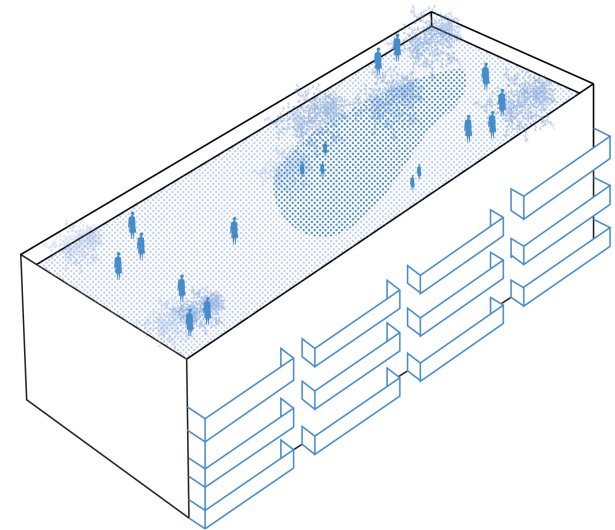


Séparatifs
verticaux



Le projet Maillons

Maillons est un projet qui vise l'accélération de la construction bio et géo-sourcée sur les territoires d'Ile de France et de Normandie. Il vise à identifier les possibilités de développement du territoire de la Vallée de la Seine pour répondre à une demande croissante en investiguant les « maillons » manquants d'une chaîne qui va du champ jusqu'aux investisseurs.

D'une durée de 2 ans, ce projet est financé par l'ADEME, la Région Normandie, dans le cadre du CPIER Vallée de la Seine et de l'AMI « Transition Ecologique et Valorisation Economique ». Il est mené par un groupement de bureaux d'études, architectes, écoles et centres de ressources.

Tourné vers les filières des régions Ile de France et Normandie, le projet vise à cartographier leurs forces et faiblesses, menaces et opportunités avec l'objectif d'accroître progressivement leur reconnaissance et leur contribution à la construction neuve et la rénovation.

Il s'attache également à créer des données économiques, carbone et normatives sur un ensemble de cas de bâtiments réels, les « prototypes », et représentatifs du marché francilien et normand.

Le travail doit se conclure début 2024 sur des orientations stratégiques territoriales.



Le projet Maillons

Le déroulé du projet Maillons se structure en 3 phases :

Phase 1 : Sourçage (1^{er} rapport du 9 décembre 2022)

- ⇒ Cartographie des filières bio et géosourcées de la Vallée de la Seine
- ⇒ Identification des chaînons manquants de leur chaîne de valeur
- ⇒ Panorama de la commande sur le territoire, par typologies et volumes

Phase 2 : Prototypages (objet du présent rapport)

- ⇒ Identification des solutions constructives avec un bilan technique, économique et carbone, appliquées à des cas réels
- ⇒ Analyse des marges d'optimisation technique et économique
- ⇒ Propositions de méthode d'évaluation sur les plans techniques, réglementaires et assurantiels

Phase 3 : Stratégie (à venir début 2024)

- ⇒ Proposition d'un plan d'accélération pour la généralisation de solutions constructives biosourcées

1

Du sourçage au prototypage

- 1.1. Du sourçage filières aux systèmes constructifs
- 1.2. Du sourçage commande aux bâtiments archétypes
- 1.3. Croisement filières et commande : les trajectoires maillons

2

Le prototypage

- 2.1. Méthodologie du prototypage : démarche progressivité + diversification
- 2.2. Les prototypes
 - 2.2.1. Le collectif béton rénové
 - 2.2.2. Le collectif patrimonial rénové
 - 2.2.3. L'ilot tertiaire neuf
 - 2.2.4. Les logements collectifs neuf

3

Du prototypage à la stratégie

- 3.1. Bilan du prototypage
- 3.2. Les maillons stratégiques pour la massification des constructions biosourcées
- 3.3. Vers une transition des référentiels
- 3.4. Esquisse des temporalités d'actions à mener

Lexique

Architecture

- Archétypes : bâtiments existants et représentatifs de l'immobilier de la vallée de la Seine. 12 archétypes ont été sélectionnés dans la première phase d'étude.
- Archétypes à prototyper : sélection d'un nombre restreint de bâtiments parmi la totalité des archétypes, dans le but d'en faire une étude approfondie, objet du présent rapport.
- Prototypes : archétype modifié au niveau de sa morphologie, de sa programmation et de sa construction dans l'objectif de réduire le bilan carbone de l'opération.
- Fragment : extrait représentatif du bâtiment sur une largeur de trame structurelle et une hauteur d'étage. Le fragment permet de traiter une échelle plus fine applicable à l'ensemble de la construction.
- BAU : "Business as usual", le produit immobilier tel qu'il est construit habituellement. Il s'agit du bâtiment existant qui constitue le point de départ du prototypage et la base de comparaison des différentes variantes de prototypes.
- Lots ACV: décomposition réglementaire du bâtiment, couvrant la construction et les équipements pour les études d'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Ils sont utilisés comme clef de décomposition pour l'évaluation carbone.
- Lots techniques : au sein des lots ACV, ensemble des équipements techniques nécessaires au fonctionnement du bâtiment (CVC, CFO/CFA, Plomberie, ascenseurs, ...)
- Procédé constructif : ensemble des définitions et méthodes permettant, à l'aide de produits déterminés dans leur nature, leur composition, leurs propriétés et, le cas échéant, leur forme et leurs dimensions, de construire des ouvrages ou parties d'ouvrages de destination déterminée. Le vocable ne recouvre pas les méthodes de fabrication des produits.
- FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire, elle recense les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV).

Technique

- Ensembles fonctionnels : se rapportent à l'enveloppe du bâtiment, aux séparatifs intérieurs verticaux et horizontaux, aux aménagements et finitions intérieurs, aux équipements techniques et équipements spécifiques ainsi que les travaux d'aménagements extérieurs et aux études d'adaptation au sol du projet,

Ils sont utilisés comme clef de décomposition pour le chiffrage économique. Voir page 38 pour le détail du contenu des ensembles fonctionnels.
- Ouvrage : résultat obtenu à l'achèvement des travaux, constitué de matériaux de construction et de composants. L'ensemble des ouvrages compose le bâtiment.

1. Du sourcing au prototypage

Un bref rappel de la méthodologie du sourçage

Pour la bonne compréhension de ce second rapport, nous rappellerons dans les pages qui suivent la méthodologie succincte et les principales conclusions de ce premier rapport.

Celui-ci est disponible sur les sites Ekopolis (<https://www.ekopolis.fr/projet-maillons>) et ARPE (<https://arpenormandie.org/nos-projets/ami-cpier-maillons/>), ainsi que sur la page LinkedIn de Maillons !



The screenshot shows the Ekopolis website interface. At the top left is the Ekopolis logo with the tagline "Pôle de ressources francilien pour le bâtiment et l'aménagement durables". Navigation links include "Newsletter", "Contact", "Adhérer", and a search icon. A green navigation bar contains "DÉMARCHE BDF/QDF", "FORMATIONS", "AGENDA", "RESSOURCES", "CARTOGRAPHIES", and "L'ASSOCIATION". The main heading is "[ÉTUDE] Projet MAILLONS : recherche-action sur les biosourcés et géosourcés". Below this are three images: a field of golden wheat, the interior of a modern wooden building, and the exterior of the same building. A text block below the images states: "Le projet MAILLONS est une recherche-action ayant pour objectif d'accompagner la massification de l'emploi des matériaux biosourcés et géosourcés dans les projets de rénovation, de construction et d'aménagement en région Normandie et en région Île-de-France."



This screenshot shows a detailed page for the Maillons project. It features a circular icon with a house and a tree. A vertical sidebar on the left lists navigation categories: "ACTUALITÉS", "QUI SOMMES-NOUS ?", "ANNUAIRES DES PRO", "DÉVELOPPEMENT DES FILIÈRES", "LE RÉNO'ACC'", "LES FORMATIONS", "NOS PROJETS", "RESSOURCES", and "ARCHIVES". The main content area is titled "Le projet Maillons" and includes a sub-heading "Maillons - diffuser la construction bas carbone inter-régionales". The text describes the project's goal: "L'ARPE Normandie a intégré l'équipe du projet Maillons, lauréat de l'appel à Manifestation d'intérêt du CPIER (Contrat de Plan Inter-régional Etat Région) Vallée de Seine. Le projet MAILLONS a pour objectif de développer la construction bio et géosourcée en identifiant les chaînons manquants de la construction bas carbone dans les régions Normandie et Île de France. Sur 3 ans, Maillons dressera un état des lieux des filières en allant à la rencontre des acteurs, riches du territoire, et travaillera à la proposition de solutions constructives." Three images are displayed: a field of wheat, the interior of a wooden building, and the exterior of the building.

1.1 Du sourçage filières aux systèmes constructifs

Le sourçage et les filières étudiées

Analyse des chaînes de valeur pour les agro et géo ressources de la Vallée de la Seine

Ce travail a consisté à répertorier les différentes chaînes de valeur liées aux matériaux bio et géo-sourcés du périmètre d'étude. Nous avons choisi de représenter ces niveaux de transformation avec les différentes briques suivantes, que nous appelons des « maillons » (figure 1).

Les filières, au nombre de 9, ont été initialement sélectionnées si au moins l'un des maillons existait sur le périmètre normand ou francilien, comme par exemple un artisan spécialisé dans un matériau, ou une zone de production agricole (figure 2).



Fig1 : Chaîne de valeur productive



Fig2 : les 9 filières sourcées au départ de l'étude

Le sourçage et les filières étudiées

Synthèse visuelle sous forme de matrices

Les filières analysées ont fait l'objet d'une synthèse visuelle, sous forme de matrice, révélant par des ronds de tailles différentes, leur niveau de maturité sur chaque maillon.

En voici les paramètres de lecture décrits succinctement :

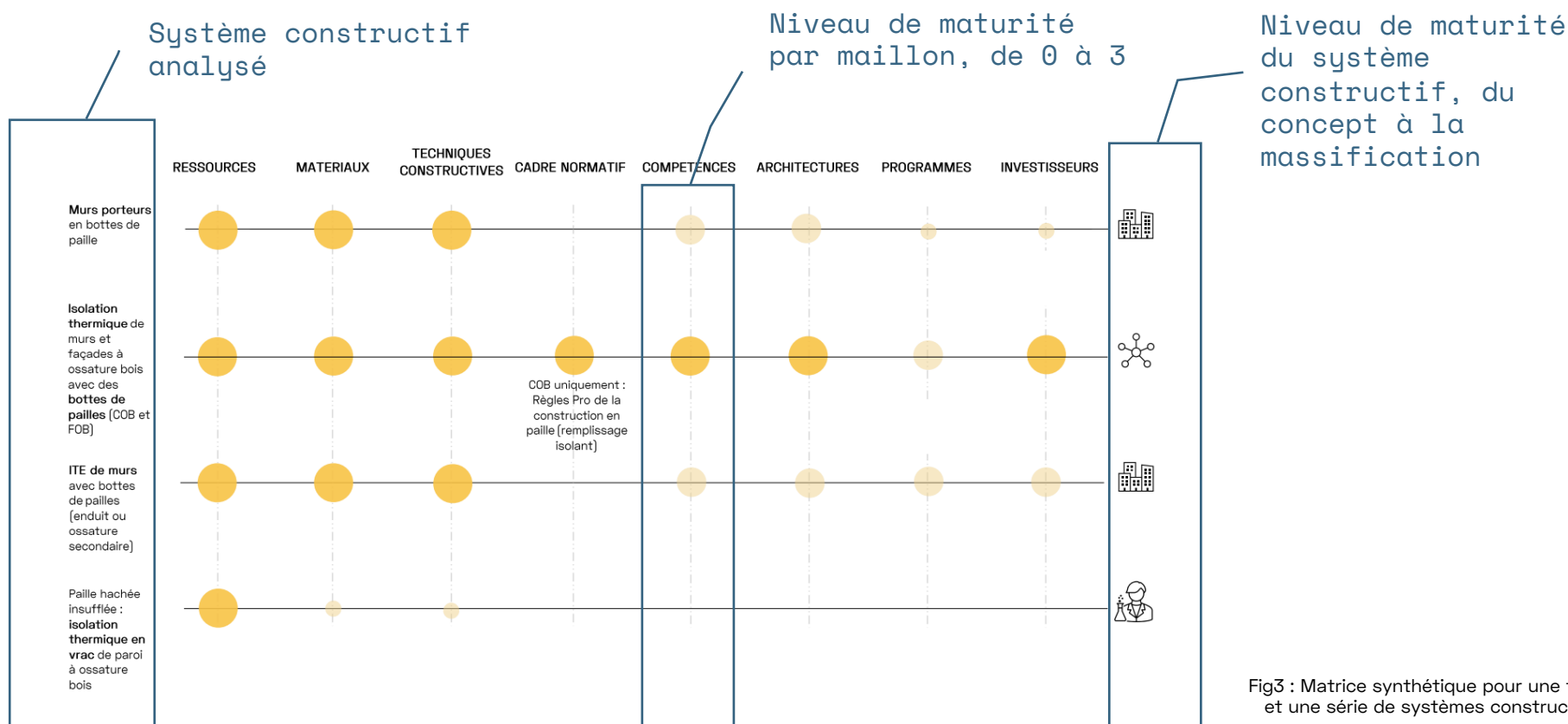


Fig3 : Matrice synthétique pour une filière et une série de systèmes constructifs

Le sourçage et les filières étudiées

Sélection des filières pour la phase prototypage

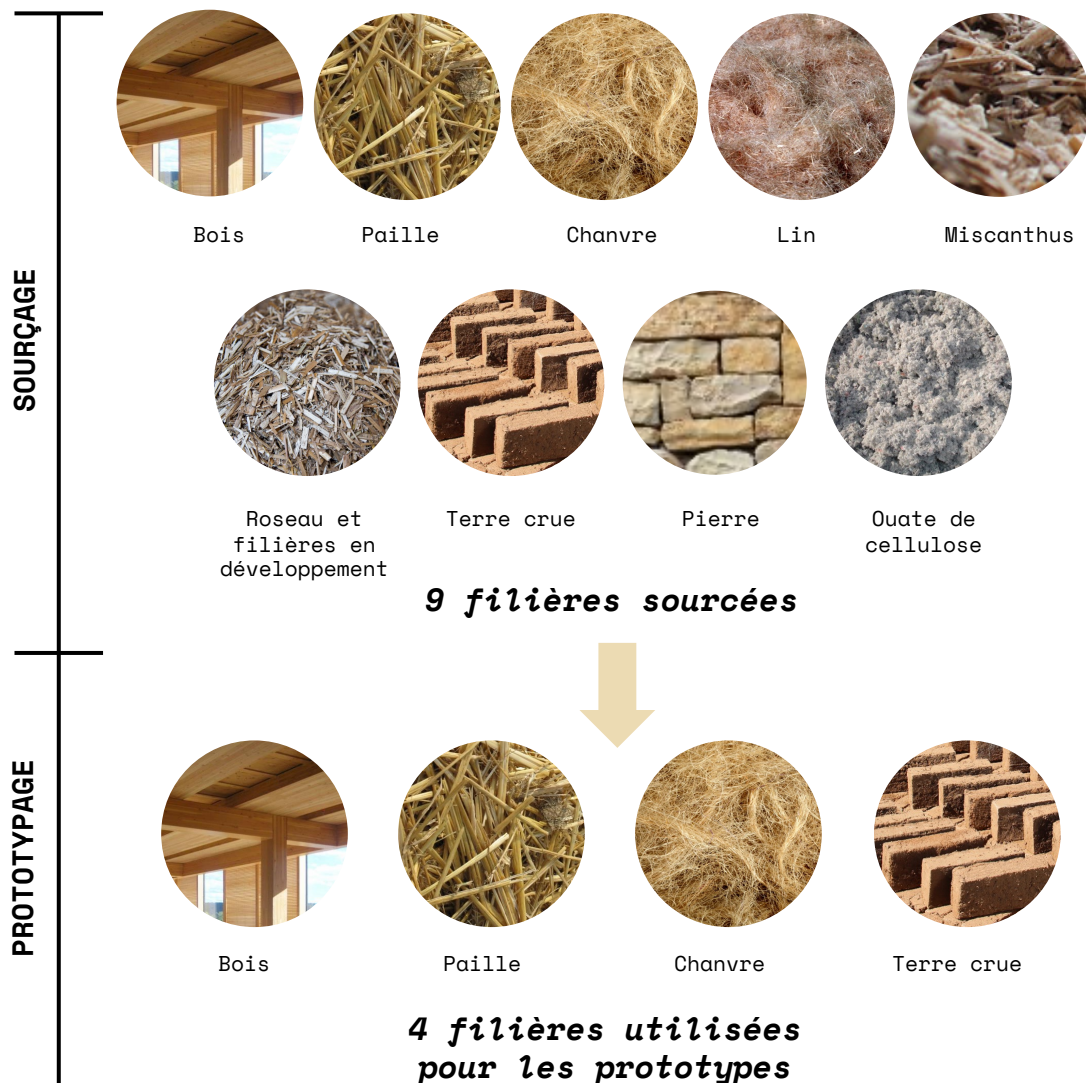
Suite à ce travail analytique, l'ensemble des matrices produites nous a permis de sélectionner les chaînes de valeur les plus compatibles avec la phase de prototypage, à savoir des chaînes qui proposaient a minima plusieurs systèmes constructifs, un cadre normatif émergent, des artisans et quelques opérations pilotes.

A l'issue de ce travail, 4 filières ont été sélectionnées :

- Le bois
- La paille
- Le chanvre
- La terre crue

Elles serviront à tester des systèmes constructifs, et les potentiels de massification.

A noter : Concernant les fibres (paille ou chanvre), d'autres typologies pourront à terme se substituer à celles étudiées pour le prototypage (lin, miscanthus ou autres).



1.2 Du sourcing commande aux bâtiments archétypes

Le sourçage et la typologie de la commande

Cartographie de la commande sur la Vallée de la Seine : analyse en trois volets

Le sourçage de la commande immobilière vise à dresser un état des lieux de la construction sur la vallée de la Seine. La commande a été analysée sur trois aspects :

- La répartition territoriale des constructions (données INSEE)
- La variété des typologies construites (chiffres Sit@del2)
- La morphologie des bâtiments produits (analyse architecturale et urbaine)

Les données statistiques sont complétées par des entretiens préparant des pistes d'évolution de la construction :

- Le marché est dominé par la production de logements dont la localisation reste le critère déterminant de la valeur du bien
- Les territoires attractifs peuvent imposer des cahiers des charges ambitieux en faveur des matériaux bio et géo-sourcés notamment
- Les territoires plus détendus permettent de développer des formes urbaines plus simples et adaptées aux expérimentations de nouveaux matériaux
- La raréfaction du foncier engage un changement global de paradigme de la commande immobilière, engageant la transition vers la rénovation de bâtiments existants.

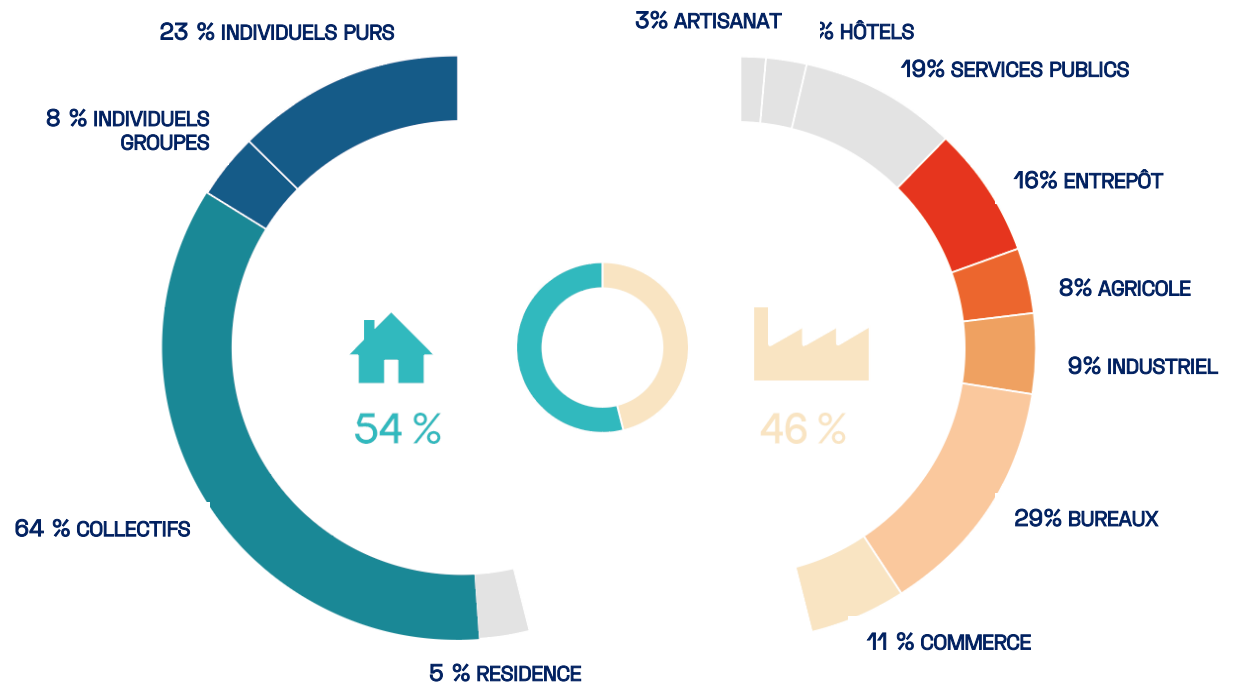


Fig4 : Répartition des produits immobiliers

Le sourçage et la typologie de la commande

Le cas particulier de la rénovation

La rénovation est encore marginale par rapport au volume de constructions neuves. Mais au regard des réglementations énergétiques et de la raréfaction des ressources, il est à espérer et à prévoir que la tendance puisse s'inverser.

