtiment ont été choisis afin d'assurer la conformité de ce dernier vis-à-vis de la RT 2012 or désormais les exigences ont évolué et sont maintenant plus strictes. Le **facteur solaire** avec protection en été des vitrages pour les murs rideaux dépassait la limite autorisée, ayant une valeur de 0,623, alors que, compte tenu de l'altitude du projet et de la zone climatique, cette valeur ne devait pas excéder 0,45 pour être conforme à la réglementation. Afin de répondre à cette exigence, une décision a été prise pour substituer le vitrage initial, désigné sous le nom de PLANITHERM des E.T.S Saint Gobain, par le vitrage COOL-LITE XTREM, également des E.T.S Saint Gobain. Ce dernier était mis en place sur les autres menuiseries et qui conserve des propriétés thermiques semblables, son facteur solaire offre la capacité de se conformer aux normes réglementaires. Les caractéristiques spécifiques de ce vitrage sont exposées dans la Figure 27 ci-dessous :

RE2020-MR- Alu 82/65- Type 1b- lame (MR 11.8*3.6 - casq)
Calculs réalisés à l'aide des données intégrées

Sans protection	Avec protection	Complément			
Menuiserie					
Transmission thermique W/(m².K)	U _w vertical		U _{j/n} vertical		1.022
	U _w horizontal		U _{j/n} horizontal		1.657
Détail	U _f	0.100	U _g	1.037	S _g 0.278
Facteur solaire	Condition hiver			Condition été	
		S _{w1}	0.229		S _{w1} 0.229
	S _w 0.264	S _{w2}	0.035	S _w 0.275	S _{w2} 0.046
		S _{w3}	0.000		S _{w3} 0.000
Transmission lumineuse	TL _w	0.559			
	TL _{w,n-diff}	-			



Figure 27 : Caractéristiques thermiques du nouveau vitrage

Source : ClimaWin2020

Par ailleurs, concernant **l'ouverture des baies** la RE2020 stipule dans l'article 25 du chapitre X relatif au confort d'été que : « Sauf si les règles d'hygiène ou de sécurité l'interdisent, les baies d'un même local autre qu'à occupation passagère s'ouvrent sur au moins 30 % de leur surface totale. Cette limite est ramenée à 10 % dans le cas des locaux pour lesquels la différence d'altitude entre le point bas de son ouverture la plus basse et le point haut de son ouverture la plus haute est égale ou supérieure à 4 m »⁴⁸. Cette exigence n'est pas satisfaite dans notre cas d'étude car les locaux à usage de bureau de l'aile B ont respectivement un pourcentage d'ouverture de :

- RDC : 27.98 %
- R+1 : 26.12 %
- R+2 : 28.22 %

Respecter cette exigence de moyen sans procéder à des modifications architecturales importantes est difficile, c'est pourquoi la répartition des ouvertures des baies restera inchangée dans la suite de notre étude afin d'être en accord avec la réalité du bâtiment existant. Il est tout de même à noter que ces vérifications devront être effectuées à l'avenir en amont du projet afin de s'assurer du respect de l'ensemble des exigences de la réglementation.

⁴⁸ Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation, https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2021/8/4/LOGL2107359A/jo/article_25

3.1.2 Exigences de résultats

Par la suite, à l'aide du logiciel ClimaWin2020, après avoir importé l'enveloppe de l'étude RT2012 réalisée par le bureau d'étude Opera Fluides, nous avons pu déterminer la position actuelle de notre bâtiment vis-à-vis des différentes exigences de résultats de la RE2020. Les résultats de cette expérimentation sont présentés dans la figure ci-dessous :

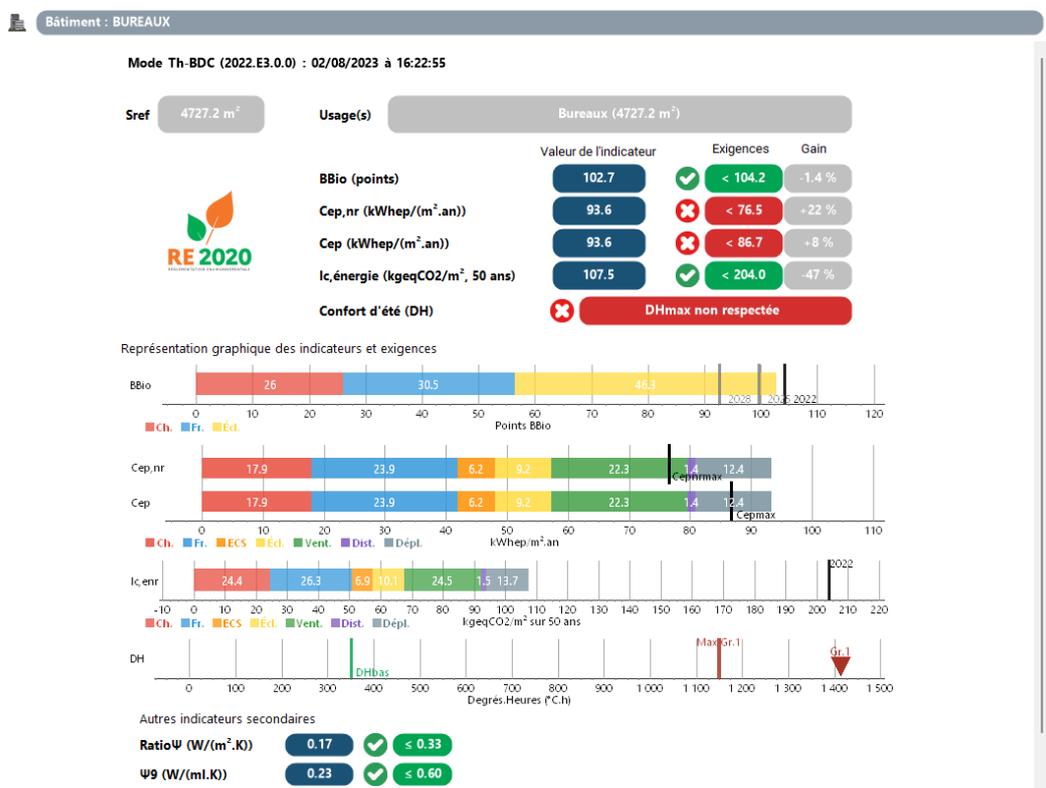


Figure 28 : Résultats RE2020 du projet AREA

Source : ClimaWin2020

Dans l'analyse du projet, nous constatons que seul les indicateur **Ic_{énergie}** et **Bbio** (seuil 2022) sont conformes à la réglementation, avec des écarts respectifs de 46 % et 1.4 % par rapport aux seuils prescrits. Cependant, les indicateurs Cep, Cep, nr et DH ne respectent pas la réglementation et présentent des écarts variables par rapport aux seuils spécifiés. Par ailleurs concernant l'indicateur Bbio, seul le seuil 2022 est satisfait, les seuils 2025 et 2028 ne sont pas atteints.

Pour étudier l'**impact carbone** du projet, nous avons utilisé le logiciel Vizcab, qui permet d'effectuer des analyses du cycle de vie dynamique, conformément aux recommandations de la RE2020. Les données ont été saisies à partir des différents éléments constitutifs du projet, en utilisant les informations du cahier des clauses techniques et particulières (CCTP), du dossier des ouvrages exécutés (DOE) ainsi que de la liste des échantillons.

Chaque élément a été associé en priorité à une fiche individuelle lorsque celle-ci existait, sinon à une fiche collective, et en dernier recours à des données environnementales par défaut. Dans certains cas, la RE2020 propose des valeurs forfaitaires pour simplifier la saisie de certains lots. Bien que ces valeurs soient plus défavorables, elles ont été utilisées en raison du manque de données actuelles dans la base INIES concernant ces éléments, rendant leur saisie complexe. Les lots concernés par la saisie forfaitaire dans le cadre de notre étude sont :

- Lot 9
- Lot 10 : réseau et énergie (courant fort) ;
- Lot 11 : réseau d'énergie (courant faible) ;
- Sous-lot 8.1 : équipements de production chaud/froid hors cogénération ;
- Sous-lot 8.3 : système d'émission ;

- Sous-lot 8.4 : traitement de l'air et éléments de désenfumage.

Par ailleurs, le calcul de l'impact carbone du chantier, qui est pris en compte dans le calcul de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$, est réalisé de manière automatique à l'aide de Vizcab avec la saisie des éléments suivants :

- Consommations électriques durant le chantier ;
- Consommations en eau durant le chantier ;
- Quantité de terre excavée, importée ou évacuée durant le chantier.

Un fois l'ensemble de ces éléments saisis, on a été en mesure de connaître l'impact carbone de la construction de ce projet sur l'ensemble de sa durée de vie (voir Figure 29) :



Figure 29 : Indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ du projet AREA

Source : Vizcab

Notre projet satisfait donc au seuil 2022 de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ avec un écart de 7 % vis-à-vis de ce dernier. En revanche, les seuils 2025, 2028 et 2031 ne sont pas satisfaits il conviendra donc d'essayer de réduire davantage l'impact carbone du projet en faisant varier ses composants pour anticiper le futur durcissement du seuil concernant les émissions de CO₂ associées à la construction de notre bâtiment.

Désormais notre bâtiment satisfait aux exigences de moyen de la RE 2020, concernant les exigences de résultats, les indicateurs $I_{c_{\text{énergie}}}$ et B_{bio} (seuil 2022) et $I_{c_{\text{construction}}}$ (seuil 2022) sont respectés. Cependant, les indicateurs C_{ep} et $C_{\text{ep,nr}}$ ne sont ici pas atteints de même que les futurs seuils à partir de l'année 2025 des indicateurs B_{bio} et $I_{c_{\text{construction}}}$.

3.2 Modification de l'enveloppe

Les modifications de l'enveloppe du bâtiment exercent d'abord une influence sur les indicateurs concernant les besoins énergétiques (B_{bio}), les consommations associées (C_{ep} et $C_{\text{ep,nr}}$) ainsi que l'impact carbone de ces consommations ($I_{c_{\text{énergie}}}$). Par ailleurs, les modifications de l'enveloppe du bâtiment vont modifier ses composants et exerceront donc une influence sur son impact carbone mesuré par l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$. Nous allons donc ici identifier les impacts de 3 différents leviers identifiés précédemment :

- Isolation par l'extérieur ;

- Protections solaire ;
- Béton bas-carbones.

3.2.1 Isolation par l'extérieur

Comme identifié précédemment, un des leviers afin d'agir sur les indicateurs B_{bio} , $I_{c_{\text{énergie}}}$, Cep , Cep_{nr} réside dans l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment. Une solution facilement réalisable pour une entreprise en charge de projets de construction de bâtiment tertiaire à usage de bureaux réside dans le renforcement de l'isolation thermique du bâtiment. Dans notre cas d'étude, l'isolation a été traitée par l'extérieur (ITE) car la façade du bâtiment est recouverte de bardage. Nous allons donc concentrer notre attention exclusivement sur les options de variation relatives à l'isolation par l'extérieur du bâtiment. En tant qu'entreprise de construction générale, EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES ne dispose pas de la capacité de modifier les choix architecturaux liés à l'enveloppe, sauf dans le cadre des projets de conception-construction, qui demeurent peu nombreux. Ainsi, notre focalisation se portera ici sur l'impact de l'isolation des parties spécifiques de notre bâtiment suivantes :

- Les planchers bas ;
- Les murs extérieurs ;
- La toiture.

L'étude de l'influence sur l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ n'a été étudié que dans le cas de l'isolation des murs car l'influence sur ce paramètre était négligeable compte tenu des faibles surfaces d'isolation du plancher bas et de la toiture et du faible écart entre les données environnementales des solutions étudiées.

Dans le contexte de notre étude, les valeurs de l'indicateur Cep_{nr} sont identiques, car le bâtiment ne bénéficie pas actuellement de systèmes de production d'énergie provenant de sources renouvelables. Ainsi, dans cette configuration, nous avons **$Cep = Cep_{nr}$** .

- Isolation des planchers bas

Initialement, l'isolation thermique des planchers bas était réalisée au moyen d'une couche de flocage de 16 cm qui correspond ici au scénario 0 (S0) présenté dans le Tableau 15. Dans le cadre de cette étude, nous analyserons l'impact de l'épaisseur de la couche de flocage à travers les scénarios suivants :

- S1 : 20 cm de flocage
- S2 : 24 cm de flocage

Nous étudierons également les performances d'une plaque d'isolation de type Ets ROCKWOOL portant la référence 305 654. Cette plaque a été conçue pour isoler les planchers bas en utilisant une couche de laine de roche d'une épaisseur de 10.2 cm (S3). La différence entre le scénario 0 et les différents scénarios est présentées ci-dessous (voir Tableau 15).

Tableau 15 : Influence de l'isolation du plancher sous-dalle par l'extérieur

Scénario	Modification	$B_{bio\ ch}$ (pts)	$B_{bio\ fr}$ (pts)	$B_{bio\ tot}$ (pts)	$Cep\ ch$ (kWhep/m ² .an)	$Cep\ fr$ (kWhep/m ² .an)	$Cep\ tot$ (kWhep/m ² .an)	$I_{c, \text{enr}\ ch}$ (kg eq CO2/m ² , 50ans)	$I_{c, \text{enr}\ fr}$ (kg eq CO2/m ² , 50ans)	$I_{c, \text{enr}\ tot}$ (kg eq CO2/m ² , 50ans)	DH (degré.heure)
0	16 cm de flocage	26,00	30,50	102,70	17,90	23,90	93,60	24,40	26,30	107,50	1413,00
1	20cm de flocage	-1,40	0,30	-1,00	-0,40	0,30	-0,40	-0,70	0,30	-0,40	29,00
2	25cm de flocage	-2,00	0,40	-1,40	-0,60	0,70	-0,20	-1,00	0,80	-0,20	45,00
3	Rockwool 10,2 cm	1,10	-0,20	0,90	0,60	-0,20	0,40	0,60	-0,20	0,40	-20,00

L'augmentation de l'épaisseur de l'isolant appliqué par flocage a engendré une diminution des indicateurs énergétiques associés au chauffage ($B_{bio_{\text{chauffage}}}$, $Cep_{\text{chauffage}}$ et $I_{c_{\text{énergie}}_{\text{chauffage}}}$). Cependant, les besoins en climatisation, des niveaux de consommation associés, ainsi que de l'impact carbone correspondant, ont eu subi une augmentation d'autant plus importante que l'épaisseur du flocage était considérable. En

ce qui concerne l'isolation réalisée au moyen du panneau de laine de roche, elle s'est traduite une augmentation des indicateurs $B_{bio_chauffage}$, $Cep_{chauffage}$ et $Ic_{\text{énergie}}_{chauffage}$ et une légère diminution des indicateurs inhérents à la climatisation.

Il est important de noter que l'indicateur DH (Degré-heure) a été impacté de manière négative dans tous nos scénarios excepté dans le cas de l'emploi de la laine de roche. Cette constatation s'avère cohérente, puisque l'amélioration des performances de l'isolation entraîne une plus grande propension de notre bâtiment à emmagasiner de la chaleur, ce qui requiert par conséquent un recours accru à la climatisation pour maintenir un niveau de confort thermique satisfaisant pour les occupants.

- ITE des murs extérieurs

Les murs extérieurs sont isolés au moyen de panneaux Rockfaçade des Ets ROCKWHOOOL constitué d'une épaisseur de 16 cm de laine de roche (S0). Afin d'étudier l'influence de l'isolation des murs extérieurs, on s'intéressera ici à différents types d'isolants pour lesquels les épaisseurs suivantes ont été analysées : 160 mm, 200 mm et 240 mm afin d'étudier également l'impact de l'épaisseur d'isolants sur les différents indicateurs de la RE 2020. Les résultats des différents scénarios sont présentés dans le Tableau 16 ci-dessous :

Tableau 16 : Influence de l'isolation des murs extérieurs

Scénario	Modification	Bbio ch (pts)	Bbio fr (pts)	Bbio tot (pts)	Cep ch (kWhep/m ² .an)	Cep fr (kWhep/m ² .an)	Cep tot (kWhep/m ² .an)	Ic, enr ch (kg eq CO2/m ² , 50ans)	Ic, enr fr (kg eq CO2/m ² , 50ans)	Ic, enr tot (kg eq CO2/m ² , 50ans)	DH (degré.heure)	Ic_construction (kg CO2 eq)
0	Rockfaçade 160 mm	26,00	30,50	102,70	17,90	23,90	93,60	24,40	26,30	107,50	1 412,80	8 098
1	Rockfaçade 200 mm	-0,70	0,10	-0,60	-0,20	0,00	-0,20	-0,30	0,00	-0,30	10,90	1 464
2	Rockfaçade 224 mm	-1,10	0,10	-0,90	-0,20	0,30	-0,30	-0,30	0,30	-0,10	18,60	4 533
3	Laine de bois 160mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,30	0,00	0,00	0,00	-0,20	-21 909
4	Laine de bois 200mm	-0,70	0,10	-0,50	-0,20	0,00	-0,20	-0,30	0,00	-0,30	9,70	-25 332
5	Laine de bois 240mm	-1,00	0,10	-0,80	-0,20	0,30	-0,30	-0,30	0,30	-0,10	17,50	-28 874
6	Fibre de chanvre 160mm	1,40	-0,30	1,20	1,00	-0,20	0,50	1,20	-0,20	1,00	-26,90	-7 738
7	Fibre de chanvre 200mm	0,60	-0,20	0,60	0,30	0,00	0,00	0,60	0,00	0,60	-13,80	-7 738
8	Fibre de chanvre 224mm	0,10	-0,10	0,20	0,30	0,00	0,00	0,30	0,00	0,30	-3,80	-7 738
9	Paille 160mm	1,10	-0,30	1,00	0,50	-0,20	0,30	0,60	-0,20	0,40	-22,10	-18 852
10	Paille 200mm	0,40	-0,10	0,40	0,30	0,00	0,10	0,30	0,00	0,30	-9,40	-18 852
11	Paille 240mm	-0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,80	-18 852
12	Laine de verre 160mm	-0,30	0,00	-0,20	0,00	0,00	-0,10	0,00	0,00	0,00	4,80	-4 214
13	Laine de verre 200mm	-0,90	0,10	-0,70	-0,20	0,00	-0,20	-0,30	0,00	-0,30	14,90	-3 270
14	Laine de verre 240mm	-1,20	0,20	-1,00	-0,40	0,30	-0,40	-0,70	0,30	-0,40	22,00	-2 314

D'abord, il est perceptible que concernant la mise en place d'isolation à base de laine de roche, de laine de bois et de laine de verre, tout comme dans le cas antérieur, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant se révèle avantageux en ce qui concerne les paramètres liés au chauffage, tandis qu'il s'avère défavorable par rapport aux indicateurs associés à la climatisation. Par ailleurs, lorsque les épaisseurs d'isolant sont équivalentes, la laine de verre se positionne comme le matériau le plus adapté en termes de chauffage, mais engendre également la plus notable hausse des besoins en climatisation. Cependant, l'effet global demeure positif pour ces 3 isolants puisque les indicateurs Cep, Bbio et $Ic_{\text{énergie}}$ manifestent néanmoins une réduction. Il convient de remarquer que l'indicateur DH témoigne d'une influence négative à travers l'ensemble des scénarii lorsque l'isolation adoptée se compose de laine de roche ou de laine de verre. En contraste, en ce qui concerne la laine de bois, une légère diminution de cet indicateur est perceptible pour le panneau d'une épaisseur de 16 cm, tandis qu'une augmentation est observée pour les épaisseurs de 200 et 240 mm.

