

r h b
architectes



**ARCHITECTURE
ET SYSTÈMES
CONSTRUCTIFS
FACE AUX ENJEUX
ENVIRONNEMENTAUX**

LE CAS DE L'ÉCOLE DE MUSIQUE ET
PÉRISCOLAIRE DE RŒSCHWOOG

INTRODUCTION

Le dérèglement du climat, actuel et à venir, occupe aujourd'hui une place importante dans la société. La responsabilité avérée des activités anthropiques et la situation d'urgence climatique amène à un besoin de changement global. Les habitudes, exigences et objectifs de chacune de nos activités doivent changer, à la fois sur les plans professionnels et personnels.

Le secteur de la construction comporte de multiples acteurs. Chacun dispose de leviers d'optimisations et de domaines d'expertises, ce qui donne à l'ensemble un fort potentiel d'amélioration du domaine.

Cette transition questionne et anime depuis longtemps les échanges au sein de notre agence. L'accueil d'un projet de fin d'études d'ingénierie au sein de l'agence rhb architectes a été l'occasion de travailler sur ce sujet. Ce PFE a été développé par Colin Perrier, aujourd'hui diplômé architecte et ingénieur en génie thermique, énergétique et environnemental INSA.

A la suite d'un inventaire des solutions possibles, quatre variantes d'un projet de l'agence ont été conçues, modélisées et simulées pour extraire différentes données, inspirées des critères d'évaluation de la RE2020 : impact environnemental, déperditions thermiques, confort d'été et coût de construction.

Ce document est le résumé des enseignements qui ont pu être extraits de ce travail de recherche.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	4
SOMMAIRE	5
CONTEXTE ET ENJEUX	6
SITUATION CLIMATIQUE ACTUELLE	7
LA RESPONSABILITÉ DES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION	8
SITUATION RÉGLEMENTAIRE ACTUELLE	8
AUTRES INDICES ET LABELS	9
OBJET DE L'ÉTUDE	10
MODE OPÉRATOIRE	11
PRÉSENTATION DU PROJET ÉTUDIÉ	12
DESCRIPTION DES QUATRE SYSTÈMES CONSTRUCTIFS	18
ANALYSE DE CYCLE DE VIE	28
PRÉSENTATION DES ENJEUX DE L'ACV	29
HYPOTHÈSES ET MÉTHODES DE CALCUL	29
IMPACT CARBONE	30
IMPACT MASSE CONSTRUITE	37
CONFORT D'ÉTÉ	38
COÛT DE CONSTRUCTION	42
ANALYSES CROISÉES	44
SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	45
CORRÉLATION MASSE / SURCHAUFFE	46
CORRÉLATION COÛT / CARBONE / BIOSOURCÉ	47
EXTRAPOLATION ET CONJECTURES	48
CONCLUSION	50
BIBLIOGRAPHIE	52
LEXIQUE ET REMERCIEMENTS	53

CONTEXTE ET ENJEUX

SITUATION CLIMATIQUE ACTUELLE

Les derniers rapports en date du GIEC annoncent un dérèglement climatique global actuel et pour les décennies à venir. La responsabilité des activités humaines est aujourd'hui confirmée.

Les différents scénarios de projection (basés sur des niveaux de réaction de la population et des gouvernements à court et moyen termes) convergent vers une augmentation

irréversible de 1,5°C à 2°C horizon 2050, ayant de multiples conséquences climatiques (montée du niveau de la mer, augmentation des fréquences et amplitudes des catastrophes climatiques) mais également sanitaires, sociales, politiques, etc.

Toutefois, les plus grandes divergences des scénarios passé 2050 montrent qu'il reste tout à faire et que les clefs de l'avenir climatique sont encore entre nos mains.

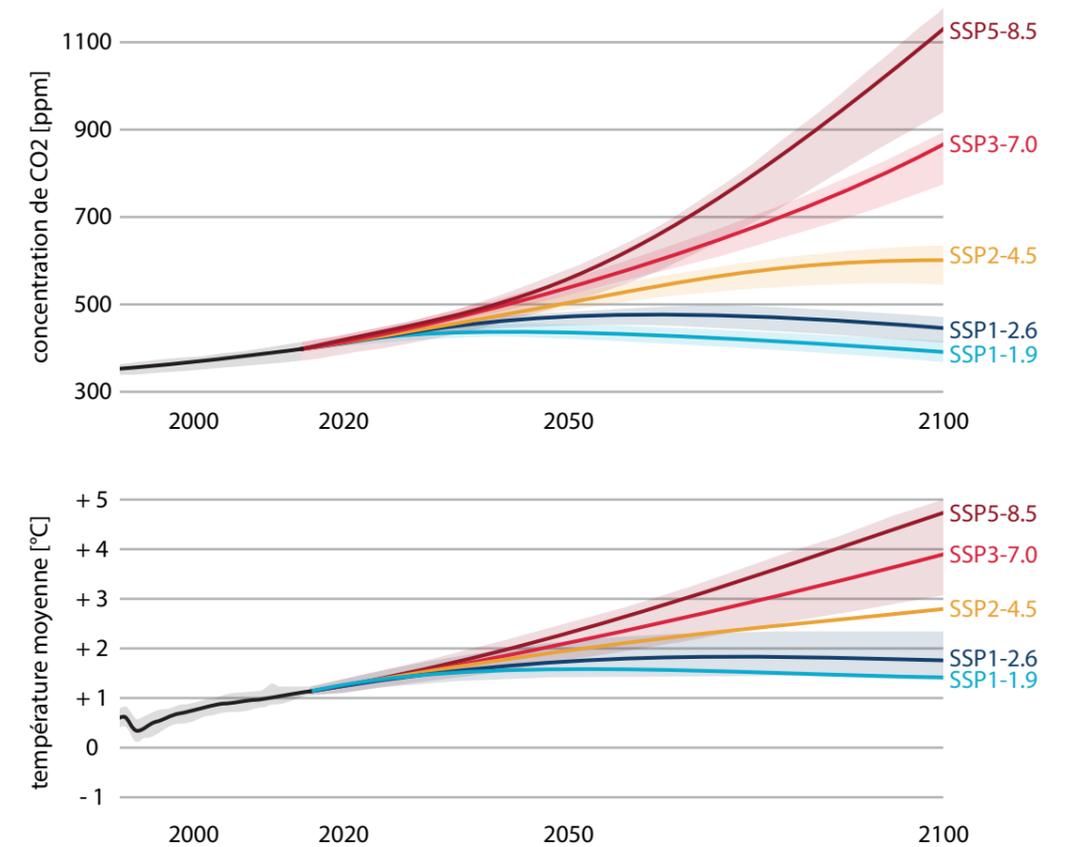


Figure 1 : Projections d'évolution d'émission et de hausse de température
Courbes tracées selon différentes trajectoires socio-économiques
Source : Figure SPM.8 dans IPCC, 2021: Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

SSP : (Shared Socio-economic Pathways)
SSP1 : développement optimiste et sobre énergétiquement
SSP2 : scénario médian
SSP3 : développement pessimiste et sobre énergétiquement
SSP 4 : développement optimiste et hautement énergivore (non représenté)
SSP 5 : développement pessimiste et hautement énergivore

LA RESPONSABILITÉ DES ACTEURS DE LA CONSTRUCTION

Selon le GIEC, le secteur du bâtiment représente 18% des émissions de gaz à effet de serre mondiales. Cette donnée le place au rang des secteurs qui ont un rôle et un impact particulièrement importants dans la transition environnementale.

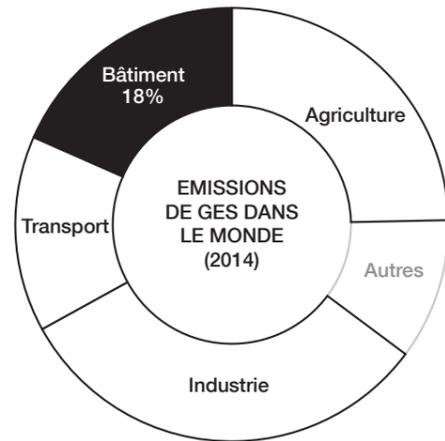


Figure 2 : Répartition des émissions de GES par secteur d'activité dans le monde en 2014
Source : GIEC, 3e groupe de travail, 2014

Dans ce contexte de transition climatique, il devient nécessaire que tous les acteurs de la construction (usagers, maîtrises d'œuvre et d'ouvrage) agissent à leurs échelles pour réduire l'impact du parc bâti.

La maîtrise d'ouvrage est initiatrice de toute construction, maîtresse des exigences et des moyens fournis au projet. Elle est également le seul acteur majeur à agir sur l'ensemble de la vie du projet, dont la durée tend à croître dans les années à venir.

Les acteurs de la maîtrise d'œuvre : architectes, ingénieurs, occupent une place importante de médiation, d'expertise et de prise de décisions dans le projet.

Les usagers, comme tous citoyens, ont un rôle important de responsabilisation, de changement de leurs habitudes d'utilisation, de consommation et de confort. Ce sont les acteurs les moins experts et ils doivent être accompagnés par les autres acteurs sur les règles d'utilisation des bâtiments.

Cependant, et bien que de plus en plus de solutions et de communication apparaissent sur le sujet, on observe que toute transition est cernée d'obstacles, qui peuvent transformer une conception de projet en labyrinthe sans fin de recherche d'informations, de négociations et de réglementations.

A la racine de ces obstacles se trouve un manque de compréhension des enjeux que soulève cette transition, à la fois dans les moyens à mettre en œuvre et dans les objectifs de résultats.

La multiplicité des acteurs et la répartition des forces de décision obligent le domaine à **partager une vision cohérente** du devenir de la construction pour œuvrer le plus possible de concert.

SITUATION RÉGLEMENTAIRE ACTUELLE

Régissant en France depuis 1974, les réglementations thermiques, ou RT, sont dans un premier temps mises en place pour réaliser des économies d'énergies suite aux augmentations du coût de l'énergie des chocs pétroliers. Les premières réglementations traitent alors uniquement les logements neufs, puis incluent les autres typologies en 1988 et les opérations sur existant à partir de la RT 2012.

Une nouvelle réglementation est en cours de mise en place à l'écriture de cette synthèse : la **Réglementation Environnementale 2020 (RE2020)**.

Comme son nom l'indique, cette réglementation ne se cantonne pas seulement à la question thermique et énergétique mais également à celle de l'impact environnemental.

Selon le Cerema, la réglementation est portée par trois objectifs majeurs :

- un **objectif de sobriété énergétique et une décarbonation de l'énergie**, évalué à l'aide du Bbio et des consommations d'énergie primaire (Cep), indices enrichis déjà présents dans la RT 2012.
- une **diminution de l'impact carbone**, évaluée à l'aide des impacts sur le changement climatique (Ic) directs (composants + chantier) et indirects (énergies).
- une **garantie de confort en cas de forte chaleur**, évaluée via les degrés-heures d'inconfort (DH), indice remplaçant la température intérieure de confort (Tic) utilisée par la RT2012.

Énergie	Bbio [points]	Besoins bioclimatiques	Évaluation des besoins de chaud, de froid (que le bâtiment soit climatisé ou pas) et d'éclairage.	ÉVOLUTION
	Cep [kWhep/(m².an)]	Consommations d'énergie primaire totale	Évaluation des consommations d'énergie renouvelable et non renouvelable des 5 usages RT 2012 : chauffage, refroidissement, eau chaude sanitaire, éclairage, ventilation et auxiliaires +	ÉVOLUTION
Carbone	Cep,nr [kWhep/(m².an)]	Consommations d'énergie primaire non renouvelable	1. éclairage et/ou ventilation des parkings 2. éclairage des circulations en collectif 3. électricité ascenseurs et/ou escalators	NOUVEAU
	Ic ^{énergie} [kg _{eq} CO ₂ /m²]	Impact sur le changement climatique associé aux consommations d'énergie primaire	Introduction de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des énergies consommées pendant le fonctionnement du bâtiment, soit 50 ans.	NOUVEAU
	Ic ^{construction} [kg _{eq} CO ₂ /m²]	Impact sur le changement climatique associé aux « composants » + « chantier »	Généralisation de la méthode d'analyse du cycle de vie pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre des produits de construction et équipements et leur mise en œuvre : l'impact des contributions « Composants » et « Chantier »	NOUVEAU
Confort d'été	DH [°C.h]	Degré-heure d'inconfort : niveau d'inconfort perçu par les occupants sur l'ensemble de la saison chaude	Évaluation des écarts entre température du bâtiment et température de confort (température adaptée en fonction des températures des jours précédents, elle varie entre 26 et 28°C)	NOUVEAU

Figure 3 : Liste récapitulative des indicateurs de la RE2020 et évolutions par rapport à la RT2012
Source : Cerema, Guide RE 2020

AUTRES INDICES ET LABELS

LABEL BBCA

Le label BBCA (Bâtiment Bas Carbone), porté par l'association éponyme, valorise toutes les démarches bas-carbone d'un bâtiment, sur la construction, l'énergie, l'usage de matériaux biosourcés et de l'économie circulaire. L'obtention du label s'effectue en atteignant un score suffisant basé sur la **réduction d'émissions de gaz à effet de serre (GES)** par rapport à une émission de référence, et sur des **opérations qualitatives bénéfiques**, comptabilisées en "points innovation climat".

LABEL PASSIVHAUS

Le label Passivhaus est un label allemand certifiant les bâtiments conçus selon les **principes de la construction passive** : une **enveloppe à très haute performance**, thermiquement et en étanchéité à l'air, une **ventilation très efficace** et une **optimisation des apports naturels de chaleur** (internes et solaires) pour réduire au maximum les besoins et consommations d'énergie du bâtiment.

Le label juge la qualité d'un bâtiment passif à la livraison de ce dernier sur la base de plusieurs indices :

- les besoins de chauffage et de refroidissement (inférieurs à 15 kWh.m².an)

- la part non renouvelable des consommations d'énergie
- l'étanchéité à l'air
- le confort intérieur

LABEL E+C-

Le label E+C- est un label expérimental lancé par le Ministère chargé de l'environnement dans l'objectif de préfigurer la RE 2020. Le temps de la mise en application de la RE2020, il reste applicable aux projets qui ne sont pas encore réglementés par cette dernière.

Les niveaux d'énergie vont de 1 à 4 et sont **calculés sur la base des consommations et productions d'énergie du bâtiment (bilan BEPOS)**.

Pour des bâtiments de bureaux :

- Les niveaux E1 et E2 correspondent à une réduction de 15% à 30% des consommations par rapport à la RT2012 (50 kWh/m²)
- Le niveau E3 correspond à une diminution de 40% des consommations et à un recours minimal de 20kWh/m² aux énergies renouvelables
- Le niveau E4 correspond à un bâtiment à énergie positive, producteur de plus d'énergie qu'il n'en consomme.

Les niveaux de Carbone vont de 1 à 2 et sont **calculés sur la base de l'impact carbone du bâtiment**.

OBJET DE L'ÉTUDE

MODE OPÉRATOIRE

L'étude consiste en la conception et la modélisation de quatre versions d'un même bâtiment **selon quatre modes constructifs** dans le but de les analyser et de simuler leurs comportements et impacts sur plusieurs plans.

ÉCHANGES ET ENTRETIENS

En amont du travail de simulation, un travail d'**inventaire des solutions existantes et des matériaux locaux** est réalisé. Permettant de réaliser un **diagnostic du champ des possibles**, il est également l'occasion de rencontrer des professionnels et d'enrichir la culture des membres de l'agence.

Ces échanges ont également permis d'alimenter des prises de décisions et hypothèses pour la suite de l'étude.

CAS D'ÉTUDE RÉEL

Un projet en étude au sein l'agence est pris comme témoin. Ce projet, un bâtiment passif, à la volumétrie archétypale, est porté par une maîtrise d'ouvrage engagée et a déjà fait l'objet de recherches de composition d'enveloppe.

De la volumétrie et du plan sont modélisés quatre systèmes constructifs différents :

- 1 - BÉTON / ITE
- 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES
- 3 - MIXTE BOIS BÉTON
- 4 - MIXTE BOIS TERRE

Les quatre variantes sont ensuite modélisées et étudiées pour extraire plusieurs données :

- **Impacts environnementaux multiples**, via une analyse de cycle de vie (ACV) ;
- **Confort d'été**, via une simulation thermique dynamique (STD) ;
- **Masse construite, masse de matériaux biosourcés** ;
- **Coût de construction**.

Le but ne sera pas de dégager une variante meilleure que les autres mais d'analyser et d'identifier les conséquences de choix architecturaux sur ces facteurs et de mettre en lumière des relations de causalité entre ces derniers.

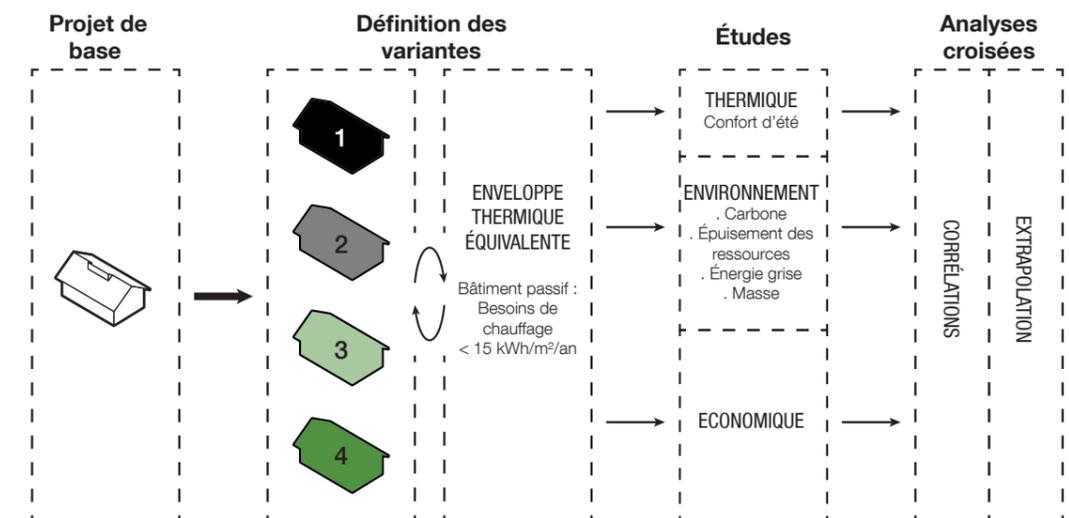


Figure 4 : Schéma de stratégie de projet



Figure 5 : Vue en perspective du projet, phase DCE

PRÉSENTATION DU PROJET ÉTUDIÉ

PROGRAMME ET PROJET

Le projet consiste en la construction neuve d'un bâtiment périscolaire et d'une école de musique dans la commune de Rœschwoog, à 35km au Nord de Strasbourg.

Le bâtiment, de 850 m² de surface de plancher, remplira les rôles d'école de musique et d'accueil de loisirs sans hébergement (ALSH), permettant l'accueil des enfants de maternelle et élémentaire (3/11 ans) durant le temps périscolaire et extrascolaire, soit toute l'année, notamment en période estivale.

Il comprend un restaurant scolaire, des salles d'ateliers, d'animation, d'évolution ainsi qu'une salle de musique.

Sur la toiture à deux pans se développe un shed orienté au Sud qui apporte de la lumière naturelle dans l'atrium.