La rénovation est plus difficile à analyser, notamment du fait de l'absence de déclaration selon la nature des interventions. C'est également une très grande disparité des opérations qui nous a conduit à privilégier deux critères de sélection :

- d'une part la rénovation thermique, en lien avec les objectifs nationaux d'un parc construit qui ne consommerait presque plus d'énergie à horizon 2050¹,
- et d'autre part le produit résidentiel, le plus répandu sur le territoire.

Nota : Importance du diagnostic préalable

Pour être réellement efficaces et ne pas créer de pathologies, les travaux réalisés doivent tenir compte de la grande diversité des bâtiments existants, qui implique des stratégies de rénovation différentes, basées sur un diagnostic préalable.

¹ Stratégie Nationale Bas Carbone

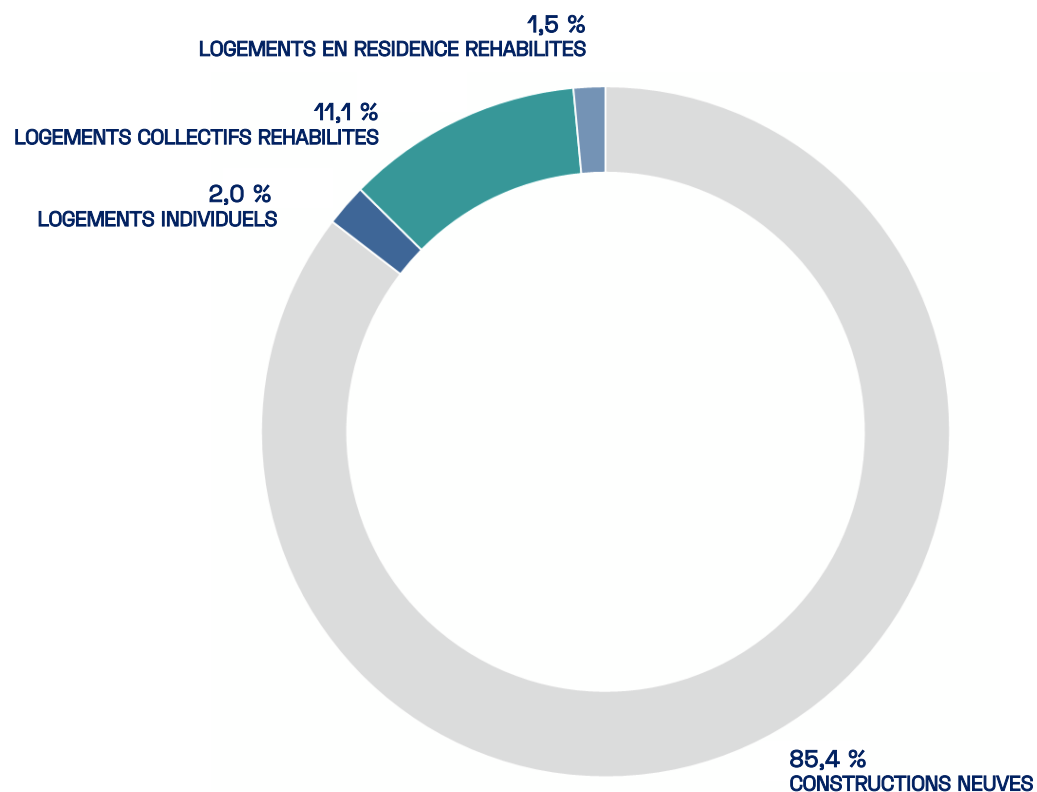


Fig5 : Répartition entre construction neuve et réhabilitée

Le sourçage et la typologie de la commande

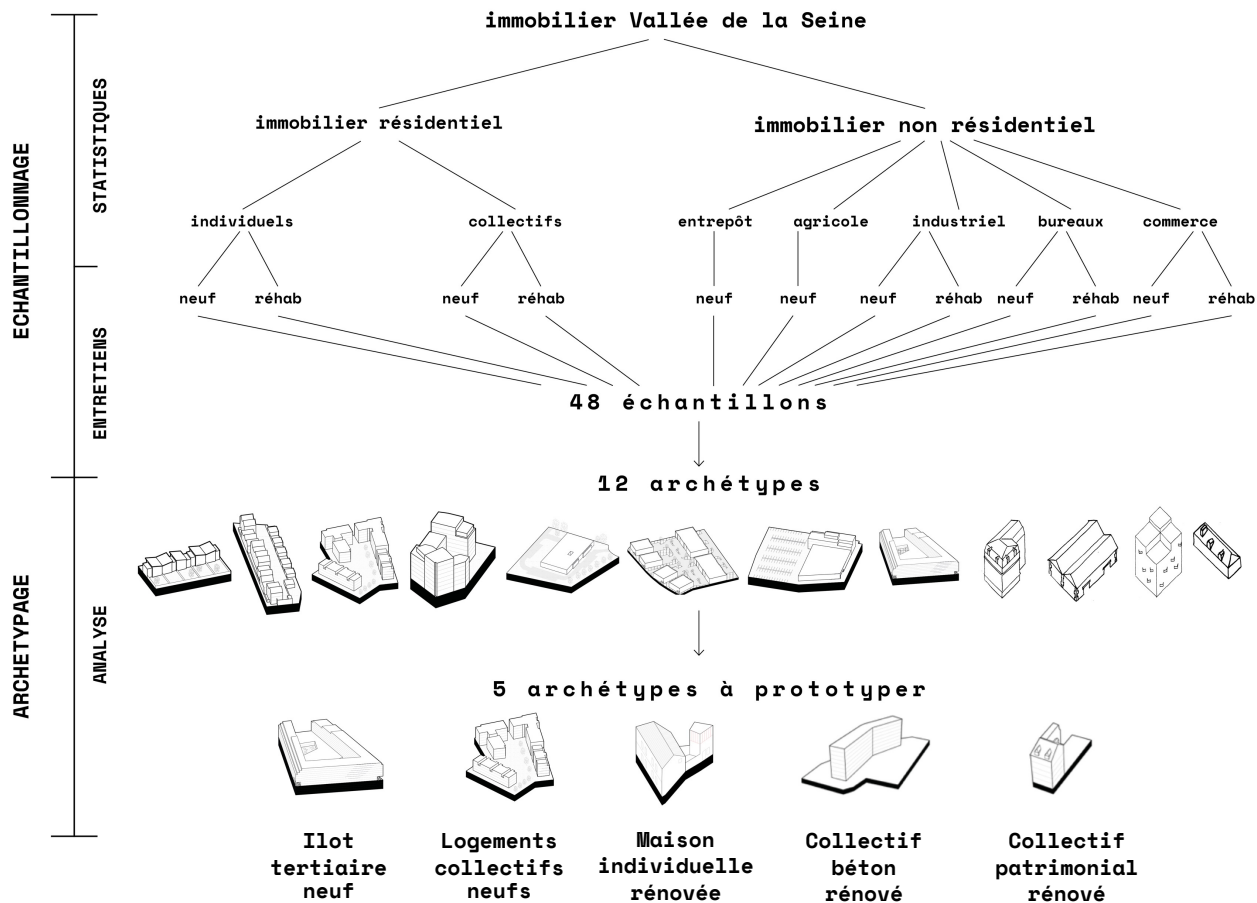
De la cartographie au prototype

Ce panorama immobilier de la Vallée de la Seine a permis, à travers des entretiens avec les acteurs de terrain, de sélectionner 48 bâtiments existants et représentatifs des données statistiques, désignés comme « les **échantillons** ». Ils caractérisent la diversité de la commande immobilière sur le territoire. Il s'agit de bâtiments existants et réalisés au cours des dix dernières années, choisis pour leur caractère ordinaire.

Ces échantillons ont ensuite été regroupés autour de 12 bâtiments dits « **archétypes** », dont le nombre réduit donne une bonne représentation du marché immobilier du territoire étudié. Ces archétypes peuvent s'apparenter à des têtes de famille morpho typologique. Les traits communs de chacune de ces familles sont la localisation (dynamique de construction, tension du marché), la nature du projet (neuf / réhabilitation), la destination (immobilier résidentiel / immobilier d'entreprise), la typologie (individuel / collectif ; tertiaire / activité) et la morphologie des constructions (surfaces, hauteur, implantation).

Enfin, la dernière étape a consisté à sélectionner parmi ces archétypes 5 bâtiments, qui sont l'objet du travail de prototypage, à savoir l'analyse de la mutation de leur conception et de leur programmation pour intégrer une large proportion de matériaux bio et géo-sourcés. Ils seront appelés les « **archétypes à prototyper** ».

A noter que l'archétype de réhabilitation d'une maison individuelle, réalisé en partenariat avec l'Ecole d'Architecture de Paris Belleville, sera présenté dans le prochain rapport, début 2024, pour être en lien avec le planning universitaire.



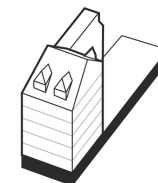
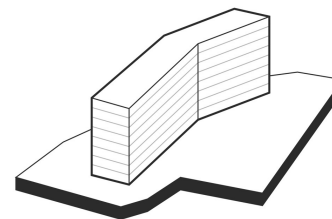
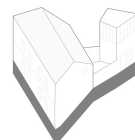
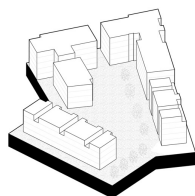
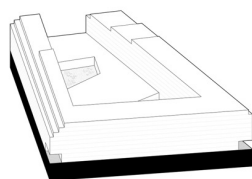
Cinq archétypes représentatifs de l'immobilier de la VDS

Les archétypes ont été sélectionnés non seulement pour leur représentativité mais également sur leur capacité à porter des opportunités dans le montage des opérations, notamment par le jeu des acteurs.trices mobilisé.e.s pour inciter à l'innovation. En tant que points de départ de l'étude et des transitions actuelles en cours, nous les avons nommés "business as usual".

Certaines typologies de bâtiments ont dû être écartées. C'est le cas par exemple des entrepôts à usage industriel, artisanal ou logistique dont le contexte économique ne

permet pas à date d'envisager de surcoûts de construction.

On peut envisager que ce type de construction suivra dans un second temps, lorsque les innovations constructives auront été testées et optimisées sur des typologies qui auront ouvert la voie, portées par des acteurs.trices engagé.e.s.



nomenclature	ILOT TERTIAIRE NEUF	LOGEMENT COLLECTIF NEUF	LA MAISON INDIVIDUELLE (À PUBLIER DÉBUT 2024)	LOGEMENT COLLECTIF BÉTON RÉNOVÉ	LOGEMENT COLLECTIF PATRIMONIAL RÉNOVÉ
Nature de projet	neuf	neuf	neuf + réno	rénovation	rénovation
programme archétype	Ilôt tertiaire	Logements collectifs	Logement individuel	Logements collectifs en béton	Logements collectifs patrimoniaux
Epoque de construction	Années 2015-20	Années 2015-20	?	Après 1940	Avant 1940
part de marché immobilier vallée de la Seine	13%	34%	14%		76%
Hauteur	R+7	R+3	R+1	R+7	R+5
Localisation	Aubervilliers	Colombelles	La Roche Guyon	Cherbourg	Paris
Catégorie sécurité incendie	Code du travail	Habitation 2 ^e famille	Habitation 1 ^{ere} famille	Habitation 3 ^e famille	Habitation 3 ^e famille

1.3 Filières x commande : les trajectoires maillons

Du sourçage au prototypage

Convergence entre la commande et les filières

L'initiation de la phase prototypage nécessite de définir les alliances possibles entre matériaux et archétypes. Les sourçages filières et commandes sont croisés pour établir l'ensemble des associations envisagées et présentées en page suivante.

Pour chaque partie du bâtiment, un degré de compatibilité entre systèmes constructifs et bâtiment prototype est défini selon les critères suivants :

- la maturité du cadre normatif,
- la pertinence constructive et hygrothermique,
- la viabilité économique,
- la dynamique des filières : localisation des ressources + représentation de la diversité des filières
- la qualité environnementale.

Ces critères permettent d'évaluer la pertinence entre systèmes constructifs et bâtiment prototype :

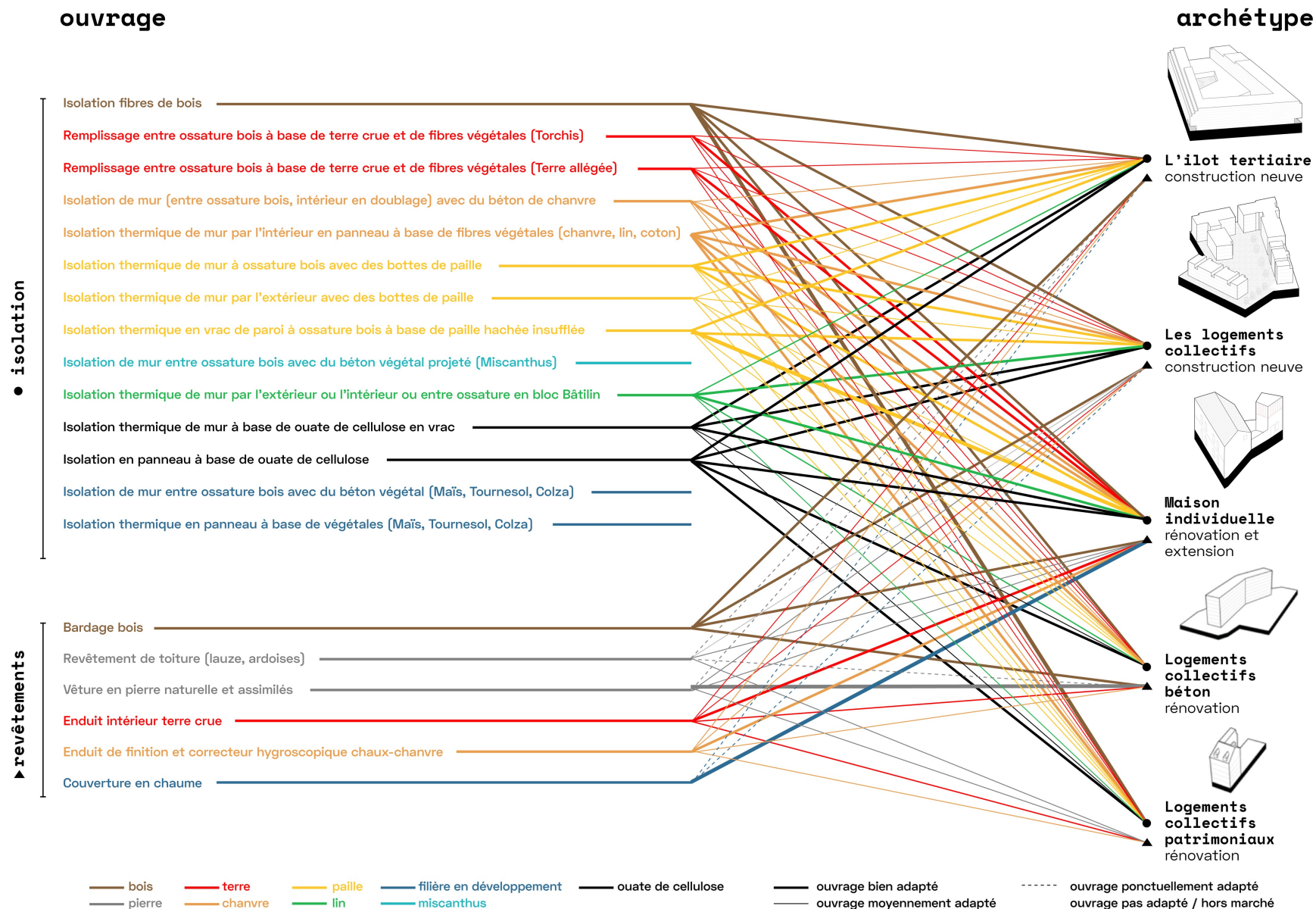
- 0 – pas adapté
- 1 – ponctuellement adapté
- 2 – moyennement adapté
- 3 – bien adapté

Si le cadre de cette étude a restreint le nombre de combinaisons étudiées, de nombreux systèmes constructifs alternatifs peuvent être envisagés. Les diagrammes en page suivantes font l'état des lieux d'un vaste champ des possibles pour devenir un outil d'aide à la décision dans une démarche de projet en matériaux bio et géo-sourcés.

(pages suivantes)

Fig5 : Croisement des sourçages filières et commande avec l'établissement des combinaisons envisagées

Diversification des systèmes constructifs



Diversification des systèmes constructifs



Insertion territoriale : sélection des filières

Construire une identité territoriale

Construire avec des matériaux bio et géo-sourcés ne consiste pas uniquement à remplacer les matériaux d'un projet «business as usual» (BAU) : cela implique un ré-ancrage des constructions dans leur site.

L'emploi de matériaux locaux comme prérequis d'un projet renverse les méthodes de conception. La matière devient un élément de programme du projet à challenger avec les autres composantes du cahier des charges. Cette démarche remet sur le devant de la scène la possibilité d'une identité régionale des constructions que le mouvement moderne avec l'avènement du béton a écartée. Les bâtiments ainsi réalisés en matériaux locaux, deviennent des fragments de territoire, élément de paysage tant dans leur insertion urbaine que dans les matériaux employés, que l'on pourrait voir revenir à la terre, en fin de vie du bâtiment.

Dans la continuité de cette approche territoriale, pour cette seconde phase du projet, les cartographies par filières réalisées dans le cadre du sourçage ont été support d'analyse de la pertinence des croisements bâtiments prototypes / systèmes constructifs au regard des dynamiques territoriales. Les bâtiments choisis pour le prototypage sont répartis équitablement sur le territoire afin d'étudier les différents écosystèmes locaux. La ressource est sélectionnée pas uniquement pour que ce soit la plus locale possible pour chaque prototype, mais également au regard de la cohérence avec les enjeux régionaux, notamment en termes de ressources agricoles / sylvicoles / géologiques / savoir-faire.