Pour ce qui est des isolants biosourcés à l'exception de la laine de bois étudiée précédemment, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant induit une diminution des besoins énergétiques, des niveaux de consommation et de l'impact environnemental de la climatisation. En revanche, elle a des effets négatifs sur les paramètres relatifs au chauffage. Les indicateurs globaux Bbio, Cep et $I_{c_{\text{énergie}}}$ sont eux aussi légèrement impactés de manière défavorable. Malgré cela, les isolants biosourcés présentent des avantages notables en matière de confort estival, et il est possible d'observer une corrélation entre la faible épaisseur de l'isolant et une réduction de l'indicateur DH (degré-heure).

On s'intéresse désormais à l'évaluation de l'impact sur le réchauffement climatique associé à la mise en place de nos différentes solutions. L'étude de l'impact carbone associé à la mise en place d'1 m² d'isolant pour chacun de nos scénarios d'étude est présentée dans le tableau ci-dessous (voir Figure 30) :

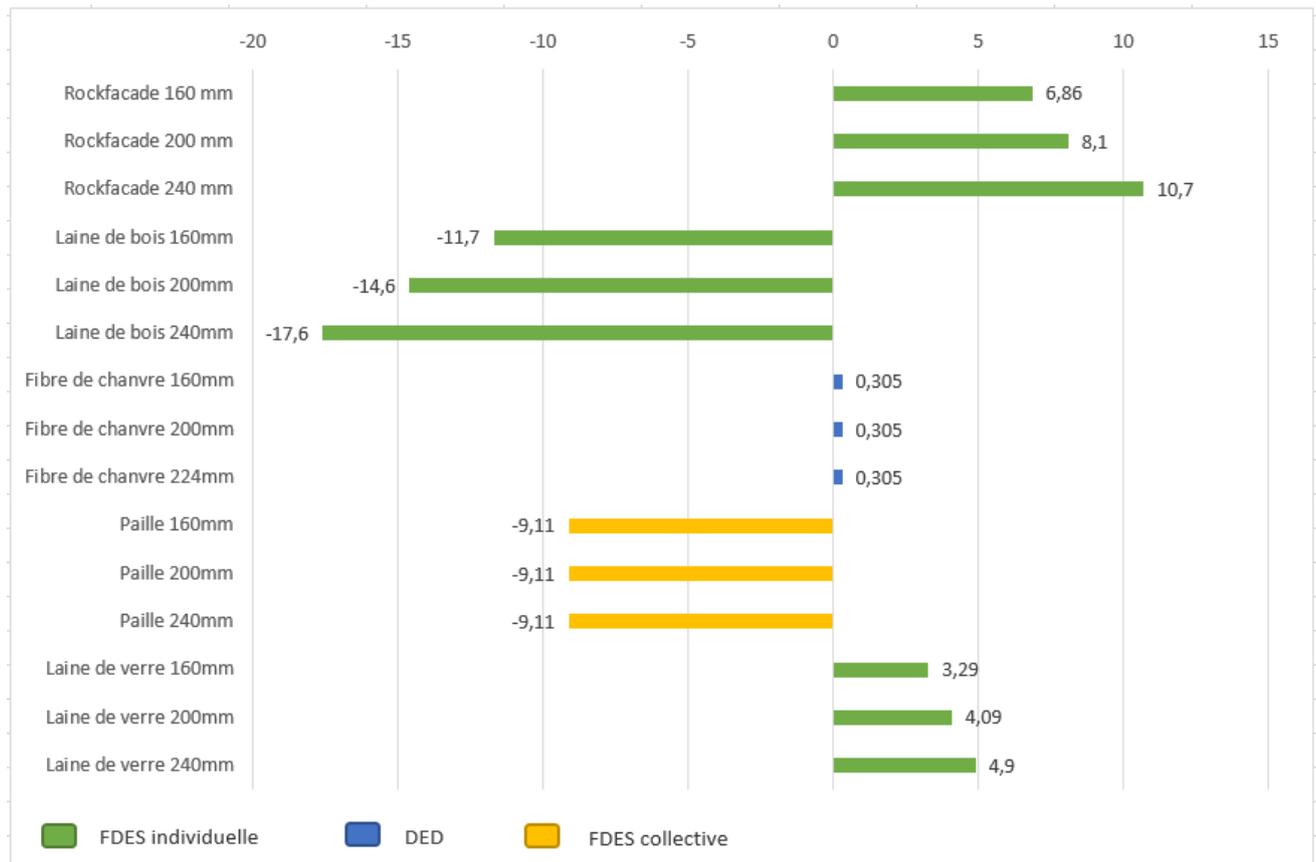


Figure 30 : Impact carbone en fonction de l'isolation par l'extérieur des murs choisie (kg CO2 eq)

Source : Base INIES

Les données environnementales relatives à la fibre de chanvre et à la paille n'ont pas permis d'incorporer l'effet de l'épaisseur de l'isolant sur l'impact carbone. Néanmoins, les fiches environnementales fournissaient un intervalle d'épaisseur incluant les valeurs de nos différents scénarios, permettant ainsi l'application de ces données pour le calcul de l'impact carbone associé à l'implémentation de ces types d'isolants. Il est observé que concernant l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$, la laine de bois se positionne en tant que matériau le plus bénéfique, suivi de près par la paille. Ces isolants affichent un impact positif en raison du phénomène de séquestration du carbone. La fibre de chanvre, quant à elle, présente un impact légèrement négatif, toutefois, demeure bien plus favorable que les isolants composés de laine de verre ou de laine de roche, lesquels s'avèrent défavorables en ce qui concerne l'impact carbone de notre structure bâtie.

- Isolation des toitures

L'isolation des toitures dans notre projet a été réalisée en appliquant une couche de 10 cm de mousse polyuréthane sur les parties accessibles et une couche de 20 cm sur les parties non accessibles. Notre analyse se concentrera d'une part sur l'impact de l'augmentation de l'épaisseur de la mousse

polyuréthane, en veillant à maintenir la différence initiale de 10 cm entre les zones accessibles et non accessibles. D'autre part, nous examinerons également les effets de l'application d'une isolation en laine de roche avec les mêmes épaisseurs que celles de la mousse polyuréthane. Les résultats complets de cette étude sont présentés dans le tableau suivant (voir Tableau 17) :

Tableau 17 : Etude de l'influence de l'isolation de la toiture

Scénario	Modification	Bbio ch (pts)	Bbio fr (pts)	Bbio tot (pts)	Cep ch (kWhep/m ² .an)	Cep fr (kWhep/m ² .an)	Cep tot (kWhep/m ² .an)	Ic, enr ch (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	Ic, enr fr (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	Ic, enr tot (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	DH (degré.heure)
0	Mousse polyuréthane 10 cm et 20 cm (non access)	26,00	30,50	102,70	17,90	23,90	93,60	24,40	26,30	107,50	1 412,80
1	Mousse polyuréthane 15 cm et 25 cm (non access)	-0,70	0,00	-0,70	-0,20	0,00	-0,20	-0,30	0,00	-0,30	5,20
2	Laine de roche 10 cm et 20 cm (non access)	0,90	-0,10	1,00	0,50	0,00	0,30	0,60	0,00	0,60	-9,20
3	Laine de roche 15 cm et 25 cm (non access)	0,20	0,00	0,20	0,30	0,00	0,10	0,30	0,00	0,30	-2,10

Comme précédemment observé, l'augmentation de l'épaisseur de la mousse polyuréthane exerce un effet bénéfique sur les paramètres liés au chauffage. Cependant, l'utilisation de la laine de roche se traduit néanmoins par une hausse générale des besoins en chauffage, des niveaux de consommation et de l'impact carbone associé, tandis qu'elle apporte une amélioration légère au confort thermique estival en réduisant le nombre de degrés heure d'inconfort.

Les indicateurs relatifs à la climatisation n'ont pas affiché de variations significatives dans chacun de nos scénarios par rapport à notre cas d'étude. Cette observation pourrait être attribuée à la surface relativement réduite de la toiture, qui peut ne pas engendrer d'impacts substantiels sur ces indicateurs.

Pour conclure, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant a été observée comme un moyen d'améliorer les performances du bâtiment en ce qui concerne les indicateurs de la RE 2020 liés au chauffage. Toutefois, cette augmentation entraîne également une hausse des besoins, des consommations de climatisation et de l'impact carbone associé, bien que les indicateurs globaux (Cep, Bbio et I_{c_énergie}) aient subi une légère diminution. De plus, elle nuit au confort estival des occupants en augmentant le nombre d'heures d'inconfort durant la période estivale, or dans le cadre de la réglementation il est également nécessaire de respecter cette exigence, il convient donc d'appliquer ces solutions avec prudence.

En ce qui concerne les matériaux biosourcés, il a été constaté que les isolants biosourcés ont un effet positif sur les besoins de refroidissement, le confort estival et l'impact carbone associé à l'isolation. Cependant, il est important de noter que les particularités de mise en œuvre des matériaux biosourcés rendent leur utilisation difficile en toiture et sous la dalle, en raison des contraintes environnementales directes telles que l'humidité, par exemple.

3.2.2 Mise en place de dispositif de protection solaire

Les dispositifs de protections solaires installés sur notre bâtiment sont les suivants :

- Au nord des stores intérieurs sont présents sur les ouvertures ;
- Les autres baies sont protégées au moyen de brise-soleil orientables (BSO) ;

- Les murs rideaux qui ne disposent d'aucune protection.

On a pu observer précédemment que les dispositifs de protection solaires sont un levier important afin de diminuer le recours à la climatisation et pour améliorer le confort d'été. On étudiera donc ici différents scénarios :

- Mise en place de stores intérieurs sur les murs rideaux
- Mise en place de BSO sur les murs rideaux
- Mise en place de BSO sur l'ensemble des menuiseries du bâtiment

L'analyse de ces différents scénarios est présentée dans le tableau ci-dessous (voir Tableau 18) :

Tableau 18 : Etude de l'influence des protections solaires

Modification	Bbio ch (pts)	Bbio fr (pts)	Bbio tot (pts)	Cep ch (kWhep/m ² .an)	Cep fr (kWhep/m ² .an)	Cep tot (kWhep/m ² .an)	Ic, enr ch (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	Ic, enr fr (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	Ic, enr tot (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	DH (degré.heure)	Impact carbone (kg CO ₂ eq)
Situation initiale	26,00	30,50	102,70	17,90	23,90	93,60	24,40	26,30	107,50	1 412,80	39 611
Mise en place de stores intérieurs sur les murs rideaux	0,10	-2,00	0,80	0,30	-0,90	-0,50	0,30	-1,00	-0,50	-27,20	+8 811
Mise en place de BSO sur les murs rideaux	0,30	-3,00	1,50	0,30	-1,40	-0,60	0,30	-1,50	-0,70	-89,00	+10 369
Mise en place de BSO sur l'ensemble des menuiseries	1,20	-6,40	-1,10	1,00	-3,20	-1,70	1,20	-3,50	-1,60	-294,70	+13 981

L'intégration de dispositifs de protection solaire se révèle être une approche efficace pour réduire les besoins énergétiques (Bbio), la consommation d'énergie (Cep) et l'empreinte carbone liée à la climatisation ($Ic_{\text{énergie}}$). Toutefois, il est observé que les paramètres associés au chauffage sont impactés négativement en raison de la diminution des gains solaires. Comparativement, l'installation de stores intérieurs montre une moindre efficacité que celle des brise-soleil orientables motorisés en ce qui concerne les indicateurs tels que le degré-heure (DH), le besoin bioclimatique en climatisation ($Bbio_{\text{climatisation}}$), la consommation conventionnelle d'énergie primaire pour la climatisation ($Cep_{\text{climatisation}}$), ainsi que l'indicateur d'énergie primaire non renouvelable pour la climatisation ($Ic_{\text{énergie}_{\text{climatisation}}}$). Cependant, ces stores intérieurs demeurent capables de contribuer à la réduction de ces indicateurs.

Enfin, une généralisation de l'utilisation de brise-soleil orientables sur toutes les ouvertures entraîne une réduction significative du degré-heure de 294.7 degrés heure, ce dernier est désormais évalué à 1118.1 degrés heure, ce qui garantit la conformité de notre bâtiment par rapport aux exigences de confort d'été stipulées par la réglementation environnementale 2020 (RE 2020) qui est dans notre cas d'étude 1150 degrés heure.

En ce qui concerne l'impact environnemental de ces dispositifs, il est à noter que les brise-soleil orientables présentent un désavantage en termes d'indicateur d'impact carbone de la construction ($Ic_{\text{construction}}$). Cependant, cet écart par rapport à la configuration initiale demeure relativement modéré compte tenu de l'importance majeure de ce paramètre sur le confort thermique estival du bâtiment.

3.2.3 Béton bas-carbone

Dans le contexte de notre étude, la totalité de la structure a été construite en utilisant du béton armé. Cependant, lors de l'analyse du cycle de vie effectuée via Vizcab, nous avons pu quantifier l'impact des émissions de CO₂ liées à la construction du projet. En ce qui concerne le béton le plus fréquemment employé (C 25/30 XC1 D20), représentant une quantité de 1747 m³, il contribue à plus de 10 % à l'empreinte carbone globale du projet.

De nouveaux types de béton à faible empreinte carbone ont été développés par les fabricants, grâce notamment à la réduction de la quantité de clinker. Le clinker est le composant le plus polluant en raison du processus de calcination exigeant la cuisson du calcaire et de l'argile à 1200 °C. L'objectif est de réduire l'impact environnemental associé au béton. Dans cette optique, nous avons examiné différentes solutions disponibles pour remplacer le béton C25/30 XC1 D20 CEM II par un béton présentant des caractéristiques physiques équivalentes, tout en étant plus respectueux de l'environnement. Notre objectif est d'identifier un béton alternatif qui permettrait de maintenir les performances attendues tout en réduisant l'impact carbone inhérent à la construction.