ARCHITECTURE DU BON SENS

La conception est animée par la recherche d'architecture du bon sens : La toiture dégage des débords importants qui protègent les façades et garantissent une protection solaire passive efficace, renforcée par l'ajout de protections solaires extérieures. Le socle semi-enterré est minéral,

apportant de l'inertie thermique et affirmant une limite franche qui permet d'éloigner le bardage du sol. Il accueille un espace de sous-sol permettant de jouer le rôle de vide sanitaire, bénéfique sur les plans hygrométrique et thermique en toutes saisons.

De nombreux choix de conception du projet visent à en réduire l'impact environnemental. Les matériaux sont choisis à dominante biosourcée, comme le bois ou la paille. Les consommations énergétiques sont également optimisées par les exigences de performances passives sur l'enveloppe et une production d'énergie renouvelable intégrée. Pour finir, la ventilation est améliorée par deux systèmes passifs : un puits canadien pour un pré-conditionnement de l'air neuf ainsi qu'un tirage thermique garanti par les ouvertures du shed pour une ventilation naturelle.

ARCHÉTYPE DE L'ARCHITECTURE

A ces règles de conception s'ajoute une typologie simple : un plan rectangulaire sur trois niveaux, une toiture à deux pans, une orientation selon les points cardinaux. Tous ces facteurs, en plus de faciliter la modélisation du bâtiment, permettent un traitement et une décomposition plus claire des résultats.

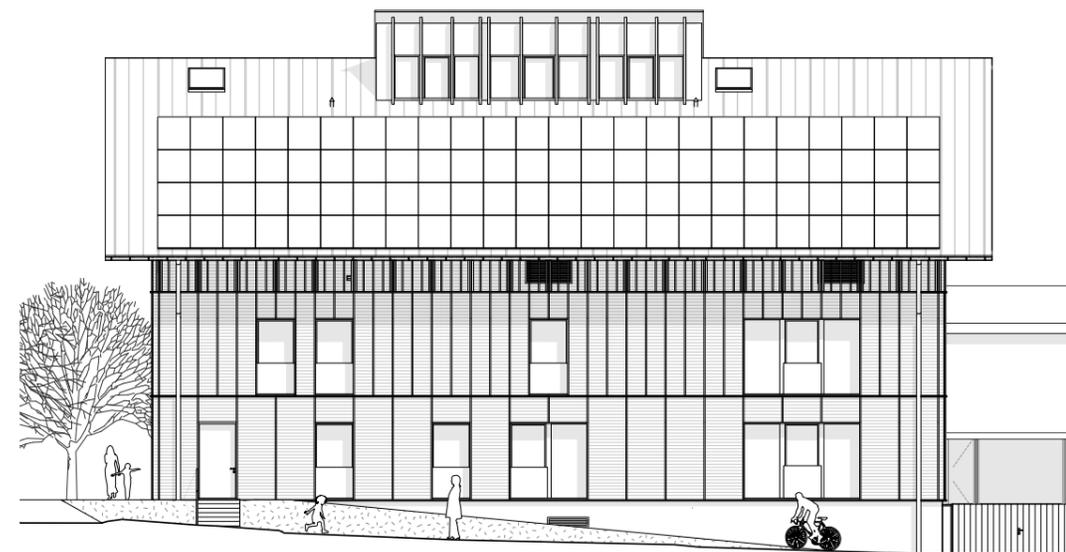


Figure 6 : Façade Sud du projet



Figure 7 : Vue perspective intérieure sur l'atrium

PLANS DE NIVEAU

RDC

PERISCOLAIRE ET ECOLE
DE MUSIQUE

- | | |
|--------------------|--|
| 1 Direction | 9 Local électrique |
| 2 Sanitaires -6ans | 10 Local eau |
| 3 Sanitaires +6ans | 11 Ascenseur |
| 4 Sas d'entrée | 12 Sas d'accès à l'école de
musique et livraisons |
| 5 Atelier «grands» | 13 Vestiaire |
| 6 Atelier «petits» | 14 Hall périscolaire |
| 7 Salle animateurs | |
| 8 Salle de repos | |

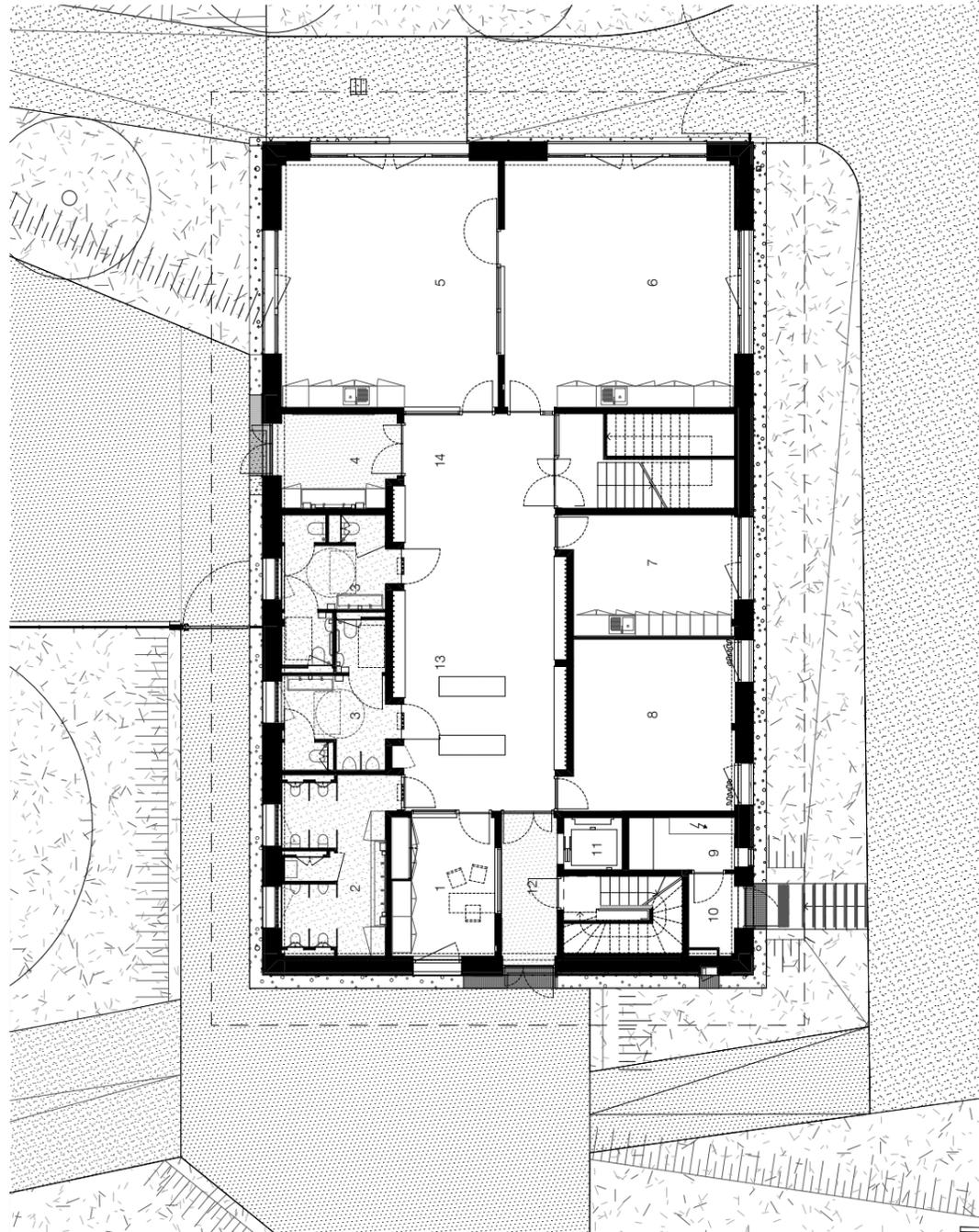
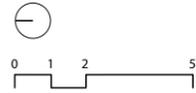


Figure 8 : Plan de niveau, RDC

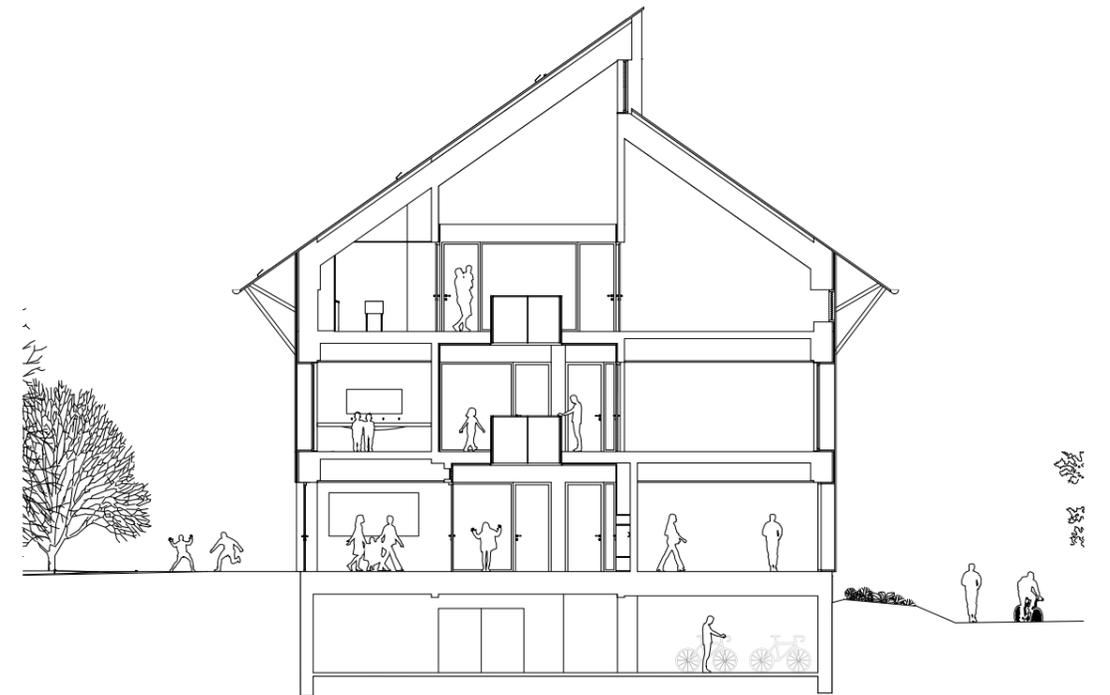


Figure 9 : Coupe transversale du projet

R+1

PERISCOLAIRE ET ECOLE DE MUSIQUE

- | | |
|----------------------------------|--|
| 1 Atelier animation | 8 Local technique |
| 2 Local ménage et vestiaire | 9 Stockage |
| 3 Sanitaire avec douche | 10 Ascenseur |
| 4 Lavabos | 11 Circulation de l'école de musique et livraisons |
| 5 Salle de restauration «grands» | 12 Circulation du périscolaire |
| 6 Salle de restauration «petits» | |
| 7 Office | |

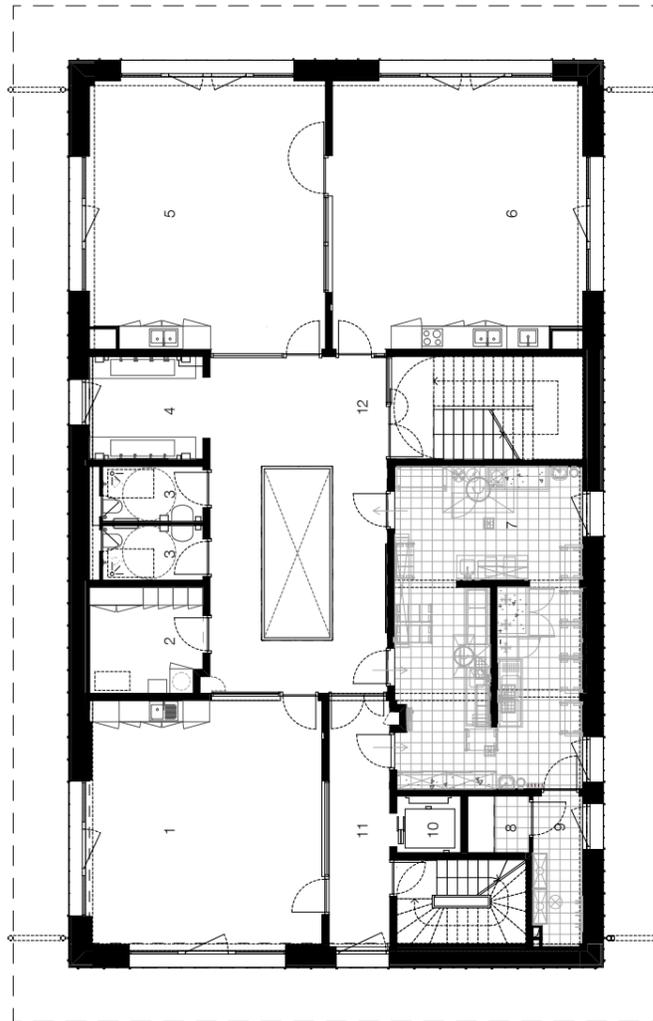
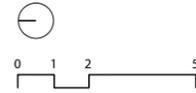


Figure 10 : Plan de niveau, R+1

R+2

PERISCOLAIRE ET ECOLE DE MUSIQUE

- | | |
|--------------------------|--|
| 1 Salle de musique | 8 Local CTA |
| 2 Sanitaire PMR | 9 Local chaufferie |
| 3 Local VDI | 10 Ascenseur |
| 4 Buanderie et rangement | 11 Circulation de l'école de musique et livraisons |
| 5 Rangement | 12 Circulation du périscolaire |
| 6 Salle d'évolution | |
| 7 Rangement | |

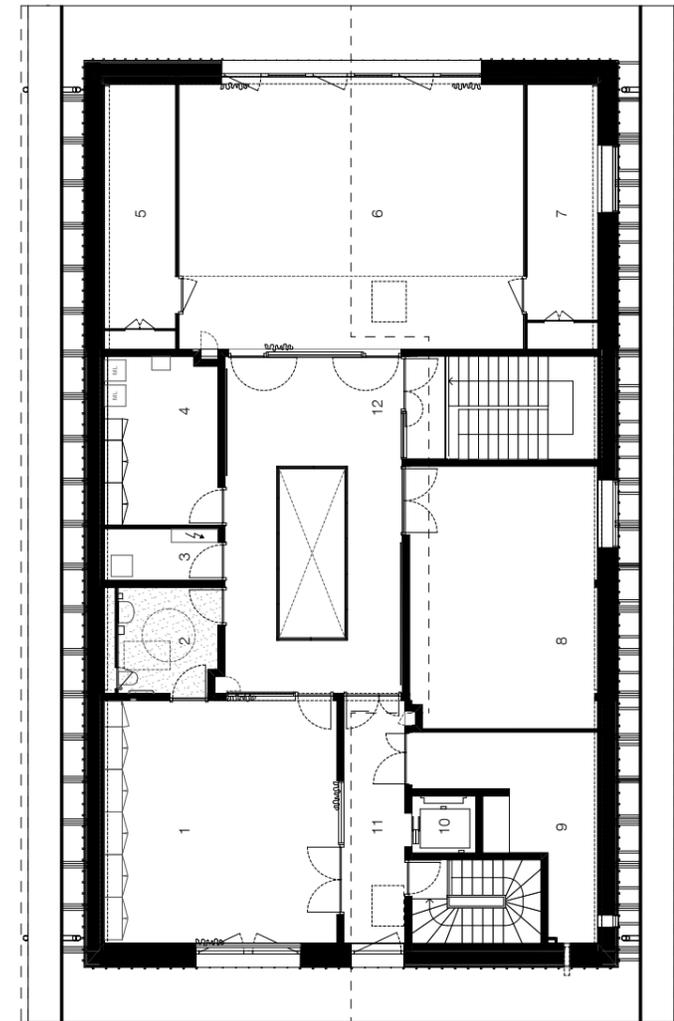
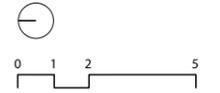


Figure 11 : Plan de niveau, R+2

1

DESCRIPTION DES QUATRE SYSTÈMES CONSTRUCTIFS

1 - BÉTON / ITE

PRINCIPE

L'ensemble de la structure est un système voiles-dalles béton. Seule la charpente reste un élément structural en bois. L'isolation se fait par l'extérieur et plusieurs économies sont faites sur les éléments variants du projet.

COMPOSITION

Les dalles et l'ensemble des refends sont en béton armé d'épaisseur 20cm. Le béton est laissé apparent et lasuré à l'intérieur.

Les cloisons sont des cloisons simples en plaques de plâtre.

Les menuiseries sont en PVC. L'isolation thermique par l'extérieur des façades et des fondations est en polystyrène expansé et laine minérale.

La toiture est en charpente bois et couverte par des tuiles béton, avec une isolation en laine minérale.

SYSTÈME ÉCONOMIQUE

La priorité est ici d'atteindre les performances thermiques passives à un prix minimal.

Cette version est également pertinente sur le plan environnemental, mettant en place une base "témoin", permettant de mieux quantifier les effets des efforts mis en place pour réduire l'impact carbone.