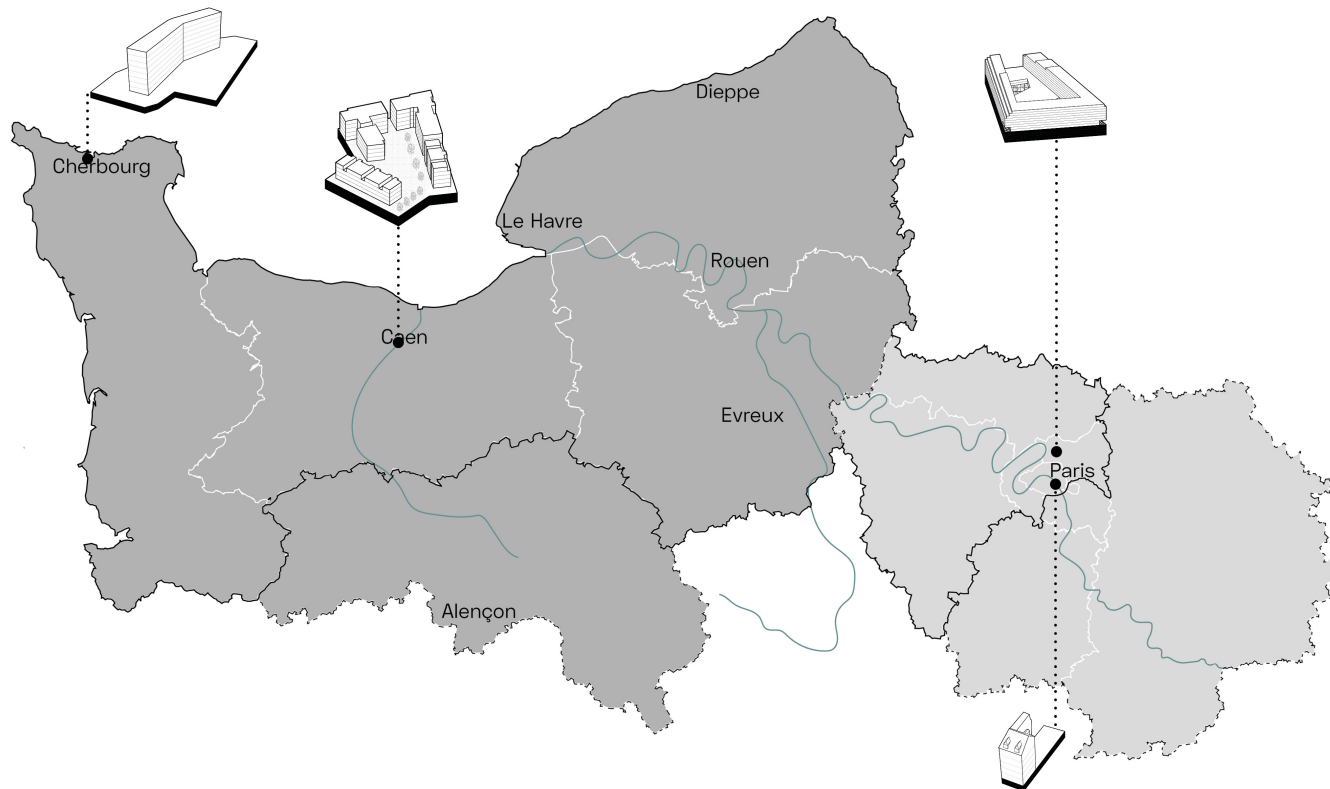


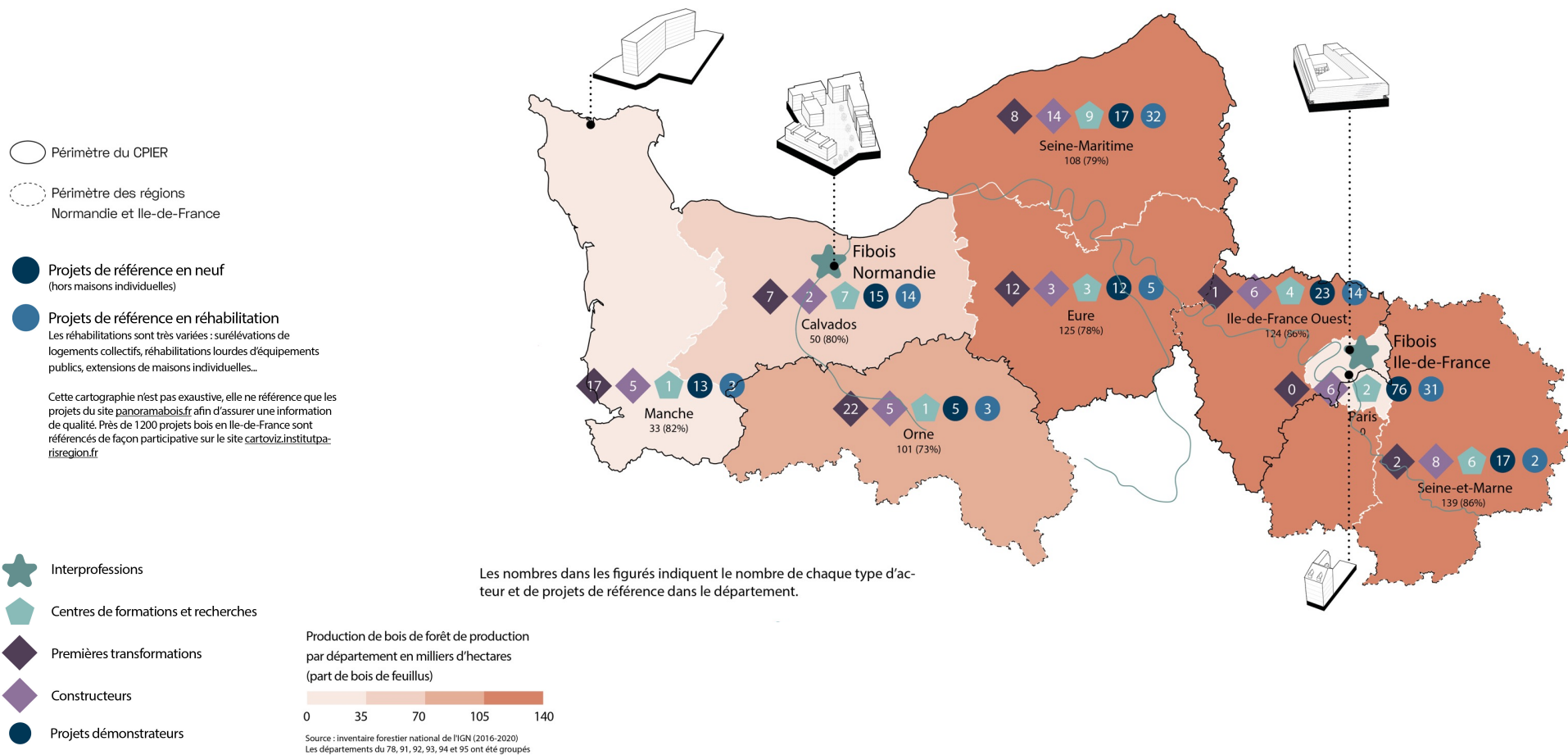
Fig6 : Répartition géographique des prototypes

Les filières en étude : le bois

690 000 hectares de forêt sur le territoire de la Vallée de la Seine (soit 31% de couverture), dont 91% de feuillus : chêne, frêne, châtaignier en Ile-de-France, et chêne et hêtre en Normandie

Malgré une ressource régionale en bois feuillue, la demande pour la construction porte majoritairement vers le bois résineux. Les feuillus étant plus difficiles à caractériser et standardiser, ils imposent un investissement élevé.

Le bois est aujourd'hui employé dans de nombreuses typologies de construction, du logement, individuel ou collectif, en neuf, en rénovation, extension ou surélévation, en bâtiment de bureau, ERP, ... Malgré cette maturité de filière, on constate un manque de connaissance des Maitrises d'Œuvre (MOE) sur le corpus technico-réglementaire. Un portage est donc à prévoir à destination des aménageurs, Maitrise d'Ouvrage (MOA) et architectes.

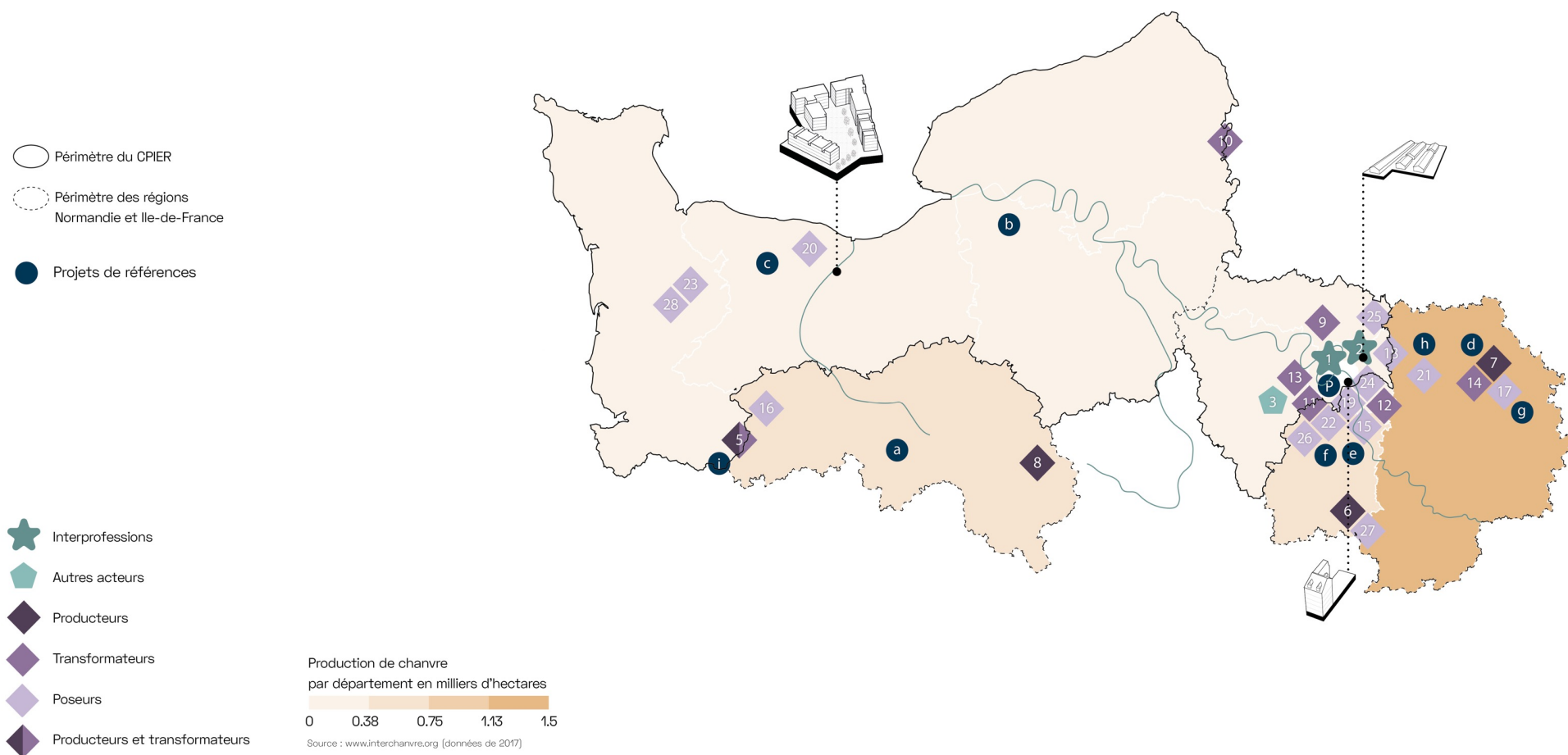


Les filières en étude : le chanvre

4 600 tonnes/an de fibres et 8 300 tonnes/an de chènevotte produites sur le territoire de la Vallée de la Seine

Le chanvre se distingue par ses qualités hygroscopiques qui en font un bon régulateur d'hygrométrie. Il présente également de bonnes qualités de résistance au feu.

Des Règles professionnelles encadrent la mise en œuvre du béton de chanvre en isolation de murs, sols et toitures ainsi que des enduits en chanvre. Ce cadre réglementaire limite cependant en hauteur l'application de ces procédés. Le chanvre est également favorable à la préfabrication, levier qu'il serait notamment intéressant de pousser dans cette étude en vue d'une massification de l'emploi du chanvre dans la construction.

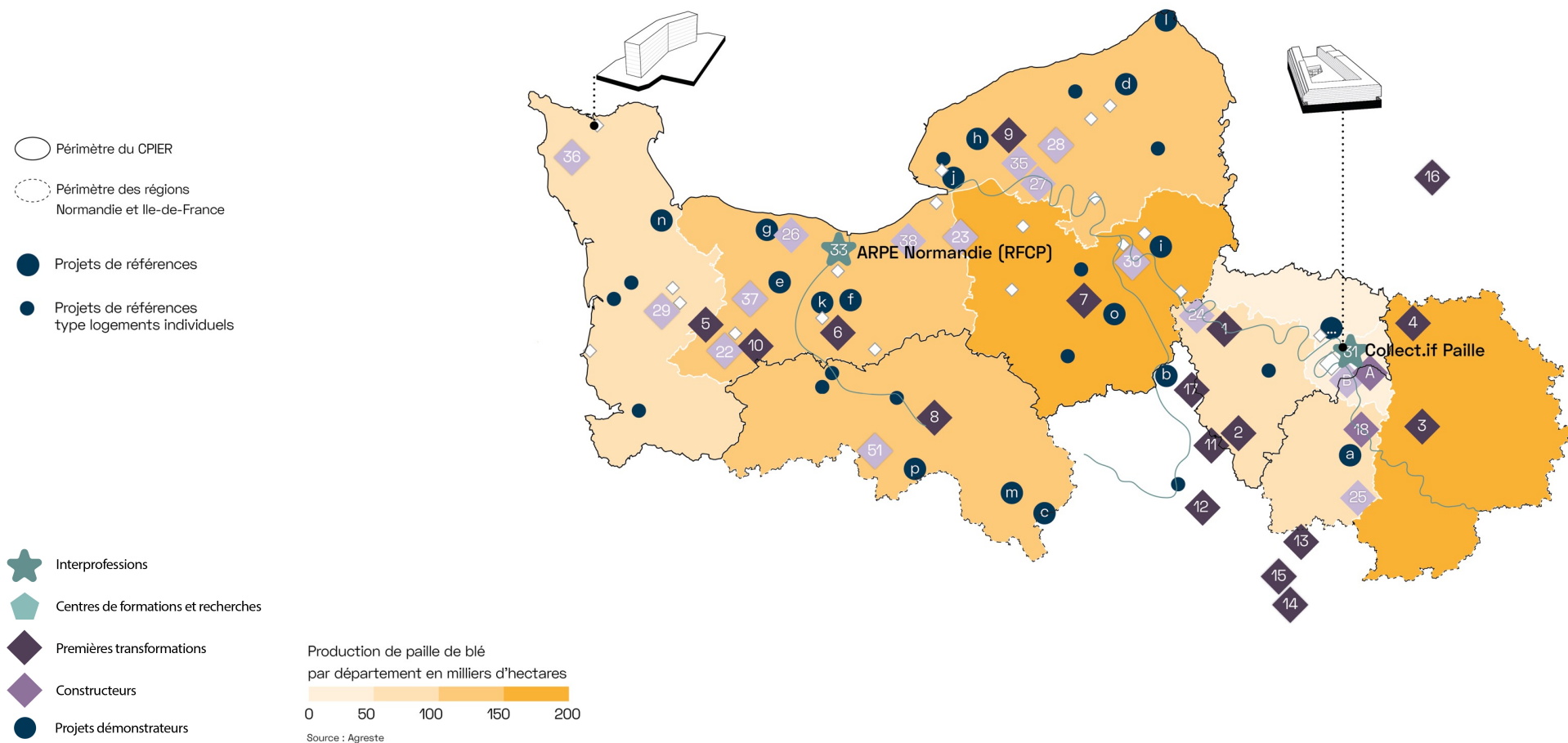


Les filières en étude : la paille

380 000 à 395 000 tonnes/an de pailles produites pour la construction sur le territoire de la Vallée de la Seine

La paille constitue une ressource disponible, abondante et de proximité, avec un approvisionnement dans un rayon de 50km. Ses caractéristiques physiques en font un matériau performant pour le confort d'hiver comme d'été.

A date, si le cadre technico normatif du procédé d'isolation d'une Façade Ossature Bois (FOB) avec remplissage paille ne permet pas d'être reconnu en technique courante sur ce type de produit immobilier, l'écosystème d'acteurs en place est favorable à engager une innovation dans ce sens.

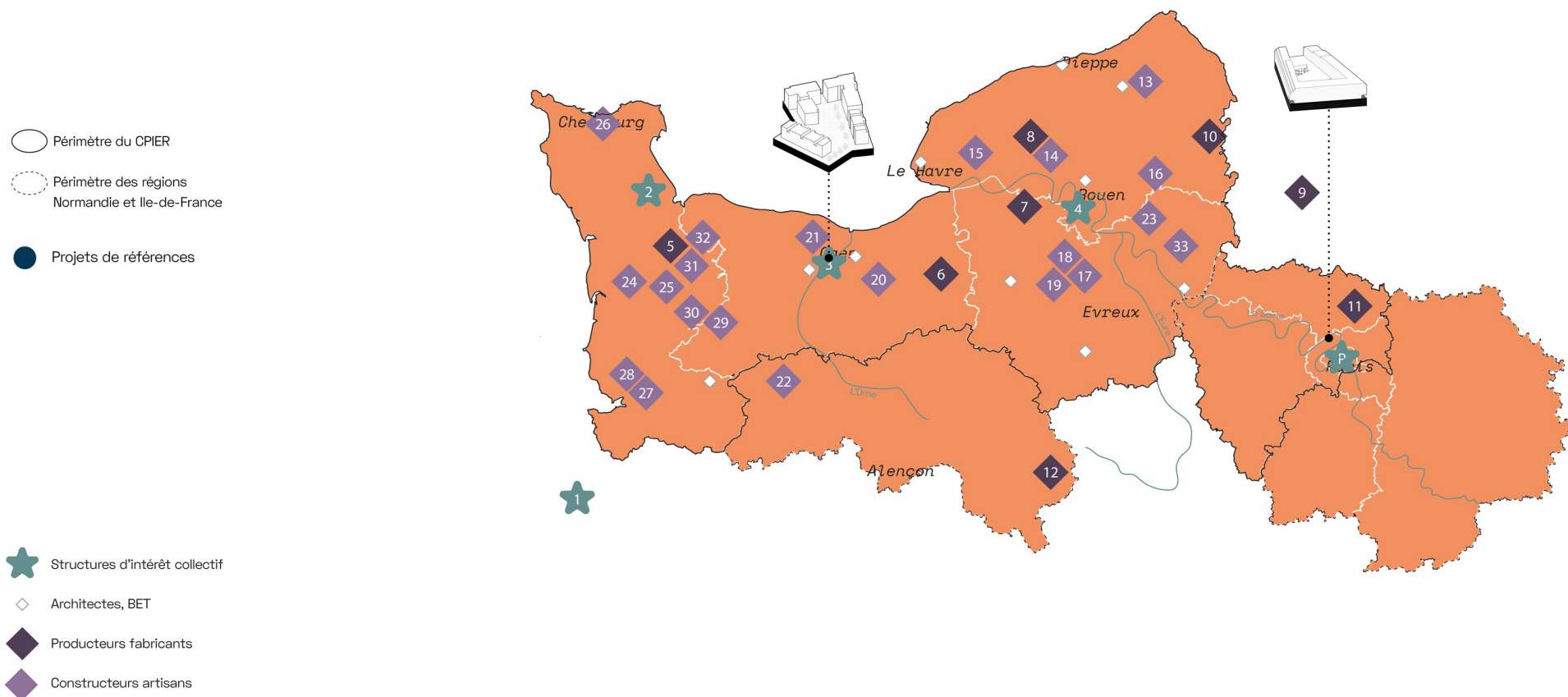


Les filières en étude : la terre

Une ressource abondante et présente partout sur le territoire interrégional

La terre crue est un matériau qui apporte un grand confort d'usage : inertie, gestion de l'hygrométrie, tenue au feu, affaiblissement acoustique et confort d'été. Associé à des matériaux d'isolation adaptés, elle permet de répondre aux enjeux environnementaux du secteur du bâtiment.

Les terres excavées pourraient être réutilisées localement comme un matériau de construction à valoriser. Elles sont aujourd'hui considérées comme un déchet de chantier. La méconnaissance du matériau terre crue pénalise le développement de son usage en construction neuve. Du fait d'une grande variabilité d'un gisement à l'autre, sa qualification fait appel à différents savoir-faire. Construire en terre crue requiert aujourd'hui une coopération étroite de tous les intervenants.



Du sourçage au prototypage : principes de sélection

Convergence entre la commande et les filières

Sur la base de ces possibilités, la convergence entre procédé constructif et typologies bâties est construite sur la base de **4 principes** :

1 – la complémentarité : reconnaître que les matériaux biosourcés fonctionnent de manière complémentaire, suivant le principe « le bon matériau au bon endroit », un seul matériau bio ou géosourcé ne saurait remplacer le béton de ciment

2 – la simplification : une seule fibre biosourcée à étudier sur un prototype

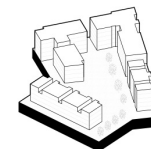
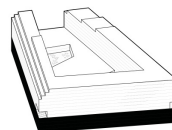
3 – la permanence du bois, notamment sur les ossatures
Ce choix pourrait être remis en perspective au regard de l'épuisement de la ressource en bois. En l'état actuel des maturités des filières, l'usage du bois semble un prérequis pour avancer. Une piste d'évolution serait d'étudier des procédés constructifs sans bois, comme la technique des bottes de paille sanglées utilisée pour une ITE paille à Paris 15e.

4 – la répartition : chaque prototype neuf fait l'objet d'un travail plus fin sur un ensemble fonctionnel particulier, comme par exemple le plancher, ou les cloisonnements

Selon ces préceptes, quatre filières principales sont choisies pour établir le travail de prototypage : le bois, la paille, le chanvre et la terre.

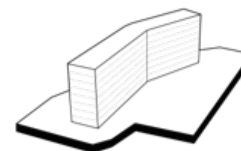
Le prototypage se concentre sur un nombre restreint de combinaisons. Il s'agit avant tout d'une **methodologie de conception** (et non une méthode de projet) où les procédés constructifs sont sélectionnés pour leur caractère générique : si ici on choisit la paille, elle pourrait être remplacée par une autre fibre selon la ressource disponible à proximité du projet. Chaque matériau comporte néanmoins ses spécificités, il conviendra pour mener ce changement de s'appuyer sur le travail de prototypage ainsi que sur celui de sourçage.

Ilot tertiaire
neuf

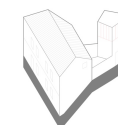


Logement
collectif neuf

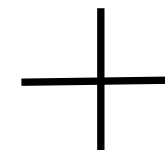
Logement
collectif
béton rénové



Logement collectif
patrimonial rénové



Maison
individuelle



Bois



Paille



Chanvre



Terre crue

2 . Le prototypage

2.1 Méthodologie du prototypage

2.1.1 Un travail itératif

Les pages suivantes expliquent d'une part comment le projet Maillons passe d'un stade archétype à un stage prototype, et d'autre part les paramètres clef sur lesquels joue la conception pour intégrer les matériaux bio et géo-sourcés.

Méthodologie générale du prototypage

La méthodologie ou la « méthode Maillons »

Les cinq bâtiments étudiés sont cinq opérations de bâtiments réalisés selon les méthodes de construction contemporaines, récentes, désignées comme le « business as usual ». Il s'agit du point de départ de la phase de prototypage et la base de comparaison pour les variantes intégrant des matériaux bio et géo-sourcés.