Tout d'abord, une étude réalisée au sein d'Eiffage Construction Centre-Est a permis de d'identifier l'impact carbone des béton bas-carbone et des bétons « classiques » des différents producteurs de la région lyonnaise. Ces données sont regroupées dans le graphique ci-dessous (voir figure 31) :

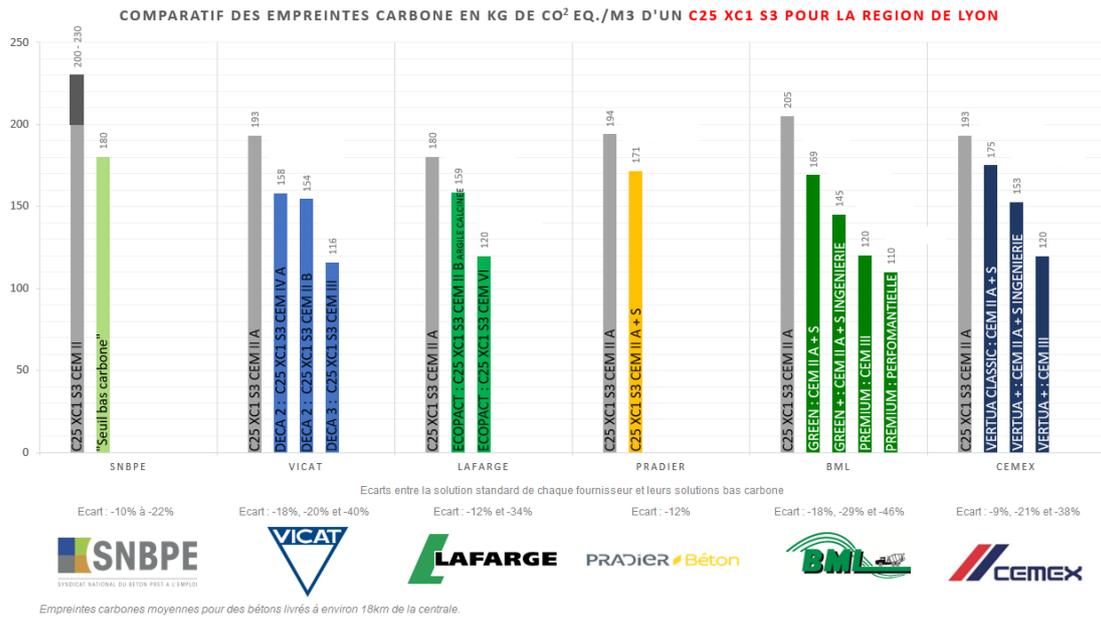


Figure 31 : Comparatif des empreintes carbonées en kg CO₂ eq/m³ d'un béton C25/30 XC1 pour la région de Lyon

Dans notre cas d'étude, le fournisseur choisi était l'entreprise Béton des Monts du Lyonnais (BML) dans la suite de notre étude, on s'intéressera donc aux solutions bas-carbone de ce fournisseur étant donné que les solutions proposées par les autres entreprises sont comparables. Le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi (SNBPE) a fixé comme limite pour considérer un béton comme bas carbone une émission de de 180 kg CO₂ eq/m³. On étudiera par la suite l'influence de l'emploi des béton GREEN, GREEN + et PREMIUM ce classe C25/30 : PERFERMANTIELLE. Les résultats de l'étude associées à l'impact des émissions de CO₂ de ce composant sont présentés dans la Figure 32 et l'effet sur le l'indicateur I_{c_{construction}} sont présentés dans la figure ci-dessous (voir Figure 33) :

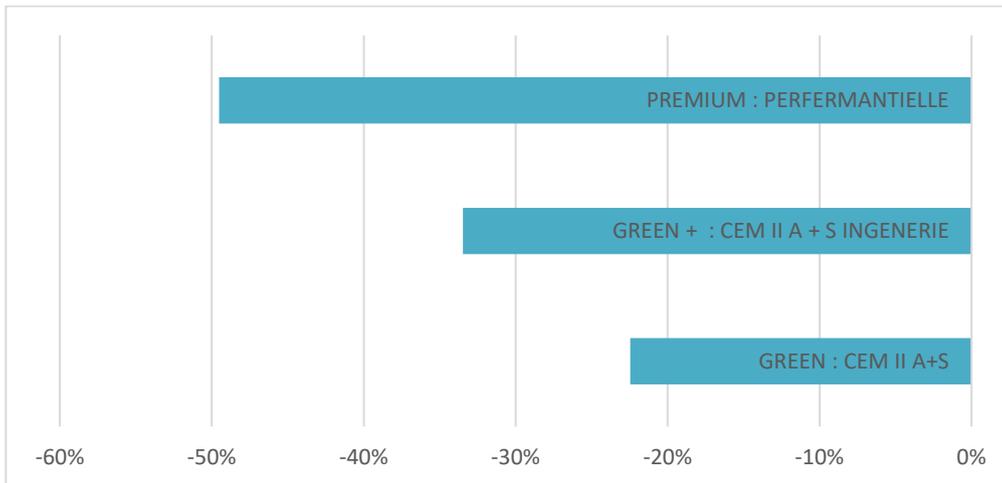


Figure 32 : Ecart en pourcentage des émissions de de CO2 du béton par rapport au béton C25/30 « classique »

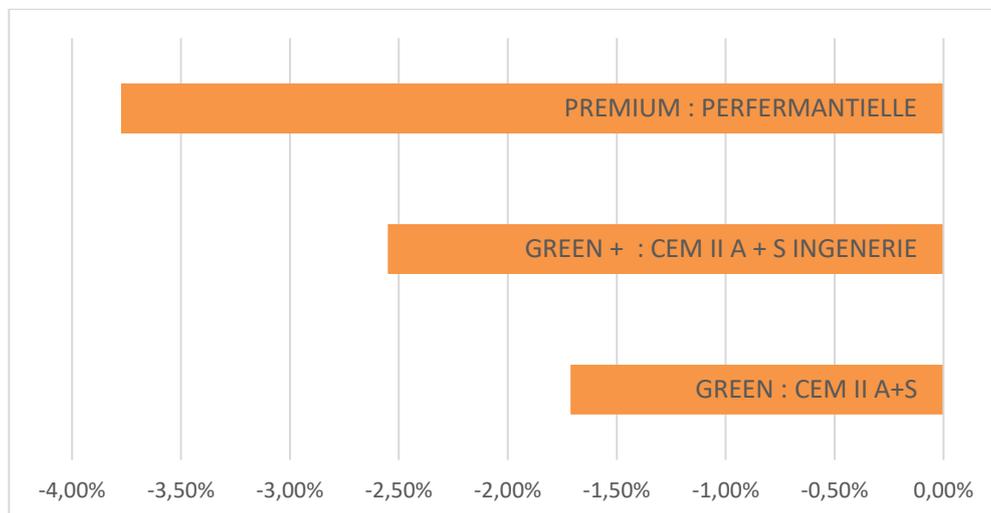


Figure 33 : Ecart en pourcentage sur l'indicateur $I_{c_{construction}}$ par rapport au béton C25/30 « classique »

Il est notable que l'utilisation de béton à faible empreinte carbone peut entraîner une réduction allant jusqu'à 50 % des émissions de CO2 associées à la mise en œuvre du béton C25/30 XC1 D20 CEM II dans notre projet. Cette réduction a un impact significatif sur l'indicateur global $I_{c_{construction}}$, avec une diminution de 3.8 %. Cette diminution revêt une importance considérable, étant donné que notre bâtiment dépasse actuellement de 19 % le seuil de l'indicateur $I_{c_{construction}}$ prévu pour 2025.

Les autres types de béton à faible empreinte carbone présentent également des avantages en termes de réduction de l'impact carbone du béton, avec des diminutions respectives de 33 % et 22 %. Ces réductions se traduisent par des baisses de l'indicateur $I_{c_{construction}}$ de 2,6 % et 1,7 %, respectivement. Toutefois, il est essentiel de noter que l'utilisation de béton à faible empreinte carbone entraîne un surcoût, d'autant plus élevé que l'impact carbone associé au béton est réduit. La Figure 34 ci-dessous illustre le surcoût associé aux différents types de béton à faible empreinte carbone proposés par la société BML :

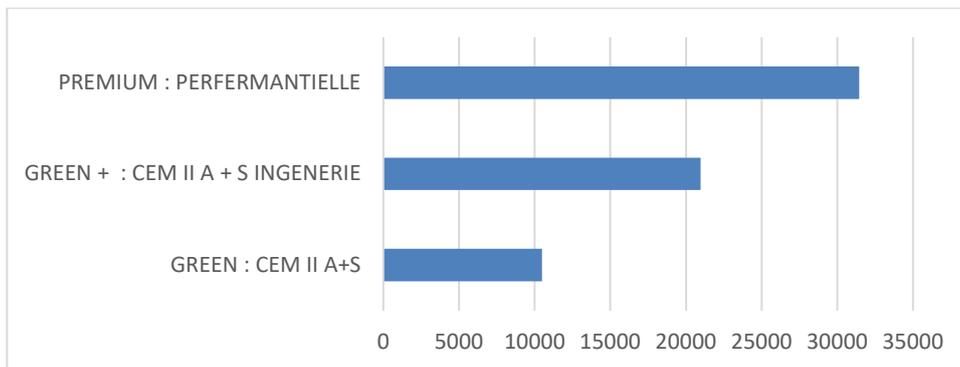


Figure 34 : Surcoût associé à la mise en œuvre de béton bas carbone

Ainsi le surcoût varie entre 31 k€ et 10.5 k€ ce qui représente un coût non négligeable pour un projet mais reste envisageable compte tenu de son impact sur les émissions de CO2 associées au projet afin de permettre aux bâtiments de satisfaire aux exigences de la RE 2020.

L'empreinte carbone liée à l'utilisation de béton dans la construction de notre projet présente une influence significative sur l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$. Cependant, des alternatives ont été élaborées dans la région lyonnaise pour atténuer les émissions de CO2 en privilégiant l'emploi de béton à faible empreinte carbone. Diverses options sont disponibles, chacune engendrant des surcoûts variables. Ainsi, il est impératif de sélectionner la solution la mieux adaptée de manière à maintenir la conformité avec l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$, tout en respectant les contraintes budgétaires du projet.

3.3 Mise en place de sources d'énergie renouvelables

3.3.1 Installation de panneaux solaires

Nous allons dans cette partie nous intéresser à l'impact de la mise en place de panneaux solaires photovoltaïques sur le toit de notre bâtiment. En effet, l'étude des plans architecturaux a permis de mettre en évidence la possibilité d'installer des panneaux solaires sur une surface de 710 m², la Figure 34 ci-dessous met en évidence la répartition ainsi que l'orientation de ces zones :

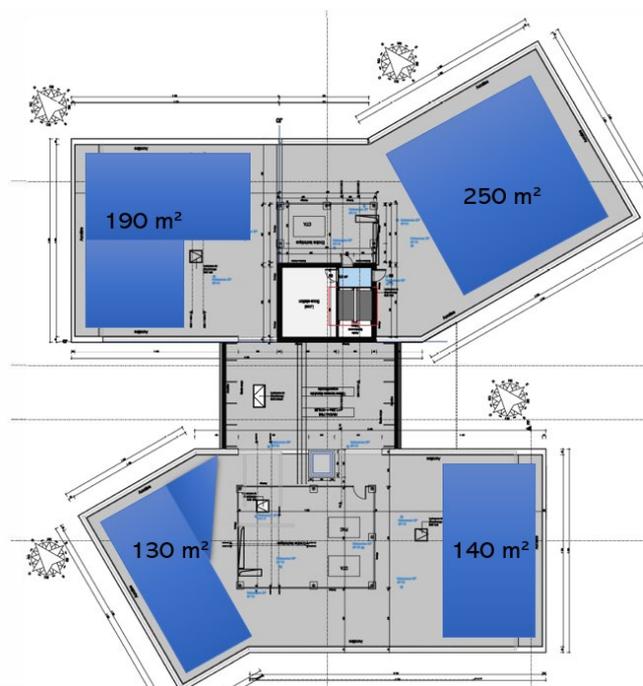


Figure 35 : Répartition et orientation des zones d'installations photovoltaïques

Les zones exploitables avec une superficie de 130 m² et 250 m² sont orientées vers le sud, tandis que les zones ayant une aire de 190 m² et 140 m² sont orientées au sud-ouest. Afin d'étudier l'influence de la présence de panneaux photovoltaïque on s'intéressera aux cas suivants :

- 100 % de la surface exploitable recouverte de panneaux
- 75 % de la surface exploitable recouverte de panneaux
- 50 % de la surface exploitable recouverte de panneaux

Pour établir les dimensions adéquates de notre système photovoltaïque, nous avons d'abord effectué des estimations préalables pour chaque zone en utilisant le logiciel PVsyst 7.4 dans le cas où 100 % de la surface exploitable est utilisée. Les données météorologiques ont été importées depuis Meteonorm 8. Les résultats de ces analyses de dimensionnement spécifiques sont présentés en détail dans l'Annexe 11. Par la suite on effectuera le même dimensionnement dans le cas où 75 % et 50 % de la surface exploitable est utilisée.

Les produits sélectionnés pour notre installation photovoltaïque sont identiques à ceux mis en œuvre dans un projet similaire de bâtiment tertiaire à usage de bureau appelé OIC Partner, situé à Grenoble. L'onduleur utilisé est le modèle Sun2000-100KTL-M1, fabriqué par Huawei, tandis que les panneaux photovoltaïques sont du type monocristallin, correspondant à la référence LR4-60HPH du fabricant Longi Sun.

On a ainsi procédé à une évaluation du bâtiment à l'aide du logiciel ClimaWin 2020 et Vizcab qui permet de prendre en compte la présence de panneaux photovoltaïque dans le cadre de la RE 2020, les résultats de ces modélisations sont présentés dans le Tableau 19 ci-dessous :

Tableau 19 : Résultats RE 2020 du projet d'installation photovoltaïque

Variantes	Cep (kWh _{ep} /m ² .an)	Ecart à Cep_max (%)	Cep, nr (kWh _{ep} /m ² .an)	Ecart à Cep,nr_max (%)	Impact carbone (kg CO ₂ eq)	Impact sur Ic_construction (%)	Surcoût (k€)
100 % de panneaux solaires	70,8	-18%	70,8	-7%	217 766,61	5,3%	86
75 % de panneaux solaires	76,1	-12%	76,1	-1%	163 524,68	4,0%	66
50 % de panneaux solaires	82,1	-5%	82,1	7%	108 976,29	2,6%	50

On peut ainsi observer une réduction variable en fonction de la surface de panneaux installés des indicateurs Cep et Cep, nr. Ainsi, la mise en place de panneaux photovoltaïques sur 100 et 75 % de la surface exploitable permet d'assurer le respect vis-à-vis des critères Cep et Cep, nr de la RE 2020. En revanche, l'installation de panneaux photovoltaïques sur 50 % de la surface entraîne un dépassement de 7 % vis à vis de l'indicateur Cep, nr.

La mise en place de panneaux solaires entraîne également une augmentation de l'impact carbone du bâtiment associé à sa mise en œuvre qui varie entre 217 et 108 tonnes de CO₂ en fonction de la surface exploitée ce qui entraîne une hausse de l'indicateur I_{c_{construction} variant de 5.3 à 2.6 %. Cette hausse n'est pas négligeable compte tenu du fait que nous avons vu précédemment que l'emploi de béton bas carbone sur notre projet engendrait une diminution allant de 1.6 à 3.8 % de l'indicateur I_{c_{construction} pour la formulation ayant l'impact le plus faible. En outre le coût associé doit également être pris en compte puisque qu'uniquement en fourniture cela représente un surcoût allant de 86 à 50 k€ en fonction de la variante choisie ce qui n'est pas négligeable dans le coût global du projet et peut engendrer un frein à leur mise en place.}}

3.4 Optimisation de l'impact carbone du projet

Grâce au logiciel Vizcab, nous sommes en mesure de connaître quelles sont les fiches les plus impactantes concernant l'empreinte carbone de notre bâtiment, ces dernières sont aux nombres de 15 et

représentées à elles seules plus de 73 % de l'impact carbone globale de notre bâtiment. Ces dernières sont présentées en Annexe 12 et ont la répartition suivante en termes de type de données environnementales :

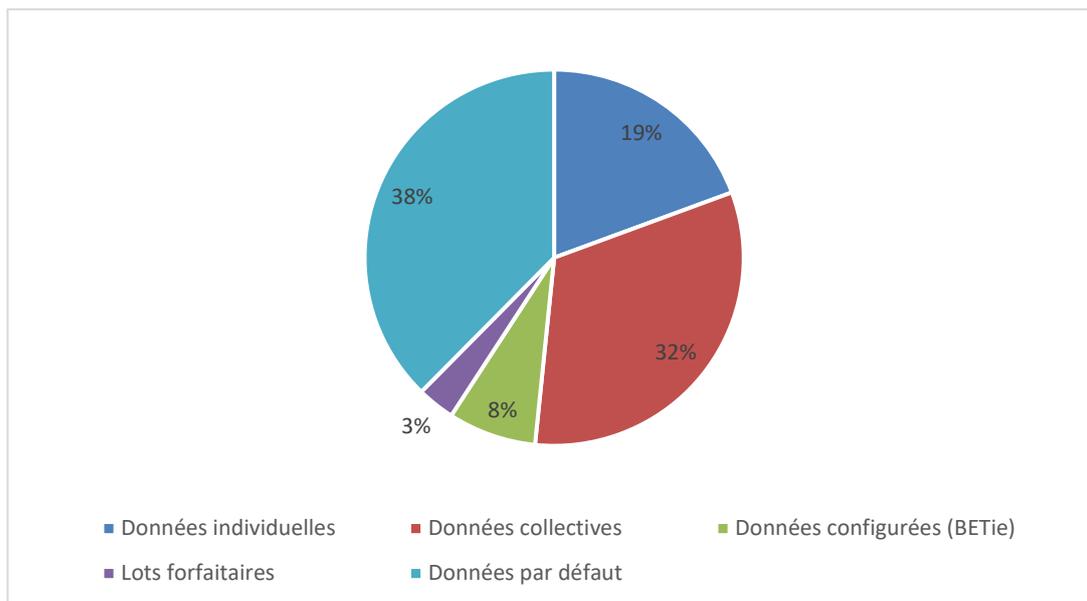


Figure 36 : Répartitions des données environnementales les plus impactantes

Parmi les 15 données les plus significatives, 6 proviennent de lots forfaitaires. Cette situation engendre une complexité pour entreprendre des mesures correctives, étant donné que ces lots forfaitaires ont été adoptés en raison des limitations actuelles de la base de données INIES, qui ne permet pas une décomposition aisée du calcul inhérent à ces groupements.

De plus, les données configurées se rapportent aux types de béton C25/30 XC1 D20 et C25/30 XF1 D10 S4, lesquels sont les plus fréquemment utilisés dans notre projet. Pour atténuer l'empreinte carbone, il s'avère indispensable de recourir à des formulations de béton à faible teneur en carbone, malgré le surcoût associé à notre projet. Nous n'étudierons pas ici l'impact de l'emploi de béton bas carbone car il a été traité précédemment à l'exception des prémurs qui ne comprennent néanmoins pas le béton de remplissage.

En ce qui concerne les autres données, il se pourrait que nous puissions réduire l'impact carbone inhérent en optant pour des fiches de données moins contraignantes, énumérées dans la base INIES, tout en conservant les propriétés techniques identiques à celles précisées dans le Cahier des Clauses Techniques Particulières (CCTP).

Par ailleurs, le logiciel Vizcab offre la possibilité d'évaluer la distribution de l'empreinte carbone de notre projet en fonction des différents lots conformes à la réglementation RE 2020, cette analyse détaillée est fournie dans l'Annexe 13 du rapport. Il est clairement observable que les lots ayant l'impact carbone le plus significatif sont ceux qui concernent la structure du bâtiment, à savoir les lots 2 et 3. Cette situation découle principalement de l'empreinte carbone élevée du béton utilisé dans ces lots. Par ailleurs, il est à noter que les lots liés aux équipements, et qui sont soumis à des forfaits (lots 8 et 10) ont un impact significatif sur l'empreinte carbone de notre bâtiment. En dernier lieu, les lots 6 et 7, englobant les façades, les menuiseries extérieures ainsi que les revêtements de sols, murs et plafonds, y compris la chape, les peintures et les produits de décoration, contribuent significativement à l'empreinte carbone globale. Il devient donc impératif de prioriser ces lots pour entreprendre des actions visant à minimiser l'empreinte carbone du bâtiment car en tant qu'entreprise général il nous est possible de modifier les composants de ces derniers.