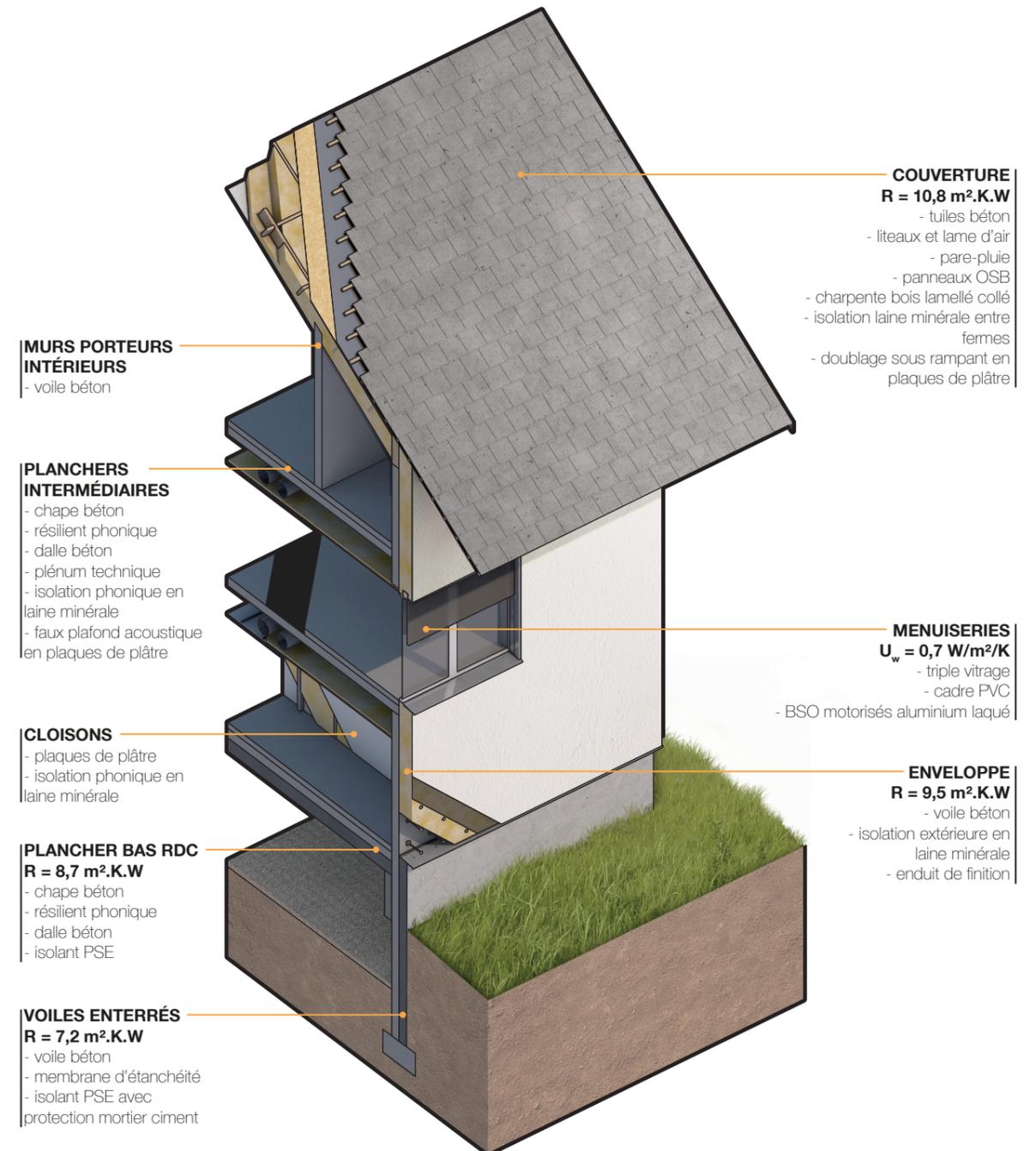
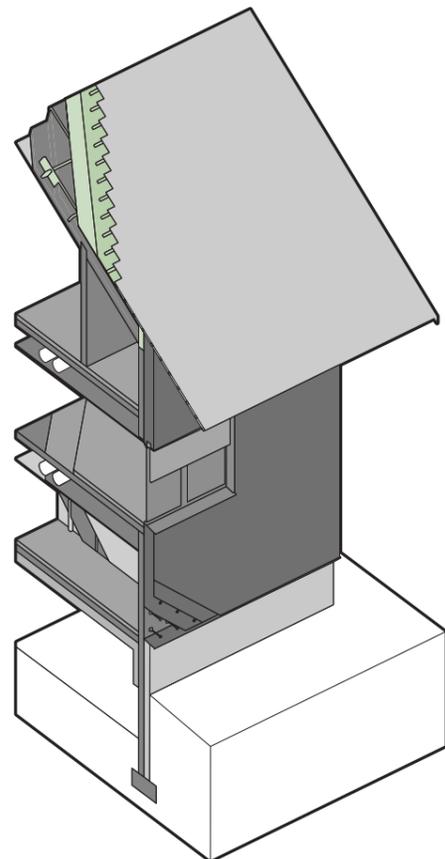


Figure 12 : Détail axonométrique ecorché, Système 1 - BÉTON / ITE

2

2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES

PRINCIPE

L'ensemble de la structure est en béton, exceptée la charpente. Les façades, porteuses, sont en prémurs thermiques isolés en fibre de bois.

COMPOSITION

Les dalles et l'ensemble des refends intérieurs sont en béton armé d'épaisseur 20cm. Le béton est laissé apparent et lasuré à l'intérieur comme à l'extérieur, ne laissant apparaître le plâtre qu'au plafond et sur les cloisons.

Les menuiseries sont en aluminium. L'isolation des fondations en polystyrène expansé et laine minérale.

La toiture est en charpente bois et couverture zinc, avec une isolation en laine minérale.

La mise en œuvre des prémurs permet également de profiter au maximum des qualités du béton. Le matériau apparent sur les deux faces permet de supprimer tout doublage et d'exploiter sa pérennité et sa robustesse naturelle.

DÉCARBONATION DU BÉTON

A l'image des prémurs thermiques, les autres éléments en béton de ce système ont été choisis à impact environnemental réduit ou "bas carbone", utilisant des granulats recyclés et un ciment plus respectueux de l'environnement. Cette réduction permet alors de comparer les systèmes constructifs 2, 3 et 4 avec une certaine sensibilité environnementale.

A l'inverse, la comparaison entre ce système et le précédent permet de mettre en lumière la différence qu'apporte un choix d'éléments décarbonés pour un système constructif en béton.

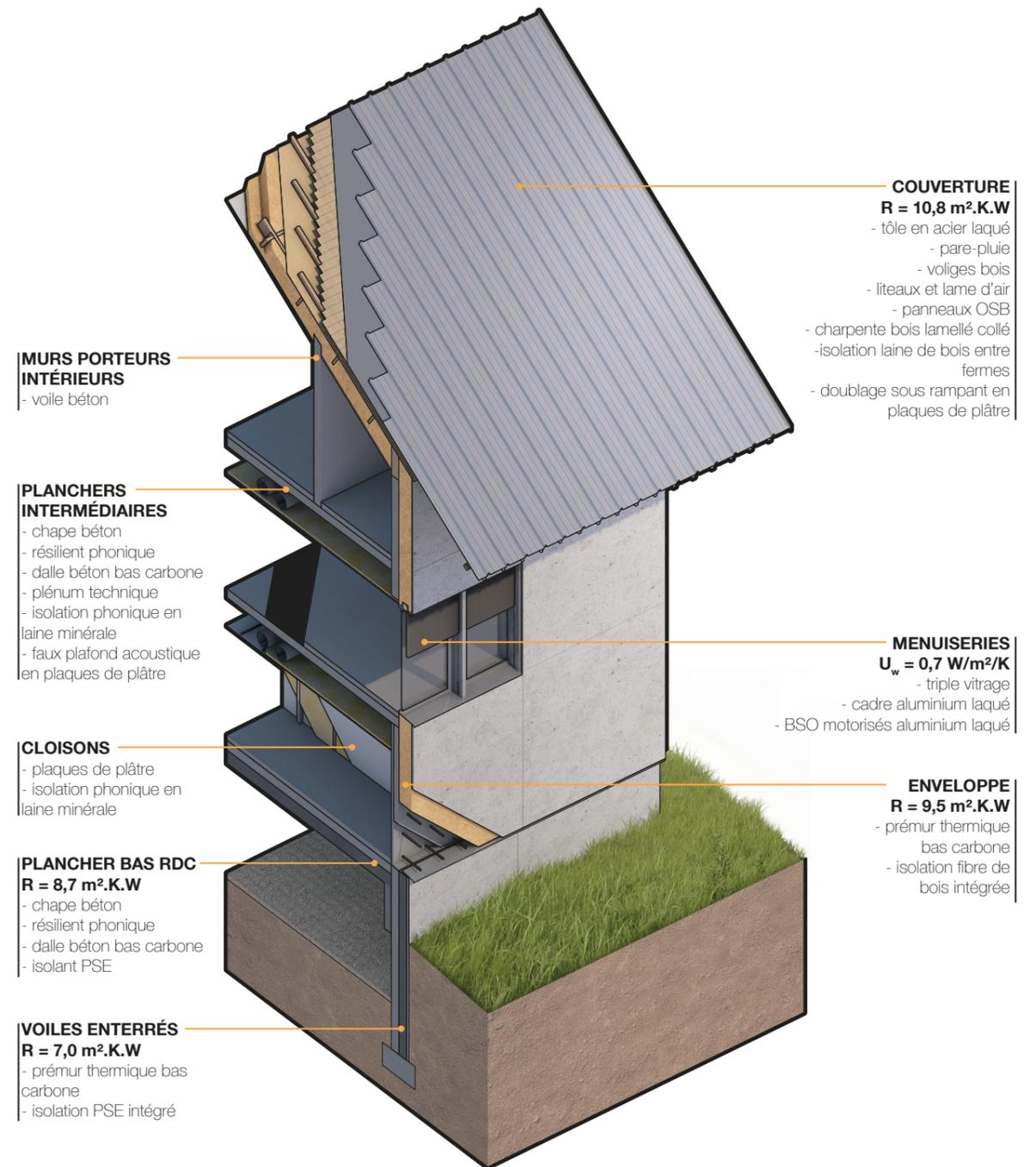
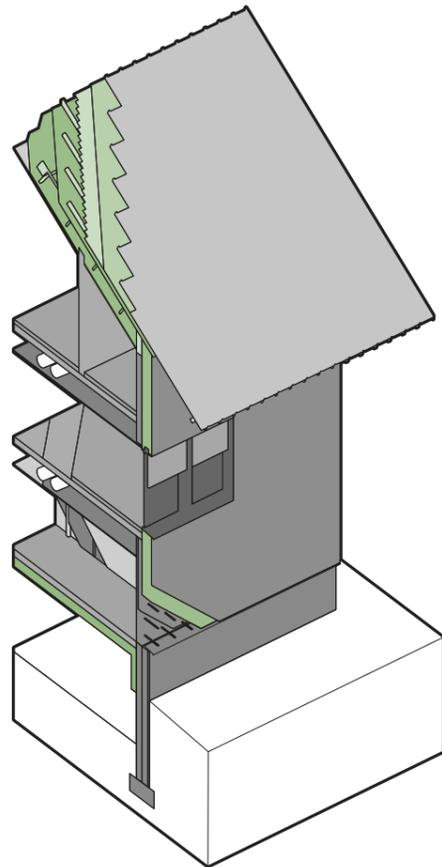


Figure 13 : Détail axonométrique ecorché, Système 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES

3

3 - MIXTE BOIS BÉTON

PRINCIPE

Ce système constructif est le système le plus proche de celui choisi pour le périscolaire.

Le but est de recourir davantage aux matériaux biosourcés, en optant notamment pour la paille en isolation d'enveloppe, et de conserver la structure en béton.

COMPOSITION

Les dalles sont en béton. Elles sont portées par des poteaux noyés dans la façade extérieure et des refends tous deux en béton également. Les refends intérieurs assurent la stabilité de l'ensemble.

La peau extérieure est une façade à ossature bois (FOB), autoporteuse, disposant d'un remplissage paille et de deux doublages en fibre de bois. Les poteaux bénéficient d'un complément d'isolation en polyuréthane pour annuler les ponts thermiques induits.

La toiture reste en charpente bois. Elle est cette-fois-ci couverte par du zinc et isolée par des bottes de paille. Les murs sont habillés d'un bardage bois pré-grisé.

COMPROMIS STRUCTURELS

Ce système est davantage issu de discussions entre les différents acteurs de la maîtrise d'œuvre. L'équilibre entre béton et bois est trouvé pour garantir une stabilité structurelle et des épaisseurs correctes tout en visant une part importante de matériaux biosourcés.

La masse de béton des dalles et des refends apporte également une inertie thermique utile en cas de fortes chaleurs.

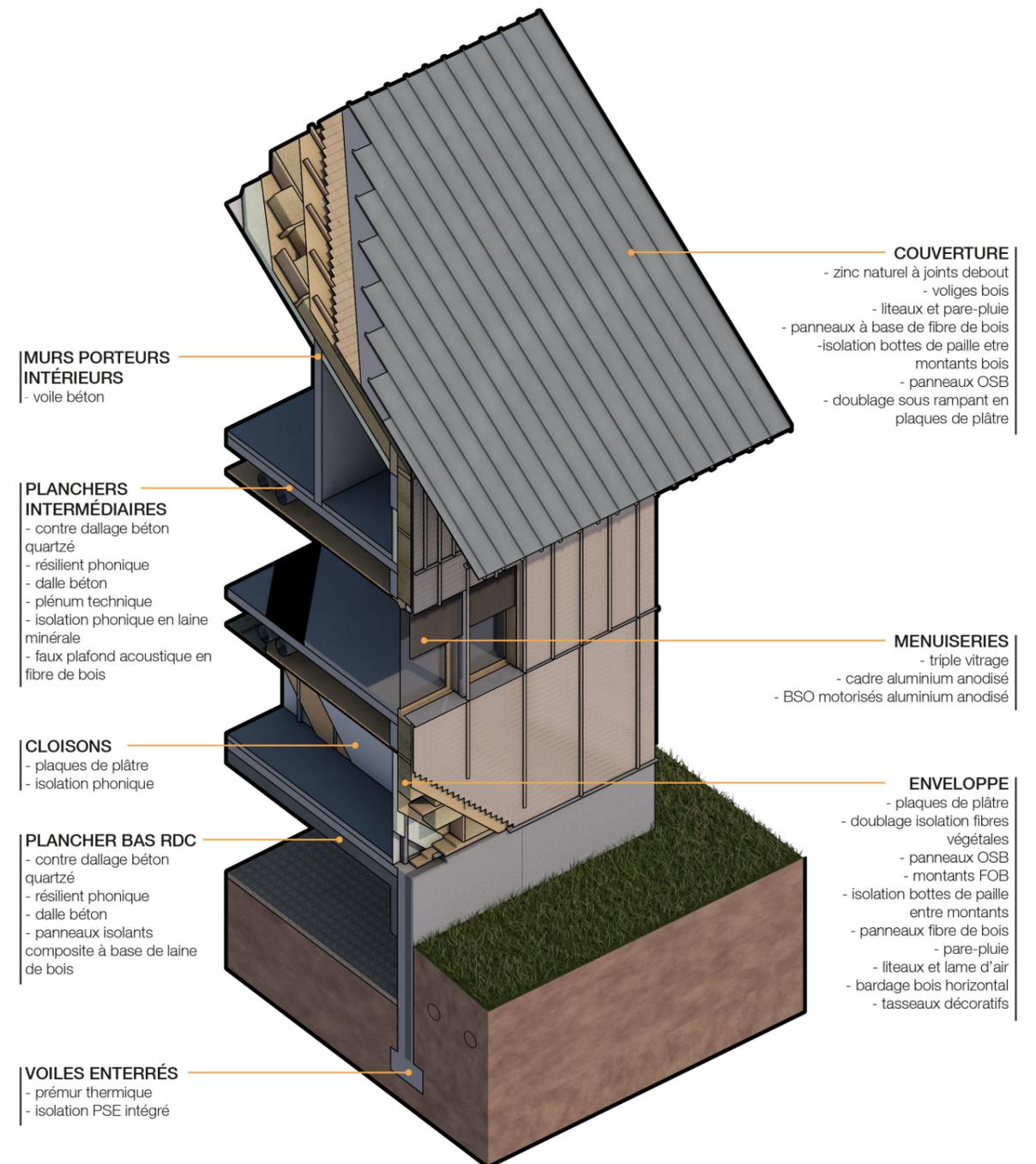


Figure 14 : Détail axonométrique écorché, Système 3 - MIXTE BOIS BÉTON

4

4 - MIXTE BOIS TERRE

PRINCIPE

Ce système constructif a pour but de créer une version durable et poussée en favorisant au maximum l'usage de matériaux biosourcés dans le cadre d'étude.

La structure est cette fois entièrement en bois. Seul les deux noyaux de circulation sont conservés en béton pour assurer le contreventement et la tenue aux séismes.

L'isolation thermique reste assurée par des isolants biosourcés. Les façades intérieures sont recouvertes de plaques de terre crue.

COMPOSITION

Les murs à ossature bois en façade sont cette fois-ci porteurs donc dimensionnés en conséquence. Ils gardent leur compositions et épaisseurs d'isolants.

Les murs et cloisons intérieurs sont également remplacés par des murs à ossature bois de sections variantes selon les charges supportées.

Les planchers sont en bois, en structure traditionnelle avec solives et panneautage bois reposant sur les murs intérieurs et extérieurs ou sur des poutres supplémentaires en bois dans le cas de portées trop importantes.

La toiture reste identique au système mixte : charpente bois, couverture zinc, isolation paille. Il en est de même pour le bardage : bois pré-grisé.

APPORTER DE L'INERTIE

Le point faible des structures en ossature, d'autant plus en bois, est leur faible masse et par conséquent leur faible inertie thermique.

Pour tenter de pallier ce problème, les murs intérieurs sont alors remplis de briques de terre crue, pour apporter le maximum de masse au bâti et diminuer les hausses de température estivales.

La masse volumique des isolants biosourcés, plus élevée que pour les laines minérales, ainsi que les finitions intérieures en terre crue, participent également à l'augmentation de la masse inertielle de l'ensemble.

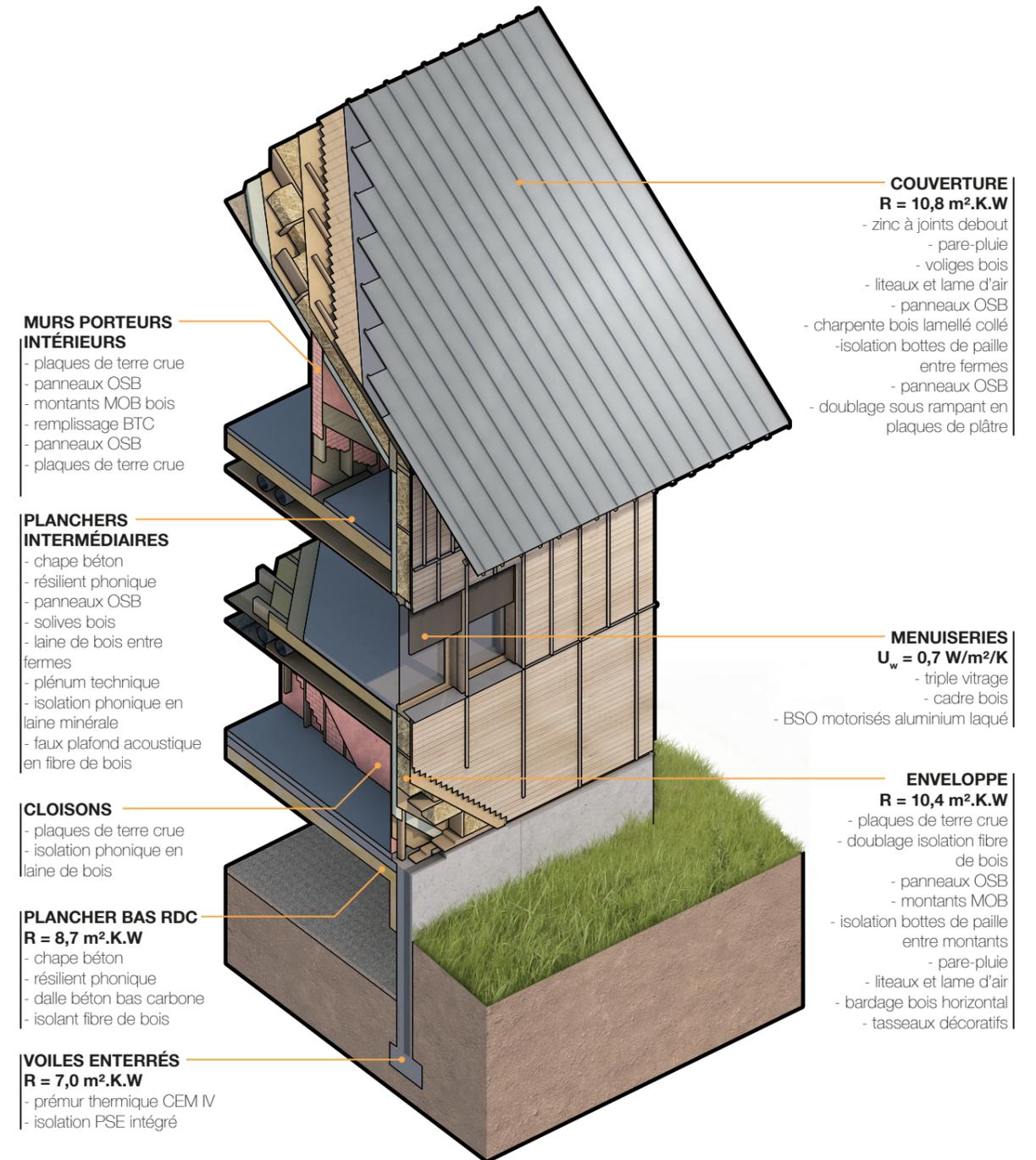
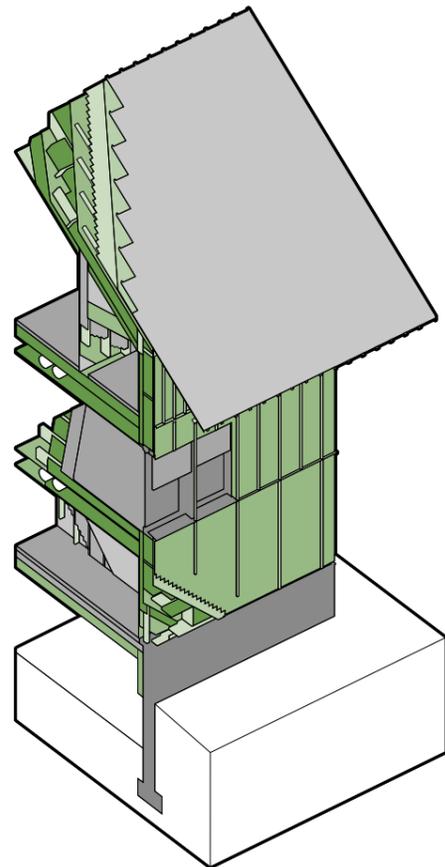


Figure 15 : Détail axonométrique ecorché, Système 4 - MIXTE BOIS TERRE

BILAN DES VARIANTES

Le tableau ci-dessous synthétise les différentes variantes et leurs différences. Les éléments cités dans le tableau seront les seuls à varier pour l'analyse de cycle de vie.