Le travail sur ces prototypes a plusieurs spécificités :

1. C'est un travail centré sur un archétype existant, une étude de cas ancrée dans le réel

Le point de départ, en neuf ou en rénovation, est une opération existante réalisée. Il s'agit de s'appuyer sur un cahier des charges représentatif de la commande immobilière sur le secteur étudié, tout en envisageant une certaine évolution prospective en rapport avec les changements sociétaux. Les conclusions sont établies vis-à-vis de ce prototype en particulier. Cela permet à la fois d'être précis sur un objet identifié, et en même temps d'avoir une visée plus large, mesurée par le taux de représentativité du prototype.

Le bâtiment existant devient un prototype car sa conception va être retravaillée pour intégrer au maximum les systèmes constructifs issus des filières sélectionnées.

En corollaire, **nous ne prétendons pas à l'exhaustivité mais à la précision des éléments étudiés.**

2. C'est un travail de conception itératif

A partir d'une sélection des croisements les plus pertinents entre archétypes et systèmes constructifs (voir chapitre précédent), sont étudiés les éléments suivants :

- ✓ **L'adaptation architecturale et constructive** des archétypes aux systèmes constructifs étudiés accompagnée d'une éventuelle adaptation programmatique
- ✓ L'assurabilité des systèmes constructifs imaginés vis-à-vis de l'état de l'art normatif actuel
- ✓ La confrontation des propositions à des acteurs de la commande immobilière et des acteurs de l'écoconstruction lors d'ateliers thématiques sur les matériaux

3. C'est un travail multifactoriel

Sur la base du dessin proposé, une évaluation environnementale et économique est proposée [voir détail de la méthodologie plus loin]. Ce travail permet de tirer des conclusions sur les solutions proposées et de réinitier une boucle d'itération le cas

échéant.

Cela donne aussi l'occasion de tester les limites des outils à disposition, voire de faire des simulations le cas échéant pour cibler des évolutions envisageables, sous réserve d'amélioration des données ou des connaissances.

La méthodologie que nous avons choisie d'adopter est centrée sur le travail de conception sur un bâtiment existant, qui devient un prototype car sa conception va être retravaillée pour intégrer au maximum les systèmes constructifs issus des 4 filières sélectionnées.



Photo1 : processus de conception itératif lors d'un atelier partenarial le 1^{er} mars 2023

De l'archétype aux prototypes

Deux échelles de conception

A partir de l'archétype existant ou "business as usual" deux démarches sont menées :

À l'échelle du bâtiment : diagnostic morphologique

Pour la construction neuve, ce diagnostic morphologique mène à des ajustements du volume du bâtiment.
 Pour la rénovation, ce diagnostic global permet d'orienter le choix constructif pour être le plus adapté à la situation.

À l'échelle du fragment : variantes constructives

Un fragment représentatif de la construction est extrait afin de travailler précisément sur la mise en œuvre des matériaux bio et géosourcés. Ce travail est décliné à travers le dessin de plan, coupe et façade pour chaque variante. Cette approche comparative entre l'archétype et le prototype prend la forme d'un "avant/après" pour mettre en évidence les adaptations morphologiques, programmatiques, constructives, technico réglementaires et économiques, nécessaires pour passer d'une construction «conventionnelle» à une construction biosourcée.

Trois prototypes biosourcés sont développés pour chaque archétype : ces variantes sont définies par un travail d'itérations et d'allers-retours entre conception constructive et architecturale d'une part, et analyse carbone, économique et assurantielle d'autre part.

A partir de ces variantes principales sont proposées des déclinaisons ou sous-variantes de manière à préciser le travail d'un ouvrage en particulier.

Objectifs :

- Montrer ce qui est déjà la version cadrée et conventionnelle de l'archétype étudié
- Pour chaque prototype, mettre en évidence un ou plusieurs leviers à travailler (cadre normatif, économie de projet, acceptabilité par la MOA, adaptation technique pour optimiser la mise en œuvre...)

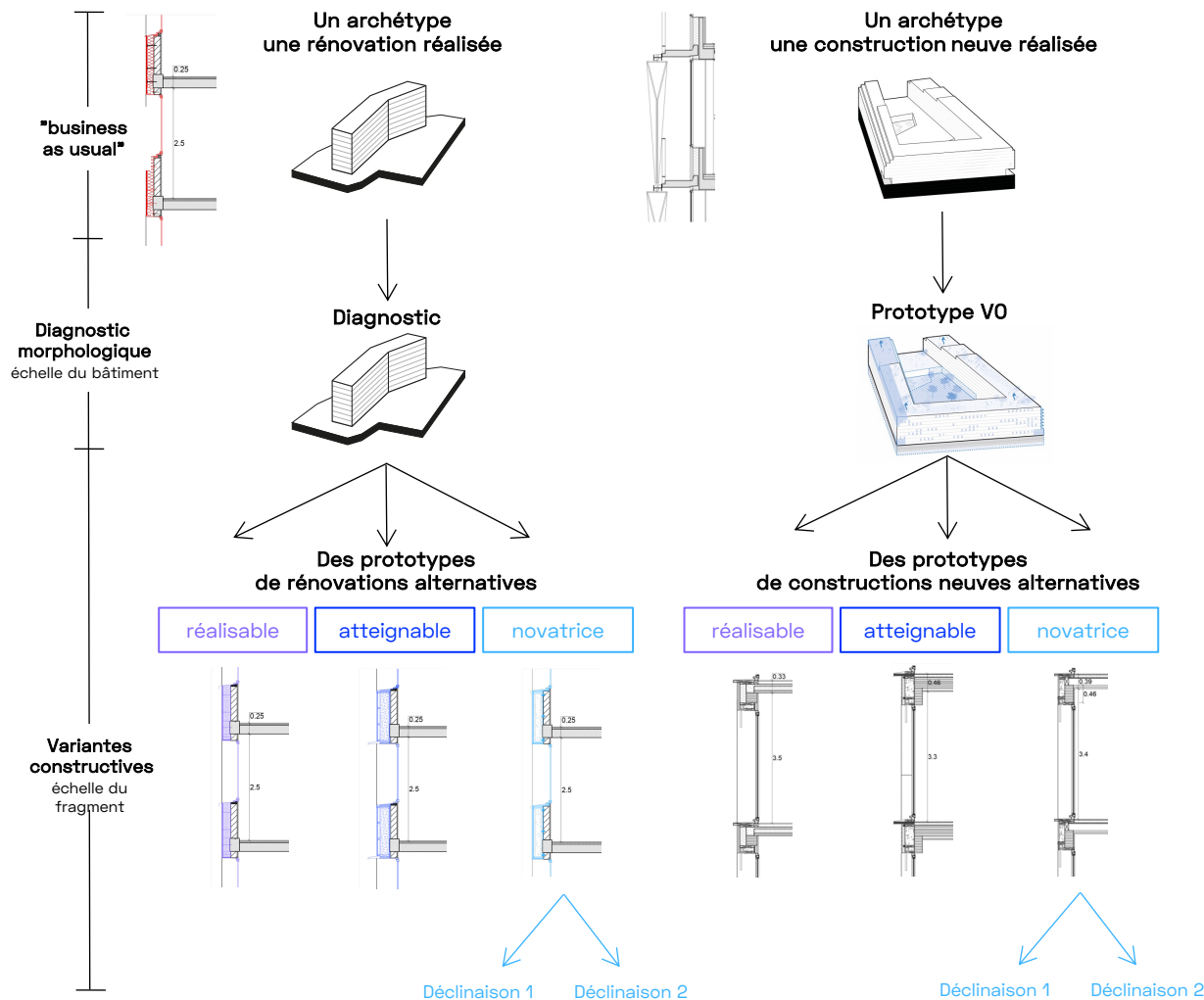


Fig10 : processus de conception du prototypage en rénovation et en construction neuve

De l'archétype aux prototypes

La rénovation

Parmi les archétypes sélectionnés, deux sont des opérations de rénovations de bâtiments existants.

Diagnostic de l'existant

La rénovation nécessite de procéder à un diagnostic fin de l'existant afin d'apporter la réponse la plus appropriée:

- Le système constructif, avec entre autres l'identification de la composition exacte de l'enveloppe, les caractéristiques inertielles, l'ouverture des parois à la diffusion de la vapeur d'eau ainsi que le diagnostic structurel sont les premières hypothèses à établir.
- A ces données d'entrée préalables du projet s'ajoutent la compréhension du système de ventilation, le calcul des déperditions et l'évaluation des consommations existantes. Le diagnostic de performance énergétique (DPE) fournit des informations. Les désordres potentiels sont à repérer qu'il s'agisse de fissure, condensation, défauts d'étanchéité à l'air.
- Les enjeux acoustiques, patrimoniaux, sociaux sont également parties prenantes du processus de réflexion.
- Enfin, l'aspect architectural souhaité par le particulier, le syndicat de copropriété ou la commune dicte parfois l'intervention à mener.

Tous ces paramètres sont à considérer comme données supplémentaires afin d'apporter la réponse la plus pertinente vis-à-vis du contexte existant. Par ailleurs la rénovation implique une forte contrainte de réalisation, notamment si la mise en œuvre des solutions doit se faire en site occupé.

Spécificités de la rénovation

Dans une optique de réduction de l'empreinte carbone, la rénovation de l'existant reste plus frugale que la construction neuve. Les résultats présentés auraient légitimement pu être comparés à une démolition et reconstruction à neuf, mais la référence utilisée est une rénovation dite basique, il s'agit du "business as usual". Ainsi les résultats chiffrés en coût et en carbone sont à relativiser.

Le sourçage commande révèle que la construction neuve est aujourd'hui largement majoritaire. Dans une vision prospective, on peut estimer que la tendance actuelle va s'inverser en lien avec la raréfaction du foncier ainsi que des objectifs comme la Zéro Artificialisation Nette.

Ce travail se concentre sur un fragment de façade. On relève plusieurs inconvénients à ce choix :

- une étude de l'enveloppe thermique complète, bien que capitale, n'est malheureusement pas envisageable.

- le traitement de la toiture, primordial dans une rénovation thermique, sort du cadre de l'étude
- Les gains sur les lots techniques et les consommations énergétiques ne sont pas quantifiés

C'est donc le cas de la rénovation thermique et plus spécifiquement celui de l'isolation des murs extérieurs qui est étudié. Nous considérons que le cas de l'extension relève plutôt du registre du travail réalisé sur les prototypes neufs. De la même manière la réhabilitation lourde n'est pas traitée car trop spécifique à chaque projet. Ainsi l'approche choisie nous laisse peu de latitude concernant la conception du bâtiment. Le développé de façade, la dimension des ouvertures, la structure des planchers restent des paramètres figés.

Une attention doit être portée au confort acoustique résultant de l'intervention : une isolation aux bruits extérieurs pouvant mener à un inconfort lié à l'entente de bruits intérieurs.

Objectifs environnementaux et rénovation

Le cas de la rénovation ne se trouve pas (encore) dans le périmètre de la réglementation environnementale actuelle (RE2020).

La rénovation des bâtiments tertiaires ou résidentiels est aujourd'hui soumise à la réglementation dite RT Existant. La méthode de calcul diffère selon la surface du projet:

- Pour des projets de moins de 1000m², c'est la RT Existant par élément qui entre en vigueur avec des seuils minimaux de performance à respecter pour les éléments remplacés.
- Pour les projets de plus grande ampleur, la performance globale doit être mesurée (RT Existant Global).

La notion d'analyse de cycle de vie est absente de la réglementation sur la rénovation. Elle intervient dans certains labels tels que le label BBCA Rénovation. Ce référentiel propose une méthode de calcul de l'empreinte carbone au prorata des lots impactés par la réhabilitation. La démarche BDF intègre dans sa grille d'évaluation des critères applicables au cas de la rénovation. La Loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (TEPCV) détermine toutefois comme objectif qu'à l'horizon 2050, l'ensemble du parc immobilier français sera rénové avec un niveau de performance énergétique conforme aux normes "Bâtiment Basse Consommation".

Dans la perspective d'objectifs environnementaux ambitieux sur la rénovation qui restent à fixer, il nous a paru essentiel de procéder malgré tout à une évaluation carbone des prototypes rénovés. La méthode de calcul décrite avec la RE2020 a été adaptée.

De l'archétype aux prototypes

La construction neuve

Bioclimatisme et compacité

En construction neuve, il s'agit tout d'abord d'interroger la conception générale du bâtiment de manière à optimiser les apports caloriques passifs de l'environnement et à réduire les quantités de matière à mettre en œuvre.

Pour évaluer l'optimisation des développés de façade au regard du volume intérieur créé, le **coefficient de compacité** est utilisé. Il s'agit du rapport entre la somme des surfaces déperditives d'un bâtiment divisée par le volume à chauffer. Les surfaces déperditives rassemblent l'ensemble des surfaces en contact avec l'extérieur et susceptibles de générer des transferts de calories : les toitures, les terrasses extérieures, les planchers bas ainsi que l'ensemble des façades. Plus le volume sera faible ou découpé, plus son coefficient de compacité augmentera et plus il faudra de calories pour chauffer l'espace intérieur. Par exemple, la maison individuelle non mitoyenne est une des formes urbaines ayant le coefficient de compacité le plus défavorable.

En ce qui concerne les paysages et la biodiversité, le **coefficient de biotope par surface** (CBS) est employé. Il décrit, par le calcul, la proportion des surfaces favorables à la biodiversité par rapport à la surface totale d'une parcelle. A chacun de ces types de surfaces est appliqué un facteur déterminant son potentiel d'accueil et développement de biodiversité.

De la matière à la trame constructive

L'introduction des matériaux bio et géo-sourcés permet ensuite de dimensionner les espaces de manière rationnelle et optimisée à partir du module de matière sélectionné : cela peut être une botte de paille ou une section admissible de structure bois. **La matière devient un paramètre de conception et du cahier des charges à part entière.**

Ce paramètre nécessite de redimensionner les espaces aux dimensions standard : les bureaux et les logements s'adaptent dans leurs configurations pour trouver un optimum entre fonctionnalités des espaces et cohérence constructive.

Prototype V0

L'ensemble de ces ajustements sont présentés comparativement avec l'archétype existant, sous forme d'un "avant/après" en plan coupe et axonométrie. L'ensemble de ces évolutions mène à configurer une variante nommée "V0", support des variantes constructives à l'échelle du fragment.

Coefficient de compacité = Surfaces déperditives / Volumes à chauffer

Coefficient de biotope = (surface de type A x coef. A) + (surface de type B x coef. B) + ... + (surface de type N x coef. N) / Surface de la parcelle

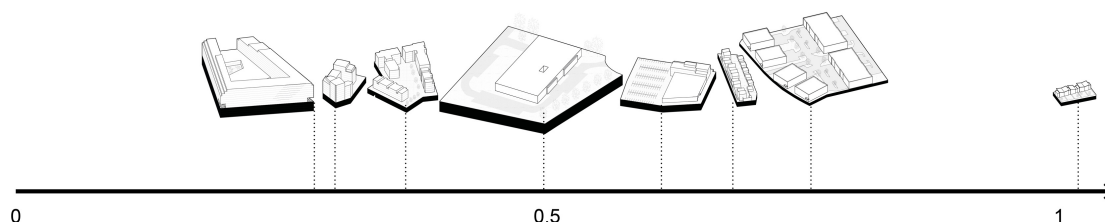


Fig7 : les archétypes en construction neuve sélectionnés en phase 1 sont classés par coefficient de compacité

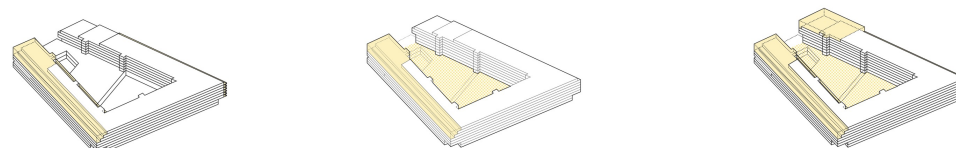


Fig8 : variantes morphologiques de l'îlot tertiaire avec une variable sur les espaces extérieurs

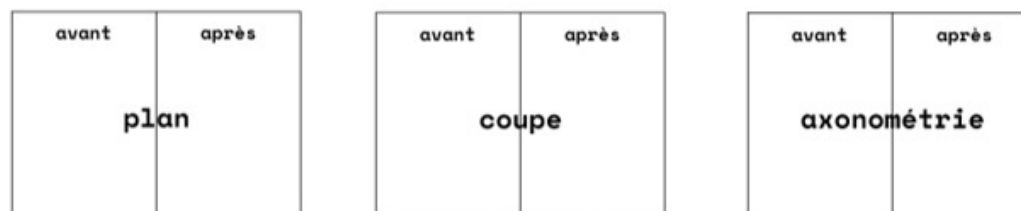


Fig9 : présentation des variantes morphologiques par comparaison avec le "business as usual" sous forme d'un avant/après

De l'archétype aux prototypes

Définition de l'archétype

L'étude de prototypage se base sur un important travail de définition et d'analyse d'archétypes existants utilisés comme références. Ces derniers, projets réalisés, sont choisis pour leurs qualités environnementale, formelle, et constructive. Dans leur représentativité des transitions en cours sur les territoires francilien et normand, ils sont qualifiés de "business as usual".

Les transitions en cours concernent tant les sujets de programmation, que de morphologie de bâti et de forme construite dans leur efficacité (compacité et ventilation naturelle), que de technique constructive (filrière bio et géosourcées dans le paysage contemporain)

La réhabilitation

Pour la rénovation, ce diagnostic global permet d'orienter le choix constructif pour être le plus adapté à la situation.

La construction neuve

L'archétype sélectionné pour l'étude de l'îlot tertiaire neuf est celui du siège social Veolia à Aubervilliers, conçu par l'agence Dietmar Feichtinger Architectes et livré en 2016. Reconnu pour ses qualités environnementales, il est labellisé HQE et BREEAM, et a été sélectionné en tant que projet pilote pour le label Biodiversity pour ses importantes surfaces végétalisées. De plus, de par l'articulation du bâti autour d'un patio, la compacité de la forme construite en est d'autant plus efficace, limitant les déperditions thermiques, tout en favorisant les vues sur un espace vert qualitatif, et la ventilation transversale. Le bois y est présent en revêtement intérieur : faux-plafond, menuiseries de cloisonnement, garde-corps.

Ce travail d'analyse et de dessin est permis par le partage de dessins techniques et de photos par les architectes Dietmar Feichtinger (Ouvrage *Le "V"* : un démonstrateur urbain au cœur du Grand Paris).

En ce qui concerne le logement collectif neuf, ici l'archétype est celui de la ZAC Jean Jaurès à Colombelles, livré en 2011. L'implantation des plusieurs volumes bâtis permet de dégager un cœur d'îlot en pleine terre. Les logements disposent de loggias ou de balcons en structure rapportée, et les distributions sont extérieures, minimisant le volume chauffé. La géométrie de ce dernier est par ailleurs déjà compact. Enfin, un bardage bois ainsi que des garde-corps en bois y sont déjà présents, améliorant le bilan carbone de l'opération.



De l'archétype aux prototypes

Progressivité de l'innovation

Les variantes sont classées avec un degré d'innovation par rapport à l'archétype existant ou "business as usual". L'innovation de chaque prototype est quantifiée sur un ensemble de critères d'évaluation :

- Adéquation avec la programmation et la fonctionnalité du bâtiment
- Construction et technique de mise en œuvre
- Assurabilité et maturité du cadre technico réglementaire
- Économie du projet et viabilité de l'opération
- Poids carbone et bilan environnemental

Ces paramètres mènent à une hiérarchisation des variantes entre elles avec un degré croissant d'innovation :

V1 : variante réalisable

les possibilités actuelles : ce qui peut être mis en place dès aujourd'hui

V2 : variante atteignable

les perspectives proches : ce qui nécessite quelques démarches d'adaptation

V3 : variante novatrice

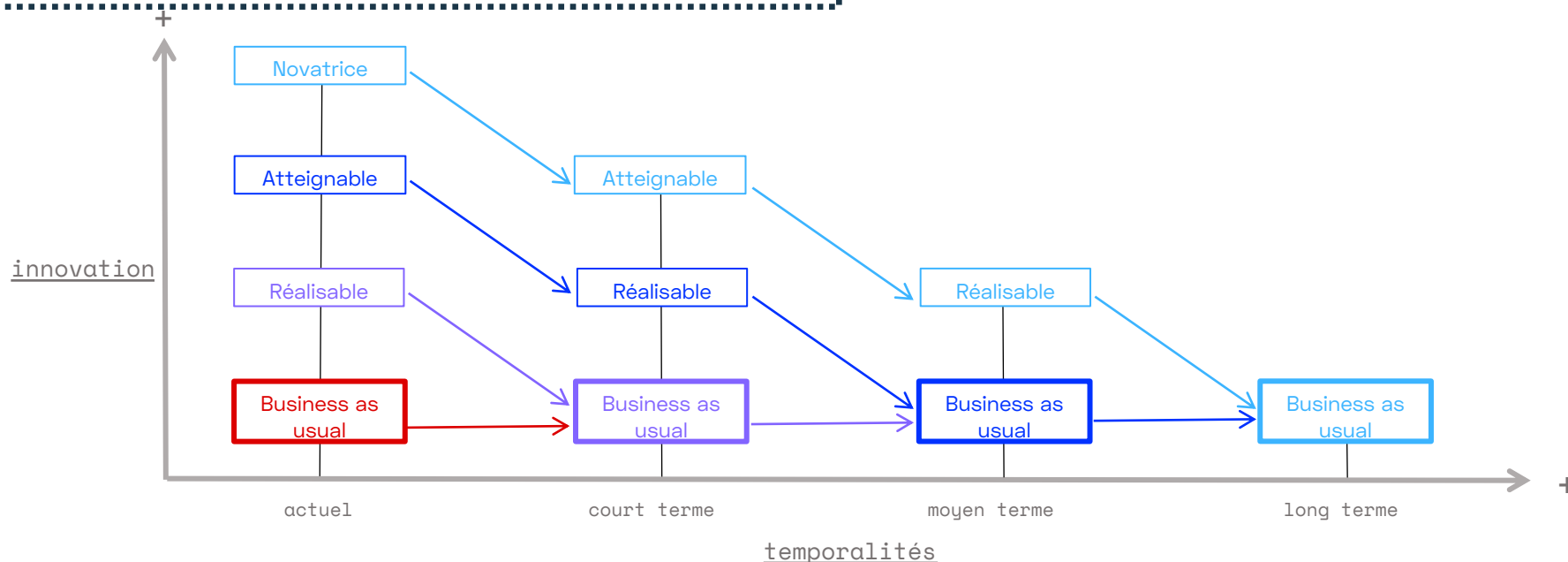
la vision prospective : ce qui implique une évolution générale du cadre de la construction

Chaque variable est classée sur un degré d'innovation. Différents degrés d'innovation

peuvent être combinés entre eux de manière à faire varier les curseurs pour tendre vers l'optimum "maillon".