En observant la répartition des données environnementales présentée dans la figure 37 ci-dessous :

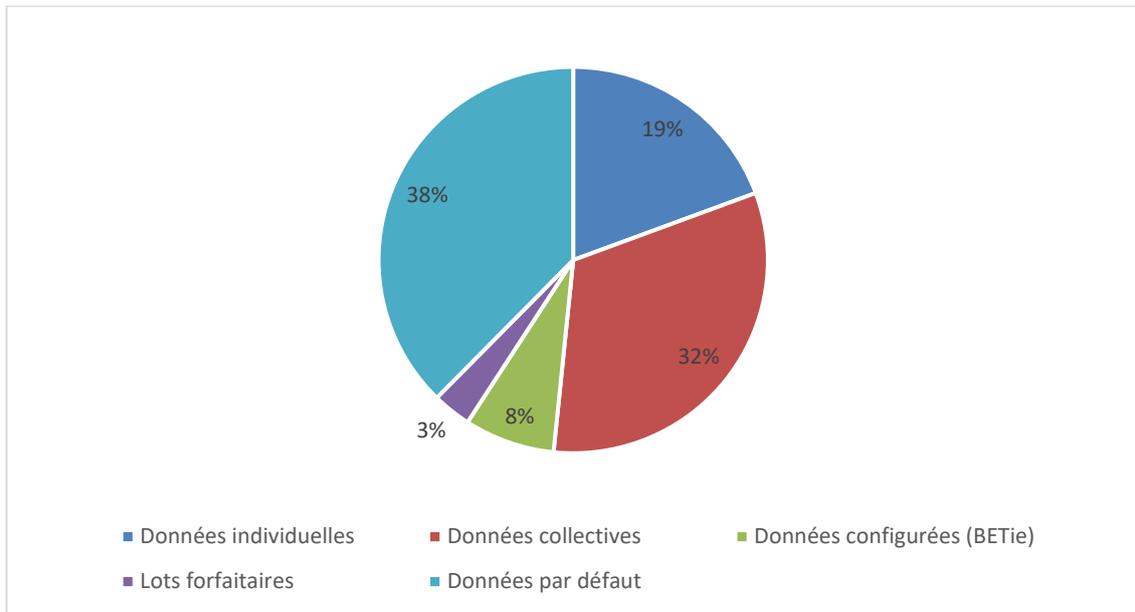


Figure 37 : Répartition des données environnementales en fonction du type de déclaration

Il est notable que les fiches individuelles sont actuellement sous représentées dans la saisie de l'analyse de cycle de vie effectuée pour notre bâtiment. Cette situation découle de deux facteurs principaux :

- Un manque de données dans les Cahiers des Clauses Techniques Particulières (CCTP), entravant la sélection adéquate de fiches individuelles.
- La présence de composants détaillés dans les CCTP, mais absents de la base de données INIES.

De ce fait il a été nécessaire d'employer fréquemment des fiches collectives ou des données environnementales, ce qui se traduit souvent par des estimations moins favorables en termes d'impact carbone des composants. Dans l'optique de maximiser la réduction de l'empreinte carbone de notre construction, des ajustements ont été apportés aux fiches employées, en harmonie avec les spécifications détaillées présentes dans les CCTP. Ces adaptations sont explicitées en détail dans la Figure 38, exposée ci-dessous.

Lot	Mise en œuvre	Produit de construction	Types de déclaration	Impact carbone (kg CO2 eq)	ID Inies
2	Base	Béton de propreté - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	292	31629
	Variante	Béton de propreté	Fiche collective	146	12465
2	Base	Caillebotis en acier galvanisé pour utilisation intérieure - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	162	31512
	Variante	Caillebotis en acier Diamond	Fiche individuelle	85,9	32627
3	Base	Plancher technique surélevé non revêtu de 30mm, monté sur vérins acier de 100mm	Fiche individuelle	23,9	26781
	Variante	Mobius Dall'R 30/38 mm Brut - Plancher technique surélevé non revêtu de réemploi monté sur vérins neufs	Fiche individuelle	-11,9	27874
3	Base	MCJ PRÉMUR CEM III de 18 à 40cm sans béton de remplissage	Fiche individuelle	24,8	33956
	Variante	Prémur RECTOR RSOFT® Béton bas carbon	Fiche individuelle	20,2	33497
4	Base	Étanchéité bicouche bitume-polymère pour toiture - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	18,3	31501
	Variante	Revêtement d'étanchéité bicouche bitume-polymère - INDE	Fiche individuelle	7,96	30516
4	Base	Couvertine en acier pour acrotère - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	24,9	29377
	Variante	Couvertine et boîte à eau ANNAPURNA	Fiche individuelle	10,3	24193
4	Base	Verrière [Uw = 1,5 W/m².K] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	614	28940
	Variante	Façade Rideau et Verrière Mixtes Bois Aluminium, système RAICO THERM+ H-I	Fiche individuelle	90	28106
5	Base	Cloisonnement en carreaux de plâtre [ép. 50 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	22,5	31984
	Variante	Carreaux épaisseurs de 50 et 70 mm	Fiche individuelle	16,6	26640
5	Base	Isolants thermiques et acoustiques pour murs (ITE) en polystyrène expansé [R entre 2,5 et 5 m².K/W] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	29,1	29473
	Variante	KNAUF Perimaxx Ultra	Fiche individuelle	11,8	32789
6	Base	Murs rideaux et verrières en aluminium - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	208	31590
	Variante	Éléments de remplissage AluminEA, GlacEA et DomEA avec parements aluminium, acier et/ou verre et âme laine de roche, épaisseurs comprises entre 28 mm et 140 mm	Fiche individuelle	66,1	33438
6	Base	Porte en aluminium vitrée - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	732	31630
	Variante	Bloc porte extérieur ALUMINIUM - modèles vitrés - SWAO - ALU100 / ALU80 / ALU60	Fiche individuelle	366,2	29441
6	Base	Bloc porte métallique (porte de locaux techniques, de caves, de service...) - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	608	34026
	Variante	Bloc-Porte de service acier isolante sur huisserie métallique	Fiche individuelle	78	29567
6	Base	Miroir [ép. = 4 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	23,3	28261
	Variante	Mirold Morena - Miroir sur verre de 4 mm d'épaisseur (épaisseurs 3 et 5 mm également couvertes)	Fiche individuelle	14,9	27640
6	Base	Bardage en acier - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	42,9	31744
	Variante	Plateau de bardage ou de couverture en acier de masse surfacique comprise entre 7,6 et 10,99 kg / m²	Fiche individuelle	35,1	27111
7	Base	Des dalles de moquette touffetées dont le poids total des poils est de 590 g/m2 un matériau de poils en polyamide 6 et un dossier ecoback ou ComfortBackeco	Fiche individuelle	14,2	30630
	Variante	Moquette modulaire avec dossier CQuest Bio en velours PA 6.6 teint masse 75% recyclées et d'un poids total maximal de fibre de 600 g/m² (v.1.2)	Fiche individuelle	8	33970
7	Base	Revêtement pour murs et plafonds en faïence [ép. entre 6 et 10mm] avec mortier colle et joint - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	25,8	13162
	Variante	Carreaux en faïence MOSA	Fiche individuelle	10,2	33535
7	Base	Revêtement de sol dur en céramique [ép. entre 10 et 12,5 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	DED	58,6	29170
	Variante	Carreaux céramiques produits par NOVOCERAM	Fiche individuelle	20,8	27341

Figure 38 : Variante relative à l'optimisation de l'impact carbone du projet

Les ajustements réalisés ont réduit l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ de notre projet (voir Annexe 14). Initialement 7 % en dessous du seuil 2022, il est maintenant **inférieur de 18 %**. Bien que dépassant initialement de 19 % le seuil 2025, après optimisation, l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ demeure **supérieur de 4 %**.

L'intégration de panneaux solaires photovoltaïques, impérative pour maintenir la conformité avec les indicateurs C_{ep} et $C_{ep, nr}$, n'a pas été considérée dans cette étape. Il est important de noter que cette mesure aura une incidence sur l'empreinte carbone globale du bâtiment et sera abordée dans la section suivante.

En revanche, il est essentiel de noter que la référencement des matériaux de construction employés dans le cadre d'un projet est primordiale afin de limiter l'emploi à des données environnementales par défaut (DED) qui sont très défavorables vis-à-vis de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$. Par ailleurs, le recours à des matériaux recyclés (moquettes et planchers techniques) ainsi qu'à des matériaux bas carbone (prémurs) améliore aussi grandement l'empreinte carbone globale du projet.

Conclusion

3.5 Présentation des différentes variantes retenues

La réglementation RE 2020 évalue de manière globale les performances des bâtiments tertiaires en relation avec divers indicateurs concernant aussi bien l'impact carbone que les performances énergétiques. L'objectif est d'atteindre les directives gouvernementales tout en offrant aux acteurs de la construction l'opportunité de s'adapter aux exigences de la réglementation qui sont amenées à évoluer afin de devenir plus contraignantes. Dans cette section, nous nous intéresserons à l'application des leviers

identifiés précédemment pour garantir, en premier lieu, la conformité de notre étude de cas avec les exigences en vigueur pour l'année 2022. Par la suite, nous aborderons le défis que représente le respect des critères Bbio et $I_{c_{\text{construction}}}$ en vue du seuil de l'année 2025 afin d'anticiper les évolutions des exigences pour un entreprise de construction générale comme Eiffage Construction Confluences.

3.5.1 Variante « AREA 2022 »

Dans cette section, on étudiera l'application des leviers identifiés précédemment afin de s'assurer de la conformité de notre bâtiment vis-à-vis des exigences de la RE 2020 actuellement en vigueur. Notre cas initial est ici le siège social d'AREA situé à Jonage pour lequel on a optimisé l'impact carbone du bâtiment sans pour autant changer les propriétés des composants mis en œuvre, les modifications effectuées ont été présentées dans la Figure 38 et les résultats vis-à-vis de l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$ sont situés en Annexe 15 et ceux concernant les indicateurs Bbio, Cep, Cep,nr, DH et $I_{c_{\text{énergie}}}$ sont présents sur la Figure 28. On observe ainsi qu'à l'heure actuelle notre bâtiment ne respecte pas l'exigence RE 2020 vis-à-vis des indicateurs Cep, Cep, nr et DH. En revanche les exigences suivantes sont satisfaites : Bbio, $I_{c_{\text{construction}}}$ et $I_{c_{\text{énergie}}}$. Il conviendra cependant de vérifier la conformité vis-à-vis de l'ensemble des indicateurs à la fin de notre étude car les indicateurs sont interdépendants donc les modifications effectuées impacteront l'ensemble de ces derniers. Les modifications apportées à notre cas initial sont les suivantes :

- Installation de panneaux photovoltaïques sur 75 % de l'espace disponible (soit 533 m²) ;
- Mise en place de brise-soleil orientables motorisés sur l'ensemble des baies (y compris sur les murs rideaux) ;
- Augmentation de l'épaisseur de l'ITE des murs de 4 cm avec installation de panneaux Rockfaçade 200 mm des Ets ROCKWHOOOL ;
- Augmentation de l'épaisseur de mousse polyuréthane en ITE des toitures de 5 cm soit une épaisseur de 15 cm pour les parties accessibles et de 25 cm pour les parties non-accessibles ;
- Mise en œuvre de béton bas-carbone -22 % de la société BML dont l'émission de CO₂ est de 169 kg CO₂ eq/m³

Tableau 20 : Synthèse des résultats de la variante "AREA 2022"

Indicateur	Bbio (pts) [2022]	Cep (kWhep/m ² .an)	Cep,nr (kWhep/m ² .an)	Ic,enr (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	DH (degré.heure)	Ic_construction (kg CO ₂ eq) [2022]
AREA 2022	100,30	74,70	74,70	86,80	1 088,00	754
Exigence	104,20	76,50	86,70	204,00	1 150,00	921
Ecart en %	-3,7%	-2,4%	-13,8%	-57,5%	-5,4%	-18,1%

Les résultats de la RE 2020 pour cette variante "AREA 2022" sont présentés en Annexe 15 et sont résumés dans le Tableau 20 ci-dessus. On remarque ainsi que les leviers mis en œuvre ont permis de respecter le seuil 2022 des exigences de la RE 2020. Cependant, il est important de noter que notre bâtiment satisfaisait initialement le critère Bbio pour le seuil 2022. En effet, suite à l'installation des brise-soleil orientables motorisés, les besoins en éclairage ont augmenté, entraînant le non-respect de ce critère. Pour rétablir la conformité, il a été décidé d'accroître l'épaisseur de l'isolation des murs et des toitures afin de réduire les besoins en chauffage, tout en garantissant le respect de l'indicateur DH.

Concernant l'empreinte carbone de notre bâtiment, les modifications apportées à l'enveloppe ont eu un impact très limité sur l'indicateur $I_{c_{\text{construction}}}$, comme cela avait été étudié précédemment. Cependant, dans le but de partiellement compenser les émissions liées à l'installation photovoltaïque, nous avons décidé de mettre en place du béton bas-carbone de la société BML. Cette démarche vise à obtenir une marge de conformité satisfaisante pour l'exigence de 2022, étant donné que notre cas initial était déjà optimisé en termes d'émissions de CO₂.

Ainsi, il est observé que la conformité atteinte pour le seuil 2022 a néanmoins nécessité des ajustements, qui, en ne prenant en compte que l'implémentation du béton bas-carbone et de l'installation photovoltaïque, représentent déjà un surcoût de 78 k€. De plus, le bâtiment satisfait certes aux exigences de la RE 2020, mais la marge par rapport à l'indicateur Cep, nr est de 1 % et l'écart par rapport à l'exigence DH est de seulement 62 degrés-heure. Par conséquent, notre construction devra toujours recourir de manière significative à la climatisation pour garantir un confort thermique optimal à ses occupants.

3.5.2 Variante « AREA 2025 »

Dans cette optique, afin de répondre aux exigences de plus en plus strictes de la réglementation environnementale RE 2020, il devient impératif de mettre en œuvre une gamme plus étendue de leviers pour garantir leur respect. Dans cette section, nous allons explorer l'utilisation de ces leviers afin de tenter d'assurer la conformité de notre bâtiment en utilisant des matériaux "conventionnels". L'objectif est d'évaluer la faisabilité du respect des critères réglementaires pour l'année 2025, sans nécessiter la mise en place de solutions plus innovantes, telles que l'utilisation de matériaux biosourcés. Dans le contexte de cette étude de cas, les modifications apportées par rapport à la configuration initiale sont les suivantes :

- Installation de panneaux photovoltaïques sur 75 % de l'espace disponible (soit 533 m²) ;
- Mise en place de brise-soleil orientables motorisés sur l'ensemble des baies, y compris sur les murs rideaux ;
- Augmentation de l'épaisseur de l'ITE des murs de 8 cm avec l'installation de panneaux Rockfaçade de 240 mm des Ets ROCKWOOL ;
- Augmentation de l'épaisseur de la mousse polyuréthane en ITE des toitures de 5 cm, soit une épaisseur de 15 cm pour les parties accessibles et de 25 cm pour les parties non-accessibles ;
- Augmentation de l'épaisseur du flocage sous la dalle en ITE de 10 cm, soit une épaisseur de 25 cm ;
- Mise en œuvre de béton bas-carbone -50 % de la société BML, dont les émissions de CO₂ sont de 145 kg CO₂ eq/m³.

Tableau 21 : Synthèse des résultats de la variante "AREA 2025"

Indicateur	Bbio (pts) [2022]	Bbio (pts) [2025]	Cep (kWhep/m ² .an)	Cep,nr (kWhep/m ² .an)	Ic,enr (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	DH (degré.heure)	Ic_construction (kg CO ₂ eq) [2022]	Ic_construction (kg CO ₂ eq) [2025]
AREA 2025	99,20	99,20	74,10	74,10	85,90	1 118,00	715,00	715,00
Exigence	104,20	99,60	76,50	86,70	204,00	1 150,00	921,00	700,00
Ecart en %	-4,8%	-0,4%	-3,1%	-14,5%	-57,9%	-2,8%	-22,4%	2,1%

Les résultats de la variante "AREA 2025" sont présentés en Annexe 16 et sont résumés dans le Tableau 21 ci-dessus. Il est ainsi observé que les modifications apportées à notre bâtiment permettent d'assurer la conformité vis-à-vis des exigences suivantes : Bbio, Cep, Cep,nr, DH et I_{C_{énergie}}. Il convient de noter qu'afin de respecter l'exigence 2025 du critère Bbio, il a été nécessaire d'augmenter l'épaisseur de laine de roche pour l'ITE des murs de 4 cm par rapport à la variante "AREA 2022". De plus, l'épaisseur du flocage isolant le plancher sous dalle a également été augmentée de 10 cm. Ces ajustements ont entraîné une augmentation du nombre de degrés-heure d'inconfort en été. Toutefois, malgré cela, le critère de la RE 2020 est toujours satisfait, bien que le recours à la climatisation demeure nécessaire pour assurer le confort des occupants.

Cependant, malgré l'emploi du béton bas-carbone PREMIUM PERFORMANTIELLE de la société BML, aux performances plus vertueuses que celui utilisé dans la variante "AREA 2022", puisque les émissions de ce dernier sont réduites de 50 % avec une valeur de 145 kg CO₂ eq/m³, le seuil 2025 de l'indicateur I_{C_{construction}} n'est pas atteint ici, avec un dépassement de 2 % de ce dernier. Ce dépassement découle en grande partie de l'impact carbone lié à l'augmentation de l'épaisseur des éléments d'isolation par l'extérieur, ainsi que des matériaux employés dans ce projet qui n'ont pas été choisis de manière à réduire l'empreinte carbone de notre bâtiment (notamment le bardage en acier, l'isolation en laine de roche, etc.).