Le premier système vise la performance d'enveloppe avec un coût minimal. Les trois autres systèmes sont conçus avec une volonté de réduire l'impact carbone.

Pour approcher au maximum la réalité, toutes les versions ont été conçues avec un haut niveau de détail. Cette définition nous a également permis de gagner en connaissance sur les mises en œuvre de certains matériaux.

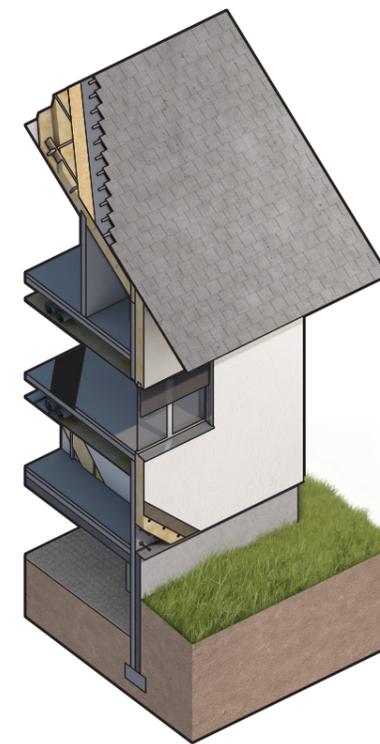
	1 BÉTON / ITE	2 BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES	3 MIXTE BOIS BÉTON	4 MIXTE BOIS TERRE
Structure	voiles - dalles	voiles - dalles	mixte voiles - poteaux - dalles	ossature bois
Porteurs verticaux ext.	murs béton	prémurs thermiques béton	poteaux béton dans MOB*	MOB*
Porteurs verticaux int.	murs béton	murs béton	murs béton	MOB* + BTC*
Porteurs horizontaux	dalles béton	dalles béton	dalles béton	plancher bois traditionnel
Chape	chape béton	chape béton	chape béton	chape béton
Façade	murs béton	prémurs thermiques	FOB*	MOB*
Isolation façade	ITE laine minérale	fibre de bois dans prémur	paille + autres biosourcés	paille + autres biosourcés
Peau extérieure	enduit	béton apparent	bardage bois + saturateur	bardage bois + saturateur
Charpente	bois	bois	bois	bois
Couverture	tuiles béton	tôle acier	zinc	zinc
Isolation toiture	laine minérale	fibre de bois	paille + polyuréthane sur poteaux	paille + autres biosourcés
Menuiseries	PVC	aluminium	bois	bois
Cloisons	laine minérale + plaques de plâtre	laine minérale + plaques de plâtre	laine de bois + plaques de plâtre	plaques terre crue + BTC*
Faux-plafond acoustique	laine minérale + plaques de plâtre	laine minérale + plaques de plâtre	laine minérale + panneaux fibre de bois	laine de bois + panneaux fibre de bois
Finitions peau int.	béton lasuré	béton lasuré	béton lasuré	plaques terre crue

*MOB = mur à ossature bois

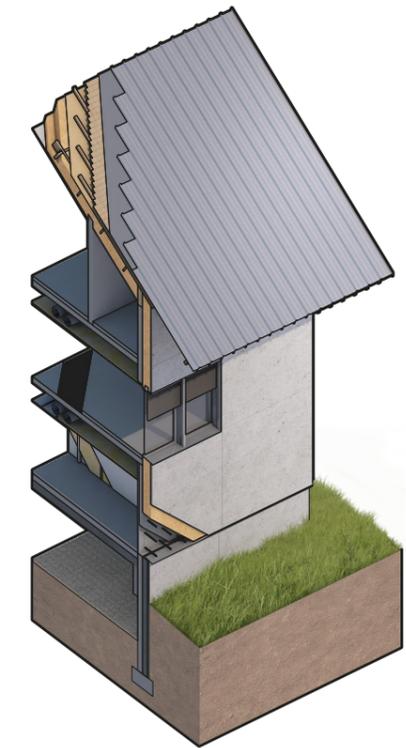
*FOB = façade à ossature bois

*BTC = briques de terre crue

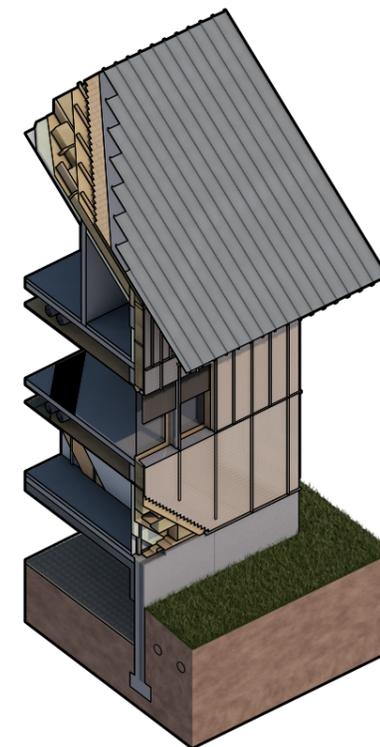
Figure 16 : Résumé des éléments variants des quatre systèmes constructifs



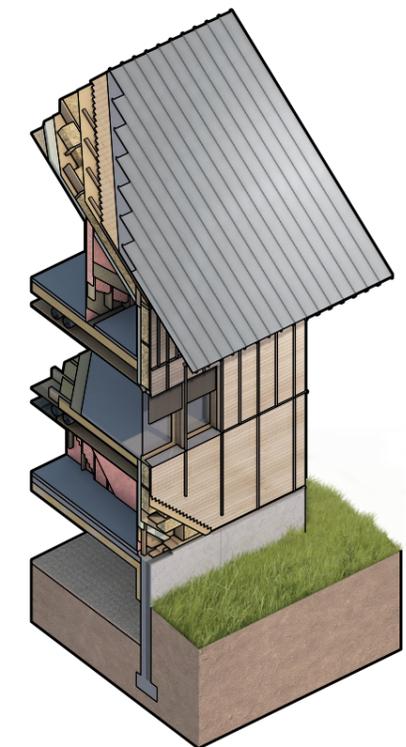
1 - BÉTON / ITE



2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES



3 - MIXTE BOIS BÉTON



4 - MIXTE BOIS TERRE

Figure 17 : Détails axonométriques écorchés des quatre variantes étudiées

ANALYSE DE CYCLE DE VIE

PRÉSENTATION DES ENJEUX DE L'ACV

DÉFINITION DE L'ACV

Selon l'INIES, « L'analyse du Cycle de Vie (ACV) est une **méthode d'évaluation environnementale multi étape et multicritère** permettant de quantifier les impacts d'un produit, d'un service, d'un procédé ou d'un ouvrage sur **l'ensemble de son cycle de vie** : de l'extraction des matières premières à son traitement en fin de vie. » On parle aussi de cycle "du berceau à la tombe".

C'est une méthode exhaustive de calcul des impacts sur plusieurs critères de chaque élément pour chaque phase de vie de ce dernier.

Les impacts sont quantifiés en 29 indices et concernent l'impact environnemental, l'utilisation des ressources et le traitement des déchets. Aujourd'hui, seuls quelques uns de ces indices sont normés, l'indice le plus connu étant **l'impact sur le réchauffement climatique, ou impact carbone.**

Les résultats obtenus sont recensés dans des **Fiches de Déclaration Environnementales et Sanitaires (FDES)** (pour les produits de construction) ou des **Profils Environnementaux Produits (PEP)** (pour les équipements) construites par des entreprises ou des organismes, seuls ou en groupement et vérifiées par des vérificateurs habilités par l'organisation. Des **Modules de Données Environnementales Génériques par Défaut (MDEGD)** ou **Données Environnementales par Défaut (DED)** construites par le Ministère de l'Environnement remplissent provisoirement la base de données.

HYPOTHÈSES ET MÉTHODES DE CALCUL

Dans cette étude, l'impact des variantes est limité à l'impact des produits de construction. Ceux des consommations d'énergie et d'eau ne sont pas pris en compte ici. On limite également l'étude au bâtiment seul en écartant les impacts des aménagements extérieurs périphériques rattachés à ce projet (lot 1 : VRD).

Les lots sélectionnés (lots 3 à 7) sont calculés élément par élément, à la suite d'un mètre du bâtiment.

Les éléments techniques (lots 8 à 12) sont approchés à l'aide de lots forfaitaires estimés par m² de surface de plancher. L'impact des fondations (lot 2) est seulement approché.

L'ensemble est sommé pour obtenir dans un premier temps l'impact global des différents systèmes. Puis l'analyse se concentre sur les lots "architecturaux" pour étudier les impacts par lot et par élément.

La durée de vie de référence est prise pour 50 ans. Les coefficients de renouvellement sont arrondis à l'entier supérieur (2 pour une durée de vie de 30 ans par exemple). La surface de plancher est constante et définie à 848 m².

INDICES ÉTUDIÉS

Dans le cadre de cette étude, seul l'impact carbone est calculé. Ramené en kgCO₂ équivalents, il est aujourd'hui l'indice le plus parlant et de ce fait le plus démocratisé en termes d'impacts sur l'environnement.

La masse construite (calculé en kg) n'est pas un impact à proprement parler mais est également extraite des fiches et calculée dans le cadre l'étude.

N°	Titre	Nom	Etat
1	-	VRD et aménagements extérieurs de la parcelle	non calculé
2	FONDATIONS	Fondations - Murs enterrés	approché
3	STRUCTURE	Superstructure - Maçonnerie	quantifiés élément par élément
4	TOITURE	Couverture - Etanchéité - Charpente - Zinguerie	
5	DOUBLAGES - CLOISONNEMENTS	Cloisonnement - Doublage - Plafonds suspendus - Menuiseries int.	
6	FACADE	Façades et menuiseries extérieures	
7	REVETEMENTS	Revetements des sols, murs et plafonds - Chape - Peintures	
8	CVC	CVC (Chauffage - Ventilation - Refroidissement - ECS)	lots forfaitaires
9	PLOMBERIE	Plomberie-sanitaire	
10	CFO	Réseaux d'énergie (courant fort)	
11	CFA	Réseaux de communication (courant faible)	
12	-	Appareils élévateurs	non calculés
13	-	Équipements de production locale d'électricité	
14	-	Fluides frigorigènes	

Légende :
 Lots sélectionnés
 Lots techniques
 Lots non inclus

Figure 18 : Récapitulatif des lots de l'analyse de cycle de vie et de leur méthode de calcul dans l'étude

IMPACT CARBONE

SYNTHÈSE GLOBALE

Les impacts carbone des quatre systèmes constructifs sont représentés ci-dessous. La partie grisée représente les lots sélectionnés. L'impact sur le réchauffement climatique faisant l'objet de plusieurs réglementations, les valeurs globales sont comparées aux niveaux de performance carbone du label E+C-.

Par rapport à l'impact de 940 kg_{eq}CO₂/m² du système constructif 1 - BÉTON / ITE, on observe les réductions suivantes :

- 120 kg_{eq}CO₂/m² (-12,8 %) pour le 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES
- 186 kg_{eq}CO₂/m² (-19,8 %) pour le 3 - MIXTE BOIS BÉTON
- 193 kg_{eq}CO₂/m² (-20,5 %) pour le 4 - MIXTE BOIS TERRE

IMPACT CARBONE [kg_{eq}CO₂/m²]

Lots sélectionnés
Impact total

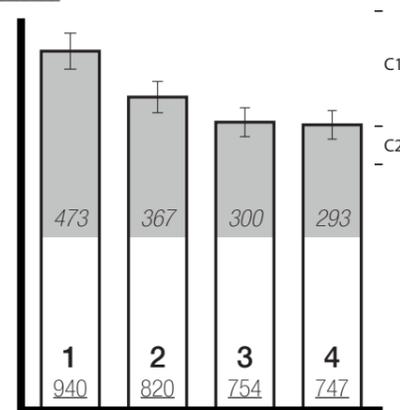


Figure 20 : Impact carbone total des variantes. En blanc la part des lots approchés (lots techniques) renseignée pour donner un ordre de grandeur.

On pourrait s'attendre à une évolution bien plus marquée. En effet, la mise en place de béton bas-carbone permet d'atteindre 60% des économies faites en optant pour la solution tout bois. **On pourra dans un premier temps émettre des réserves sur l'équivalence des fiches FDES**, coûteuses à mettre en place et à optimiser. Ce coût marque un contraste sur la base de données entre les filières nouvelles et celles développées, contraste qui risque de jouer sur l'impact environnemental des matériaux concernés.

Pour consolider la comparaison des variantes, il faudrait également déterminer la précision des résultats au moyen d'un calcul de propagation de l'incertitude.

BILAN DES FICHES CHOISIES

Le diagramme ci-dessous donne la répartition des fiches par type pour les ACV des trois systèmes 2,3 et 4.

Pour cette étude, la comparaison avec une phase esquisse, plutôt qu'une phase AVP (état d'avancement du projet au moment du lancement de ce travail de recherche) fait sens au vu du caractère expérimental de cette étude.

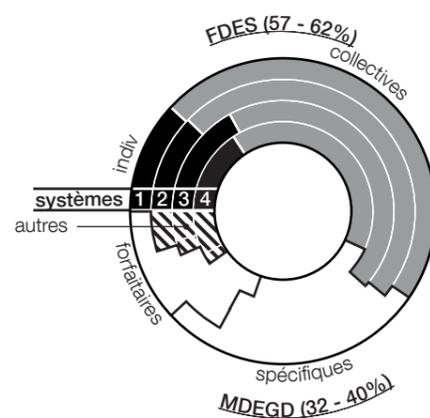


Figure 19 : Répartition des FDES par types de fiches. Les fiches "recomposées" sont des fiches non attestées reconstruites dans le cadre de cette étude uniquement.

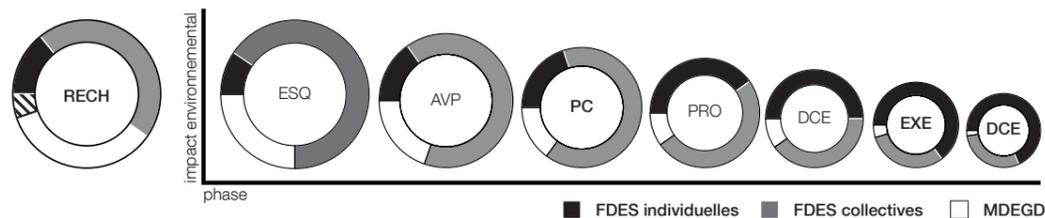


Figure 21 : Objectif visé pour une performance environnemental du bâtiment réussie. Répartition moyenne dans le cadre de l'étude pour comparaison (Source : Alliance HGE-GBC, AIMCC, 2021)

ANALYSE LOT PAR LOT

L'étude lot par lot permet de mettre en lumière plusieurs points pertinents concernant les influences des éléments architecturaux sur l'impact carbone.

Les barres sur la gauche de l'axe vertical représentent les parts d'impact "négatifs" comptabilisées dans certains lots. Ces termes négatifs modélisent le stockage de carbone pendant la croissance des éléments biosourcés, calculé en impact négatif dans le cadre des conventions de calcul de l'ACV.

Sans grande surprise on observe que plus un système allège sa structure et remplace du béton par du bois, plus

il réduit son impact carbone, en témoigne les impacts des lots structures des différents systèmes (réduction de 73,8 kg_{eq}CO₂/m² ou - 51 % sur le lot 3 : Structure du système 1 - BÉTON / ITE au 4 - MIXTE BOIS TERRE)

En revanche, le système béton permet de réduire le nombre et la complexité des doublages et des cloisonnements, ce qui réduit la part de ce lot dans son bilan. **On observe une réduction de 27 % sur le lot 5 : Doublages/ cloisonnement du système 4 au système 2.** Ce gain s'avère néanmoins toujours plus faible que l'augmentation du poids carbone du lot structure, **plus haute de 44% sur le lot 3 : Structure pour les mêmes systèmes.**

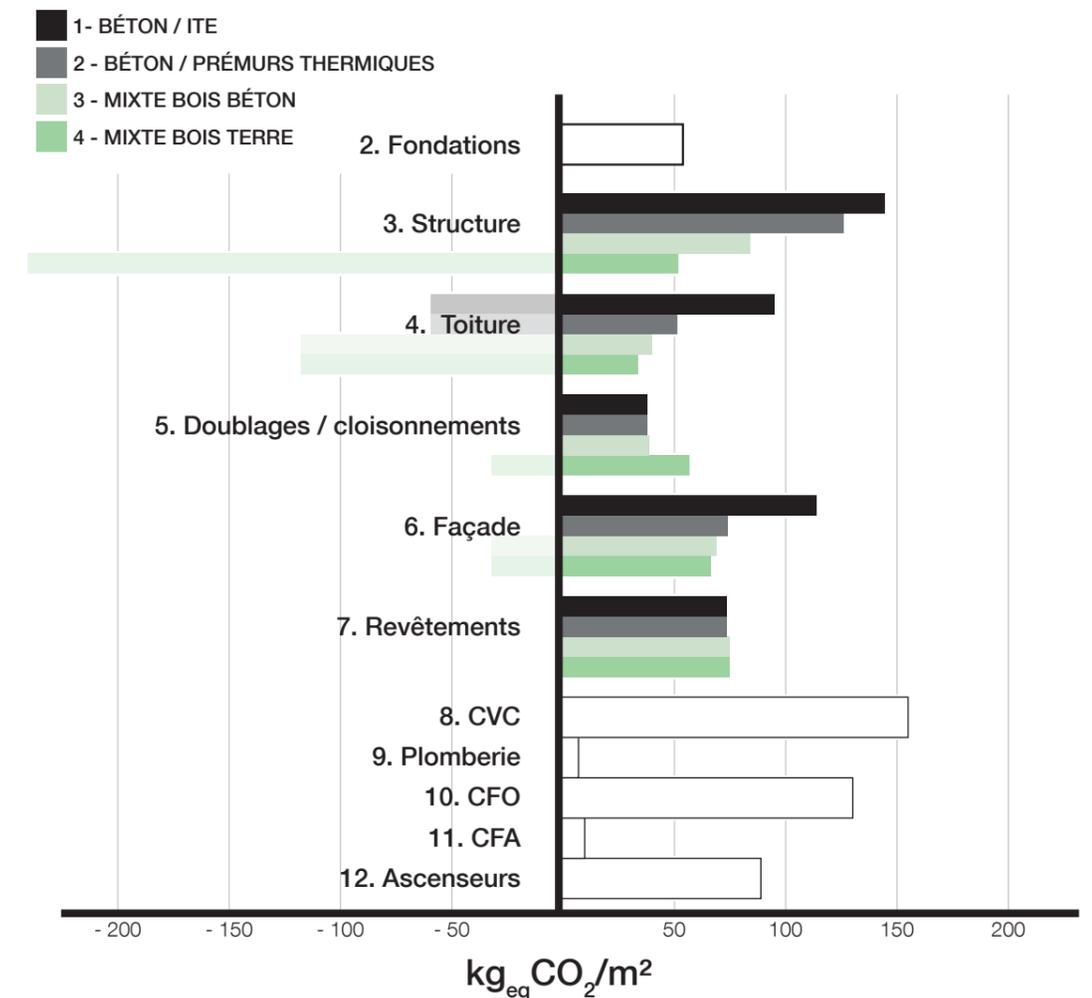


Figure 22 : Impacts carbone de chaque lots pour les différentes variantes. Les barres blanches représentent les approches des lots forfaitaires

ANALYSE ÉLÉMENT PAR ÉLÉMENT

Ce second niveau de lecture s'effectue uniquement sur les lots sélectionnés. Les couronnes de répartition des pages actuelle et suivantes sont harmonisées et à une échelle commune, basée sur la couronne de plus haut impact.