Cette classification de l'innovation des variantes reflète l'état actuel du cadre de la construction ; l'objectif est ici d'identifier les freins et leviers permettant de faire évoluer cette situation:

- Chaque niveau de variante est susceptible d'évoluer avec le temps. Les techniques et l'assurabilité des dispositifs mis en place se généralisant avec la multiplication des opérations qui "ouvrent la voie".
- Chaque réalisation qui pourra mettre en œuvre un "pas de côté" sur une partie d'édifice sera un jalon contribuant à l'avancée de l'intégration des matériaux bio et géo-sourcés dans la construction. Ainsi, la variante novatrice d'aujourd'hui deviendra atteignable demain, et par un effet de dominos, l'évolution de l'ensemble de ces variantes mèneront à l'amendement d'un "business as usual" à chaque étape intégrant plus de matériaux biosourcés.



De l'archétype aux prototypes

Diversification de l'innovation

Afin de proposer des solutions concrètes et réalistes, le prototypage resserre la conception des archétypes autour de cinq familles d'ouvrages principales :

- La structure porteuse
- Les planchers
- L'isolation en façade
- Les revêtements intérieur et extérieur en façade
- Les cloisons séparatives et distributives

Les variantes sur chacun de ces ouvrages se répartissent entre les prototypes, de manière à ne pas cumuler plus de trois paramètres de variabilité par prototype.

La façade étant un enjeu important, chaque prototype décline des variantes de façade - isolation + revêtements. Les autres ouvrages : structure, plancher et cloisons ne sont applicables qu'aux prototypes de constructions neuves car le prototypage de rénovation n'étudie que le traitement de la façade. Les immeubles de bureaux étant conçus actuellement principalement en open space, il n'est pas pertinent d'étudier les cloisonnements qui seront appliqués sur le prototype de logements collectifs. Enfin la structure est appliquée à un bâtiment de moindre envergure de manière à lever des freins technico réglementaires.

Cela aboutit à cette répartition entre archétype et ouvrage du bâtiment :

- **Collectif patrimonial rénové**
Isolation + revêtements en façade
- **Collectif béton rénové**
Isolation + revêtements en façade
- **Ilot tertiaire**
Isolation + revêtements en façade + plancher
- **Collectif neuf**
Isolation + revêtements en façade + cloisons
- **Maison individuelle**
Isolation + revêtements en façade + structure

Cette répartition permet d'envisager une combinaison des variantes entre prototypes maximisant le champ des possibilités à l'issue du prototypage.

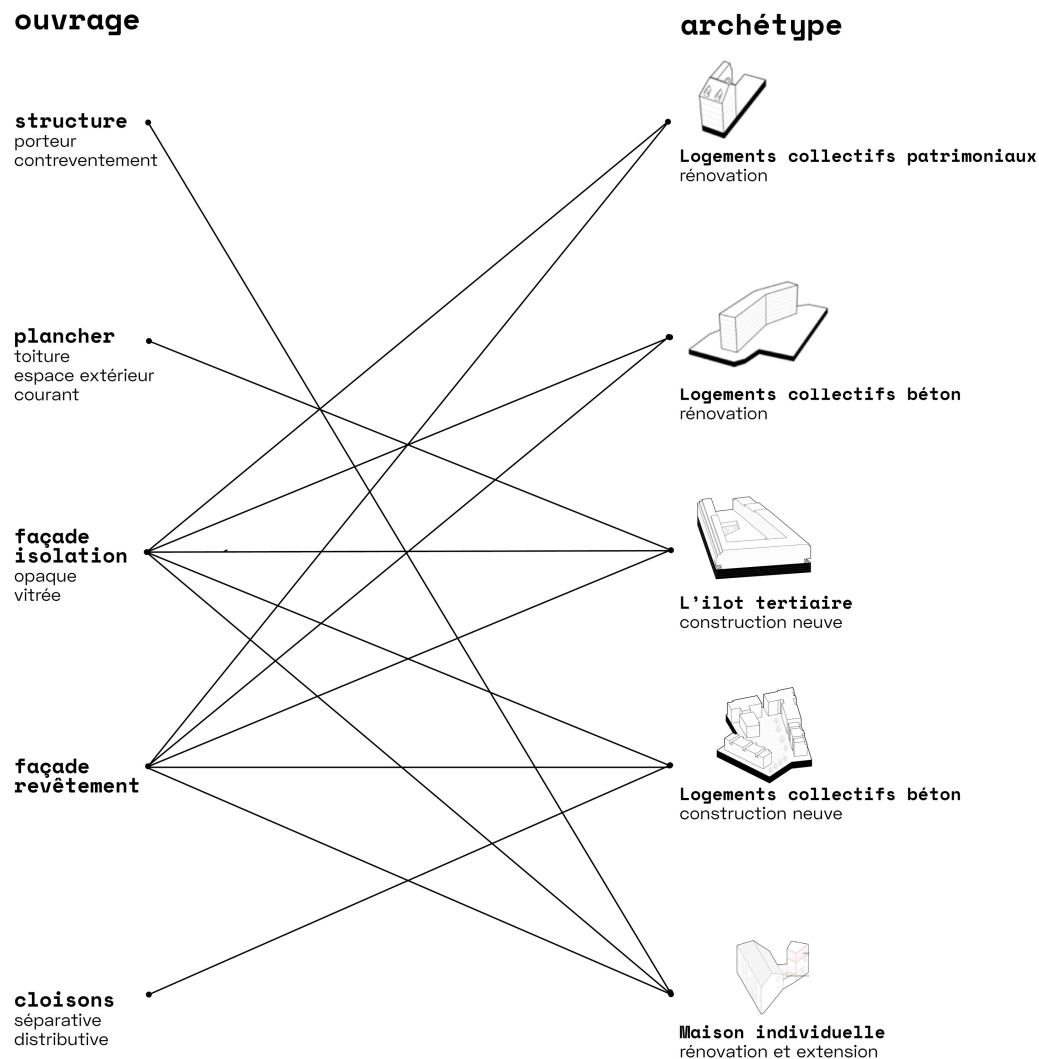


Fig11 : répartition des ouvrages étudiés et variétés sur chaque archétype

2.2.1 Une évaluation multifactorielle

Les pages suivantes vont décrire la méthodologie d'évaluation utilisée dans chaque champ d'analyse : le champ normatif, le champ économique et le champ environnemental. Chacun de ces champs sera ensuite détaillé spécifiquement dans les parties dédiées aux prototypes analysés.

L'évaluation du cadre technico-normatif

Généralités

Chaque procédé, partie de procédé ou domaine d'emploi n'étant pas visé par le référentiel du domaine traditionnel (NF DTU, règles professionnelles sur liste verte de la C2p, Recommandations Professionnelles RAGE) ou du domaine non traditionnel mais évalué (ATEX, Avis Technique ou DTA), peut être considéré comme innovant.

Outre le fait de devoir être visé par une évaluation technique adéquate pour relever de la technique courante, chaque innovation amène au traitement de nombreuses thématiques et nécessite de franchir des pas importants pour atteindre l'objectif de réalisation d'un projet.

On notera que la probabilité d'un projet de construction d'aller au bout (c'est-à-dire d'être réalisé) et d'envisager sa reproductibilité par la suite, sont, entre autres, fortement liés au nombre d'innovations et donc de sujets qu'il embarque. Ces sujets vont d'une complexité simple à extrême, si ce n'est impossible certaines fois.

Ainsi, un projet intégrant des innovations maîtrisées et bien ciblées, pour un ou 2 procédés constructifs donnés par exemple, a plus de probabilité d'aboutir qu'un projet contenant de très nombreuses innovations complexes, non maîtrisées et sur une multitude d'ouvrages.

La phase de sourçage réalisée a été une étape importante dans la mesure où elle a permis d'identifier les limites d'emploi et ainsi les niveaux de reconnaissance des différents procédés constructifs. Elle nous offre ainsi la possibilité d'apprécier pour chaque solution constructive le palier à franchir pour assurer un niveau de faisabilité.

Sur ces bases, la méthodologie développée pour la définition des prototypes a intégré plusieurs niveaux d'ambitions : leur principale différence, d'un point de vue technico-règlementaire, repose sur la temporalité d'application et sur le pas à franchir pour que la faisabilité du projet défini soit atteinte.

Cela se traduit par les niveaux de variante suivants :

❖ Variante Réalisable :

Variante, soit ne présentant pas d'innovation à proprement parler, soit avec des innovations limitées et pour lesquelles les connaissances scientifiques actuelles sur les thématiques associées sont poussées et seront à compléter de façon relativement limitée.

Ce niveau d'ambition est réalisable à condition que les acteurs.rices, notamment de la conception, maîtrisent parfaitement les référentiels technico-réglementaires les plus pertinents et les plus actuels, et disposent en plus d'une parfaite compréhension de leurs objectifs au-delà de leur expression littérale. Cette connaissance et cette compréhension conduisent à ne pas considérer l'atteinte de la conformité aux référentiels comme l'objectif ultimes à atteindre, mais bien comme un socle minimal.

Ce niveau de connaissance et de compréhension, nécessite toutefois aussi, lorsque la variante intègre une innovation, des compétences spécifiques en matière de gestion d'innovation, d'évaluation technique et d'assurabilité, des financements spécifiques suffisants et du temps pour mener les actions qui en découlent.

❖ Variante Atteignable :

Variante qui présente, au choix :

- des innovations supplémentaires en comparaison à la variante réalisable, et donc un pas à franchir un peu plus important.
- un même niveau d'innovation que la variante réalisable mais avec beaucoup moins de données scientifiques pour justifier de l'aptitude à l'emploi du système constructif dit innovant, impliquant alors un nombre d'essais et d'études plus important que pour la variante réalisable ;
- le même niveau d'innovation et de données scientifiques que pour la variante réalisable ; dans ce cas, le classement est issu d'une ambition supérieure à la variante réalisable sur l'un des autres critères que celui du cadre « technico-règlementaire ».

Les niveaux de connaissances et de compréhension des acteurs.rices décrits pour la variante réalisable sont au moins identiques pour la variante atteignable.

❖ Variante Novatrice :

Variante, dont certains points sont en rupture totale avec les pratiques et procédés constructifs actuels, et pour lesquels les connaissances scientifiques et techniques à date devront être complétées de façon importante. Une justification préalable sensiblement conséquente de cette ambition devra ainsi être réalisée avant d'être réellement entreprise.

Le travail collaboratif et itératif mené sur les prototypes a ainsi été, pour chaque système constructif proposé et dont les caractéristiques répondaient aux autres critères définis précédemment, d'évaluer s'il s'inscrivait bien dans le niveau recherché et dans le cas contraire d'évaluer quelles seraient les modifications ou autre système constructif qui pourraient y répondre.

L'évaluation économique

Généralités

Périmètre de l'évaluation économique

L'évaluation économique a été réalisée à partir d'une méthode basée sur un mètre des principaux ensembles fonctionnels multipliés par des prix unitaires reconstitués.

Les ensembles fonctionnels **pris en compte** dans l'étude économique se rapportent :

- A l'**enveloppe** constituée de planchers bas, de façades opaques et vitrées, de planchers hauts.
- Aux **séparatifs intérieurs verticaux et horizontaux** du bâtiment, refends structurels, cloisonnements légers, planchers intermédiaires, structure poteaux / poutres, liaisons verticales (escaliers), éléments de distribution (bloc-portes).
- Partiellement aux **aménagement intérieurs** lorsqu'il s'agit de matériaux biosourcés ou de réemploi.
- Aux **constructions extérieures** tels que des balcons.

Les ensembles fonctionnels suivants **ont été exclus** de l'étude de manière à se concentrer sur l'économie structurelle du bâtiment en superstructure :

- **Adaptations aux sols** liées aux terrassements et fondations,
- **Equipements techniques** du bâtiment relatif à la CVC, plomberie et électricité.

Méthode de l'évaluation économique

Sur la base de pièces graphiques des différents prototypes étudiés : vues en plan, coupes de principes, fragments types de façade, il a été identifié les différentes matérialités mises en œuvre. Celles-ci ont ensuite été organisées par **ensembles fonctionnels**, puis **métrés** et enfin **estimés** à l'aide de ratios économiques connus à un instant T caractérisés par une date de valeur appelée mois 0.

Cela a permis de calculer les coûts propres des ensembles fonctionnels en euros de chaque prototype décliné sous différentes versions : BAU et Variantes. Ces coûts par ensembles fonctionnels ont été ensuite transformé en ratio de coûts ramenés à la surface de plancher (€ / m² sdp). Il en a été donc déduit les différences de ratio de coûts (€/m² sdp) entre le BAU et ses variantes respectives ; ces différences de coût ont été retranscrits en **écart en pourcentage** (Variante par rapport au BAU).

Afin de s'affranchir des évolutions des coûts au cours du temps, les ratios économiques ont été traduits en **base 100** afin d'établir une relativité économique entre BAU et ses variantes (pour un prototype étudié).

Nota : Base 100 - La valeur de départ, appelée valeur de base, prend la valeur d'indice 100. Il s'agit du BAU. On calcule ensuite l'indice d'arrivée caractérisé par la Variante en prenant l'écart BAU / Variante auquel il est ajouté 100.

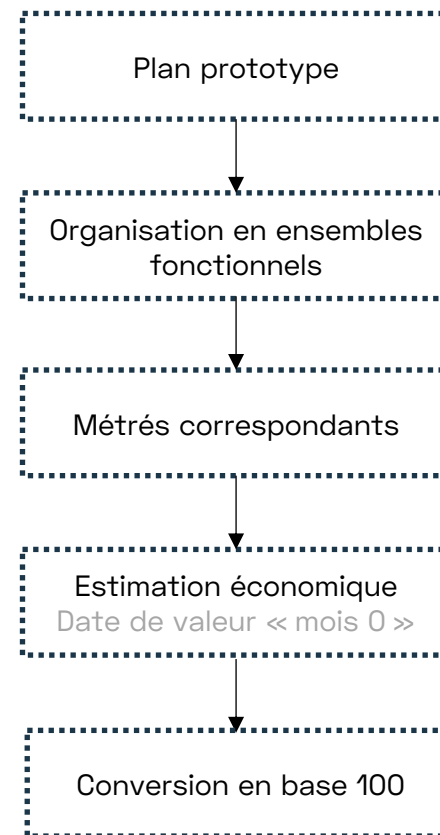


Fig12 : schéma méthodologie économique

L'évaluation environnementale

Généralités

Pourquoi une évaluation environnementale ?

Travailler avec des matériaux bio ou géo-sourcés permet de porter l'attention sur les ressources nécessaires à la construction. Les matériaux de construction ont un impact environnemental, qui peut comprendre une phase d'extraction, et ses impacts sur le milieu écologique dans lequel on opère le prélèvement, et des besoins en énergie, du prélèvement, à la transformation, de la ressource initiale au matériau final.

Massifier l'usage des matériaux biosourcés implique donc d'évaluer leur bénéfice en termes de besoin en énergie et en impact sur les ressources, notamment non renouvelables. Ce dernier point est en lien avec les thématiques biodiversité et pollution, qui sont des limites planétaires.

Pour mener cette évaluation, nous avons choisi l'indicateur d'analyse du cycle de vie (ACV), qui sera détaillé sur la page suivante. Ce calcul commence à être maintenant bien maîtrisé et permet d'avoir une représentation des émissions de gaz à effet de serre tout au long du cycle de vie d'un matériau. Il ne couvre certes pas tous les champs évoqués plus hauts, mais permet une première approche sur une métrique qui commence à être diffusée largement.

D'autres indicateurs pourraient venir en soutien, mais sur lesquels nous n'avons encore que peu de recul, par exemple l'impact sur l'épuisement des ressources.

Nous nous attacherons également à montrer les limites et biais impliqués par les calculs carbone, pour en tirer des pistes d'amélioration.

Nous y adjoindrons autant que possible une analyse sur les indicateurs de confort et d'usage, qui sont aujourd'hui qualitatifs, mais qui pourront peut-être à l'avenir être mesurés.

L'évaluation environnementale

Les indicateurs utilisés

Un focus sur l'indicateur carbone

Chaque prototype est évalué au moyen d'une analyse de cycle de vie, pour une durée de vie de 50 ans. L'étude se concentre sur l'indicateur carbone afin d'évaluer l'impact sur le réchauffement climatique des produits de constructions et équipements (PCE) des prototypes.

Cette évaluation carbone s'appréhende à deux niveaux : la réglementation environnementale progressivement applicable à l'ensemble des constructions neuves (déjà applicable pour les bâtiments tertiaires et de logements) et les ambitions nationales de neutralité carbone, dictées par les Accords de Paris. Un double calcul est ainsi réalisé : une application de la méthodologie d'ACV dynamique de la RE2020, et une modulation de cette méthode, avec un bilan carbone « optimisé » selon différents paramètres présentés par la suite.

Une évaluation carbone déclinée selon le contexte de l'opération

Selon que le prototype étudié soit une construction neuve ou réhabilitée, le périmètre d'analyse diffère :

- Pour les **prototypes neufs**, une évaluation détaillée des lots suivants est réalisée :

- Lot 3 : Superstructure
- Lot 4 : Couverture, toiture
- Lot 5 : Cloisonnement, doublages, ...
- Lot 6 : Façade

Ces lots sont ceux impactés par les systèmes constructifs étudiés.

Les autres lots sont estimés à partir de valeurs forfaitaires issues de la réglementation environnementale et des retours d'expériences (REX Zefco), pour permettre d'obtenir un bilan carbone global du prototype [au m2.SU]. Celui-ci peut alors être positionné par rapport aux objectifs carbone réglementaires (Ic construction 2022, 2025, 2028, 2031) et par rapport au BAU (pour lequel une ACV est réalisée en parallèle)

La présence de matériaux bio et géo-sourcés dans les prototypes a vraisemblablement un impact sur les lots techniques, que ce soit le chauffage, ou la ventilation. Toutefois cet impact n'a pas pu être évalué dans le cadre de cette étude.

- Pour les **prototypes réhabilités** :

Le périmètre d'intervention dans le cas de la rénovation étant limitée, l'évaluation carbone est centrée sur le fragment de bâtiment étudié. Les performances environnementales des différentes variantes sont ainsi évaluées lot par lot, au m2 d'élément réhabilité (façade).

Les variantes étudiées sont comparées entre elles, à un projet de réhabilitation conventionnelle (non biosourcée) nommé « BAU ». Il n'y a pas de seuil réglementaire pour la réhabilitation.



Fig13 : Lots ACV évalués dans le cadre du prototypage

L'évaluation environnementale

Les optimisations possibles

Les simulations carbone pour les prototypes neufs

L'étude carbone réglementaire fait ensuite l'objet de différentes simulations pour viser un bilan « optimisé ». Celles-ci ont pour objectif de faire varier le calcul réglementaire sur différentes hypothèses. Par exemple, nous analysons l'impact qu'auraient des données optimisées sur la fin de vie dans certaines FDES, ou alors l'impact d'une comptabilisation de la terre de récupération en réemploi. Ces tests ont pour objectif de déterminer la marge de progression atteignable à iso-système constructif, avec des données ou des normes de comptabilisation différentes, qui peuvent être atteinte avec plus d'investissement dans la production de données, ou avec un changement de catégorisation réglementaire.

Des impacts sur d'autres lots, qui restent à quantifier

Les modifications morphologiques et de matériaux proposées ont des répercussions positives sur d'autres lots, qui n'ont pas pu être étudiées dans le cadre de cette étude, mais qui semblent prometteuses.