Ainsi, à l'heure actuelle, les leviers mis en place ne s'avèrent pas suffisants pour garantir la conformité de notre bâtiment par rapport à l'ensemble des exigences qui seront en vigueur en 2025. Toutefois, opter pour l'utilisation généralisée de béton bas carbone aurait davantage réduit l'empreinte carbone du projet. En revanche, notre étude sur le béton bas-carbone se limitait au type C25/30 XC1 D20, ce qui explique pourquoi seule cette référence a été modifiée dans le cadre de notre analyse. Par conséquent, notre attention se tournera désormais vers l'introduction de matériaux plus respectueux de l'impact carbone, dans le but de répondre aux critères de 2025 de la réglementation RE 2020.

3.5.3 Variante « AREA 2025 biosourcée »

Compte tenu du fait que les leviers précédents n'ont pas été suffisants pour assurer la conformité de notre projet par rapport aux futures exigences de la réglementation à l'horizon 2025, nous nous pencherons ici sur l'introduction de modifications additionnelles relatives à l'utilisation de matériaux biosourcés plus respectueux de l'environnement. Les modifications apportées au bâtiment initial dans le cadre de cette étude de cas sont les suivantes :

- Installation de panneaux photovoltaïques sur 75 % de l'espace disponible (soit 533 m²) ;
- Mise en place de brise-soleil orientables motorisés sur l'ensemble des baies (y compris sur les murs rideaux) ;
- Augmentation de l'épaisseur de l'ITE des murs de 8 cm avec installation de panneaux en laine de bois SMART 240 mm des Ets PAVAWALL ;
- Augmentation de l'épaisseur de mousse polyuréthane en ITE des toitures de 5 cm soit une épaisseur de 15 cm pour les parties accessibles et de 25 cm pour les parties non-accessibles ;
- Augmentation de l'épaisseur de flocage sous la dalle en ITE de 10 cm soit une épaisseur de 25 cm
- Mise en œuvre de béton bas-carbone -50 % de la société BML dont l'émission de CO₂ est de 145 kg CO₂ eq/m³
- Mise en place de bardage en bois en façade

Tableau 22 : Synthèse des résultats de la variante "AREA 2025 biosourcée"

Indicateur	Bbio (pts) [2022]	Bbio (pts) [2025]	Cep (kWhep/m ² .an)	Cep,nr (kWhep/m ² .an)	Ic,enr (kg eq CO ₂ /m ² , 50ans)	DH (degré.heure)	Ic_construction (kg CO ₂ eq) [2022]	Ic_construction (kg CO ₂ eq) [2025]
AREA 2025 biosourcée	99,30	99,30	74,10	74,10	85,90	1 118,00	691,00	691,00
Exigence	104,20	99,60	76,50	86,70	204,00	1 150,00	921,00	700,00
Ecart en %	-4,7%	-0,3%	-3,1%	-14,5%	-57,9%	-2,8%	-25,0%	-1,3%

Les résultats de cette variante « AREA 2025 biosourcée » sont présentés en Annexe 17 et résumés dans le Tableau 22 ci-dessus. On observe ainsi que suite à l'emploi de matériaux biosourcés (laine de bois), les performances thermiques de notre bâtiment sont comparables à la variante précédente où de la laine de roche était mis en œuvre pour l'ITE des murs. Les exigences suivantes sont toujours satisfaites : Bbio, Cep, Cep,nr, DH et Ic_{énergie}.

En outre l'utilisation de panneaux de la laine de bois de 224 mmm a permis de diminuer les émissions de CO₂ de notre bâtiment de 79 t CO₂ eq, cependant il a également été nécessaire de remplacer l'intégralité des bardages en acier par des bardages en bois afin de respecter le critère 2025 de l'exigence Ic_{construction}. Malgré ces changements l'exigence est atteinte avec un écart de seulement 1 %.

Ainsi, les évolutions des exigences liées à la réglementation RE 2020 demanderont des efforts croissants de la part des entreprises de construction générales pour garantir la conformité des projets à venir. Les critères actuels ont pu être satisfaits en optimisant l'isolation de notre bâtiment et en sélectionnant des produits répertoriés dans la base INIES, présentant des propriétés identiques à celles de notre projet. Sans ces modifications, notre bâtiment aurait certes atteint le seuil 2022 pour l'indicateur Ic_{construction}, mais aurait échoué à répondre à l'exigence de 2025, même après des modifications ultérieures.

L'exigence pour 2025 présente donc un réel défi en termes d'émissions de CO₂, ce qui a imposé l'utilisation de matériaux biosourcés. Leur capacité de captation contribue à réduire l'empreinte carbone du bâtiment. En vue d'anticiper les futures évolutions de la réglementation environnementale, il devient impératif de repenser dès à présent les matériaux employés dans les projets. Sans cette démarche, la conformité des projets futurs pourrait se trouver compromise.

3.6 RE 2020 et labels, une approche complémentaire

La RE 2020 est entrée en vigueur pour les bâtiments tertiaires à usage de bureaux depuis le 1^{er} juillet 2022, cependant auparavant d'autres organismes (institutions, associations, organisations à but non lucratif ou gouvernements) ont créé des labels afin de promouvoir la durabilité, l'efficacité énergétique et d'autres aspects environnementaux et sociaux dans le secteur de la construction. Les labels et les certifications ne sont certes pas imposés par la législation française mais ils peuvent être exigés par les clients car ils constituent une véritable vitrine pour les projets qui ont su remplir les conditions d'obtention de ces derniers. Pour les entreprises de construction générales comme EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES il s'agit par ailleurs de démontrer leur implication concernant la prise en compte des problématiques environnementales sur leurs projets.

Ces labels sont de plus en plus nombreux et bien que l'évaluation des performances énergétiques et de l'impact carbone durant la phase d'exploitation restent les deux critères les plus souvent mis en avant par les labels (BREAM, HQE, LEED, Effinergie et E+/C-), le périmètre d'évaluation tend à s'élargir afin d'inclure notamment la qualité de vie (Ozmoz et Well), l'environnement ou encore la connectivité (Wiredscore)⁴⁹. On peut également citer le label E+/C- lancé en 2016 qui a été conçu comme une expérimentation afin de préparer l'arrivée de la RE 2020. Certaines des mesures introduites par le label E+/C- ont subi des évolutions au niveau de leurs méthodes de calcul et de leurs exigences. On peut particulièrement mentionner l'indicateur de l'impact carbone, précédemment dénommé Eges dans le cadre du label E+/C-, qui est maintenant désigné sous le nom d'I_c_{construction}. Cette évolution majeure se caractérise par l'introduction d'une analyse de cycle de vie dynamique ainsi que par une révision à la hausse des objectifs associés.

En outre, d'après une étude réalisée par le Baromètre de la Certification Environnementale™ en 2020⁵⁰ les bâtiments à usage de bureau sont les bâtiments qui ont été le plus certifiés depuis 2008 sur le plan environnemental avec en 2019 à l'échelle de l'Europe :

- 563 bâtiments de bureaux neufs ou en rénovation certifiés en Europe
- 651 bâtiments de bureaux en exploitation certifiés en Europe⁵¹

Dans le domaine des bâtiments tertiaires en France, les labels prééminents pour la construction, la rénovation et l'exploitation sont BREEAM et HQE, souvent assortis de certifications multiples, y compris le label LEED.

Ainsi, l'introduction de synergies et de collaborations fructueuses entre les réglementations environnementales et les labels de certification a émergé comme un élément clé dans le domaine de la construction, en particulier pour les bâtiments tertiaires à usage de bureau. L'entrée en vigueur de la RE

49 « Labels et certifications en exploitation, l'embarras du choix ». Workplace Magazine, <https://workplacemagazine.fr/immobilier/3865/labels-et-certifications-en-exploitation-l-embarras-du-choix>. Consulté le 23 août 2023.

50 « Content - Green Soluce - Communication ». Green Soluce, <https://www.greensoluce.com/content/>. Consulté le 23 août 2023.

51 Bureaux : les bâtiments les plus certifiés. <https://www.alterea.fr/le-lab/bureaux-batiments-les-plus-certifies>. Consulté le 23 août 2023.

2020 vise à réglementer les performances des bâtiments concernant les émissions de carbone ainsi que les performances énergétiques pour être en mesure de satisfaire l'objectif de neutralité carbone auquel s'est engagé la France en 2050. Les labels quant à eux tendent à promouvoir non seulement des performances environnementales élevées mais évaluent également le bâtiment sur un périmètre plus large qui sort du domaine d'action de la réglementation. De ce fait, la convergence et la complémentarité entre les impératifs réglementaires et les initiatives volontaires des labels encourage l'engagement croissant vers un environnement bâti plus durable. Cela favorise donc le développement de projets de bâtiments tertiaires à usage de bureau qui soient à la fois réglementaires écoresponsables et favorables à la santé et au bien-être.

3.7 Prise de recul

Cette étude a permis d'analyser l'effet des leviers pour permettre à EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES de répondre aux exigences réglementaires concernant les futurs projets de bureaux tertiaires. Toutefois, en tant qu'entreprise générale, les appels d'offres en phase DCE guident la plupart de nos projets, excluant dans notre cas d'étude l'application des leviers en phase de conception. Pourtant, la conception joue un rôle crucial dans la conformité aux normes et, face aux futures exigences, garantir dès le départ une conception conforme (compacité, traitement des ponts thermiques, ouvertures, systèmes énergétiques, etc.) est essentiel, afin d'assurer que les leviers que peut mettre en œuvre EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES soient suffisants pour garantir la conformité du projet.

En outre, l'étude de cas portait ici uniquement sur un bâtiment tertiaire à usage de bureau « classique », cependant à leur actuelle certains projets de bâtiments de bureaux en milieu urbain sont à usages multiples et comporte régulièrement des commerces. Cette usage de bâtiment n'est toujours pas intégré au périmètre de la RE 2020 ils sont donc encore soumis à la RT 2012 ce qui rend plus délicat la mise en application de ces leviers étant donné que plusieurs exigences différentes interviennent sur le même bâtiment. Il conviendra donc de rester prudent lors de la mise en application des leviers identifiés sur des bâtiments aux usages multiples.

L'analyse économique de l'ensemble des leviers n'a ici pas été effectuée sur la totalité des leviers compte tenu de la fluctuation des prix et de la variabilité des ces derniers en fonction des fournisseurs consultés. Il conviendra cependant de prendre en compte ces derniers lors de la phase étude du projet afin de garantir non seulement la conformité du projet mais également la compétitivité de l'entreprise lors de l'appel d'offre.

En outre, le cas d'étude portait sur un projet existant de bâtiment tertiaire de bâtiment de bureau, mais ce dernier était soumis à la réglementation thermique 2012 et lors de sa conception les nouvelles exigences introduites avec la RE 2020 n'ont pas été prise en compte. Cela peut notamment expliquer que des modifications importantes ont dû être mise en œuvre afin de s'assurer du respect du projet vis-à-vis des différentes exigences de la RE 2020. A l'avenir, ces exigences seront prises en compte dès la phase de conception du projet ce qui devrait limiter le nombre de levier à faire intervenir pour s'assurer de la conformité du bâtiment.

L'analyse du cycle de vie du bâtiment a été élaborée à partir des données extraites du CCTP et des DPGF. Cependant, l'association entre les composants et leur empreinte carbone a parfois été complexe en raison du manque de références dans ces documents et des informations limitées dans la base INIES. Cette base est constamment mise à jour, et l'empreinte carbone de notre bâtiment évoluera en fonction de la publication de nouvelles données environnementales.

3.8 Conclusion générale

La réglementation environnementale 2020 est entrée en vigueur depuis le 1^{er} juillet 2022 concernant les bâtiments tertiaires à usage de bureaux, elle vient ainsi succéder à la réglementation thermique 2012 et à l'expérimentation du label E+/C-. Cette dernière a été introduite compte tenu du contexte climatique actuel afin de s'assurer que le secteur du bâtiment soit en mesure de réduire sa consommation énergétique ainsi que ses émissions de GES en s'inscrivant dans une démarche plus durable. Il s'agit donc d'une réforme ambitieuse qui introduit notamment pour la première fois la prise en compte de l'impact carbone grâce à la méthode de l'analyse de cycle de vie. Concernant ces exigences, on peut identifier deux catégories :

- Exigences de moyens : Elles sont basées sur des critères techniques et des méthodes de calculs spécifiques et définissent les caractéristiques qu'un bâtiment doit posséder afin d'être conforme à la réglementation
- Exigences de résultats : Elles se concentrent sur l'évaluation des performances réelles du bâtiment lors de sa construction et en période d'exploitation. Il s'agit donc de performances globales que le bâtiment doit atteindre qui sont évaluées à travers 6 indicateurs (Bbio, Cep, Cep,nr, DH, $I_{c_{construction}}$, $I_{c_{énergie}}$).

Ainsi, lors de ce travail, on a pu étudier les défis et les opportunités auxquels devront faire face les entreprises de construction générales comme EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES dans le cadre de l'entrée en vigueur de la nouvelle réglementation environnementale 2020 (RE 2020).

L'étude s'est initialement concentrée sur l'analyse des implications de la réglementation environnementale RE 2020, en examinant ses exigences et ses impacts sur la conception, la construction et l'exploitation des bâtiments tertiaires à usage de bureau. Il a été clairement démontré que la RE 2020 introduit des contraintes importantes en matière de performance énergétique et environnementale, ainsi que des attentes élevées en termes d'empreinte carbone et de réduction des émissions de carbone.

Par la suite, une analyse approfondie a été menée sur divers leviers ainsi que sur leurs incidences sur les indicateurs de la réglementation environnementale 2020 (RE 2020). Cette étude a révélé une variété de facteurs qui influencent l'ensemble du bâtiment (incluant son enveloppe, sa structure, ses systèmes énergétiques, ainsi que les produits de construction utilisés, entre autres). Étant donné l'interdépendance des indicateurs réglementaires, il est impératif d'exercer une grande prudence lors de la mise en œuvre des leviers identifiés, en veillant à évaluer l'impact global sur le projet afin de garantir sa conformité. En tant qu'entreprise générale de construction, EIFFAGE CONSTRUCTION CONFLUENCES dispose de moyens modérés pour influencer la conformité réglementaire des projets. Une étude préliminaire approfondie de la conception du bâtiment revêt une importance capitale pour garantir la conformité du projet à venir avec la mise en œuvre ultérieure des leviers disponibles pour une entreprise générale de construction.

À travers l'analyse détaillée des différentes variantes du projet « AREA », ce TFE a mis en évidence la complexité et les compromis inhérents à l'atteinte de la conformité aux exigences réglementaires et environnementales. Il en ressort également qu'avec une approche holistique il est possible pour une entreprise de construction générale d'agir avec les leviers qui sont à sa disposition pour s'assurer du respect vis-à-vis de la norme de ces futurs projets. Cependant, l'évolution des exigences de la réglementation va demander de plus en plus la mise en œuvre de procédés innovant et respectueux de l'environnement (béton bas carbone, matériaux de réemploi, matériaux biosourcés, énergies renouvelables).

En conclusion, ce TFE a mis en évidence que l'industrie de la construction est confrontée à des défis complexes et en constante évolution en matière de durabilité et de conformité réglementaire. Les efforts pour répondre à ces défis nécessitent une approche intégrée, faisant appel à une combinaison de réglementations, de leviers techniques, de matériaux novateurs et de certifications environnementales. Ainsi, la prise en compte de l'ensemble de ces éléments par les entreprises générales de construction permettra d'assurer non seulement la conformité des projets vis-à-vis de la RE 2020 mais participera également à la construction d'un avenir plus durable, économe en énergie et respectueux de l'environnement.