1 - BÉTON / ITE

Les matériaux d'isolation, du fait de leur important volume nécessaire aux performances de l'enveloppe demandées, contribuent largement à l'augmentation de l'impact carbone de cette variante. L'isolation par l'extérieur des murs émet **103,7 kg_{eq} CO₂/m²_{isolant}** soit **73,1 kg_{eq} CO₂/m²_{projet}**.

L'isolation de la toiture représente une part importante de la part du lot correspondant (plus de 75%), en émettant **63,0 kg_{eq} CO₂/m²_{projet}**.

Les éléments de la structure pleine en béton contribuent beaucoup, le matériau émettant environ 80 kg_{eq} CO₂/m²_{élément} (mur ou dalle). **Les éléments de structure émettent en tout 210,4 kg_{eq} CO₂/m²_{projet}**, et contribuent alors à **28%** de l'impact total de ce système.

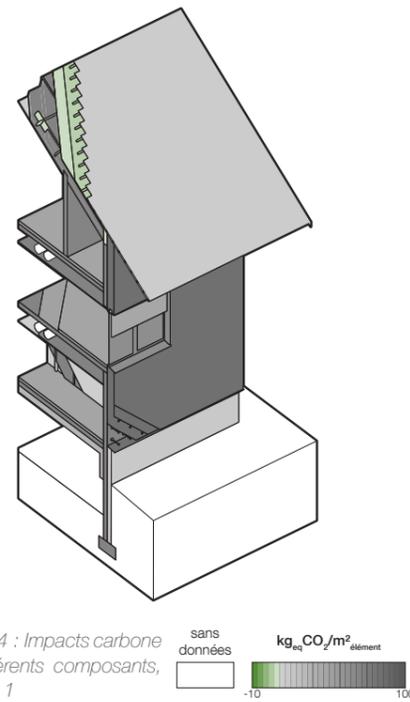


Figure 24 : Impacts carbone des différents composants, système 1

2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES

Le remplissage en fibre de bois des prémurs est calculé comme ayant un impact de **-8,8 kg_{eq} CO₂/m²_{façade}**.

Cette réduction et celle des éléments de béton tend à réduire l'impact de **51 kg_{eq} CO₂/m²_{projet}** soit une **réduction de 23%** pour le lot 3 : Structure par rapport au système précédent.

Les menuiseries en aluminium affichent un impact de **110 kg_{eq} CO₂/m²_{fenêtre}** soit 35% de plus que les fenêtres PVC. Cependant, il est à garder en tête que les impacts de produits hautement facturés présentent d'importantes variations d'impact selon les fiches et les constructeurs. L'impact des fenêtres ne représentant que **5%** de l'impact total pour le système 2, ces imprécisions n'ont pas un grand impact sur le bilan carbone global.

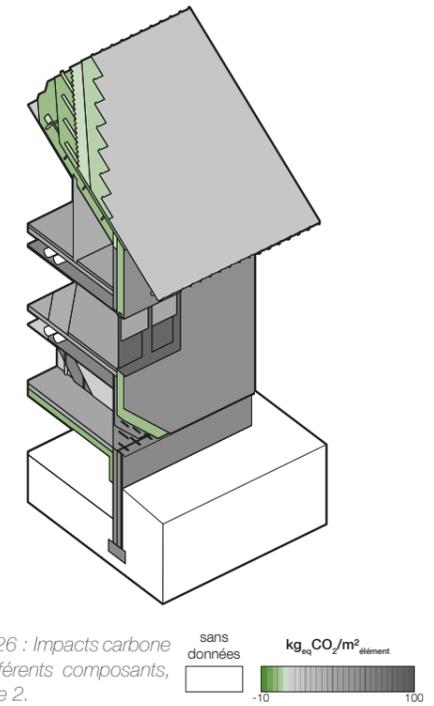


Figure 26 : Impacts carbone des différents composants, système 2.

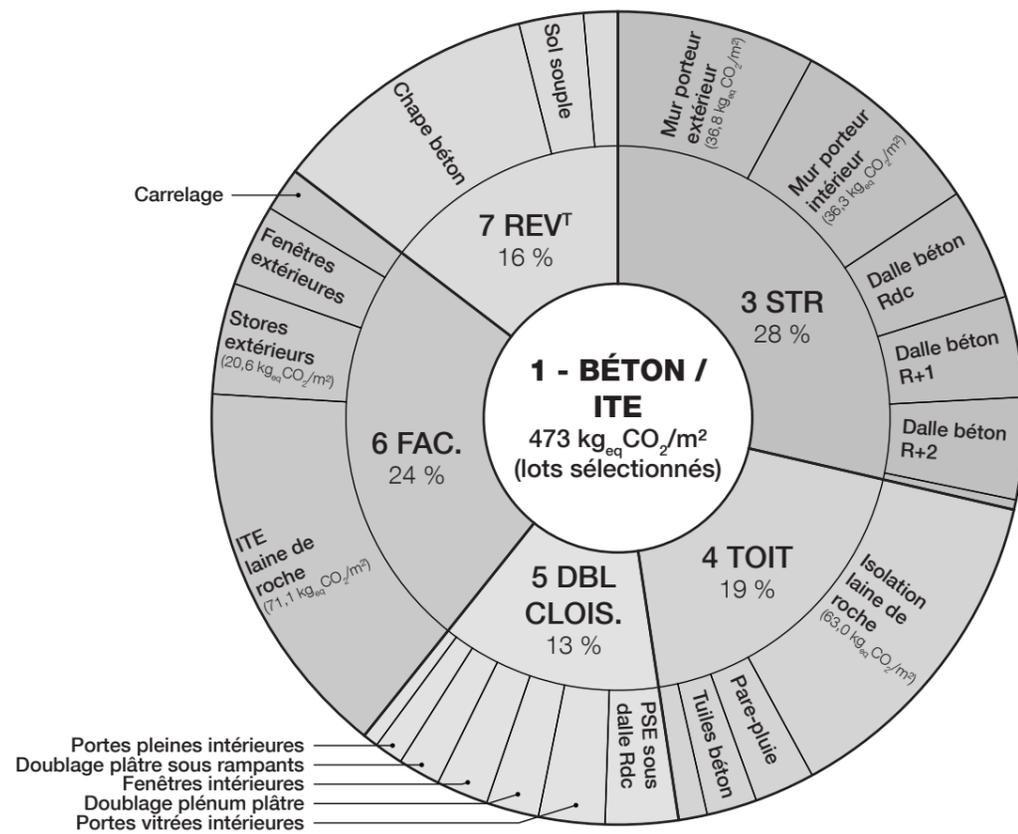


Figure 23 : Couronne de répartition des impacts carbone composants, lots architecturaux, système 1 - BÉTON / ITE

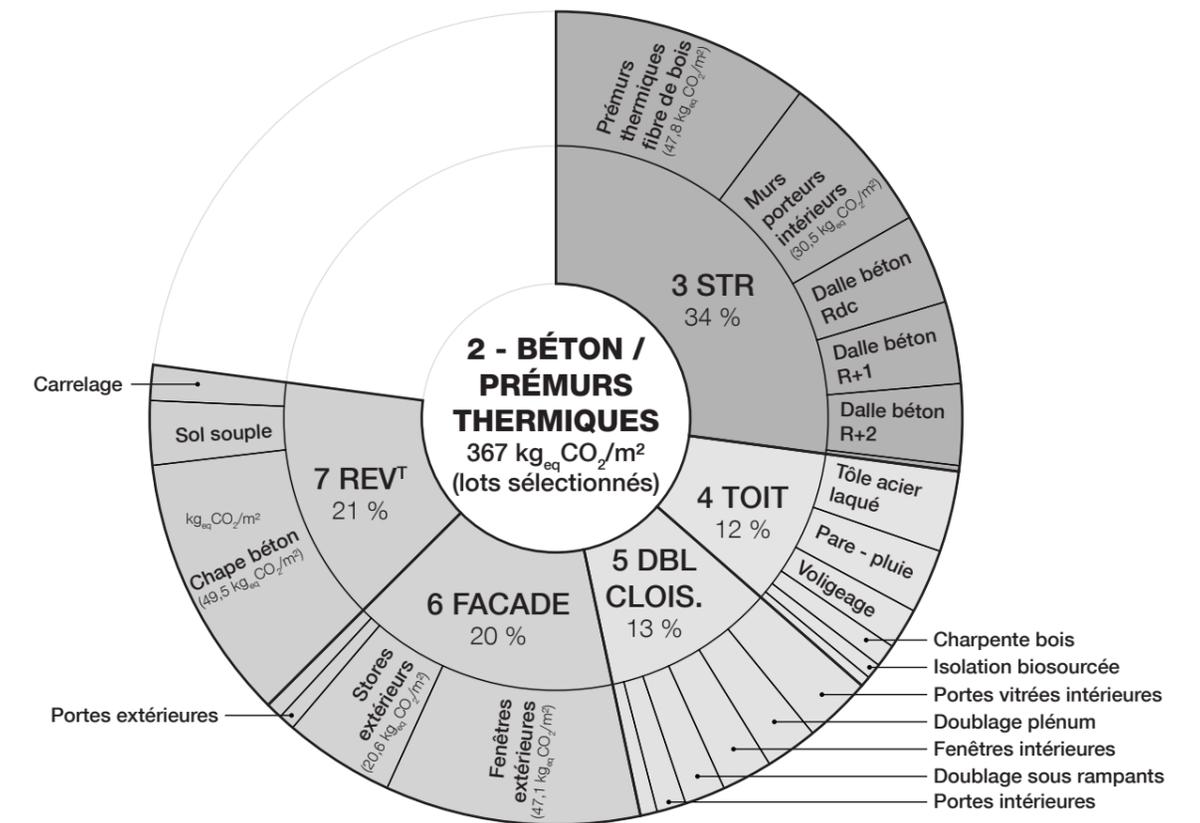


Figure 25 : Couronne de répartition des impacts carbone composants, lots architecturaux, système 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES

3 - MIXTE BOIS BÉTON

Cette variante est la première à recourir largement aux matériaux biosourcés. Ce choix se ressent dans l'impact carbone. D'une part, la mise en place de FOB remplissage paille permet de passer du mode structurel "voiles - dalles" à "poteaux - dalles" et de réduire la masse de béton mise en œuvre. En parallèle, ce remplissage avec un fort taux de biosourcé permet de réduire grandement l'impact global.

Compte tenu de ces deux modifications majeures, on observe une réduction remarquable de l'impact de l'enveloppe verticale :

De 195 kg_{eq} CO₂/m²_{façade} pour le système 1 et 67 kg_{eq} CO₂/m² pour le système 2, son impact passe à 13 kg_{eq} CO₂/m² pour le système 3.

Les bottes de paille en toiture permettent également de **diviser l'impact de ce lot par 4 (22,3 kg_{eq} CO₂/m²_{projet})**.

En revanche, on voit augmenter la part du lot doublages/cloisonnement, qui passe **de 20 à 70 kg_{eq} CO₂/m²_{projet}** entre les systèmes 2 et 3 (soit un passage de 5 à 18% des lots sélectionnés).

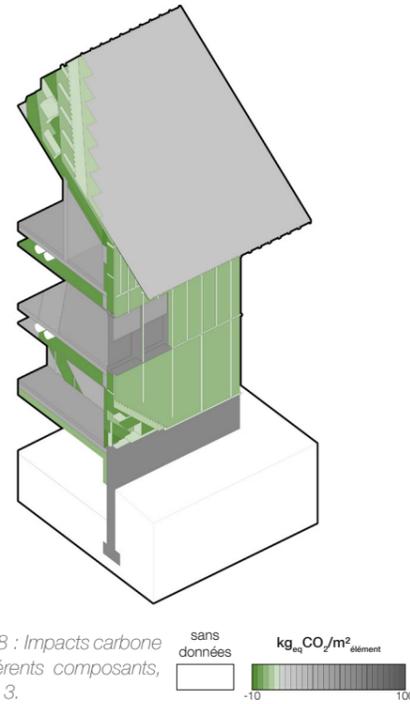


Figure 28 : Impacts carbone des différents composants, système 3.

4 - MIXTE BOIS TERRE

En plus de supprimer entièrement le béton des porteurs verticaux, ce système se distingue du précédent système par deux aspects.

Premièrement, les planchers intermédiaires en plancher traditionnel bois ont un impact total de **40 kg_{eq} CO₂/m²_{plancher}** soit une division par 2 par rapport aux dalles béton des systèmes 2 et 3.

Ensuite, la plupart des murs intérieurs est remplacée par des MOB remplissage terre crue. Leur impact, calculé par fiche recomposée, est de **86 kg_{eq} CO₂/m²_{mur} contre 44 kg_{eq} CO₂/m²_{mur} pour les voiles béton intérieurs et 10 kg_{eq} CO₂/m²_{cloisons} pour les cloisons plâtre. Cette différence représente alors pour le bilan du système 4 une augmentation de **20 kg_{eq} CO₂/m²_{projet}** (du système 3 au système 4).**

Cette différence, liée au bilan carbone de la fiche sélectionnée pour la terre crue, semble déconnectée des avantages de ce matériau présentés dans la recherche. Nous invitons à prendre ce résultat particulier avec un certain recul, pour les raisons présentées en introduction de ce chapitre.

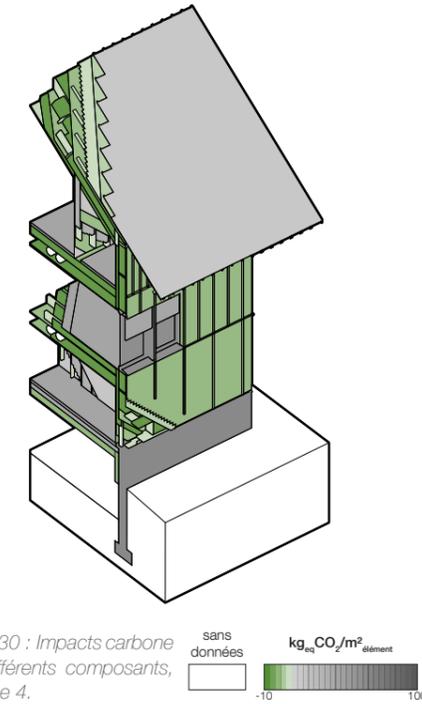


Figure 30 : Impacts carbone des différents composants, système 4.

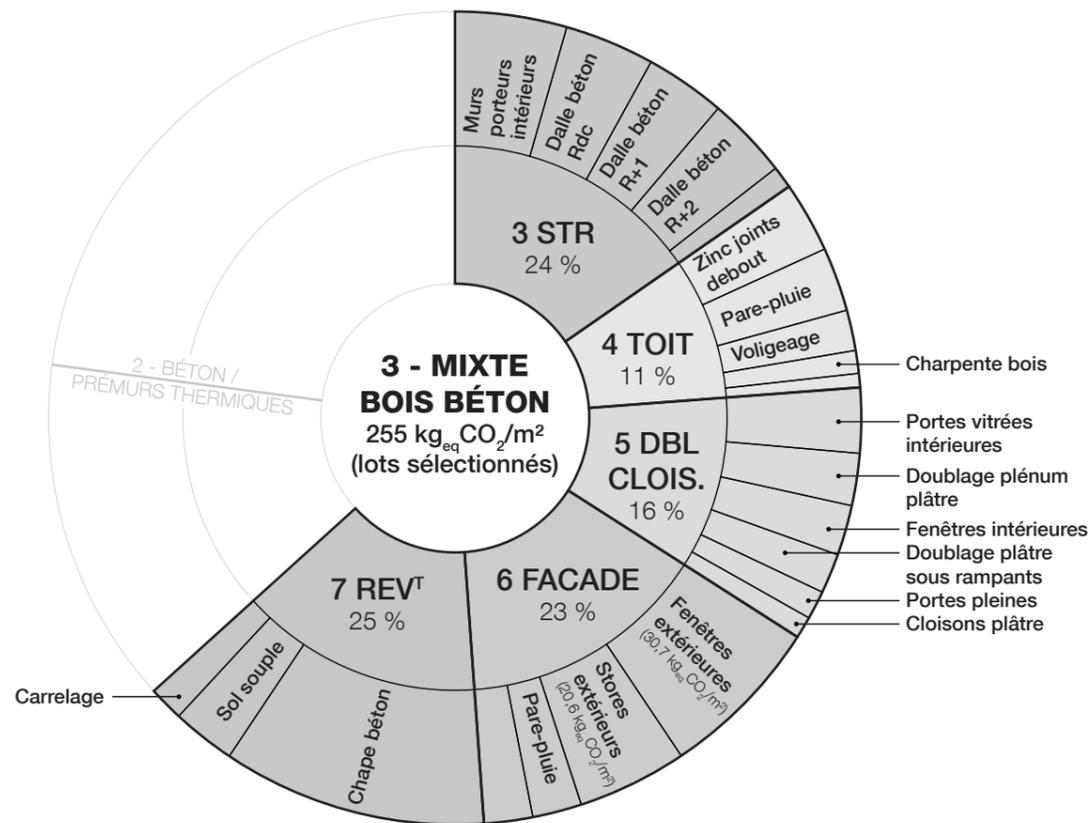


Figure 27 : Couronne de répartition des impacts carbone composants, lots architecturaux, système 3 - MIXTE BOIS BÉTON