Voici quelques pistes qui pourraient être valorisées dans le cadre d'une autre étude :

- Une structure bois conduit à un bâtiment plus léger > *impact sur les fondations*
- A l'usage, les matériaux bio et géo-sourcés améliorent le confort intérieur, ce qui est aujourd'hui uniquement caractérisé par des retours d'expériences qualitatifs > *diminution du besoin en froid ou en chaud*
- Sur un bâtiment entièrement respirant, il est à prévoir que le besoin en instrument de pilotage du bâtiment tendra à diminuer fortement, voire à disparaître > *diminution des lots Climatisation – Ventilation – Chauffage*
- La terre crue a des atouts en termes d'affaiblissement acoustique, ce qui permet de limiter les dispositifs complémentaires en cas d'exigence dans ce domaine > *impact sur les dispositifs ajoutés*
- etc.

Usage des biosourcés	Caractéristique	Impact probable
Bois structure	Léger	Diminution du dimensionnement des fondations
Tous	Confort ressenti	Diminution des besoins en chaud ou froid
Tous	Respirabilité	Diminution besoins en ventilation
Terre crue	Masse	Affaiblissement acoustique important [courbes disponibles]

Fig14 : Des impacts positifs non pris en compte dans l'étude

L'évaluation environnementale

Les données qualitatives

Les indicateurs

Afin de synthétiser les caractéristiques de chaque variante, six indicateurs sont représentés :

- Trois d'ordre général : le caractère innovant, le gain en kg CO2, et le surcoût économique (par rapport au "business as usual"). Ils se placent sur une échelle relative au prototype étudié, allant du minimum au maximum de la variable, sur les quatre ou cinq variantes du prototype.
- Trois concernant le confort thermique : la résistance thermique, la perméabilité à la vapeur d'eau et l'inertie thermique. Ils se placent sur une échelle relative à l'ensemble des variantes étudiées, sur les quatre prototypes, afin que les performances thermiques de toutes les enveloppes soient comparables entre elles.

Précisions sur les indicateurs de confort thermique

La performance thermique d'une paroi opaque est souvent jugée uniquement à l'aune de la résistance thermique. Or cette valeur ne prend pas en compte l'inertie et la perméabilité à la vapeur d'eau, caractéristiques qui sont prépondérantes dans le confort d'été. Ainsi, pour qu'un bâtiment soit confortable et économe en énergie, avoir une paroi seulement résistante ne suffit pas.

Une paroi avec de l'inertie a une importante capacité à stocker la chaleur et réduit l'amplitude des variations de température sur les périodes quotidienne, séquentielle, et annuelle. Bien dimensionnée, la paroi avec inertie permet aussi de décaler le pic de chaleur d'une demi-période quotidienne (12 h), phénomène appelé déphasage thermique. La perméabilité à la vapeur d'eau garantit l'équilibre de l'humidité relative en fonction de la température.

Pour la vingtaine d'enveloppes étudiées, aussi bien en rénovation qu'en neuf, trois caractéristiques sont représentées :

- la résistance thermique, calculée à partir de la conductivité des matériaux
- la perméabilité à la vapeur d'eau, calculée à partir du coefficient de perméabilité à la diffusion de la vapeur d'eau des matériaux
- l'inertie de la paroi, calculée à partir de la chaleur spécifique et de la masse volumique des matériaux.

Le calcul de l'inertie d'une paroi est difficile, spécifiquement dans le cas de l'usage des isolants bio-sourcés, car les isolants "lourds" (béton de chanvre, terre-paille...), contribuent à l'inertie d'une paroi au lieu d'y faire simplement écran comme les isolants légers (polystyrène, laine minérale). La distinction entre ces deux comportements est floue car non décrite par la réglementation énergétique.

=> C'est pourquoi deux curseurs sont représentés sur l'échelle de l'inertie, le bleu foncé ne prenant pas en compte la participation des isolants lourds à l'inertie de la paroi, le bleu clair prenant en compte cette participation.

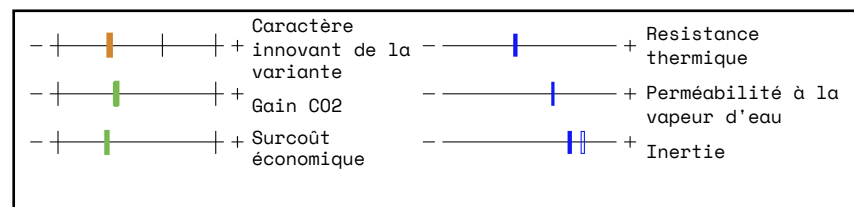


Fig15 : Synthèse des indicateurs relatifs à un prototype

Mise en regard du carbone et de l'économique

La convergence d'un périmètre carbone vers un périmètre économique

Faire des comparatifs coûts carbone nécessite de faire converger les pratiques professionnelles. En effet, les éléments d'analyse diffèrent entre l'estimation économique et l'ACV, avec d'un côté des ensembles fonctionnels, et de l'autre un découpage en 13 lots techniques pour le calcul ACV.

❖ Le choix a été fait de rassembler les données sur les ensembles fonctionnels pour chaque variante de prototype.

Par ailleurs, les valeurs économiques et d'impacts carbone sont comparées par rapport à une base 100, qui est celle de l'impact carbone et du coût du BAU.

Lecture du principe de graphique ci-contre :

- si la barre du coût atteint 90, cela signifie que la variante évaluée a un coût inférieur de 10% au BAU.
- De la même manière, si la valeur carbone atteint 20, cela signifie que l'impact carbone de la variante est 20% de celle du BAU, et que l'impact carbone est diminué de 80% par rapport au BAU.
 - A noter que la valeur carbone peut être négative, si les matériaux absorbent plus de carbone qu'ils n'en émettent, comme c'est le cas pour les biosourcés. Ainsi, une valeur carbone à -10 signifie que la variante n'émet pas de carbone et stocke l'équivalent de 10% du carbone émis par le BAU.

Cette comparaison éco-carbone permet de mettre en perspective les variations de coût liées à l'emploi des matériaux bio et géo-sourcés, et les économies carbone réalisées.

Cela permet une approche du rendement des solutions constructives choisies, en termes d'allocation budgétaire nécessaire pour un certain impact carbone.

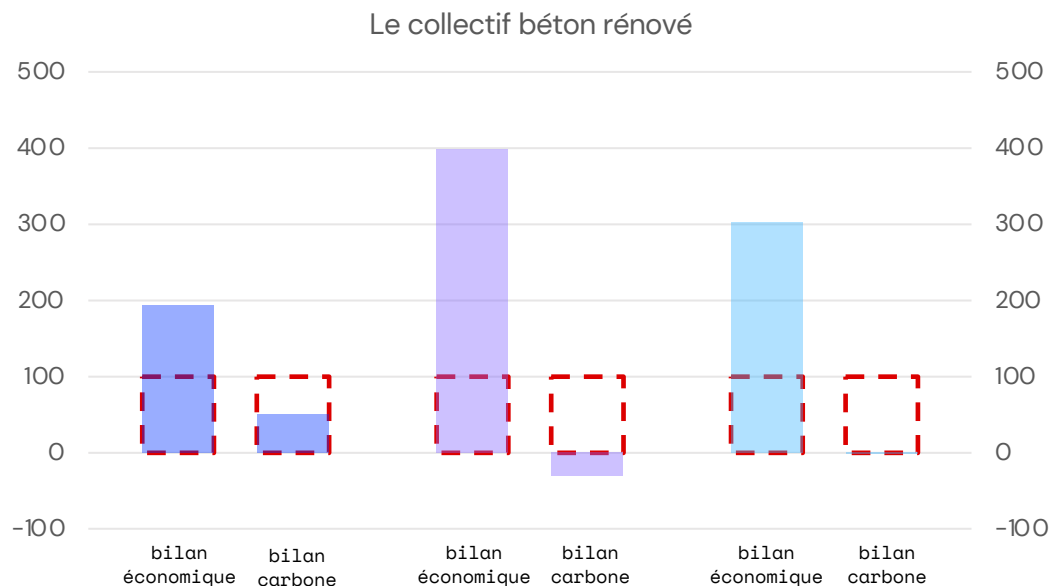


Fig15 : Exemple de visualisation de la comparaison éco-carbone sur différentes variantes

Grille de lecture du prototypage

Cette planche, que l'on retrouvera pour décrire les prototypes dans la section suivante, détaille les différents éléments composant chaque variante (réalisable – atteignable – novatrice) pour chaque prototype.



Evaluation de la variante

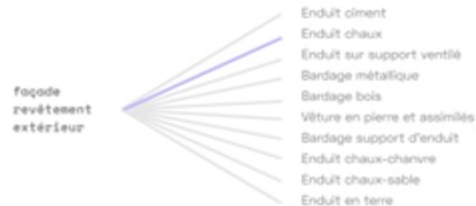
synthèse de l'évaluation multi critère développée en pages suivantes

Indicateurs de confort

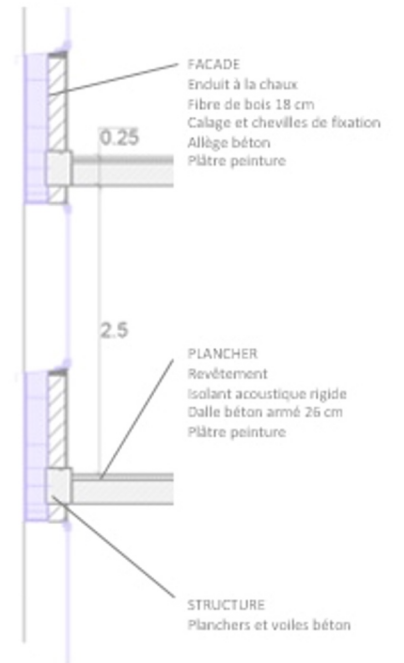
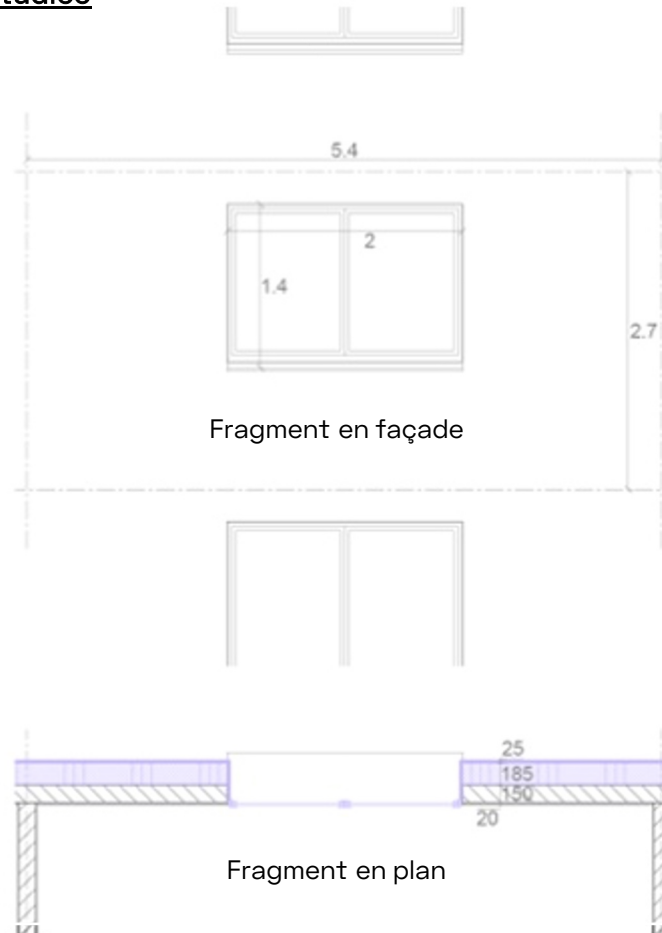


Alternatives possibles

Le prototypage développe un nombre restreint de procédés constructifs de manière à les étudier en détails. Il existe une multitude d'autres procédés s'appuyant sur d'autres filières. Appuyé sur le travail de sourçage de la phase 1 de Maillons, ce diagramme propose des procédés constructifs alternatifs pour un projet situé sur le territoire de la Vallée de la Seine.



Dessins en détails de la variante étudiée



Fragment en coupe

* Les 3 premiers indicateurs sont placés sur des graduations relatives au prototype, les 3 autres se situent sur des échelles communes à toutes les variantes.

2.2 Les prototypes

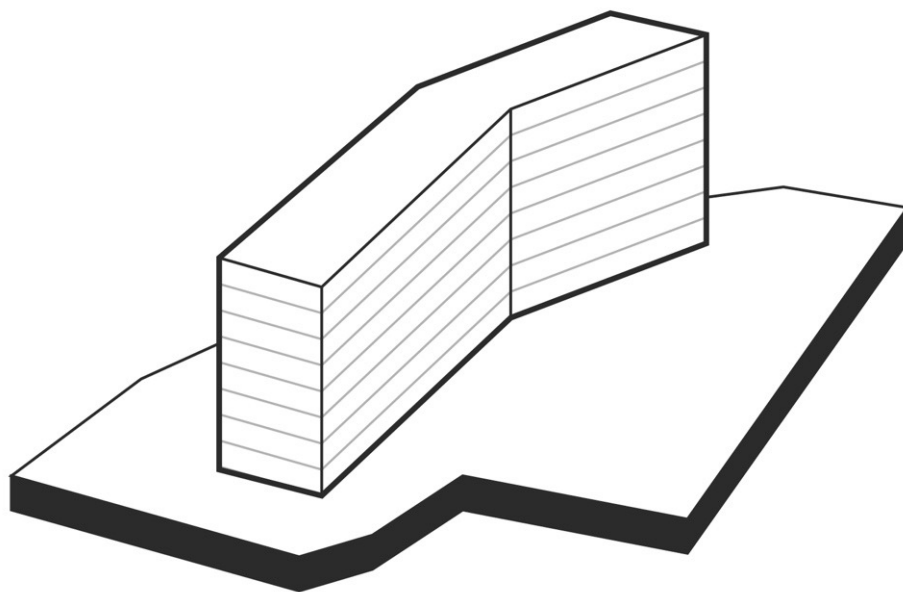
2.2.1 Le collectif béton rénové

Le collectif béton renové

Description de l'archétype existant

50% des logements collectifs en Haute-Normandie ont été construits entre 1945 et 1974

On constate une prépondérance des réhabilitations de logements collectifs sur les différents groupements communaux étudiés, avec une proportion importante de constructions datant de la période après-guerre et avant la première réglementation thermique.



Synthèse des caractéristiques du prototype étudié :

localisation	Cherbourg-Octeville CA du Cotentin (50)
programme	Logements collectifs
Classement incendie	3e famille
Surface parcelle	6 050 m ²
Emprise au sol	1 400 m ²
Surface de plancher Surface utile (ratio 92%)	11 200 m ² 10 304 m ²
SDP étage courant SU courant (ratio 92%)	1 400 m ² 1 288 m ²
Nombre d'étages	R+7
Hauteur du plancher bas du dernier niveau	25m
Hauteur façade à l'acrotère	
Profondeur bâtie	14m
Coefficient de compacité	
Zone sismique	2
Zone climatique	H1a
Zone vent	2
Hygrométrie des locaux	
Budget travaux base	2,2 millions HT

Échelle du bâtiment

Le collectif béton rénové

Conception architecturale et technique

L'état existant

Les bâtiments résidentiels en béton datent généralement de l'après seconde guerre mondiale, issus de la reconstruction ou de constructions plus tardives. Ces bâtiments reposent sur l'utilisation d'éléments standardisés et de mises en œuvre industrielles.

Les logements collectifs de ce type sont le plus souvent construits selon une trame régulière de voiles porteurs en béton armé isolés par l'intérieur. Les planchers sont quant à eux en béton armé ou constitués de poutrelles béton et hourdis de terre cuite ou béton surmontés d'une chape de béton. Les maisons individuelles qui se rapprochent de ce style de construction, souvent de type pavillonnaire, sont plutôt en maçonnerie de bloc creux en terre cuite ou béton avec des planchers en béton ou poutrelles/hourdis. Avec les années et le manque d'entretien régulier, ces bâtiments ont souvent été fragilisés et dévalorisés. Il semble donc opportun de porter un autre regard sur ce patrimoine.

Les points de vigilance à aborder pour la rénovation de ce type de construction sont :

- Repérage et identification du type de pare/frein vapeur et des matériaux hydrofuges éventuels
- Positionnement du dormant et performance des menuiseries extérieures
- Les parois du bâti moderne majoritairement fermées à la diffusion de vapeur d'eau.

Malgré plusieurs interventions au fil des ans, la résidence présentait des dégradations sur les balcons, sur le bardage existant et sur les revêtements intérieurs d'origine usés. Les travaux ont consisté en l'isolation thermique par l'extérieur, l'isolation des planchers bas des logements, mise en place d'une ventilation naturelle assistée, réfection des parties communes, remplacement d'équipements sanitaires, réfection des sols, remplacements des garde-corps, remplacement des portes palières.

Choix de l'ITE fibre de bois / paille

Les systèmes constructifs d'isolation par l'extérieur présentent les caractéristiques suivantes :

- Une ITE permet de mieux traiter les ponts thermiques structurels
- L'intervention n'engendre pas de perte de surface habitable
- Les travaux sont réalisables sans que les habitants ne quittent le logement
- La rénovation permet la modification de l'apparence extérieure du bâtiment
- Néanmoins, cette technique est plus complexe à réaliser et moins performante si le bâtiment présente de nombreux balcons et ouvertures.

Les choix de conception se sont orientés vers des solutions constructives fibre de bois et paille car elles sont prometteuses du point de vue économique.



Échelle du fragment

Le collectif béton rénové

récapitulatif des variantes constructives

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de l'archétype existant à partir duquel sont déclinés trois prototypes principaux utilisant des procédés constructifs avec des matériaux bio et géosourcés.

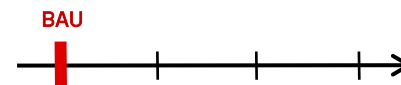
En bleu sont représentés les ouvrages modifiés par rapport à la variante précédente.

En gris sont indiqués les ouvrages qui ne sont pas analysés dans le cadre de cette étude.

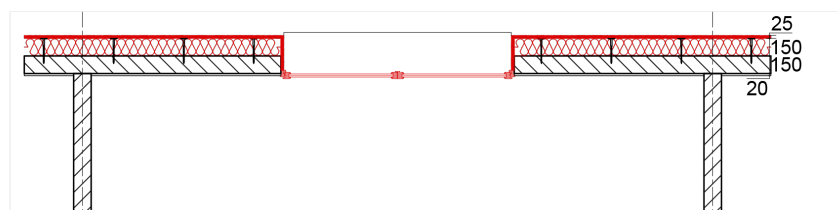
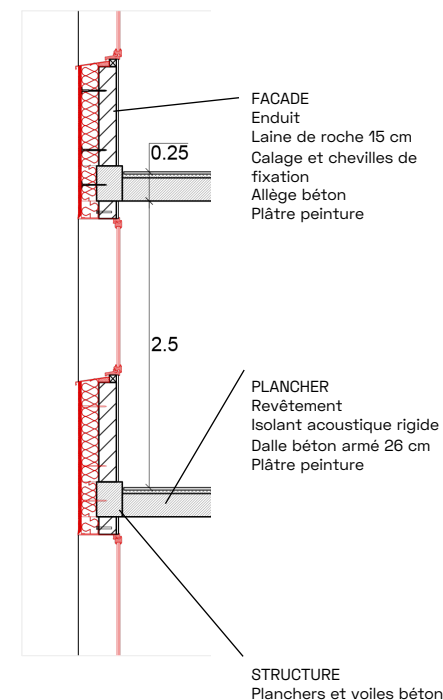
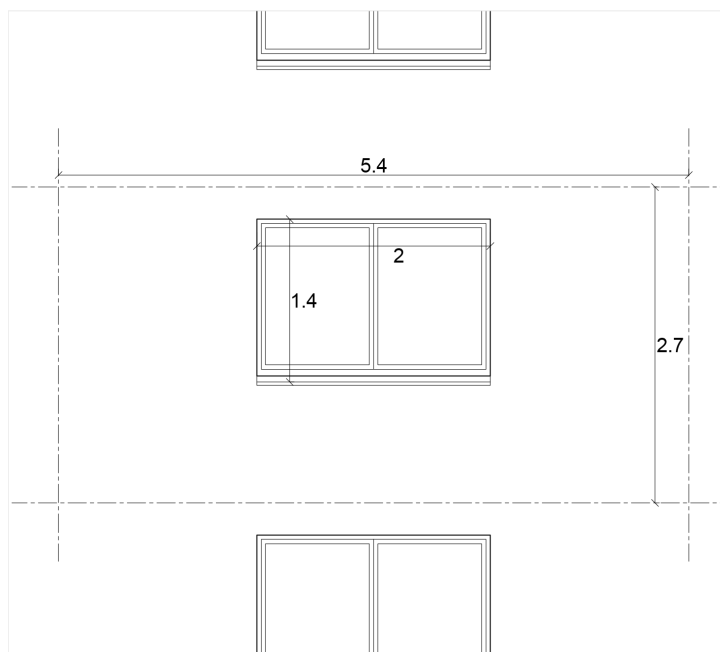
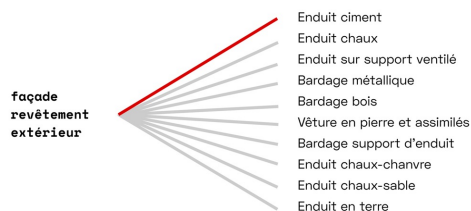
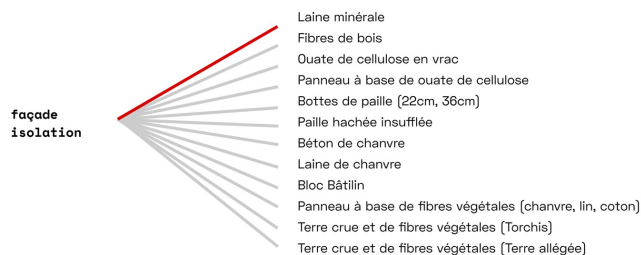
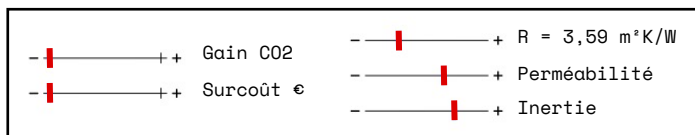
	Archétype existant	Prototype Réalisable	Prototype Atteignable	Prototypes Novateurs 1 et 2
Porteur	Planchers et voiles béton	Planchers et voiles béton	Planchers et voiles béton	Planchers et voiles béton
Plancher courant	Plancher béton Revêtement, isolant acoustique rigide, dalle béton armé 26 cm, plâtre peinture	Plancher béton Revêtement, isolant acoustique rigide, dalle béton armé 26 cm, plâtre peinture	Plancher béton Revêtement, isolant acoustique rigide, dalle béton armé 26 cm, plâtre peinture	Plancher béton Revêtement, isolant acoustique rigide, dalle béton armé 26 cm, plâtre peinture
Façade courante	Mur béton , enduit, plâtre peinture 19.5 cm	ITE fibre de bois 18cm chevillé , Extérieur : enduit à la chaux Intérieur : mur béton , enduit, plâtre peinture 38 cm	FOB préfabriquée isolation paille hachée 20 cm Extérieur : bardage bois ventilé Intérieur : mur béton , enduit, plâtre peinture 47.7 cm	Déclinaison 1 : FOB préfabriquée isolation bottes de paille 22 cm Extérieur : enduit sur panneau pare-pluie Intérieur : mur béton , enduit, plâtre peinture 43.8 cm Déclinaison 2 : ITE bottes de paille Extérieur : enduit sur panneau pare-pluie Intérieur : mur béton , enduit, plâtre peinture 43.8 cm
Façade vitrée	menuiseries extérieures PVC	menuiseries extérieures bois	menuiseries extérieures bois	menuiseries extérieures bois