4. Références bibliographiques

- [1] « Publication du 6e rapport de synthèse du GIEC ». Ministères Écologie Énergie Territoires, <https://www.ecologie.gouv.fr/publication-du-6e-rapport-synthese-du-giec>. Consulté le 9 juillet 2023.
- [2] Thoreau, Henry David. *La moelle de la vie: 500 aphorismes*. Traduit par Thierry Gillyboeuf, Éd. Mille et une nuits, 2006.
- [3] « Énergie dans les bâtiments ». *Ministères Écologie Énergie Territoires*, <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>. Consulté le 9 juillet 2023.
- [4] Article 1, LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, DEVX0811607L
- [5] « Énergie dans les bâtiments ». *Ministères Écologie Énergie Territoires*, <https://www.ecologie.gouv.fr/energie-dans-batiments>. Consulté le 9 juillet 2023.
- [6] « Réglementation environnementale RE2020 ». *Ministères Écologie Énergie Territoires*, <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-environnementale-re2020>. Consulté le 10 juillet 2023.
- [7] « Historique des Réglementations Thermiques ». Bureau d'études thermiques RT2012 en ligne, <https://www.e-rt2012.fr/explications/generalites/precedentes-reglementations-thermiques/>. Consulté le 9 juillet 2023.
- [8] Bâtiment (CTB), Cahiers Techniques du. REGLEMENTATION RT 2000 : ce qui va changer en 2003 - Cahiers Techniques du Bâtiment (CTB). Mai 2003, <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/reglementation-rt-2000-ce-qui-va-changer-en-2003.31330>.
- [9] « Réglementation thermique RT2012 ». Ministères Écologie Énergie Territoires, <https://www.ecologie.gouv.fr/reglementation-thermique-rt2012>. Consulté le 9 juillet 2023.
- [10] Article R112-2 du Code de l'urbanisme
- [11] Article 12, JO n°1 du 1er Janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>
- [12] Article 14, JO n°1 du 1er Janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>
- [13] Article 7, JO n°1 du 1er Janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>
- [14] Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer et Ministère du logement et de l'habitat durable, Octobre 2016, Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs, <http://www.batiment-energiecarbone.fr/IMG/pdf/referentiel-energie-carbone-niveau-de-performance-2016-10.pdf>
- [15] Myriam BAHAR, Cours de développement durable, ENTPE, 2023
- [16] Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer et Ministère du logement et de l'habitat durable, « Méthode d'évaluation de la performance énergétique et environnementale des bâtiments neufs », 2016, <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-27814-referentiel-label-energie-carbone-methode.pdf>
- [17] Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>
- [18] Groupe d'experts transversaux, « GE11 - Surfaces de référence », 2019, ge11_surfaces_de_re_fe_rence_rapport_final.pdf.
- [19] Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>
- [20] Articles R. 147-5 à R. 147-11 du Code de l'urbanisme

- [21] Annexe 2, Décret n°2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043877196>
- [22] « Vizcab, solutions pour la transition environnementale du bâtiment ». Vizcab, <https://vizcab.io/>. Consulté le 10 juillet 2023.
- [23] Article 21, Arrêté du 4 août 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine et portant approbation de la méthode de calcul prévue à l'article R. 172-6 du code de la construction et de l'habitation, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043936431>
- [25] Article 15, JO n°1 du 1er Janvier 2013, <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000026871753>
- [26] A. Boursas et Z. Mehri, Etude de l'impact de la compacité du bâtiment sur la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel, Université de Constantine, 2012
- [27] Verbeke, Stijn, et Amaryllis Audenaert. « Thermal Inertia in Buildings: A Review of Impacts across Climate and Building Use ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, février 2018, p. 2300-18, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.083>.
- [28] T. Catalina, J. Virogne, JJ. Roux et E. Blanco, Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation, 2009
- [29] Ademe, Guide – Confort d'été, 2011, <https://www.saint-etienne.fr/sites/default/files/Guide%20ADEME%20-%20Le%20confort%20d'%C3%A9t%C3%A9.pdf>
- [30] Su, Shu, et al. « How Can Energy Saving Culture of a Company Influence Energy Behaviors and Consumptions in Its Offices? A Simulation and Optimization Model ». *Journal of Building Engineering*, vol. 58, octobre 2022, p. 105011, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105011>.
- [31] Système DRV | Guide Bâtiment Durable. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/systeme-drv>. Consulté le 6 juillet 2023.
- [32] Oury, Nadège. « Les chiffres clés 2022 ». Inies, 24 novembre 2022, <https://www.inies.fr/les-chiffres-cles-2022/>.
- [33] « Labels et certifications en exploitation, l'embarras du choix ». *Workplace Magazine*, <https://workplacemagazine.fr/immobilier/3865/labels-et-certifications-en-exploitation-l-embarras-du-choix>. Consulté le 23 août 2023.
- [34] « Content - Green Soluce - Communication ». Green Soluce, <https://www.greensoluce.com/content/>. Consulté le 23 août 2023.
- [35] Bureaux : les bâtiments les plus certifiés. <https://www.alterea.fr/le-lab/bureaux-batiments-les-plus-certifies>. Consulté le 23 août 2023.

Annexes

Annexe 1 : Coefficients de modulation de l'exigence $B_{bio_{max}}$

Exigence $B_{bio_{maxmoyen}}$ pour les bâtiments tertiaires

Bureaux	95 points
Enseignement primaire et secondaire	68 points

Coefficient $M_{b_{geo}}$ concernant les bureaux

Zone climatique Altitude	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
< 400m	0,05	0,10	0,20	-0,05	0	0,10	0,30	0,25
400m-800m	0,25	0,25	0,20	0,20	0,20	0,10	0,10	-0,05
>800m	0,45	0,45	0,40	0,40	0,35	0,25	0,30	0,10

Coefficient $M_{b_{surftot}}$ concernant les bureaux

Surface du bâtiment	Mbsurf tot		
	Année à laquelle la demande de permis de construire ou la déclaration préalable est déposée :		
	Années 2022 à 2024	Années 2025 à 2027	À partir de l'année 2028
$S_{ref} \leq 500 \text{ m}^2$	$\frac{24 - 0,06 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{24 - 0,06 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{24 - 0,06 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$
$500 \text{ m}^2 < S_{ref} \leq 4000 \text{ m}^2$	$\frac{-5,55 - 0,0009 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{-4,9 - 0,0022 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{-3,8 - 0,0044 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$
$4000 \text{ m}^2 < S_{ref} \leq 10000 \text{ m}^2$	$\frac{-5,55 - 0,0009 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{-9,7 - 0,001 * S_{ref}}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{-21,4}{B_{bio_maxmoyen}}$
$S_{ref} > 10000 \text{ m}^2$	$\frac{-14,55}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{-19,7}{B_{bio_maxmoyen}}$	$\frac{-21,4}{B_{bio_maxmoyen}}$

Source : Décret n° 2022-305, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045288020>

Annexe 2 : Coefficients de modulation des exigences Cep_{max} , Cep, nr_{max} , $Ic_{\text{énergie}}$

Exigence $Cep_{maxmoyen}$ concernant les bâtiments tertiaires

Bureaux	85 kWhep/(m ² .an)
Enseignement primaire	72 kWhep/(m ² .an)
Enseignement secondaire	72 kWhep/(m ² .an)

Exigence $Cep, nr_{maxmoyen}$ concernant les bureaux

Bureaux	75 kWhep/(m ² .an)
---------	-------------------------------

Exigence $Ic_{\text{énergie}_maxmoyen}$ concernant les bâtiments tertiaires

Usage de la partie de bâtiment et énergie utilisée	Valeur de $Ic_{\text{énergie}_maxmoyen}$		
	Année 2022 à 2024	Années 2025 à 2027	À partir de l'année 2028
Bureaux raccordés à un réseau de chaleur urbain	280 kg éq. CO ₂ /m ²	200 kg éq. CO ₂ /m ²	200 kg éq. CO ₂ /m ²
Bureaux - autres cas	200 kg éq. CO ₂ /m ²	200 kg éq. CO ₂ /m ²	200 kg éq. CO ₂ /m ²
Enseignement primaire ou secondaire raccordés à un réseau de chaleur urbain	240 kg éq. CO ₂ /m ²	200 kg éq. CO ₂ /m ²	140 kg éq. CO ₂ /m ²
Enseignement primaire ou secondaire - autres cas	240 kg éq. CO ₂ /m ²	140 kg éq. CO ₂ /m ²	140 kg éq. CO ₂ /m ²

Coefficient $M_{C_{geo}}$ concernant les bureaux

Zone climatique Altitude	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
< 400m	0,05	0,10	0,10	0	0	0	0,15	0,15
400m-800m	0,20	0,25	0,20	0,15	0,15	0,05	0,10	-0,05
>800m	0,35	0,40	0,35	0,35	0,30	0,20	0,25	0,10

Coefficient $M_{C_{surf\text{tot}}}$ concernant les bureaux

Surface du bâtiment	$M_{C_{surf\text{tot}}}$
$S_{ref} \leq 500 \text{ m}^2$	$\frac{12,5 - 0,025 * S_{ref}}{Cep, nr_{maxmoyen}}$
$S_{ref} > 500 \text{ m}^2$	0

Source : Décret n° 2022-305, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045288020>

Annexe 3 : Coefficients de modulation de l'exigence $I_{c_{\text{construction_max}}}$

Exigence $I_{c_{\text{construction_maxmoyen}}}$ concernant les bâtiments tertiaires

Usage de la partie de bâtiment	Valeur de $I_{c_{\text{construction_maxmoyen}}}$			
	Années 2022 à 2024	Années 2025 à 2027	Années 2028 à 2030	À partir de l'année 2031
Bureaux	980 kg éq. CO ₂ /m ²	810 kg éq. CO ₂ /m ²	710 kg éq. CO ₂ /m ²	600 kg éq. CO ₂ /m ²
Enseignement primaire ou secondaire	900 kg éq. CO ₂ /m ²	770 kg éq. CO ₂ /m ²	680 kg éq. CO ₂ /m ²	590 kg éq. CO ₂ /m ²

Coefficient Mi_{combles} concernant les bureaux

Surface de référence du bâtiment	Misurf
Si $S_{ref} \leq 2500 \text{ m}^2$	$0,034 - \frac{0,86 \times S_{ref}}{10000}$
Si $S_{ref} \geq 2500 \text{ m}^2$	-0,181

Coefficient Mi_{vrd} concernant les bureaux

Valeur de $I_{c_{lot1}}$	Mivrd
Si $I_{c_{lot1}} \leq 10 \text{ kg éq. CO}_2/\text{m}^2$	0
Si $I_{c_{lot1}} > 10 \text{ kg éq. CO}_2/\text{m}^2$	$I_{c_{lot1}} - 10$

Coefficient Mi_{infra} concernant les bureaux

Valeur de $I_{c_{lot2}}$	Miinfra
Si $I_{c_{lot2}} \leq 40 \text{ kg éq. CO}_2/\text{m}^2$	0
Si $I_{c_{lot2}} > 40 \text{ kg éq. CO}_2/\text{m}^2$	$I_{c_{lot2}} - 40$

Coefficient Mi_{ded} concernant les bureaux

Valeur de $I_{c_{ded}}$	Mided		
	Année à laquelle la demande de permis de construire ou la déclaration préalable est déposée :		
	Années 2022 à 2024	Années 2025 à 2027	À partir de l'année 2028
Si $I_{c_{ded}} \leq 275 \text{ kg éq. CO}_2/\text{m}^2$	0	0	0
Si $I_{c_{ded}} > 275 \text{ kg éq. CO}_2/\text{m}^2$	$0,3 \times (I_{c_{ded}} - 275)$	0	$-0,3 \times (I_{c_{ded}} - 275)$

Coefficient Mi_{geo} concernant les bureaux

Zone climatique Altitude	H1a	H1b	H1c	H2a	H2b	H2c	H2d	H3
	< 400m	0	0	0	0	0	0	50 kg éq. CO ₂ /m ²
≥ 400m	0	0	0	0	0	0	0	0

Source : Décret n° 2022-305, <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045288020>

Annexe 4 : Exigences en termes d'isolation d'enveloppe de la RT 2012

Résistances thermiques minimales selon la RT 2012

Type de paroi opaque	Résistance thermique minimale R de l'ensemble paroi + isolant en m ² .K / W		
	zone climatique H1	zone climatique H2 (H3 à plus de 800 m d'altitude)	Zone climatique H3 (à moins de 800 m d'altitude)
Mur extérieur, toiture de pente > 60 °	2,9	2,9	2,2
Mur en contact avec un volume non chauffé	2	2	2
Plancher bas donnant sur l'extérieur ou sur un local non chauffé	2,7 *	2,7	2,1
Planchers de combles perdus	4,8	4,8	4,8
Toiture de pente < 60 °	4,4 **	4,3	4
Toiture terrasse	3,3 ***	3,3 ***	3,3 ***

* R = 2,1 possible pour adapter l'épaisseur d'isolant nécessaire à la hauteur libre disponible si celle-ci est limitée par une autre exigence réglementaire.

** R = 4 possible si la diminution de surface habitable est supérieure à 5% en raison de l'épaisseur de l'isolant.

*** R = 3 possible dans les cas suivants :

- l'épaisseur d'isolation implique un changement des huisseries, ou un relèvement des garde-corps ou des équipements techniques,
- ou l'épaisseur d'isolation ne permet plus le respect des hauteurs minimales d'évacuation des eaux pluviales et des relevés,
- ou l'épaisseur d'isolation et le type d'isolant utilisé implique un dépassement des limites de charges admissibles de la structure.

Source : ADEME, <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/1954/fiche-travaux-renovation-logement-reglementation-thermique.pdf>

Annexe 5 : Configurations des enveloppes des bâtiments A et B

Configurations de l'enveloppe du bâtiment A

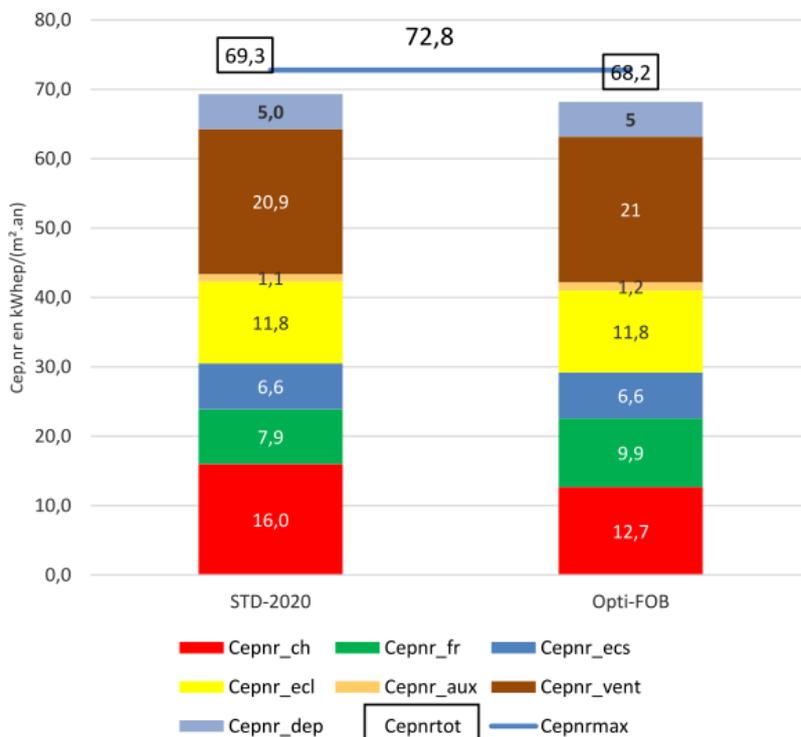
Configuration	STD-2020	Opti-FOB
Murs extérieurs	Béton banché + ITI par 14 cm (R= 5 m ² .K/W)	Façade à ossature bois 14 cm entre montant + 8 cm intérieur (R=6 m ² .K/W)
Planchers intermédiaires	Plancher Béton + Rupteurs thermiques / Planelles (L9=0,6 W/m.K)	Traitement par le mur ossature bois (L9=0,17 W/m.K)
Planchers bas	15 cm de flocage sous dalle (R=4,5 m ² .K/W) + Sous chape 4,8 cm (R=2,2 m ² .K/W)	15 cm de flocage sous dalle (R=4,5 m ² .K/W) + Sous chape 4,8 cm (R=2,2 m ² .K/W)
Toiture terrasse	18 cm (R=8,2 m ² .K/W) Dalles béton + 12 cm (R=5,45 m ² .K/W)	20 cm (R=8,2 m ² .K/W) Dalles béton + 12 cm (R=5,45 m ² .K/W)
Perméabilité à l'air	1 m ³ /h.m ²	1 m ³ /h.m ²
Fenêtres, portes fenêtres	Uw = 1,4 W/K.m ² Sw = 0,45 TI = 0,55	Uw = 1,3 W/K.m ² Sw = 0,45 TI = 0,58

Configurations de l'enveloppe du bâtiment B

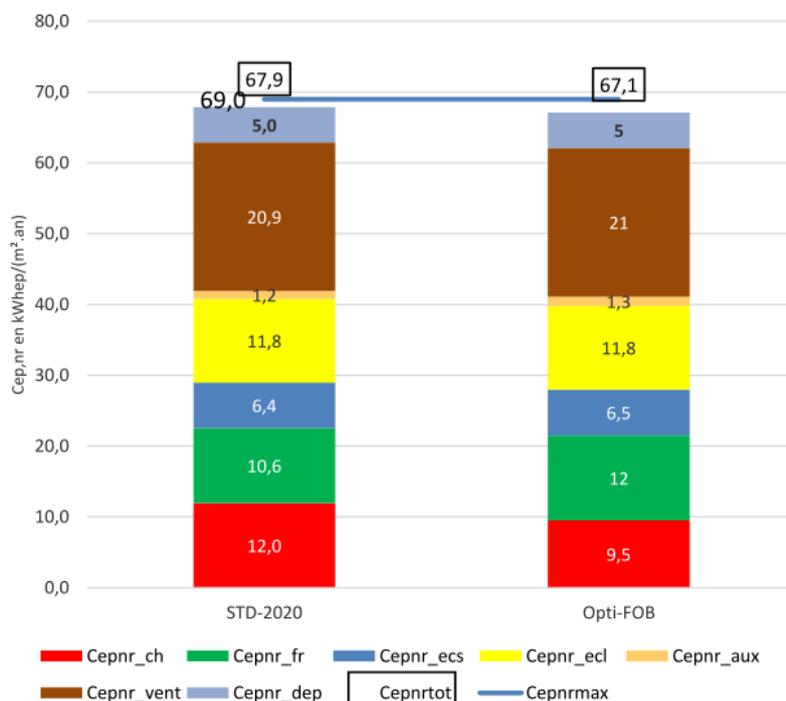
Configuration	STD-2020	Opti-FOB
Murs extérieurs	Béton banché + ITI par 14 cm (R= 4.35 m ² .K/W)	Façade à ossature bois 14 cm entre montant + 8 cm intérieur (R=6 m ² .K/W)
Planchers intermédiaires	Plancher Béton	Traitement par le mur ossature bois (L9=0,17 W/m.K)
Planchers bas	15 cm de flocage sous dalle (R=4,2 m ² .K/W) + Sous chape 4,8 cm (R=2,2 m ² .K/W)	15 cm de flocage sous dalle (R=4,2 m ² .K/W) + Sous chape 5.6 cm (R=2,6 m ² .K/W)
Toiture terrasse	18 cm (R=8,2 m ² .K/W) Dalles béton + 12 cm (R=5,45 m ² .K/W)	Idem STD-2020
Perméabilité à l'air	1.7 m ³ /h.m ²	1 m ³ /h.m ²
Fenêtres, portes fenêtres	Uw = 1,6 W/K.m ² Sw = 0,48 TI = 0,6	Uw = 1,5 W/K.m ² Sw = 0,48 TI = 0,6