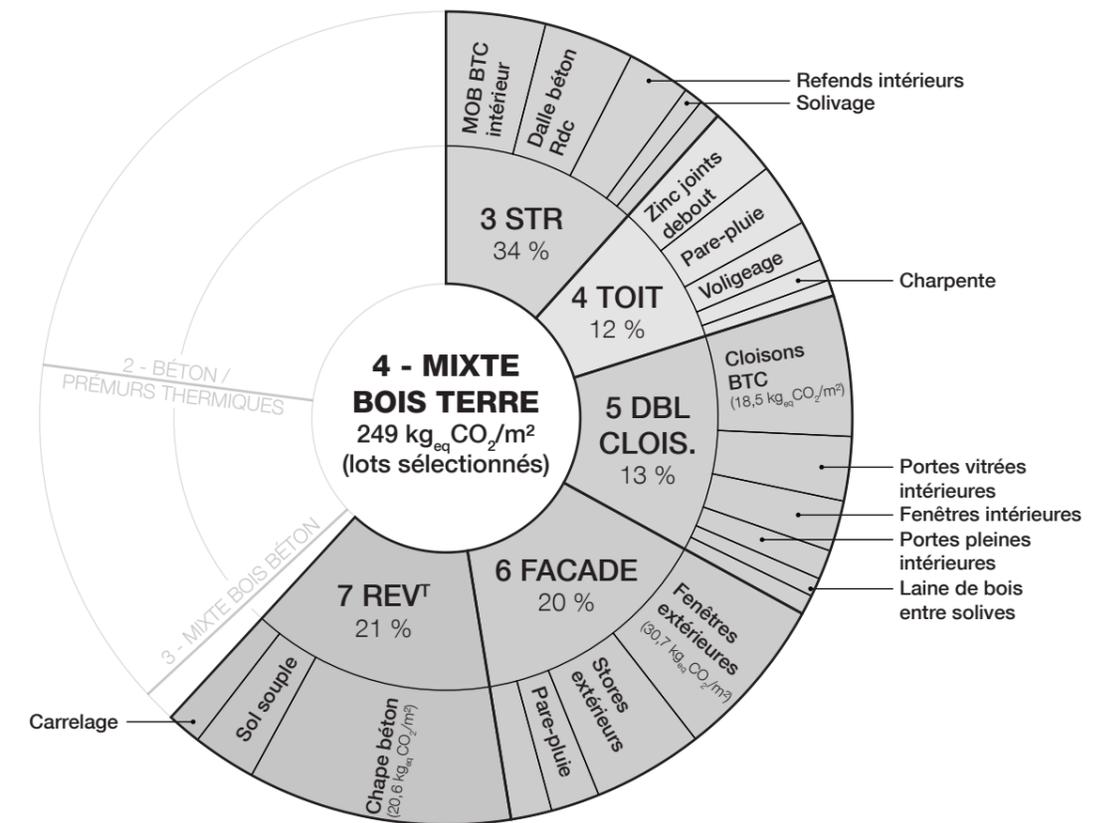


Figure 29 : Couronne de répartition des impacts carbone composants, lots architecturaux, système 4 - MIXTE BOIS TERRE

ÉLÉMENTS MAJORITAIRES

Les principaux contributeurs de l'impact carbone sont les éléments porteurs en béton : les dalles et les murs. Les fenêtres et protections solaires extérieures ont également un impact important sur le bilan, comme en témoignent les axonométries d'impacts par élément. On note que cet impact semble peu dépendant du changement de matériaux du cadre de fenêtre entre les systèmes, ce qui s'explique par la part grandement majoritaire du vitrage dans l'impact total d'une fenêtre, alors poussé au maximum par l'utilisation de triple vitrage. Ce bilan d'impact permet de poser la question de la légitimité systématique du triple vitrage, dont les avantages thermiques risquent de devenir négligeables au vu de la hausse d'émissions à la construction. Dans le cas de l'étude, les exigences de performances d'enveloppe passive rendent le choix du triple vitrage essentiel.

IMPACT DE L'ISOLATION THERMIQUE

Le recours aux matériaux biosourcés présente également un impact important dans les matériaux d'isolation thermique : le remplacement de la laine de verre par de la paille en isolant de toiture divise l'impact carbone du lot par plus de deux. Cette différence est d'autant plus importante pour des bâtiments aux performances thermiques hautes, qui tendent à être de plus en plus nombreux dans les décennies futures.

La complexification des cloisons pour les versions ossaturées se traduit par une augmentation importante de l'impact des lots de cloisonnement lorsque les surfaces de béton brut lasuré sont remplacées par des doublages acoustiques ou des cloisons intermédiaires.

BILAN SUR L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

L'analyse de cycle de vie détaillée permet de prendre du recul sur les matériaux et systèmes constructifs mis en œuvre dans un bâtiment. Avant même les analyses croisées, cette analyse a permis de tirer les enseignements suivants :

L'usage de matériaux biosourcés réduit drastiquement l'impact carbone. Cela est dû principalement au stockage de carbone durant la croissance de ces matériaux, mais également au peu de transformations qu'ils subissent et aux importantes émissions du matériau béton, principalement dues à la faible recyclabilité du matériau et à la fabrication fortement émissive du ciment.

L'impact des lots techniques occupe une part

importante de l'impact environnemental d'un bâtiment.

Les premières estimations donnent une part de 50% de l'impact de carbone et jusqu'à 90% pour d'autres indices de l'ACV. Une quantification de cet impact est alors plus que nécessaire pour déterminer le bilan environnemental du bâtiment dans son entièreté.

Si les lots de second œuvre augmentent dans les solutions ossaturées et biosourcées (3 et 4), leurs impacts restent globalement moins émissifs que les gains dus à la suppression des éléments béton.

L'étude nous a également permis de tirer des enseignements généraux, détachés des valeurs extraites.

La question de la durée de vie est primordiale. Outre le fait qu'il soit souvent profitable d'opter pour des solutions résistantes et pérennes, la considération de la durée de vie réelle et attendue d'un bâtiment aiderait à appréhender de manière plus intelligente la question de l'impact environnemental.

De la même manière, la question de la fin de vie d'un bâtiment et du devenir de ses éléments est à considérer dans le processus de conception. Ce point est d'autant plus vrai que les questions de démontabilité, recyclage, traitement des déchets, difficiles à généraliser, sont souvent détachées de la réalité de la construction et donc mal voire non représentées dans les FDES.

Il est primordial que la maîtrise d'ouvrage définisse clairement les moyens qu'elle est prête à mettre en œuvre pour l'entretien des bâtiments. La plupart des éléments décarbonés demandent un entretien souvent plus régulier et/ou un vieillissement plus visible. Revoir à la hausse le budget et la fréquence d'entretien sur un projet permettrait de faciliter la mise en œuvre de ces matériaux.

IMPACT MASSE CONSTRuite

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Les indices de masses construite et biosourcées sont extraits des FDES et utilisés pour estimer la masse totale mise en œuvre dans chacun des systèmes.

Les systèmes disposant d'une structure pleine gagnent beaucoup en masse. Si cette masse a tendance à augmenter l'impact carbone des versions, elle se révélera utile pour améliorer le confort d'été.

LIEN MASSE / IMPACT CARBONE

On observe une certaine corrélation entre l'impact carbone et la masse des lots des différents systèmes, corrélation qui se vérifie également pour les variantes dans leur ensemble.

Il est important avant toute analyse de préciser qu'il existe dans l'étude un fort lien entre allègement de la structure et ajout de matériaux biosourcés, la structure lourde de béton étant progressivement remplacée par un mode ossaturé.

MASSES CONSTRITES [kg/m²]

□ Lots sélectionnés
■ Masse biosourcée approchée (non quantifiée)

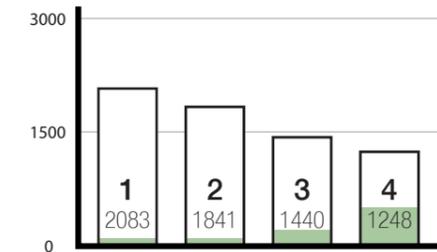


Figure 31 : Masse construite totale des variantes
En vert la masse biosourcée estimée

Il reste pertinent d'observer et d'illustrer ce phénomène. La réduction de masse inclut très généralement une réduction de matière et donc une réduction d'impact carbone. **Ce point fait naître alors, au même titre qu'un besoin de sobriété énergétique, un besoin de sobriété de consommation de matière.**

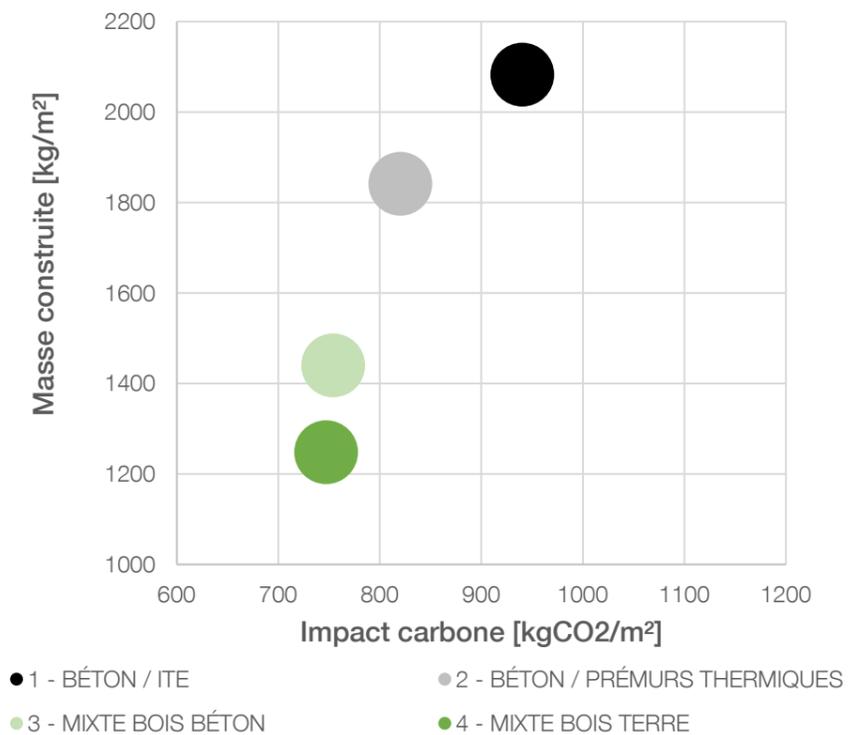


Figure 32 : Diagramme carbone / masse, tous systèmes

CONFORT D'ÉTÉ

HYPOTHÈSES ET MÉTHODE DE CALCUL

L'outil de simulation thermique dynamique (STD) permet de modéliser le bâtiment et de caractériser son comportement en calculant l'évolution de données (températures, puissances, débits) dans le temps.

Dans le cadre de cette étude, la STD permet dans un premier temps de vérifier le critère passif des enveloppes, puis dans un second temps de calculer les évolutions des températures intérieures et de caractériser les surchauffes estivales.

CARDE NORMATIF

La notion de confort d'été est incluse à partir de la RT 2012. Ce confort est caractérisé par la Tic (Température Intérieure Conventiionnelle), qui est une limite de température maximale à ne pas atteindre sur le bâtiment modélisé sous un climat et une durée de simulation définis.

D'autres critères de confort d'été existent et **abordent alors la notion de durée** en évaluant et limitant la durée de dépassement d'une température maximale.

La RE2020 analyse ce confort d'été via un nouvel indice qui ajoute un degré supplémentaire de complexité : les degrés-heures d'inconfort.

Les degrés-heures d'inconfort (ou DH) sont exprimés en °C.h sur la période des 25 jours les plus chauds.

La température intérieure ne devra pas dépasser une température limite. Chaque degré supérieur à la limite

pendant une heure est sommé pendant les horaires d'occupation du local.

Par exemple, 2°C de plus que la limite pendant 3h compteront pour 6°C.h

MÉTHODE DE CALCUL

Dans le cadre de la norme comme dans celui de l'étude, les modèles sont simulés sous deux climats :

- Strasbourg 2010, caractérisant le climat actuel
- Canicule 2003, fichier choisi dans le cas de calculs réglementaires, caractérisant le possible nouveau climat médian dans les années 2050.

Cette partie de l'étude porte sur les systèmes 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES, 3 - MIXTE BOIS BÉTON et 4 - MIXTE BOIS TERRE.

Ces trois modèles sont calculés **sans système de climatisation actif**. Le but est de vérifier le comportement des différents modes constructifs sans solution technologique.

ÉVALUATION DES VALEURS

Dans le cadre du confort d'été, **on étudiera les écarts de température intérieure entre les variantes**. Les évolutions de température sont donc représentées par les écarts de température entre les systèmes 3 et 4 en prenant comme base le système 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES.

Le local le plus défavorable dans toutes les simulations est l'Atelier petits, situé sur l'angle Nord-Est au premier étage. Tous les graphiques traiteront de cette pièce.

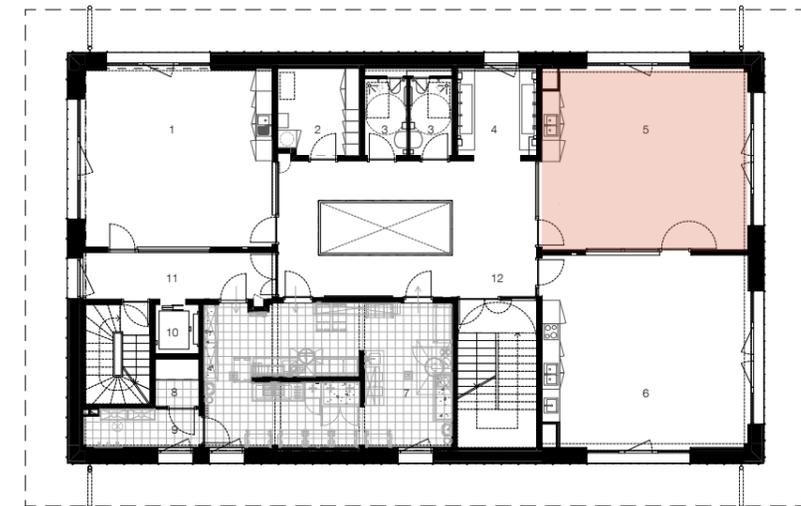


Figure 33 : Localisation du local "atelier petits", plan R+1

ANALYSE DES DONNÉES

INFLUENCE DU CLIMAT EXTÉRIEUR

En plus des hautes performances thermiques de l'enveloppe, le bâtiment dispose d'un dessin optimisé pour le confort d'été : débords de toiture importants, protections solaires extérieures opaques.

Toutes ces qualités d'enveloppe permettent de limiter au maximum l'influence de l'extérieur sur la température intérieure des locaux.

De plus, l'implantation du puits canadien comme système de climatisation passif permet de contrebalancer de manière significative les hausses de chaleur intérieures.

Le bâtiment est donc, avant toutes variations de matériaux dans le cadre de l'étude, hautement équipé contre les surchauffes.

INFLUENCE DE L'OCCUPATION

Une fois l'influence de la température et du rayonnement extérieur hautement réduite, les principales sources de chaleur (et donc de surchauffe) sont **les charges internes, soit les émissions des équipements et des occupants.**

Dans le cas de ce bâtiment, l'utilisation intensive en période estivale rend le bâtiment particulièrement sensible à la surchauffe.

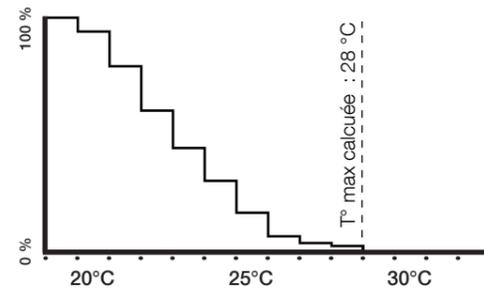
INFLUENCE DE LA MASSE

En période estivale, lorsque la température extérieure est supérieure à la température intérieure, l'aération en journée est susceptible de faire empirer la situation. **Une bonne réponse à ce problème est d'augmenter l'inertie thermique du bâtiment.**

Bien que les deux paramètres ne soient pas entièrement corrélés, les différences de masse construites entre les versions permettent d'affirmer l'existence de différences de capacité de stockage de chaleur et de les approcher.

L'influence de cette capacité s'observe alors dans les différences de températures entre les trois systèmes modélisés. Le système 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES affiche des variations de température moins

Répartition cumulée des températures en juin, juillet et août
Atelier Petits - fichier météo « Strasbourg moyen »



Répartition cumulée des températures en juin, juillet et août
Atelier Petits - fichier météo « Été caniculaire »

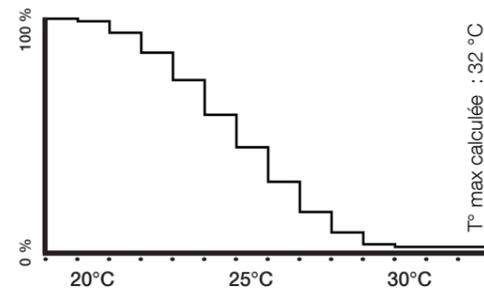


Figure 34 : Répartition des températures maximales dans le local "Atelier Petits" en période estivale et pour les deux climats. Résultats issus de l'analyse STD pour la réalisation du dossier Climaxion Passif du projet de Roeschwoog. On pourra approximer que ce résultat traduit le comportement du système 3 - MIXTE BOIS BÉTON

amples que les autres, le système 3 - MIXTE BOIS BÉTON divergeant moins que le 4 - MIXTE BOIS TERRE. Cette analyse permet également de déterminer que la masse de terre crue utilisée dans le système 4 - BOIS est insuffisante pour apporter au système la même inertie que le béton dans les autres systèmes.

L'inertie thermique permet alors de réduire les déperditions et ainsi les baisses de température en période inoccupée en hiver, mais surtout d'amortir les surchauffes en accumulant la chaleur émise et en la déchargeant la nuit grâce à la sur-ventilation nocturne mise en place.

CONCLUSION

Dans le cas d'une enveloppe et de protections performantes, les apports internes sont la plus grande faiblesse du bâtiment.

Pour pallier ce problème, l'apport d'inertie thermique se révèle efficace, comme l'atteste le meilleur comportement des systèmes constructifs 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES et 3 - MIXTE BOIS BÉTON. Sur le plan général, **une structure trop légère est plus vulnérable aux surchauffes qu'une structure lourde.**

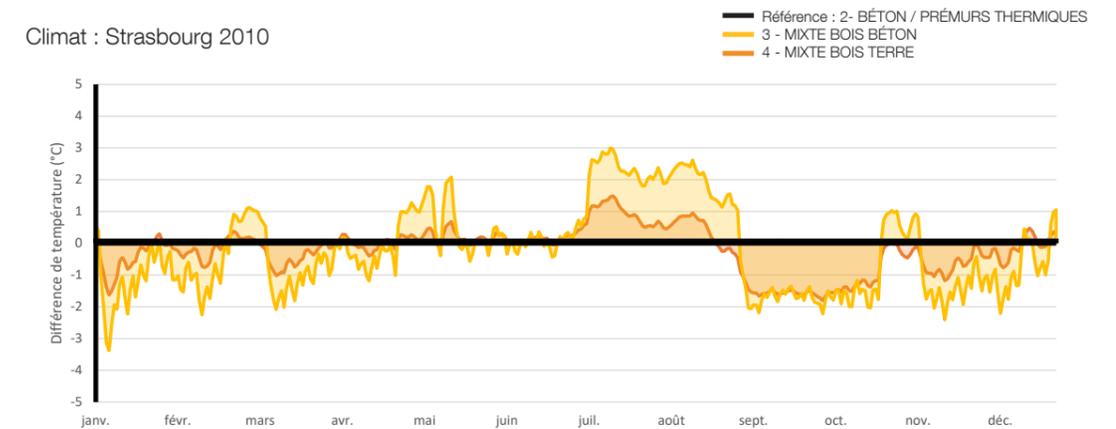
Ce problème est amené à prendre de plus en plus d'ampleur compte tenu du dérèglement climatique à venir. Le béton, mais aussi la pierre, la terre, la brique, sont des matériaux lourds permettant de stocker la chaleur reçue

pendant la journée et de la relâcher la nuit pour éviter de trop grandes surchauffes. D'autres moyens existent pour augmenter le confort en été et en période de canicule : systèmes de climatisation passifs (ex : puits canadien), protections solaires efficaces, réduction des ouvertures (sans trop réduire les apports solaires en période froide).