Le collectif béton rénové

"Business as usual"



Procédé très couramment mis en œuvre actuellement, l'isolation thermique par l'extérieur en laine minérale est peu chère mais assez dispendieuse en énergie. En effet, le processus de fabrication de la laine de roche est très industrialisé et implique notamment la mise en fusion de basalte dans des fours chauffés à 1400°C. La faible densité du matériau, qui limite un peu son impact carbone, le classe dans la catégorie des isolants légers, contribuant peu au confort d'été car inaptes à stocker la chaleur. Ce type d'isolant voit aussi ses performances drastiquement réduites s'il est mouillé et nécessite une paroi très étanche.



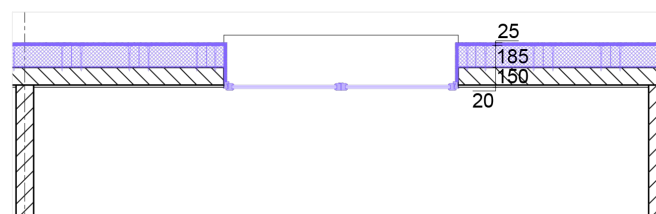
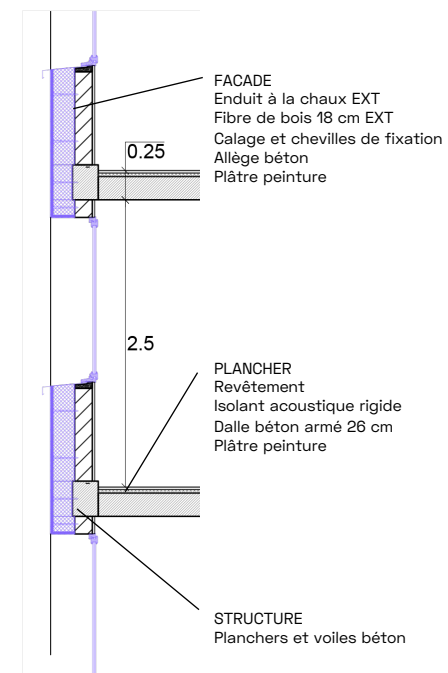
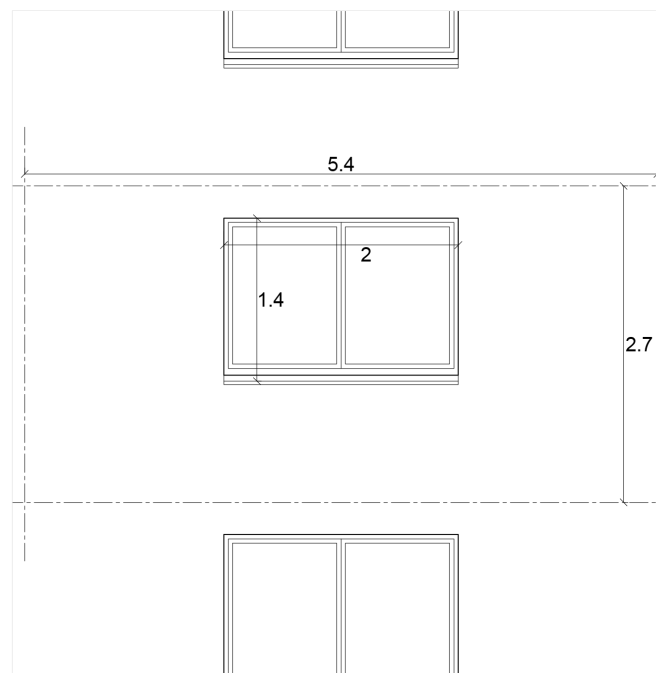
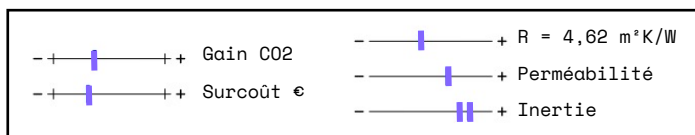
Le collectif béton rénové

Réalizable

REALISABLE



De plus en plus courante, l'isolation en fibre de bois présente plusieurs avantages : un coût assez faible en comparaison à d'autres isolants biosourcés, une conductivité thermique très faible comparable aux isolants non bio-sourcés couramment utilisés, ainsi qu'une masse volumique et une chaleur spécifique élevées, qui lui permettent de participer à l'inertie des parois et de contribuer au confort d'été. Cependant, une part importante de résines (autour de 20 %) est utilisée, ce qui réduit l'intérêt environnemental du produit.

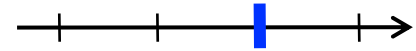


- façade isolation**
- Laîné minérale
 - Fibres de bois
 - Ouate de cellulose en vrac
 - Panneau à base de ouate de cellulose
 - Bottes de paille (22cm, 36cm)
 - Paille hachée insufflée
 - Béton de chanvre
 - Laîné de chanvre
 - Bloc Bâtilin
 - Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
 - Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
 - Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)
- façade revêtement extérieur**
- Enduit ciment
 - Enduit chaux
 - Enduit sur support ventilé
 - Bardage métallique
 - Bardage bois
 - Véture en pierre et assimilés
 - Bardage support d'enduit
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit chaux-sable
 - Enduit en terre

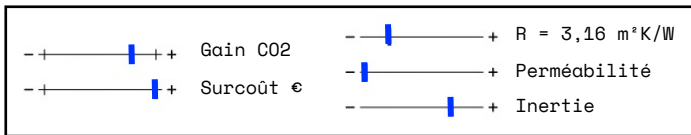
Le collectif béton rénové

Atteignable

ATTEIGNABLE



Contrairement aux procédés des variantes précédentes, où l'isolant était directement chevillé au support béton, la mise en œuvre de la paille hachée se fait ici au moyen de panneaux de FOB préfabriqués et suspendus à la façade existante. La paille hachée est insufflée en atelier, contre la membrane qui constitue le fond de la FOB. La finition bardage bois nécessite, dans l'état actuel de la réglementation incendie, un certain nombre d'accessoires comme les déflecteurs, qui peuvent mitiger ses bonnes performances carbone. De plus, les réglementations feu actuelles exigent des dispositions géométriques (C+D) que les bâtiments anciens ne respectent pas toujours : il est important de toujours bien vérifier la conformité de l'ancien, comme c'est le cas ici.

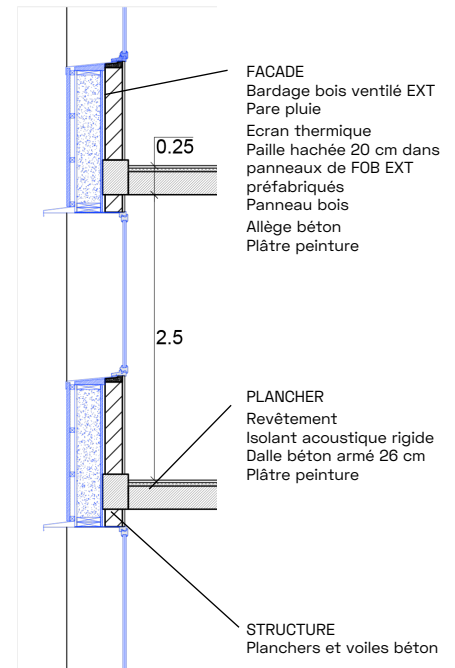
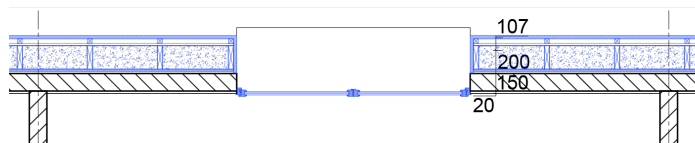
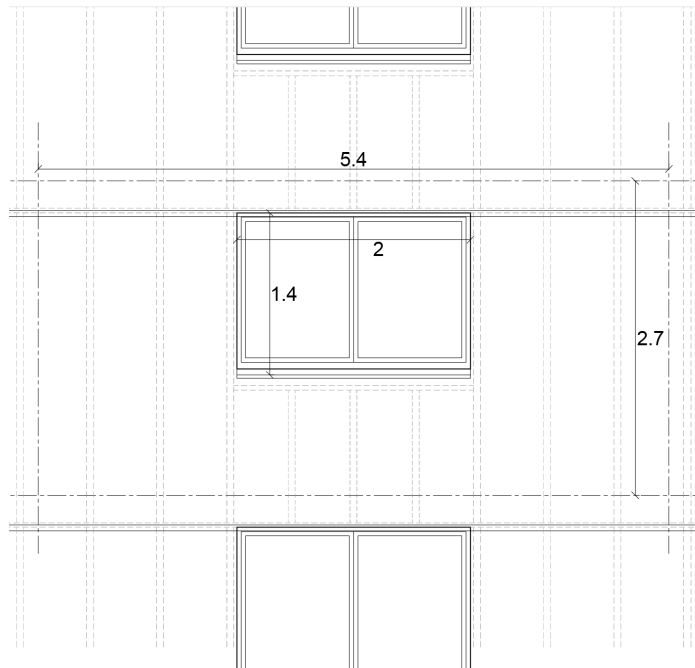


façade
isolation

- Laine minérale
- Fibres de bois
- Ouate de cellulose en vrac
- Panneau à base de ouate de cellulose
- Bottes de paille (22cm, 36cm)
- Paille hachée insufflée
- Béton de chanvre
- Laine de chanvre
- Bloc Bâtlin
- Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
- Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
- Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)

façade
revêtement
extérieur

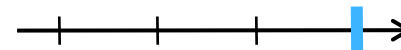
- Enduit ciment
- Enduit chaux
- Enduit sur support ventilé
- Bardage métallique
- Bardage bois
- Vêture en pierre et assimilés
- Bardage support d'enduit
- Enduit chaux-chanvre
- Enduit chaux-sable
- Enduit en terre



Le collectif béton rénové

Novatrice - déclinaison 1

NOVATRICE



Les bottes de paille de 22cm, de dimension plus faible que celles fabriquées par les botteleuses agricoles standard, permettent de limiter la surépaisseur du mur tout en garantissant une forte amélioration de la performance thermique de la paroi. Les bottes de paille sont posées en remplissage d'une ossature bois fixée au mur existant. Les caissons peuvent être entièrement préfabriqués. Cela permet d'intervenir rapidement et en filière sèche sur des bâtiments de grande échelle.

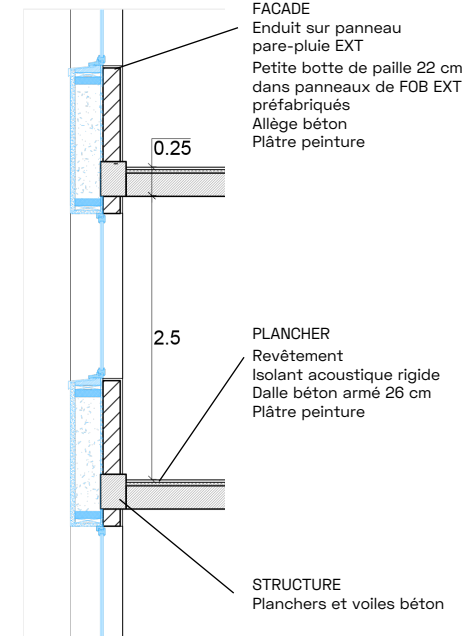
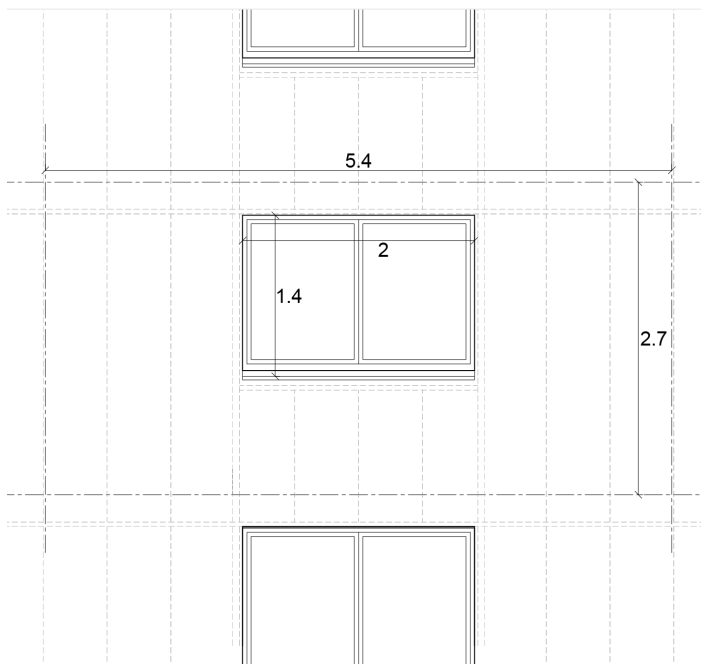
- +	+	Gain CO2	- +	+	R = 4,68 m²K/W
- +	+	Surcoût €	- +	+	Perméabilité
- +	+		- +	+	Inertie

façade
isolation

- Laine minérale
- Fibres de bois
- Ouate de cellulose en vrac
- Panneau à base de ouate de cellulose
- Bottes de paille (22cm, 36cm)
- Paille hachée insufflée
- Béton de chanvre
- Laine de chanvre
- Bloc Bâtilin
- Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
- Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
- Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)

façade
revêtement
extérieur

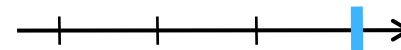
- Enduit ciment
- Enduit chaux
- Enduit sur support ventilé
- Bardage métallique
- Bardage bois
- Vêtire en pierre et assimilés
- Bardage support d'enduit
- Enduit chaux-chanvre
- Enduit chaux-sable
- Enduit en terre



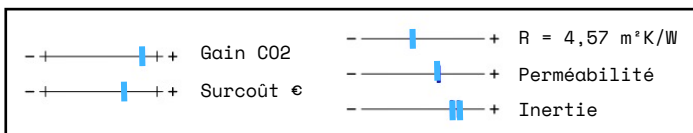
Le collectif béton rénové

Novatrice - déclinaison 2

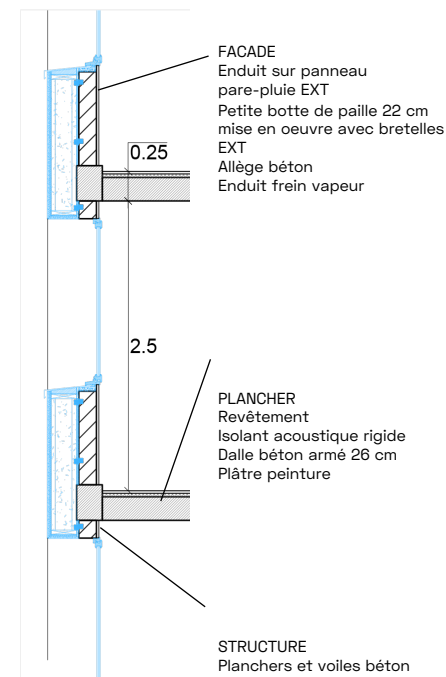
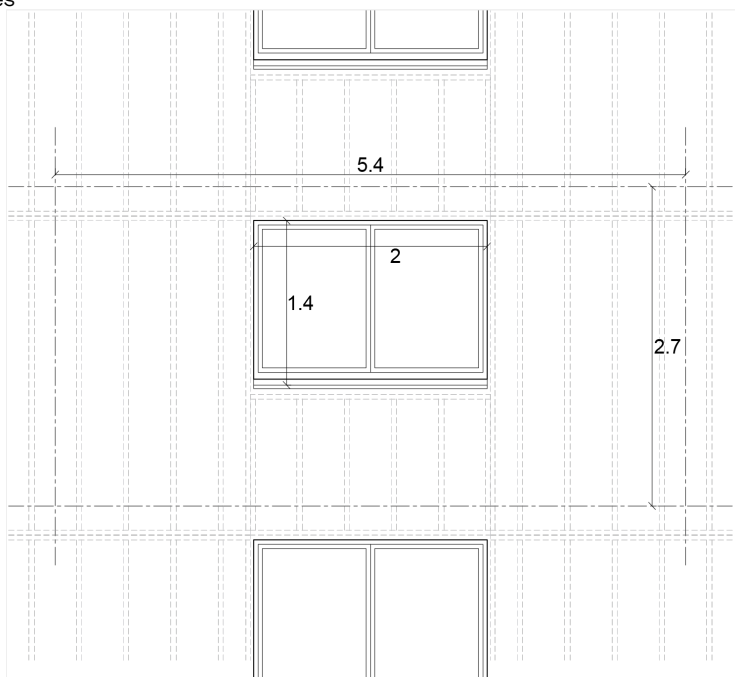
NOVATRICE



Ce mode de mise en œuvre est beaucoup moins consommateur en bois que les exemples en Façades Ossature Bois (FOB) présentés précédemment. Les "bretelles" sont des feuillards en polyester ancrés dans le mur au moyen de chevilles métalliques. Cette technique a été utilisée en R+1 et R+2 sur le chantier d'isolation par l'extérieur du 135 rue de la Convention Paris 15 (maître d'ouvrage Paris Habitat, maîtres d'œuvre Trait Vivant et LandFabrik).



- façade isolation**
- Laine minérale
 - Fibres de bois
 - Ouate de cellulose en vrac
 - Panneau à base de ouate de cellulose
 - Bottes de paille (22cm, 36cm)
 - Paille hachée insufflée
 - Béton de chanvre
 - Laine de chanvre
 - Bloc Bâtilin
 - Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
 - Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
 - Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)
- façade revêtement extérieur**
- Enduit ciment
 - Enduit chaux
 - Enduit sur support ventilé
 - Bardage métallique
 - Bardage bois
 - Vêture en pierre et assimilés
 - Bardage support d'enduit
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit chaux-sable
 - Enduit en terre



Le collectif béton rénové

L'évaluation cadre normatif

L'ensemble de l'évaluation du cadre normatif et indications données, sont valables dans les configurations connues et retenues du prototype considéré. La mise en application des prototypes sur un projet réel, sera conditionnée par un diagnostic poussé de l'existant afin d'évaluer la réelle faisabilité et applicabilité du prototype au regard de la configuration du projet.

Variante Réalisable

Cette variante intègre une **solution d'enduit sur isolation thermique par l'extérieure (ETICS) en fibre de bois** pour lesquels plusieurs procédés sont sous Avis Technique ou Document Technique d'Application et sur liste verte de la C2p.

=> Il n'est donc a priori pas nécessaire de prévoir d'évaluation technique complémentaire.

Précisons toutefois que cela ne dispense pas les acteurs d'avoir à réaliser l'ensemble du diagnostic de la façade tel que défini dans les documents précités, notamment en termes de résistance mécanique des chevilles de fixation dans la paroi existante.