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

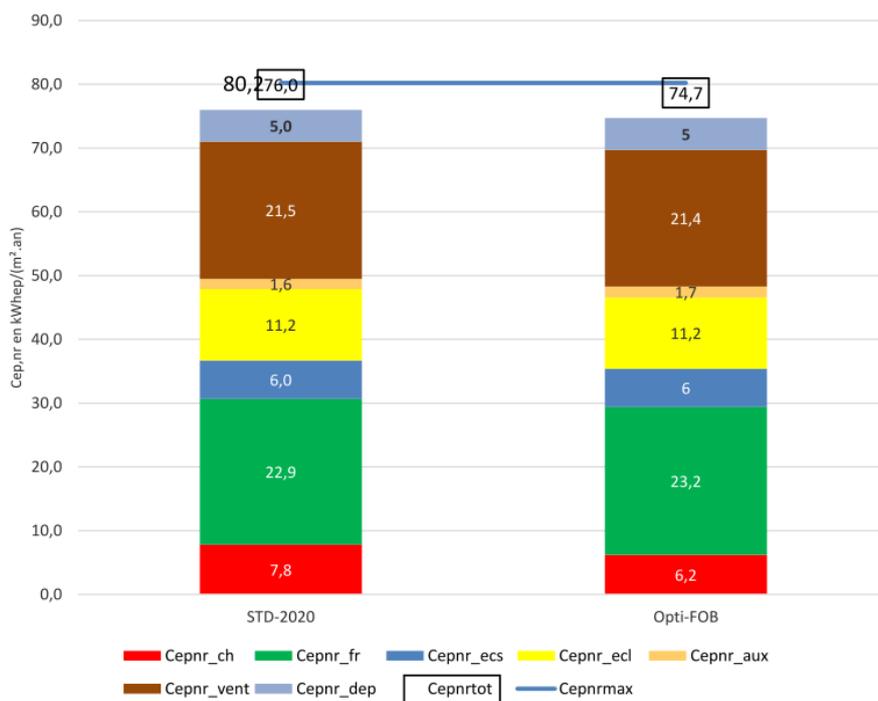
Annexe 6 : Etude de l'influence de l'isolation sur la consommation en énergie primaire non renouvelable



Consommation en énergie primaire non renouvelable zone H1a en fonction de la configuration



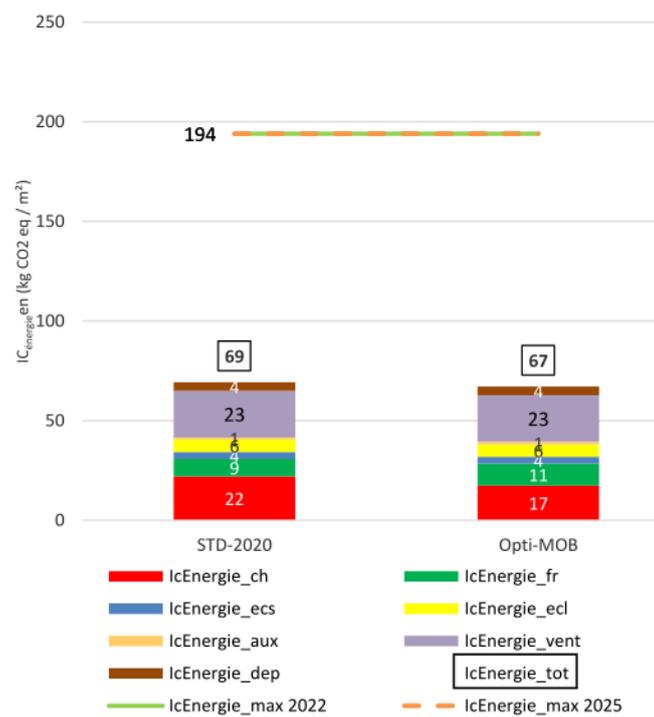
Consommation en énergie primaire non renouvelable zone H2b en fonction de la configuration



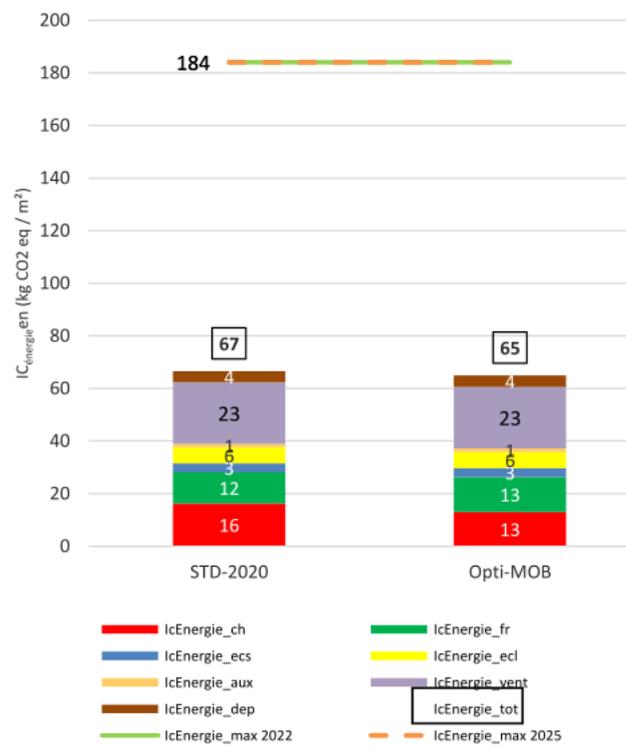
Consommation en énergie primaire non renouvelable zone H3 en fonction de la configuration

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

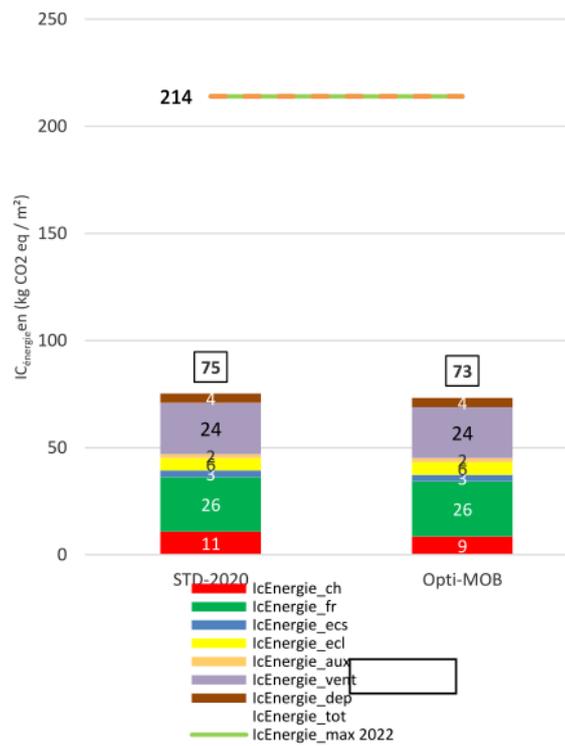
Annexe 7 : Etude de l'influence de l'isolation sur l'indicateur $I_{c_{\text{énergie}}}$



Emissions de CO2 associées aux consommations zone H1a en fonction de la configuration



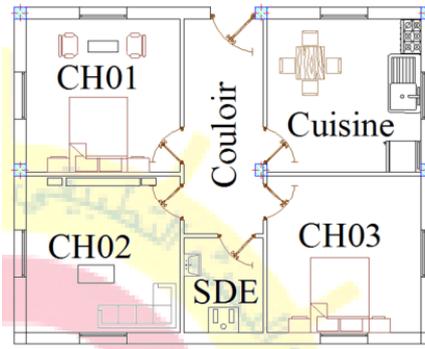
Emissions de CO2 associées aux consommations zone H1a en fonction de la configuration



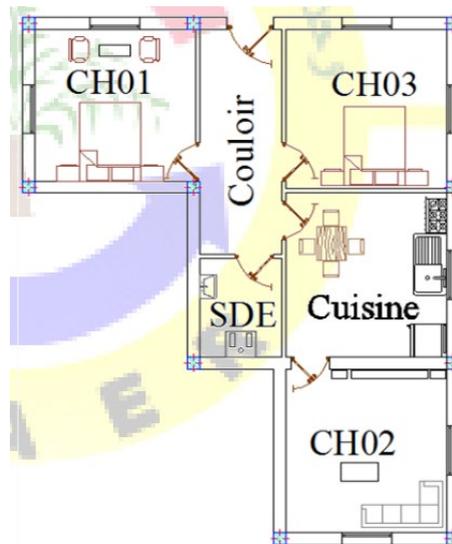
Emissions de CO2 associées aux consommations zone H3 en fonction de la configuration

Source : Malette AICVF, <https://aicvf.org/comite-technique/outils-re2020/>

Annexe 8 : Plans généraux des bâtiments 1,2 et 3

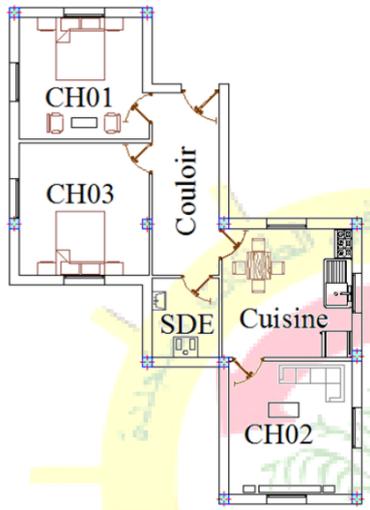


Plan général du bâtiment pour le cas 1⁵²



Plan général du bâtiment pour le cas 2

⁵² A. Boursas et Z. Mehri, Etude de l'impact de la compacité du bâtiment sur la performance énergétique d'un bâtiment résidentiel, Université de Constantine, 2012



Plan général du bâtiment pour le cas 3

Annexe 9 : Analyse des données environnementales concernant les lots sols souples, sols durs et faux plafonds

Lot	Projet	Source	Fabricant	Utilisation	Type	Total cycle de vie (kgCO2eq)	Unité
Faux-plafonds	Karré 1	EXE	Ecophon	Dalle de faux-plafond démontable en laine de verre avec armatures cachées	FDES	5,28	m ²
	Karré 1	CCTP	Rockfon	Dalle de faux-plafond démontable en laine minérale avec armatures cachées	FDES	3,58	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Placo	Plaque de plâtre perforée	FDES	3,18	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Placo	Plaque de plâtre perforée	FDES	3,33	m ²
	Karré 1	EXE	Knauf	Dalle de faux-plafond démontable en laine minérale type Welt-Felt avec armatures en T	DED	10,8	m ²
	Karré 1	CCTP	Rockfon	Dalle de faux-plafond démontable en laine minérale avec armatures en T	FDES	3,58	m ²
	JDL	EXE	Armstrong	Dalle de faux-plafond démontable en laine minérale avec armature en T	DED	14,7	m ²
	JDL	CCTP	Rockfon	Dalle de faux-plafond démontable en fibres minérales avec armatures en T	DED	19,3	m ²
	OIC	EXE	Rockfon	Dalle de faux-plafond démontable en fibres minérales avec armatures en T	FDES	2,23	m ²
	OIC	CCTP	Armstrong	Dalle de faux-plafond démontable en fibres minérales avec armatures en T	DED	19,3	m ²
Karré 1	EXE/CCTP	Rockfon	Dalle de faux-plafond démontable en laine minérale avec armatures en T	DED	10,6	m ²	
Sols durs	Karré 1	EXE/CCTP	Floorgres	Grès cérame décoratif mat Dimension : 30x60/60x60/60x120 cm	DED	58,6	m ²
	Karré 1	EXE	Floorgres	Plinthes 4,6 x 60 cm	DED	6,73	ml
	Karré 1	CCTP	Floorgres	Plinthes droites de 30/60x10 cm ht	DED	6,73	ml
	Karré 1	EXE/CCTP	Casalgrande	Grès cérame antidérapant B classement U3P3 20 x 20 cm	DED	58,6	m ²
	Karré 2	EXE/CCTP	Casalgrande	Plinthe droite de 10 x 20 cm	DED	6,73	ml
	Karré 1	EXE/CCTP	Floorgres	Grès cérame mural décoratif mat - Dimension : 30x60 cm	DED	25,8	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Novoceram	Carrelage en grès cérame 20 x 20 antidérapant	FDES	20,8	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Novoceram	Plinthes à gorge	DED	6,73	ml
	Karré 1	EXE/CCTP	Casalgrande	Grès cérame antidérapant R11 classement U4P3 20 x 20 cm	DED	58,6	m ²
	Karré 1	EXE/CCTP	Casalgrande	Plinthes à gorge de 20x10 cm ht	DED	6,73	ml
	Karré 1	EXE/CCTP	-	Grès cérame mural - Dimension 20 x 20 cm	DED	25,8	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Novoceram	Carrelage en grès cérame scellé antidérapant 20x20	FDES	20,8	m ²
OIC	EXE/CCTP	Novoceram	Plinthes à talons grès cérame - L : 20cm ; Ht : 8cm	DED	6,73	ml	

	OIC	EXE/CCTP	Novoceram	Revêtement mural en grès cérame 20x20	DED	25,8	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Cinca	Faïence grès cérame 20 x 20 revêtement mural	DED	32,8	m ²
	Karré 1	EXE/CCTP	Floorgres	Grès cérame décoratif mat classment U4P3 30 x 60 cm / 60 x 60 cm	DED	58,6	m ²
	Karré 1	EXE	Floorgres	Plinthes 4,6 x 60 cm	DED	6,73	ml
	Karré 1	CCTP	Floorgres	Plinthes droites de 30/60x10 cm ht	DED	6,73	ml
	OIC	EXE/CCTP	Novoceram	Carrelage grès cérame 45 x 45 cm	FDES	20,8	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Novoceram	Plinthes droites grès cérame - L : 45cm ; Ht : 7cm	DED	4,82	ml
	OIC	EXE/CCTP	Novoceram	Revêtement mural en grès cérame 30x60	DED	25,8	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Novoceram	Carrelage en grès cérame rectifié 20 x 20	FDES	20,8	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Atlas Concorde	Grès cérame décoratif mat 60 x 60 cm	FDES	28,1	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Atlas Concorde	Plinthes droites	DED	6,73	ml
	JDL	EXE	Atlas Concorde	Faïences 45 x 90 cm	DED	25,8	m ²
	JDL	CCTP	Atlas Concorde	Faïence 45 x 90 cm	DED	25,8	m ²
Sols souples	Karré 1	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	Karré 1	CCTP	Desso	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	Karré 1	CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	Karré 1	CCTP	Interface	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	9,24	m ²
	Karré 1	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	21,1	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Interface	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	7,84	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	19,1	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	JDL	EXE/CCTP	Balsan	Revêtements textiles en dalles de moquette	FDES COL	13,2	m ²
	OIC	EXE/CCTP	Shaw Contract	Revêtement vinyl	FDES COL	19,6	m ²
OIC	EXE/CCTP	Forbo	Revêtement vinyl	FDES COL	17,6	m ²	

Annexe 10 : Modification dans le référencement des produits

- ♦ Pour le béton :

	Produit de construction	Type de déclaration	Impact (kg.CO2 eq/m ²)	% I _{construction} PCE (RE2020)
Base	Béton classique avec fiche collective par typologie d'usage	FDES collective	91.2	20%
Variante	Béton bas Carbone réduisant de 20% l'impact carbone (y compris acier)	FDES individuelle	37.8	15,9%

- ♦ Pour le bardage :

	Produit de construction	Type de déclaration	Impact (kg.CO2 eq/m ²)	% I _{construction} PCE (RE2020)
Base	Bardage en aluminium simple peau [ép. 1 mm] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT	Données environnementales par défaut	91.2	8,7%
Variante	Panneau composite en aluminium	FDES individuelle	37.8	3,6%

Référence couverte : Produits Alucobond

- ♦ Pour les moquettes :

	Produit de construction	Type de déclaration	Impact (kg.CO2 eq/m ²)	% I _{construction} PCE (RE2020)
Base	Moquettes touffetées en dalles plombantes amovibles à velours 100% polyamide et de masse de velours totale inférieure à 750 g/m ²	FDES collective	13.3	6,64 %
Variante	COLOR SCALE – GREY MATTERS, moquettes touffetées en dalles/lames	FDES individuelle	8.2	2,5 %

Fiche similaire à la gamme METROPOLITAN de BALSAN, mentionnée dans la notice.

- ♦ Pour les menuiseries :

	Produit de construction	Type de déclaration	Impact (kg.CO2 eq/m ²)	% I _{construction} PCE (RE2020)
Base	Fenêtres en aluminium - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT	Données environnementales par défaut	231	5,9 %
Variante	Fenêtre 2 vantaux en profilés aluminium ≤ 2,3 m ²	FDES collective	96.4	2,4 %

Cette fiche collective couvre 1000 référence commerciale chez les membres de la SNFA

- ♦ Pour les planchers techniques :

	Produit de construction	Type de déclaration	Impact (kg.CO2 eq/m ²)	% I _{construction} PCE (RE2020)
Base	Plancher technique surélevé non revêtu MDF [Ep. 38 mm] [Gestion durable] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT	Données environnementales par défaut	72.9	4,8 %
Variante	Plancher technique surélevé non revêtu de 30mm, monté sur vérins acier de 100mm	FDES individuelle	23.4	1,54 %

Cette fiche correspond au plancher Burobox de GAMA industrie, marque recommandée dans la notice.