Il est important de garder en tête que la forte affluence en période estivale fait de ce bâtiment un cas particulièrement sensible aux surchauffes. Pour une occupation plus répartie dans l'année et amoindrie en été, le risque de surchauffe serait bien moindre. **Un design efficace pour garantir un confort d'été passe par un renseignement précis de l'occupation d'un projet au plus tôt dans le processus de conception.**

DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURES MOYENNES JOURNALIÈRES ATELIER PETITS - Référence : 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES

Climat : Strasbourg 2010



Climat : Canicule 2003



Figure 35 : Différences des températures moyennes journalières par rapport au système 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES, climat Strasbourg 2010 et Canicule 2003

COÛT DE CONSTRUCTION

HYPOTHÈSES ET MÉTHODE DE CALCUL

Les estimations de coût sont élaborées sur la base de l'estimatif réalisé pour la phase APD. Les modifications ont été évaluées sur la base de ratios au m² (valeurs 2021) appliqués aux mètres des variantes.

Les données extraites sont les prix hors taxes pour le bâtiment neuf (hors aménagement extérieur). Les coûts sont ramenés à la surface de plancher.

COÛT DE CONSTRUCTION [€/m² HT]

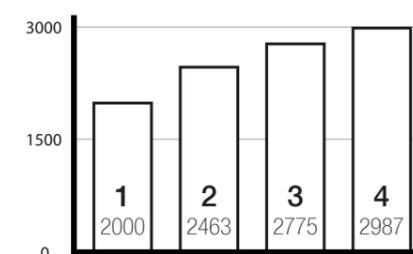


Figure 36 : Coûts de construction globaux

ANALYSE DES DONNÉES

Par rapport à l'impact de 2 000 € HT/m² du système constructif 1- BÉTON / ITE, les coûts augmentent de :

- 463 € HT/m² (+23%) pour le 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES ;
- 775 € HT/m² (+39%) pour le 3 - MIXTE BOIS BÉTON ;
- 987 € HT/m² (+49%) pour le 4 - MIXTE BOIS TERRE.

Sans grande surprise, la construction biosourcée se révèle plus coûteuse en augmentant le coût de construction des systèmes 3 et 4 relativement à leurs proportions de biosourcé.

BILAN

Ces résultats montrent une tendance à l'augmentation du prix en montant dans les variantes. Le croisement avec l'évolution du taux de biosourcé permet d'établir un lien et d'en faire la conclusion suivante :

L'usage de matériaux biosourcés a tendance à faire augmenter le prix, comme en témoigne le graphique ci-dessous. Cependant, cette tendance n'est pas automatique, et l'usage de matériaux biosourcés, qui demande une recherche plus importante de gisements locaux et de certifications techniques, peut parfois aboutir à un prix plus faible pour de meilleures performances. Il est également bon de rappeler qu'un recours plus récurrent à ces matériaux accompagnera le développement des filières attachées locales et aidera à équilibrer les possibles écarts de coût et de faisabilité actuels.

L'inclusion des aides fournies pour toute amélioration sur le plan environnemental d'un bâtiment est également à prendre en considération. **De multiples aides, pilotées par des acteurs territoriaux de toute échelle permettent d'amortir les surcoûts, voire de réduire l'impact budgétaire global du bâtiment.** Ce dernier cas survient souvent lors des améliorations d'enveloppe et est primordial à considérer.

Cette étude économique se révèle d'autant plus pertinente pour les analyses croisées de la suite de l'étude. Elle permettra de quantifier les évolutions des autres grandeurs et de les traduire en plus-value à la construction, valeur aujourd'hui largement dominante dans le domaine.

Comparaison des prix d'isolants à résistance thermique équivalente (R=5 m².K/W) selon le matériau (prix distributeur € HT / m²)

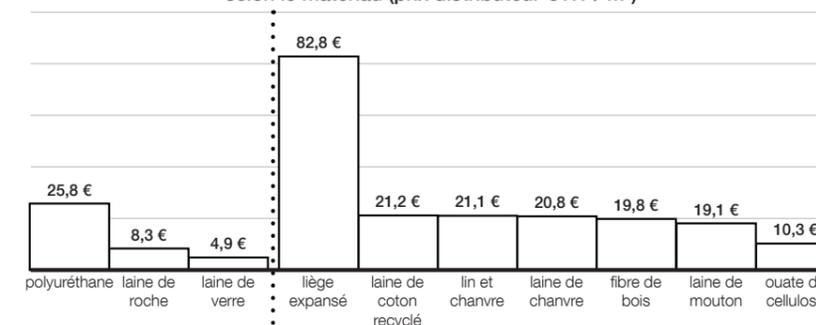


Figure 37 : Prix d'isolants à résistance thermique équivalente. Prix : Mars 2016. Source : Observatoire des coûts de la construction, Cerema

ANALYSES CROISÉES

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

L'ensemble des données collectées dans le cadre de l'étude est présent dans le tableau ci-dessous.

Les besoins de chauffage, exprimés en kWh/m²/an, ne sont pas abordés dans l'étude. Extraits pendant la première phase de la STD, ils permettent d'attester que les systèmes constructifs sont comparés à **enveloppe thermique équivalente et passive**. Le système 1-BÉTON / ITE étant construit avec des équivalences de résistance thermique pour toutes les parois donnant sur l'extérieur, on peut considérer que son comportement vis-à-vis des besoins de chauffage est équivalent à celui du système 2 - BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES.

PREMIÈRES CONCLUSIONS

La plupart des données observent une progression linéaire et monotone en se déplaçant du système 1 au 4 :

- La surchauffe estivale, la proportion de biosourcé et le coût de construction évoluent de manière croissante.
- L'impact carbone et la masse construite évoluent de manière décroissante.

Dans la suite de l'étude, on s'intéressera à croiser les résultats afin de pouvoir établir des corrélations entre les données.

BIAS DE PROPORTIONNALITÉ : LIEN MASSE CONSTRuite / MASSE BIOSOURCÉE

Les corrélations à suivre afficheront la proportion de biosourcé dans les systèmes étudiés. Avant de poser les premières hypothèses, il est important d'observer la relation entre masse construite et masse de biosourcé.

En excluant le système 1, qui ne présente pas d'évolution de masse de biosourcé par rapport au 2, on observe une relation de proportionnalité quasiment parfaite entre la masse construite et la masse de biosourcé.

Cette relation s'explique par une métamorphose progressive du mode structurel en plus des changements de système constructif. D'un mode "voiles dalles" plein pour le système 2, on finit sur un mode ossaturé bien plus léger pour le système 4.

La différence entre cette relation et les autres observées dans cette étude est que cette dernière est moins systématique dans les tendances de la construction actuelle. Les autres vérifient des modes de comportement connus aujourd'hui, que l'étude ne prouve pas mais cherche plutôt à quantifier et à appliquer pour un cas précis : le cas du périscolaire et école de musique de Roeschwoog.

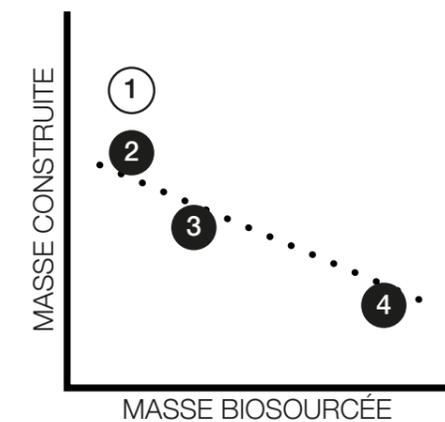


Figure 39 : Diagramme de corrélation masse construite / masse de biosourcé pour les 4 systèmes constructifs

		1	2	3	4
		BÉTON / ITE	BÉTON / PRÉMURS THERMIQUES	MIXTE BOIS BÉTON	MIXTE BOIS TERRE
Besoins de chauffage [kWh/m ² /an]			13,96	14,30	13,39
Surchauffes estivales [°C]	climat Strasbourg 2010	non modélisée en STD	(ref)	+ 1,5	+ 3,0
	climat Canicule 2003		(ref)	+ 2,0	+ 3,7
Impact carbone [kg _{eq} CO ₂ /m ²]		940	820	754	747
Masse [kg/m ²]	Masse construite	2 083	1 841	1 440	1 248
	Masse biosourcée	≈ 100	≈ 100	≈ 200	≈ 500
Coût [€ HT/m ²]		2 000	2 463	2 775	2 987

Figure 38 : Tableau récapitulatif des données quantitatives récoltées dans le cadre de l'étude.

CORRÉLATION MASSE / SURCHAUFFE

La première corrélation pertinente observée est la mise en relation de la masse construite et des surchauffes estivales des systèmes 3 et 4 par rapport au système 2 (sous les deux climats).

Comme évoqué dans la partie Confort d'été, la masse construite est liée aux surchauffes observées pour les systèmes 3 et 4. La masse permet d'approximer l'inertie des systèmes, qui leur permet de stocker la chaleur émise par les occupants pour maintenir une température basse en journée, puis de décharger cette énergie en période nocturne.

SENSIBILITÉ DES STRUCTURES LÉGÈRES

La sensibilité à la surchauffe du système 4-BOIS augmente légèrement avec le climat Canicule 2003. Cette augmentation met en lumière la vulnérabilité grandissante des structures légères avec un réchauffement climatique global, augmentant ainsi le besoin de vigilance sur cette question pour les constructions, rénovations et réhabilitations à venir.

Pour augmenter la quantité de matière inertielle dans le système 4 en conservant le principe de départ pour ce dernier, on pourra recommander l'ajout de terre crue entre les solives du plancher, comme observé dans la mise en œuvre du bâtiment LowCal, par Enerthec¹.

CORRÉLATION COÛT / CARBONE / BIOSOURCÉ

Cette corrélation met en relation le coût et l'impact carbone en visualisant le taux de biosourcé des quatre variantes.

LIEN COÛT/CARBONE

A première observation, on peut observer un certain alignement des données. Si le foisonnement manque pour avancer une réelle hypothèse de relation de proportionnalité, cet alignement permet d'approcher la relation suivante :

$$-1 \text{ kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2 = + 5,5 \text{ €}$$

UNE ASYMPTOTE VERTICALE

On remarque également que la marge de progression diminue au fur et à mesure que l'on diminue l'impact carbone. Cette augmentation de la pente permet de poser l'hypothèse de l'existence d'une asymptote, une limite verticale, émission minimale de carbone non évitable. A l'approche de cette droite, les $\text{kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2$ se révèlent plus chers à économiser.

Ainsi, il faut retenir que **les premiers efforts d'optimisation peuvent se révéler très efficaces**. Ce comportement est développé en pages suivantes.

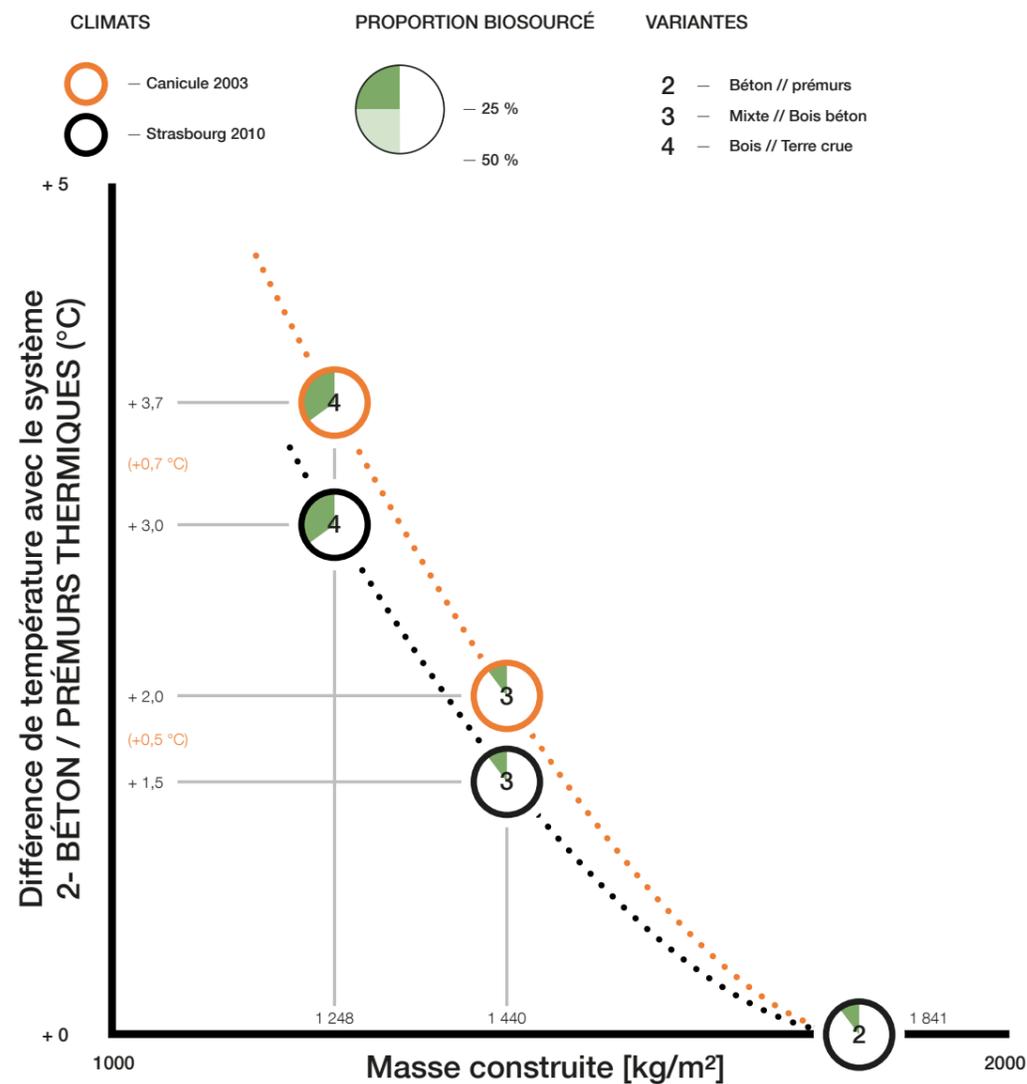


Figure 40 : Corrélation Masse/Surchauffe max/Proportion de biosourcé pour les systèmes 2, 3 et 4

¹ : RIESER T. LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à coût maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage. 2020.

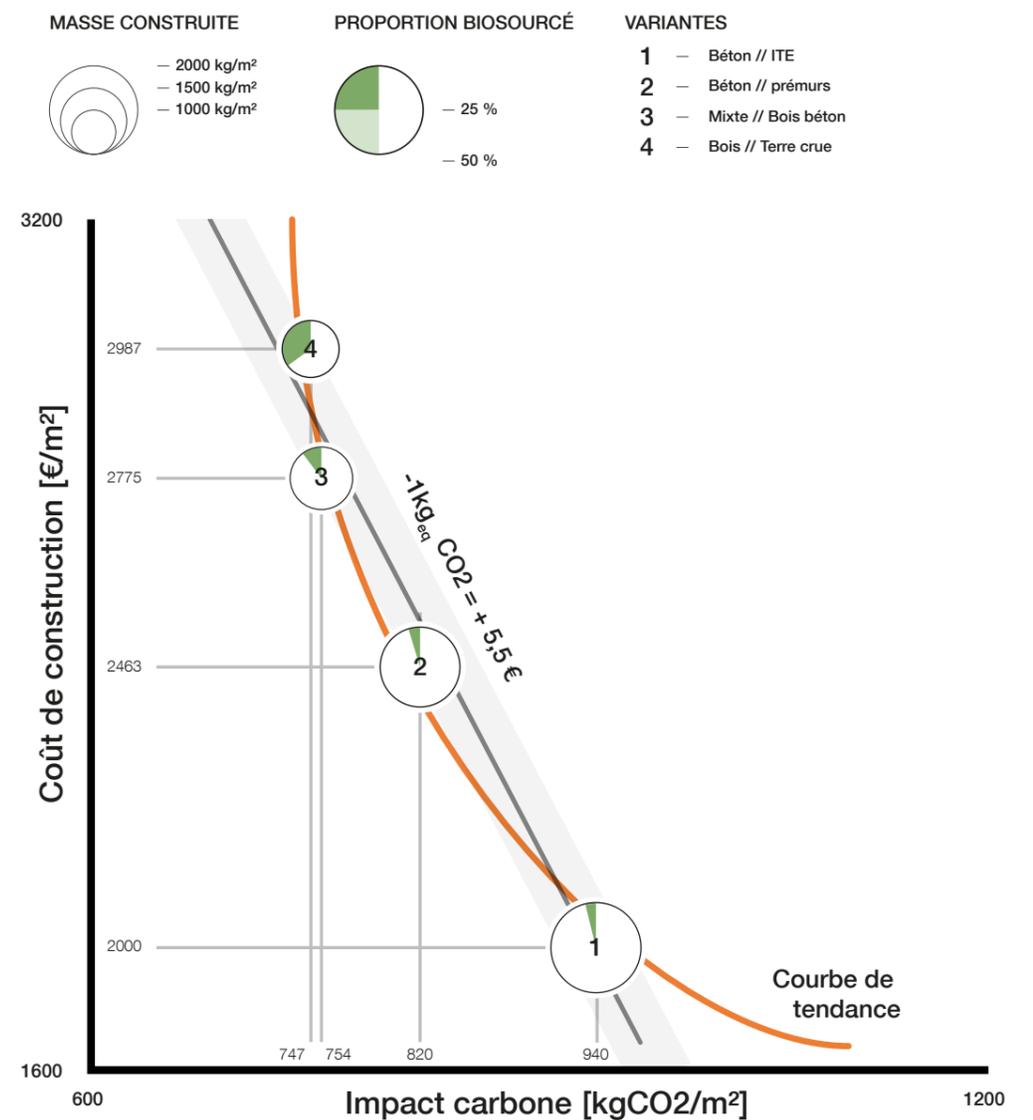


Figure 41 : Diagramme Coût/Carbone/Taux de biosourcé

EXTRAPOLATION ET CONJECTURES

La suite de cette étude est un exercice de projection.

Partant des relations entre variables énoncées plus tôt, et d'hypothèses de comportements, nous avons tenté d'étendre ce diagramme au cas général.

L'abaque ci-dessous est le résultat de cet exercice. Il part du principe que les variations d'un paramètre font se déplacer le projet selon des courbes pour lesquelles les autres paramètres sont constants. On considère également que ces "isoquantes" sont connues pour le projet donné.

L'abaque est construit de la manière suivante :

- Lorsqu'on modifie le taux de biosourcé, et qu'on conserve la même performance thermique, on se déplace selon l'isoquante "performance thermique", en orange sur le graphique, sur laquelle on se trouve ;
- Lorsqu'on modifie la performance thermique sans jouer sur le taux de biosourcé, on se déplace alors le long de l'isoquante "masse de biosourcé" correspondante, en vert sur le graphique.

Ce diagramme permet de formaliser la vision des liens coût/carbone d'aujourd'hui que nous a apporté ce travail de recherche :

- Construire plus décarboné reviendra plus cher à la construction
- Construire plus performant reviendra également plus cher à la construction mais amènera à réduire les coûts d'exploitation.

Une recherche du meilleur compromis coût/carbone/performance devient alors nécessaire et bénéfique pour toute construction, en gardant à l'esprit qu'en général les premiers efforts se révèlent être les plus rentables (exemple : le surcoût d'un passage à une enveloppe passive a de fortes chances de se révéler plus faible que les économies sur les consommations énergétiques).

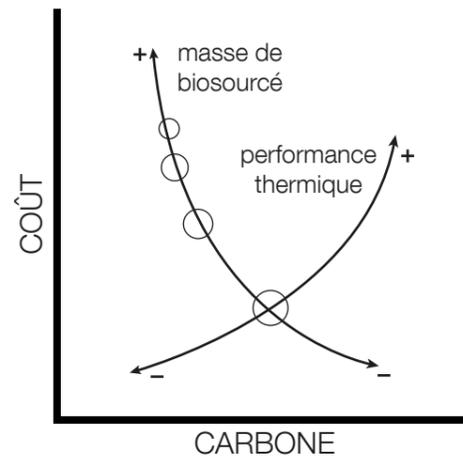


Figure 42 : Pistes d'extrapolations des données. L'impact carbone et budgétaire de la variation de taux de biosourcé est observé sur la corrélation précédente. L'augmentation de performance thermique quant à elle devrait naturellement faire augmenter le coût et l'impact carbone, puisqu'elle repose notamment sur une augmentation de la quantité de matière construite.

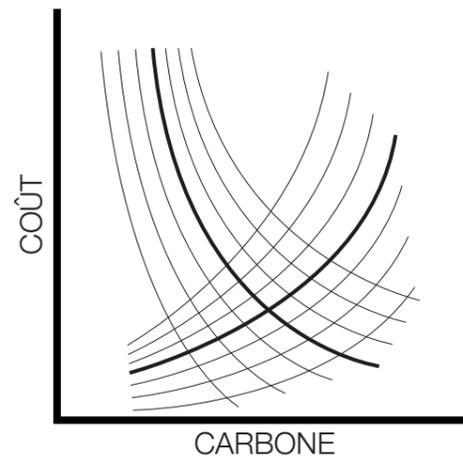


Figure 43 : Suite de la figure précédente : Deux jeux de courbes "isoquantes" se développent selon les deux vecteurs directeurs. Les courbes qui montent vers la droite sont des isoquantes "masse biosourcée". Les courbes qui montent vers la gauche sont les isoquantes "performance thermique".

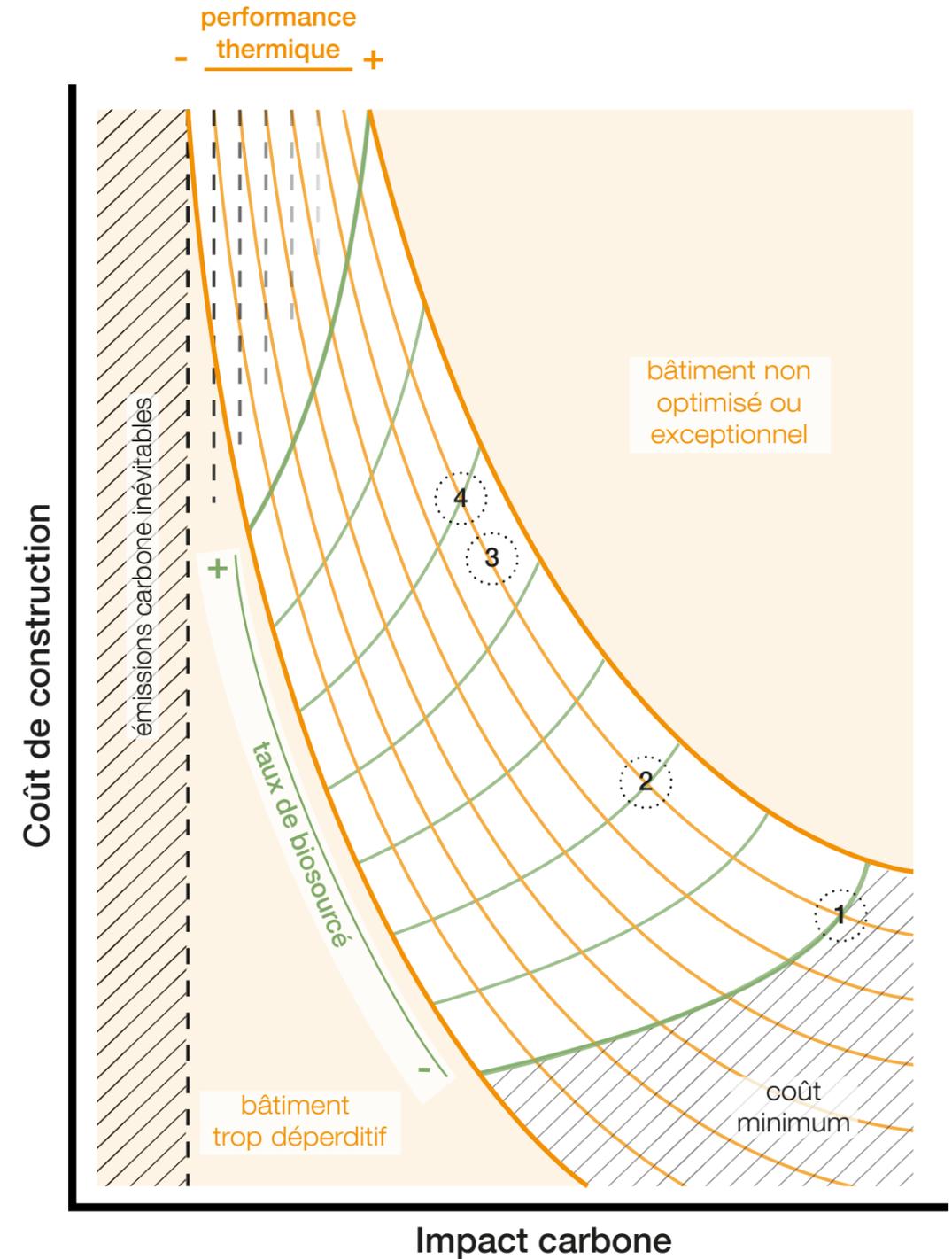


Figure 44 : Abaque d'extrapolation des données, exercice réalisé dans le cadre du projet de fin d'études

CONCLUSION

ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE L'ÉTUDE

La conjecture d'abaque présentée en partie précédente permet de mettre en lumière plusieurs enseignements tirés lors de cette étude :

Si les surcoûts liés au recours au biosourcé vont être amenés à diminuer avec le temps, **la réduction de l'impact carbone augmente à ce jour le coût de construction. Cependant, il convient de garder en mémoire que selon les rapports récents du GIEC, « agir coûtera moins cher que l'inaction ».** Il reviendra moins cher de participer aujourd'hui à la décarbonation de la construction que de répondre aux conséquences d'un changement climatique aggravé.

Bien que ce point soit une hypothèse de départ pour cette étude, il va également sans dire que **construire plus performant coûte plus cher et émet plus de carbone à la construction.** Toutefois ces investissements permettent de réduire dans un second temps les coûts d'exploitation ainsi que l'impact carbone des consommations énergétiques. L'équilibre va en général dans le sens des premiers efforts bénéfiques, notamment sur le caractère sensible de l'énergie, à la fois sur l'augmentation du prix, le besoin de sobriété de consommation et l'augmentation des besoins de climatisation.

Le reste de l'étude nous permet également d'arriver à d'autres conclusions :

Les apports internes représentent un risque de surchauffe important à ne pas négliger, plus difficilement évitable que les températures extérieures et les apports solaires. Pour éviter au mieux ce risque de surchauffe, **une connaissance accrue de l'occupation d'un projet futur est nécessaire à une optimisation du confort d'été de ce dernier.**

Dans le cas général, les systèmes passifs de climatisation (puits canadien) ou de protections (débords de toiture) représentent d'excellentes solutions peu consommatrices de matière et d'énergie pour amortir efficacement le risque de surchauffe estivale dans un bâtiment.

Dans le cas de fortes affluences en période estivale, et

considérant l'évolution du climat, **la présence d'une masse construite suffisante et d'un dispositif de surventilation nocturne efficace aide à diminuer ces surchauffes.**

Sur le plan général, les performances médianes du système constructifs 3 - MIXTE BOIS BÉTON ont permis de **mettre en lumière les qualités de l'hybridation.** La solution à ces contraintes multiples pourrait ne pas reposer sur un seul matériau mais sur **une architecture du bon sens, non dogmatique. Appliquer pour chaque élément le matériau optimal sur les différents plans présentés dans cette étude** permettrait d'améliorer l'ensemble des qualités d'un projet, en termes d'ambiance, de coût, de performance et d'impact environnemental.

ALLER PLUS LOIN DANS L'ÉTUDE

Ce travail de recherche pourrait se voir complété par plusieurs études.

Premièrement, une analyse des lots techniques précise permettrait d'aborder l'analyse de cycle de vie de manière plus complète. Les premières estimations leur donnent une part de 50% de l'impact de carbone et jusqu'à 90% dans d'autres indices de l'ACV. Le calcul détaillé de ces lots permettrait de lever cette approximation et d'étudier l'ensemble avec une résolution homogène. Dans un second temps, ce gain de précision permettrait de jouer également sur ces éléments techniques et de comparer différentes stratégies mises en place, aux même titre que pour les éléments architecturaux.

Ensuite, **une multiplication des matériaux et systèmes constructifs** serait plus que pertinente pour améliorer cette étude. **L'inclusion de l'acier, de la pierre, de la brique, du pisé** permettrait d'augmenter le nombre de résultats et de consolider les conjectures émises. Cette ouverture ferait également gagner en recul et disposer d'un regard plus global sur le champ des possibles dans la construction contemporaine.

Pour finir, **une analyse de l'impact des consommations énergétiques en phase d'exploitation** du bâtiment pourrait s'ajouter à cette étude. La performance thermique deviendrait alors une variable à part entière.

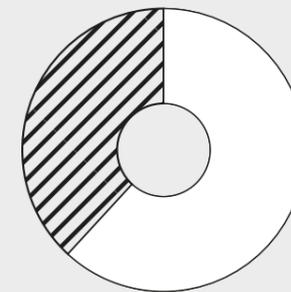
ALLER PLUS LOIN DANS LA TRANSITION

Au-delà du cadre de l'étude, il devient important de modifier la démarche d'appréhension et de développement de projets architecturaux. Passées à travers le spectre de l'impact environnemental, plusieurs stratégies particulièrement bénéfiques se dégagent.

Construire moins carboné passe en premier lieu par construire moins. **Donner une priorité importante à la réhabilitation** doit être le premier réflexe. Cet aspect prend davantage de sens avec le vieillissement du parc bâti des cinquante dernières années à dominante de béton, matériau durable et difficilement recyclable. **Optimiser les surfaces et les volumes construits** peut permettre de réduire l'impact environnemental. **Garantir une occupation maximale des locaux en favorisant la mutualisation de programmes** permet d'utiliser un bâtiment à son plus haut potentiel.

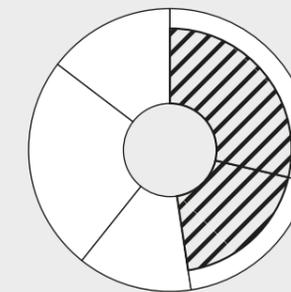
La recherche du recours au réemploi doit être systématique. Le geste doit aller dans les deux sens : détecter et valoriser des gisements de réemploi en fin de vie, rechercher des éléments réemployés à installer dans un projet en construction.

Pour finir, dans le cas d'une construction neuve, **il est impératif d'intégrer la pensée de la durabilité et de l'évolutivité d'un projet. Une recherche de pérennité** des matériaux permettra de limiter les rénovations nécessaires et de prolonger la durée de vie du bâtiment. **Une conception réduisant les contraintes d'agencement intérieur** permettra d'aider l'évolution vers ses usages futurs, et contribuera également au prolongement de sa durée de vie.



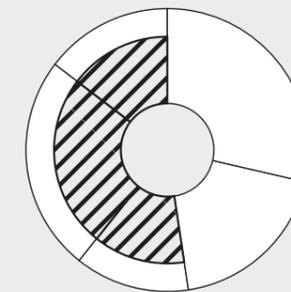
COMPOSITION

Utilisation de matériaux à impact réduit



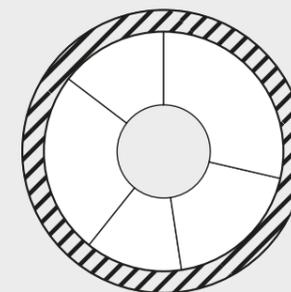
RÉHABILITATION

Réutilisation des éléments structurels présents



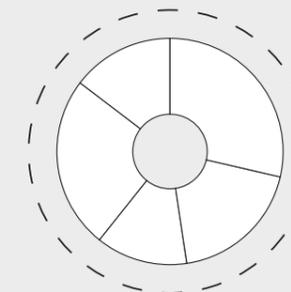
RÉEMPLOI

Revalorisation d'éléments de second oeuvre



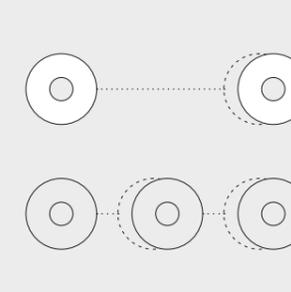
OPTIMISATION

Réduction des surfaces et de la quantité construite



MUTUALISATION

Augmentation de l'utilisation du bâtiment pour une surface constante



PERENNITÉ

Augmentation de la durée de vie pour diminuer la fréquence de reconstruction

BIBLIOGRAPHIE

BIHOUIX P. Conférence introductive : To build or not to build. In : CNBD (Congrès International du Bâtiment Durable). Strasbourg. 6 oct 2021

CABASSUD N. Guide RE 2020. Cerema, 2020, 72 p.

CABASSUD N., GULDNER L., FROMENT S., et al. Fiche n° 03 : Les grands principes de la RE2020. Une réglementation à la fois énergétique et environnementale. In : Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), Décrypter la réglementation bâtiment. Bron : Cerema, 2020, 12 p.

DEBAEKE A. #01 Le bois - La complémentarité des systèmes constructifs en bois avec différents matériaux isolants biosourcés. In : Interreg V France-Wallonie-Vlaanderen. Les cahiers techniques biosourcés. Namur : Ligne bois, 2020.

DELCOURT H. #02 La paille - Spécificités techniques, réglementaires et organisationnelles d'un projet de construction en paille. In : Interreg V France-Wallonie-Vlaanderen. Les cahiers techniques biosourcés. Namur : Clster Eco-construction, 2021

Envirobat Grand Est. Matériaux de construction biosourcée et commande publique. [en ligne]. Disponible sur <https://www.youtube.com/watch?v=VWMQc8oKTjk> (Diffusée le 16 mars 2021)

FOUQUET M. ACV dynamique vs ACV statique 2/3 : étude de cas pour des logements collectifs. [en ligne]. Disponible sur [https://www.construction21.org/france/articles/h/acv-dynamique-vs-acv-statique-2-3-etude-de-cas-pour-des-logements-collectifs.html#:~:text=Dans%20le%20calcul%20statique%2C%20la,de%20vie%20\(100%20ans\)](https://www.construction21.org/france/articles/h/acv-dynamique-vs-acv-statique-2-3-etude-de-cas-pour-des-logements-collectifs.html#:~:text=Dans%20le%20calcul%20statique%2C%20la,de%20vie%20(100%20ans).). (Publié le 9 fév. 2021)

DE KORFF M., BOYEUX B., BLAISSE L. et al. Matières, retour aux sources. Architectures Cree, 2015, n°373.

LIERMANN F., COMPIN J.B., ENGUERRAND M. Confort d'été et matériaux bio/géo-sourcés. Zoom sur la terre crue. In : CNBD (Congrès International du Bâtiment Durable). Bruxelles. 8 oct 2021

MICHAUX B., RABUEL N. Nouveaux matériaux et marchés. Exemple de l'isolation en paille hachée. In : CNBD (Congrès International du Bâtiment Durable). Bruxelles. 8 oct 2021

MOUGEL B., ROBINOT M., KLEIDERER T. et al. Carte des ressources du Territoire Lorrain. Frugalité Heureuse et Créative, sept. 2020.

OLIVA J.P., COURGEY S. La conception bioclimatique. Mens : Terre Vivante, 2006, p. 208 (col. Techniques de pro)

OLIVA J.P., COURGEY S. L'isolation thermique écologique. Mens : Terre Vivante, 2010, p. 11-16. (col. Techniques de pro)

Passive House Institute. Passive house requirements. [en ligne]. Disponible sur https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm (Page consultée en oct. 2020)

POUILLADE A. Les coûts des matériaux biosourcés dans la construction - État de la connaissance 2016. Nantes : Cerema, 2017

PERRIER C. Accompagner une agence d'architecture dans sa transition environnementale. Mémoire de projet de fin d'études, INSA Strasbourg, 2022

P&Ma (Paris & Métropole Aménagement). Construction bas carbone : baliser le champ des possibles. [en ligne]. Disponible sur <https://www.paris-metropole-amenagement.fr/fr/construction-bas-carbone-baliser-le-champ-des-possibles-528>. (Page consultée en fév. 2022)

RIESER T. Description du bâtiment et de ses équipements. In : LowCal, étude du premier bâtiment E4C2 pour massifier la réalisation, à cœur maîtrisé, du bâtiment à énergie positive, bas carbone, low-tech, local et sans chauffage. 2020.

SURINI T., SCHIFF L., GUIDAT S. et al. Sur le chemin de la neutralité carbone : les filières. In : CNBD (Congrès International du Bâtiment Durable). Strasbourg. 6 oct 2021

Décret n° 2021-1004 du 29 juillet 2021 relatif aux exigences de performance énergétique et environnementale des constructions de bâtiments en France métropolitaine (J.O. n°176 du 31 juillet 2021)

Arrêté du 26 octobre 2010 relatif aux caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments, Chapitre III, Article 7

LEXIQUE

ACV : Analyse de Cycle de Vie

BBCA : Bâtiment Bas Carbone

Bbio : Besoins Bioclimatiques

BTC : Briques de Terre Crue

CE : Confort d'Été

Cep : Consommation en Énergie Primaire

DH : Degrés - Heures (d'inconfort)

FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire

FOB : Façade à Ossature Bois

MOB : Mur à Ossature Bois

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

ITE : Isolation Thermique par l'Extérieur

MDEGD : Module de Déclaration Environnementale Générique par Défaut

PEP : Profil Environnemental Produit

RE2020 : Réglementation Environnementale 2020

RT : Réglementation Thermique

REMERCIEMENTS

Katharina BROCKSTEDT, centre de ressources ENERGIEVIE.PRO

Didier CASSIN, entreprise ARGILUS

Camille DE GAULMYN, bureau de conseil FRANCK BOUTTÉ CONSULTANTS

Nicolas GENTNER, entreprise SCHILLIGER

Adrien GUILLOT, entreprise PIVETEAU

François MAIROT, bureau d'études OTE

Franck MARSCHALL, entreprise MOCOPINUS

Quentin MEYER, bureau d'études OTE

Laurent ROSART, entreprise EVOLUGLASS

Allain VOLLMER, entreprise VOLLMER

Manuel ZAEPFFEL, entreprise BATILIBRE

r h b |

rouby hemmerlé brigand architectes

13 rue du Général de Castelnau

67000 Strasbourg

09 81 43 57 36

agence@rhb-architectes.com