- ♦ Pour les ascenseurs

	Produit de construction	Type de déclaration	Impact (kg.CO2 eq)	% I _{Construction} PCE (RE2020)
Base	Éléments d'ascenseur ou monte-charge DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAUT (4 fiches)	Données environnementales par défaut	121 675	4,2 %
Variante	Ascenseurs Schindler (2 fiches)	FDES individuelle	30 697	1,1 %

Références : Schindler 1000, Schindler 3000

Annexe 11 : Réalisation du dimensionnement des installations photovoltaïques pour le cas où 100 % de la surface exploitable est utilisée

Paramètres de simulation		Champ PV		Résultats principaux					
Projet	AREA_sud	Modules PV	LR4-60 HPH 385 M G2	Onduleur	SUN2000-100KTL-M1-480Vac	Production du système	36.6 MWh/an	Prod. normalisée	3.77 kWh/kWc/jour
Site	Jonage	Puissance nominale	26.6 kWc	Puiss. nom. ond.	100.0 kW	Productible	1378 kWh/kWc/an	Pertes champ	0.40 kWh/kWc/jour
Type système	Couplé au réseau	Tension MPP	34.4 V	Nb. d'entrées MPPT	3	Indice de performance	0.892	Pertes système	0.06 kWh/kWc/jour
Simulation	01/01 au 31/12 (Données météo génériques)	Courant MPP	11.2 A						

Simulation de la zone de 130 m² orientée sud

Paramètres de simulation		Champ PV		Résultats principaux					
Projet	AREA	Modules PV	LR4-60 HPH 385 M G2	Onduleur	SUN2000-100KTL-M1-480Vac	Production du système	63.7 MWh/an	Prod. normalisée	3.78 kWh/kWc/jour
Site	Jonage	Puissance nominale	46.2 kWc	Puiss. nom. ond.	100.0 kW	Productible	1379 kWh/kWc/an	Pertes champ	0.40 kWh/kWc/jour
Type système	Couplé au réseau	Tension MPP	34.4 V	Nb. d'entrées MPPT	5	Indice de performance	0.891	Pertes système	0.06 kWh/kWc/jour
Simulation	01/01 au 31/12 (Données météo génériques)	Courant MPP	11.2 A						

Simulation de la zone de 250 m² orientée sud

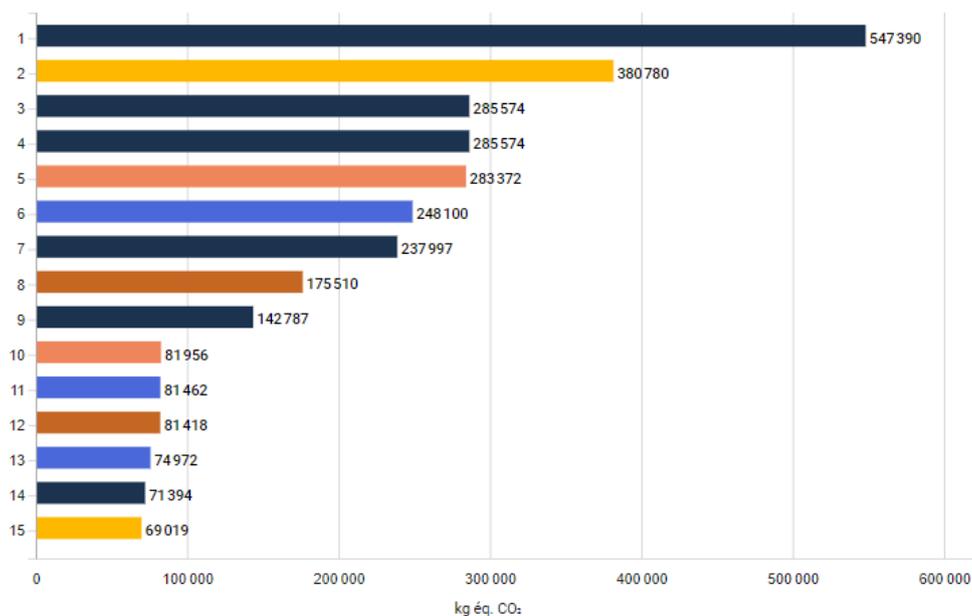
Paramètres de simulation		Champ PV		Résultats principaux					
Projet	AREA	Modules PV	LR4-60 HPH 385 M G2	Onduleur	SUN2000-100KTL-M1-480Vac	Production du système	50.4 MWh/an	Prod. normalisée	3.74 kWh/kWc/jour
Site	Jonage	Puissance nominale	37.0 kWc	Puiss. nom. ond.	100.0 kW	Productible	1364 kWh/kWc/an	Pertes champ	0.40 kWh/kWc/jour
Type système	Couplé au réseau	Tension MPP	34.4 V	Nb. d'entrées MPPT	4	Indice de performance	0.890	Pertes système	0.06 kWh/kWc/jour
Simulation	01/01 au 31/12 (Données météo génériques)	Courant MPP	11.2 A						

Simulation de la zone de 190 m² orientée sud-ouest

Paramètres de simulation		Champ PV		Résultats principaux					
Projet	AREA	Modules PV	LR4-60 HPH 385 M G2	Onduleur	SUN2000-100KTL-M1-480Vac	Production du système	37.8 MWh/an	Prod. normalisée	3.74 kWh/kWc/jour
Site	Jonage	Puissance nominale	27.7 kWc	Puiss. nom. ond.	100.0 kW	Productible	1364 kWh/kWc/an	Pertes champ	0.40 kWh/kWc/jour
Type système	Couplé au réseau	Tension MPP	34.4 V	Nb. d'entrées MPPT	3	Indice de performance	0.890	Pertes système	0.06 kWh/kWc/jour
Simulation	01/01 au 31/12 (Données météo génériques)	Courant MPP	11.2 A						

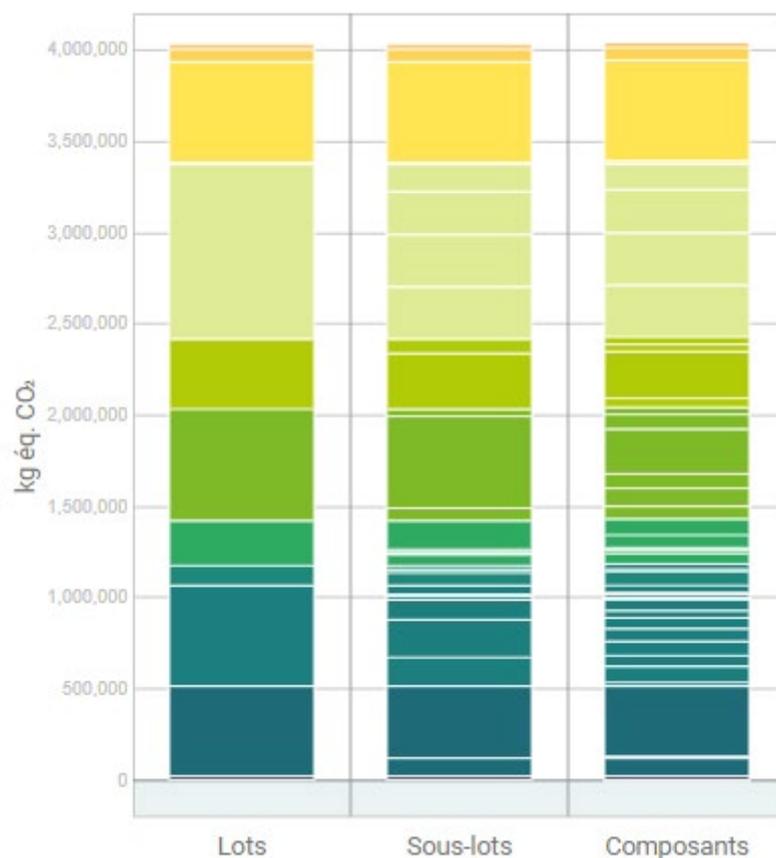
Simulation de la zone de 140 m² orientée sud-ouest

Annexe 12 : Présentation des 15 données environnementales les plus impactantes



1.	[RE2020] Lot forfaitaire – Lot 10 – Bureau – Réseaux d'énergie (courant fort) - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE	Non applicable
2.	C25/30 XC1 D20	Non applicable
3.	[RE2020] Sous-lot forfaitaire – Sous-lot 8.1 – Bureaux – Équipements de production chaud/froid hors cogénération - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE	Non applicable
4.	[RE2020] Sous-lot forfaitaire – Sous-lot 8.3 – Bureau – Systèmes d'émission - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE	Non applicable
5.	Des dalles de moquette touffetées dont le poids total des poils est de 740 g/m ² un matériau de poils en polyamide 6 et un dossier ecoback ou ComfortBackeco	Revêtements de s...
6.	Porte automatique rotative à 3/4 vantaux - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	Non applicable
7.	[RE2020] Sous-lot forfaitaire – Sous-lot 8.4 – Bureau – Traitement de l'air et éléments de désenfumage - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE	Non applicable
8.	FDES ARMATURES SUR CATALOGUE	Non applicable
9.	[RE2020] Sous-lot forfaitaire – Sous-lot 8.5 – Bureau – Réseaux et conduits - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE	Non applicable
10.	Plancher technique surélevé non revêtu de 30mm, monté sur vérins acier de 100mm	Planchers
11.	Murs rideaux et verrières en aluminium - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	Murs rideaux et ve...
12.	Fenêtre 1 vantail en profilés aluminium ≤ 2,3 m ²	Fenêtres / portea f...
13.	Brise soleil en aluminium [profondeur 0,12m] - DONNEE ENVIRONNEMENTALE PAR DEFAULT	Volets / volets roul...
14.	[RE2020] Lot forfaitaire – Lot 11 – Bureau – Réseaux de communication (courant faible) - DONNEE ENVIRONNEMENTALE CONVENTIONNELLE	Non applicable
15.	C25/30 XF1 D10 S4	Non applicable

Annexe 13 : Présentation de la répartition de l'impact carbone en fonction des lots RE 2020



Lot	Impact [kg eq. CO ₂]	Contribution [%]
Lot 1 Voirie et Réseaux divers	17 968	0.4
Lot 2 Fondations et infrastructure	491 329	12.2
Lot 3 Superstructure - Maçonnerie	548 763	13.6
Lot 4 Couverture - Etanchéité - Charpente - Zinguerie	116 854	2.9
Lot 5 Cloisonnement - Doublage - Plafonds suspendus - Menuiseries intérieures	241 518	6
Lot 6 Façades et menuiseries extérieures	614 245	15.2
Lot 7 Revêtements des sols, murs et plafonds - Chape - Peintures - Produit de décoration	384 015	9.5
Lot 8 CVC	951 932	23.6
Lot 9 Installations sanitaires	17 825	0.4
Lot 10 Réseaux énergie - courant fort	547 422	13.6
Lot 11 Réseaux de communication - courant faible	71 550	1.8
Lot 12 Appareils élévateurs et autres équipements de transport intérieur	30 001	0.7

Annexe 14 : Résultats $I_{c\text{construction}}$ après l'amélioration de l'impact carbone du projet



Résultat Vizcab après optimisation de l'impact carbone

Annexe 15 : Résultats RE 2020 de la variante « AREA 2022 » de notre projet

Bâtiment : BUREAUX

Mode Th-BDC (2022.E2.1.0) : 21/08/2023 à 09:45:37

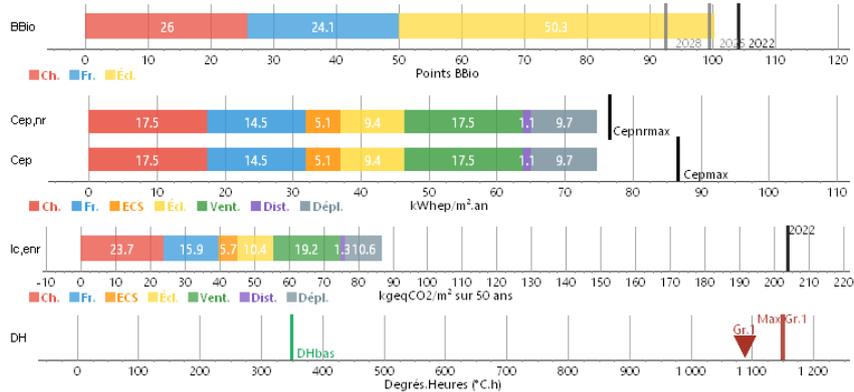
Sref 4727.2 m²

Usage(s) Bureaux (4727.2 m²)



	Valeur de l'indicateur	Exigences	Gain
BBio (points)	100.3	< 104.2	-3.7 %
Cep,nr (kWhep/(m².an))	74.7	< 76.5	-2 %
Cep (kWhep/(m².an))	74.7	< 86.7	-14 %
Ic,énergie (kgeqCO₂/m², 50 ans)	86.8	< 204.0	-57 %
Confort d'été (DH)	DHmax respectée		

Représentation graphique des indicateurs et exigences



Autres indicateurs secondaires

RatioΨ (W/(m².K))	0.17	≤ 0.33
Ψ9 (W/(ml.K))	0.23	≤ 0.60

Résultats ClimaWin 2020 de la variante « AREA 2022 »



Résultat Vizcab de la variante « AREA 2022 »

Annexe 16 : Résultats RE 2020 de la variante « AREA 2025 » de notre projet



Bâtiment : BUREAUX

Mode Th-BDC (2022.E3.0.0) : 21/08/2023 à 11:13:01

Sref 4727.2 m²

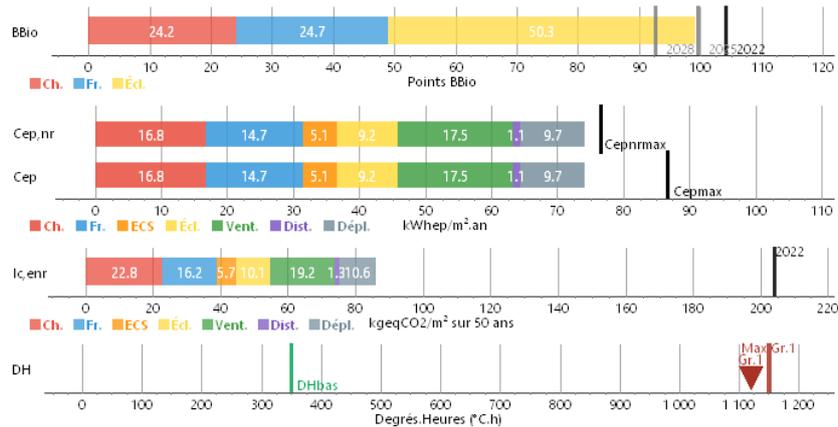
Usage(s)

Bureaux (4727.2 m²)



	Valeur de l'indicateur	Exigences	Gain
BBio (points)	99.2	< 104.2	-4.8 %
Cep,nr (kWhep/(m².an))	74.1	< 76.5	-3 %
Cep (kWhep/(m².an))	74.1	< 86.7	-15 %
Ic,énergie (kgeqCO₂/m², 50 ans)	85.9	< 204.0	-58 %
Confort d'été (DH)	DHmax respectée		

Représentation graphique des indicateurs et exigences



Autres indicateurs secondaires

RatioΨ (W/(m².K))	0.17	≤ 0.33
Ψ9 (W/(m².K))	0.23	≤ 0.60

Résultats ClimaWin 2020 de la variante « AREA 2025 »



Résultat Vizcab de la variante « AREA 2025 »

Annexe 17 : Résultats RE 2020 de la variante « AREA 2025 biosourcé » de notre projet



Bâtiment : BUREAUX

Mode Th-BDC (2022.E3.0.0) : 21/08/2023 à 14:20:00

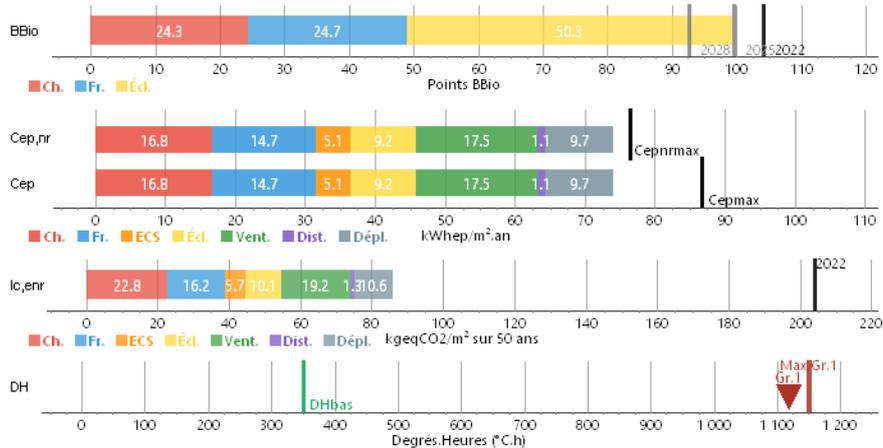
Sref 4727.2 m²

Usage(s) Bureaux (4727.2 m²)



	Valeur de l'indicateur	Exigences	Gain
BBio (points)	99.3	< 104.2	-4.7 %
Cep,nr (kWhep/(m².an))	74.1	< 76.5	-3 %
Cep (kWhep/(m².an))	74.1	< 86.7	-15 %
Ic,énergie (kgeqCO₂/m², 50 ans)	85.9	< 204.0	-58 %
Confort d'été (DH)	DHmax respectée		

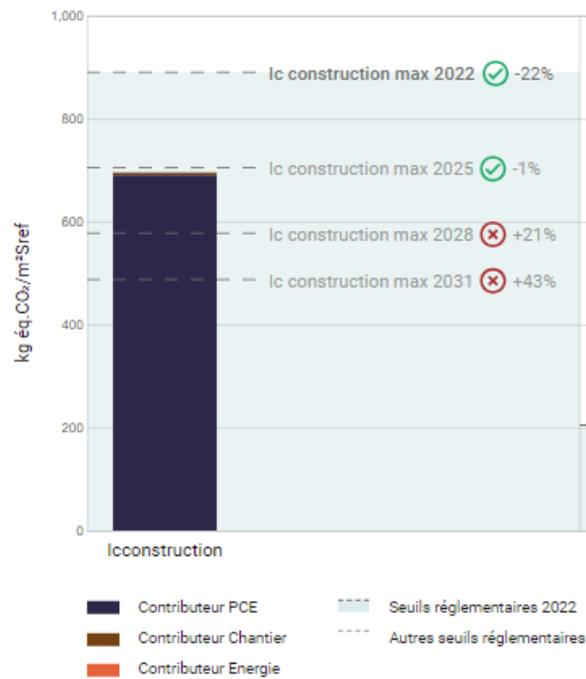
Représentation graphique des indicateurs et exigences



Autres indicateurs secondaires

RatioΨ (W/(m².K))	0.17	≤ 0.33
Ψ9 (W/(m².K))	0.23	≤ 0.60

Résultats ClimaWin 2020 de la variante « AREA 2025 Biosourcée »



Résultat Vizcab de la variante « AREA 2025 Biosourcée »