Concernant les aspects de sécurité incendie, le système constructif doit faire l'objet d'une étude approfondie et d'une évaluation réglementaire spécifique démontrant que l'emploi du procédé n'a pas pour effet de diminuer le niveau de sécurité incendie antérieur, voire même, si cela est possible, qu'il y ait au contraire une amélioration de celui-ci.

On notera que les tenants de système d'ETICS disposent a priori d'Appréciation de Laboratoire décrivant les dispositions visant à limiter le risque de propagation du feu par les façades. Néanmoins, la bonne atteinte des objectifs de sécurité via les moyens décrits dans ces Appréciations, peut être conditionnée par le respect entre autres de la règle dite du C+D.

Les bâtiments couverts par le présent prototype sont antérieurs à l'arrêté du 31 janvier 1986, ils n'ont donc sans doute pas été soumis à cette disposition constructive et risquent ainsi de facto de ne pas y répondre. L'évaluation réglementaire précitée devra ainsi tenir compte de ce point.

Variante Atteignable

Cette variante intègre différents points qui ne sont pas visés dans le référentiel technico-réglementaire existant, dont:

- L'emploi d'un bardage bois sur une FOB qui n'est pas visé par le NF DTU 41.2 ;
- L'emploi d'un isolant en botte de paille dans une FOB qui n'est ni visée par le NF DTU 31.4, ni par les règles professionnelles « Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit ».
- L'emploi d'un isolant en botte de paille à des hauteurs de 25m n'est pas visé par le domaine d'emploi des règles professionnelles « Construction en paille, remplissage isolant

et support d'enduit ».

Les sujets liés à ces points sont cependant relativement bien connus dans le domaine de l'évaluation technique:

- Des données scientifiques permettant de justifier de l'aptitude à l'emploi d'un bardage sur FOB et d'un isolant en botte de pailles dans une FOB avec un bardage ventilé existent d'ailleurs déjà mais seront à compléter, en particulier pour l'emploi de l'isolant en botte de paille dans la paroi (comportement hygrothermique, etc.).

=> Au regard des connaissances actuelles il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable sous conditions que les acteurs du projet aient bien les connaissances indiquées précédemment dans la méthodologie de définition des variantes.

Dans une stratégie de premiers retours d'expérience reconnue et réussie, le recours à des Appréciations Techniques d'Expérimentation (ATEX) de cas b, à condition qu'elles soient favorables, semble être le bon véhicule de portage de cette « innovation ».

On relèvera toute fois que l'emploi d'un bardage bois constitue de facto une aggravation du risque de propagation du feu par les façades en comparaison à l'existant pour lequel le revêtement de façade est incombustible. Des dispositions constructives spécifiques devront être prises de façon à ce que cette aggravation ne soit pas avérée. Ces dispositions seront à valider par une évaluation réglementaire spécifique.

En ultime recours il sera possible de changer le parement extérieur en retenant un matériau non combustible.

Variante Novatrice

La solution constructive proposée est composée d'enduit sur plaque sur FOB isolée en botte de paille ne correspond à aucun procédé existant à date. Les poutres en I doivent faire l'objet d'un Avis Technique visant leur emploi.

Un nombre conséquent de données scientifiques et techniques sera à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

=> Cette solution relevant de la R&D, il n'est pas possible à cette heure de définir un mode d'évaluation technique adapté.

Le collectif béton rénové

L'évaluation économique

Ensemble fonctionnel

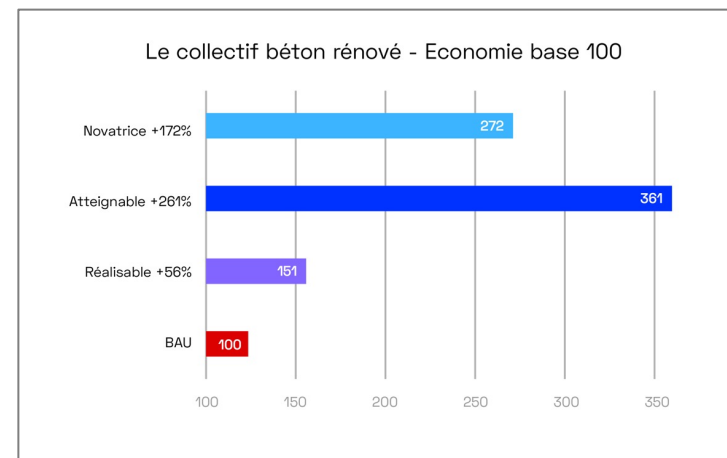
L'évaluation économique est limitée à un fragment de façade. Seul l'ensemble fonctionnel enveloppe sera utilisé pour l'étude. Les coûts de dépose et curage de matériaux existants ne sont pas pris en compte.

Hypothèses constructives

	BAU	Réalisable	Atteignable	Novatrice
Enveloppe	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque béton : mur existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures PVC - Isolation intérieur non biosourcé - Vêtture : enduit 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque béton : mur existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures bois - Isolant fibre de bois chevillé (ép. suivant plan) - Vêtture : enduit Ciment (ép. suivant plan) 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque béton : mur existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures bois - Ossature bois support botte de paille + complexe isolant paille hachée - Vêtture : bardage bois 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque béton : mur existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures bois - Ossature bois support botte de paille + complexe isolant botte de paille (ép. suivant plan) - Vêtture : enduit chaux - sable (ép. suivant plan) sur bottes de paille

Résultats économiques (base 100)

PAR ENSEMBLES FONCTIONNELS	BAU	Réalisable	Atteignable	Novatrice
	Ratios Prix base100	Ratios Prix base 100	Ratios Prix base 100	Ratios Prix base 100
Bilan en Base 100	100	156	361	272
ENVELOPPE DU BATIMENT - périmètre étude partiel	100	156	361	272



L'impact économique de la rénovation biosourcée et géosourcée par rapport à celle du BAU se caractérise notamment par le choix du type d'isolant et par le choix du type de vêtture :

- La mise en œuvre d'un isolant nécessitant une ossature bois de remplissage est beaucoup plus onéreux que la mise en œuvre d'un isolant simplement chevillé sur le un support existant.
- De même, le choix de la vêtture jouera un facteur économique important comme ici l'enduit contre le bois.

Le collectif béton rénové

L'évaluation environnementale

Une rénovation thermique en biosourcé qui stocke du carbone

Les variantes « Atteignable » et « Novatrice » présentent des résultats carbone négatifs, ce qui signifie que ces rénovations contribuent à stocker du carbone, au-delà même de leur effet visé initialement, qui est de diminuer fortement la consommation d'énergie en exploitation.

C'est donc un résultat très fort : **la rénovation thermique avec les biosourcés peut contribuer à atténuer les émissions carbone du bâtiment** sans contribuer en parallèle à leur augmentation du fait de la mise en œuvre des matériaux nécessaires.

Les menuiseries, un investissement carbone

Le remplacement des menuiseries représente un poste d'émission carbone très significatif sur la réhabilitation de la façade, comme l'atteste la figure 17. Néanmoins, si la nécessité est avérée, cela représente un investissement de limitation énergétique en réduisant fortement les déperditions thermiques liées aux parties vitrées de l'enveloppe et en participant à limiter les consommations d'énergie liées au chauffage.

Limites de la méthode sur l'enduit

Les variantes « novatrice » mettent en évidence l'économie carbone générée par les façades en enduit. Néanmoins cette économie carbone est à nuancer par la faible diversité de FDES pour les enduits de façade, qui ne permet pas de couvrir la variété des propositions de conception.

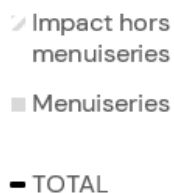
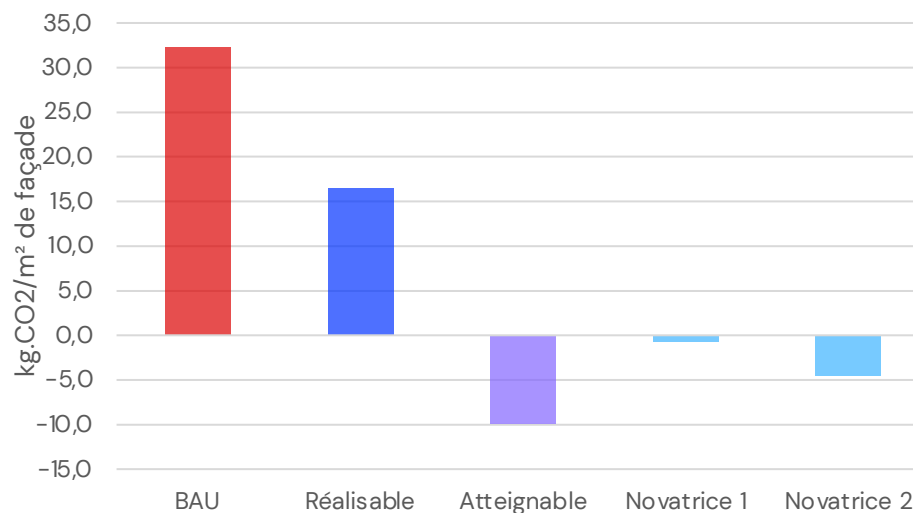
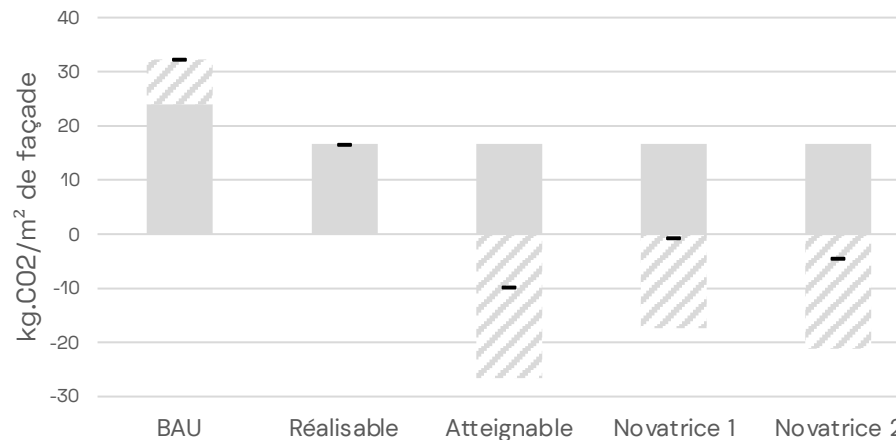


Fig17 : Poids des menuiseries dans l'ACV →

Le collectif béton rénové – ACV dynamique



Le collectif béton rénové – ACV dynamique



Le collectif béton rénové

Mise en regard de l'avantage carbone et du coût économique

Des gains carbone conséquents pour des surcoûts facilement importants, à nuancer

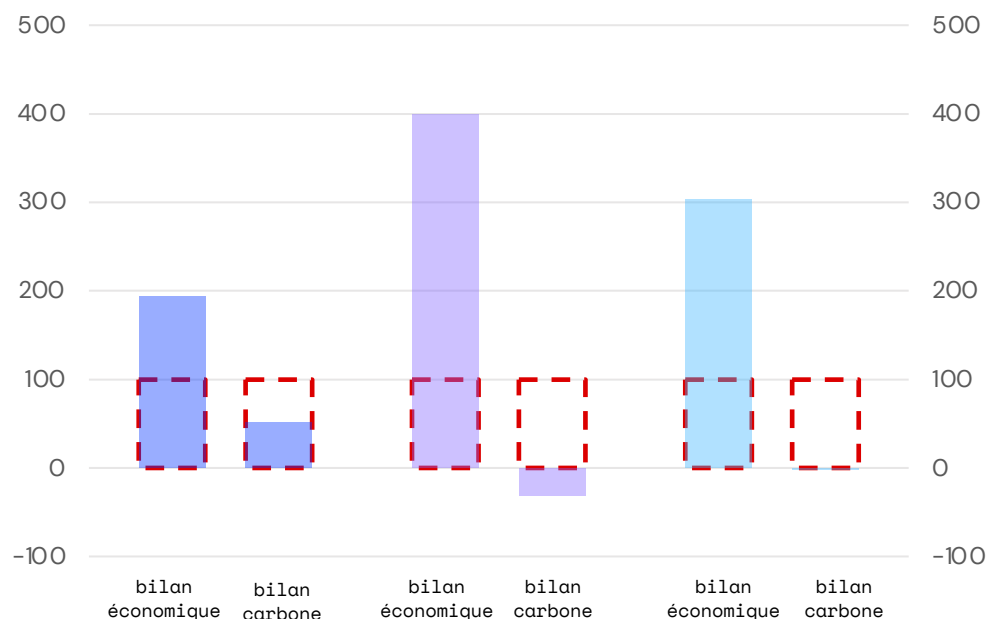
Les trois variantes étudiées présentent un surcoût important par rapport à une rénovation standard.

Toutefois, ce surcoût pourrait être nuancé par plusieurs éléments, déjà évoqués dans la partie méthodologique relative à la rénovation :

- Cibler un fragment de façade est un prisme déformant puisqu'il ne décrit qu'une fraction limitée du bâtiment
- **Rénover un bâtiment** permet vraisemblablement de **rallonger sa durée de vie**, ce qui a forcément un impact financier (non évalué)
- Une **étude en coût global**, intégrant l'exploitation du bâtiment rénové, permettrait d'intégrer les bénéfices des matériaux biosourcés en exploitation. En effet, leurs propriétés thermiques sont très favorables au confort d'hiver et d'été, en réduisant les effets de parois froides et en augmentant l'inertie. Cela se traduit par une réduction des consommations d'énergie, donc des charges en exploitation, et également une moindre pression sur les ressources énergétiques, dans un contexte de transition.

En conclusion, pour mener à bien cette analyse coût carbone pour la réhabilitation, il faudrait élargir la focale avec une vision plus globale des apports économiques.

Le collectif béton rénové



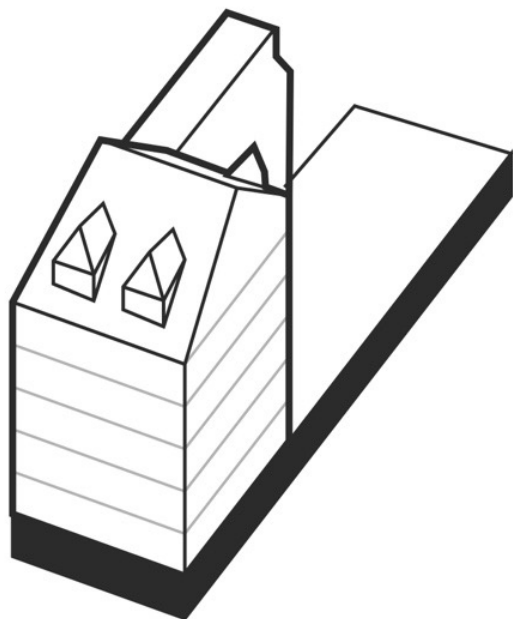
2.2.2 Le collectif patrimonial rénové

Le collectif patrimonial rénové

Description de l'archétype existant

Les logements collectifs représentent 76% des logements rénovés sur le territoire d'étude

Les bâtiments de ce type peuvent être divers : immeuble de logement en centre-ville, bâtiment patrimonial plus important, grande bâtisse en zone rurale.



10m

Synthèse des caractéristiques du prototype étudié :

localisation	Paris 5 ^e (75)
programme	Résidentiel collectif Commerce en RDC
Classement incendie	3e famille
Surface parcelle	220 m ²
Emprise au sol	170 m ²
Surface de plancher Surface utile	607 m ² 440 m ²
SDP étage courant SU courant	121 m ² 88 m ²
Nombre d'étages	R+4 + combles
Hauteur du plancher bas du dernier niveau	20m
Hauteur façade à l'acrotère	
Profondeur bâtie	13m
Coefficient de compacité	
Zone sismique	1
Zone climatique	H1a
Zone vent	2
Hygrométrie des locaux	
Budget travaux base	1,7 millions HT

Échelle du bâtiment

Le collectif patrimonial rénové

Conception architecturale et technique

L'état existant

Les bâtiments de ce type sont généralement des bâtiments construits avant les années 30.

Les points de vigilance à aborder sont :

- Détermination de la présence, ou l'absence, d'un isolant dans le bâti ancien
- Positionnement du dormant et performance des menuiseries extérieures
- Les parois du bâti ancien sont majoritairement ouvertes à la diffusion de vapeur
- Un déséquilibre hydrique de la paroi doit être anticipé pour ne pas créer de désordre
- La question de l'installation d'une ventilation mécanique se pose si les défauts d'étanchéité à l'air sont corrigés par l'intervention

Le bâtiment existant prototype est un immeuble du XVIIIème siècle au cœur d'un quartier historique. Ses murs sont en maçonnerie de moellons enduits. La pérennité de cet édifice résulte en premier lieu de sa capacité à gérer de manière équilibrée les échanges hygroscopiques à travers ses parois. A l'occasion des travaux, le corps de bâtiment principal a été entièrement restauré et une extension a été créée avec une aile en retour pour accueillir les distributions. Une isolation par l'intérieur en béton de chanvre a été choisie dans le bâtiment existant.

Choix de l'ITI chanvre

Les systèmes constructifs d'isolation par l'intérieur présentent les caractéristiques suivantes :

- Adaptée lorsqu'il n'est pas possible de modifier l'aspect extérieur de la façade
- Permet de supprimer la sensation de paroi froide
- Améliore le confort acoustique intérieur
- Facilite le passage des gaines dans le doublage installé
- En rénovation, l'ITI ne permet pas de gérer tous les ponts thermiques
- Généralement moins chère qu'une ITE

Les choix de conception se sont orientés vers des solutions constructives chanvre et terre car elles sont prometteuses du point de vue du confort hygrothermique.



Échelle du fragment

Le collectif patrimonial rénové

récapitulatif des variantes constructives

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de l'archétype existant à partir duquel sont déclinés trois prototypes principaux utilisant des procédés constructifs avec des matériaux bio et géosourcés.

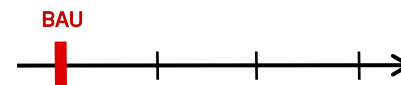
En bleu sont représentés les ouvrages modifiés par rapport à la variante précédente.

En gris sont indiqués les ouvrages qui ne sont pas analysés dans le cadre de cette étude.

	Archétype existant	Prototype Réalisable	Prototype Atteignable	Prototype Novateur
Porteur	Façade et murs de refends en moellons	Façade et murs de refends en moellons	Façade et murs de refends en moellons	Façade et murs de refends en moellons
Plancher courant	Plancher métallique Revêtement, chape béton sur bac acier, isolant acoustique rigide, poutres métal et solives bois, plaque de plâtre peinture	Plancher métallique Revêtement, chape béton sur bac acier, isolant acoustique rigide, poutres métal et solives bois, plaque de plâtre peinture	Plancher métallique Revêtement, chape béton sur bac acier, isolant acoustique rigide, poutres métal et solives bois, plaque de plâtre peinture	Plancher métallique Revêtement, chape béton sur bac acier, isolant acoustique rigide, poutres métal et solives bois, plaque de plâtre peinture
Façade courante	Façade moellons	ITI béton de chanvre 10 cm , Extérieur : enduit à la chaux Façade moellons 40 cm Intérieur : enduit hygrothermique béton de chanvre 4 cm	ITE béton de chanvre 15 cm Extérieur : enduit à la chaux Façade moellons 40 cm Intérieur : enduit chaux-sable	ITI terre-chanvre projeté 10 cm Extérieur : enduit à la chaux-sable Façade moellons 40 cm Intérieur : enduit à la chaux
Façade vitrée	40 cm menuiseries extérieures PVC	54 cm menuiseries extérieures bois	57 cm menuiseries extérieures bois	43,8 cm menuiseries extérieures bois

Le collectif patrimonial rénové

"Business as usual"



Bien que courant, l'usage du polystyrène, matériau très peu perméable à la vapeur d'eau, sur des parois perspirantes comme des façades en moellons et mortier à la chaux, peut-être à l'origine d'importantes pathologies. Thermiquement, un tel doublage peut aussi se révéler contre-productif car, bien qu'augmentant la résistance thermique de la paroi, il lui fait perdre ses qualités d'inertie et de perspiration qui contribuent largement au confort d'été dans le bâti ancien.

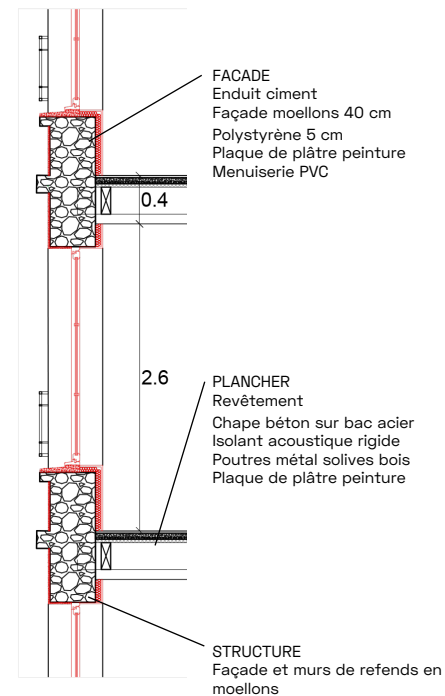
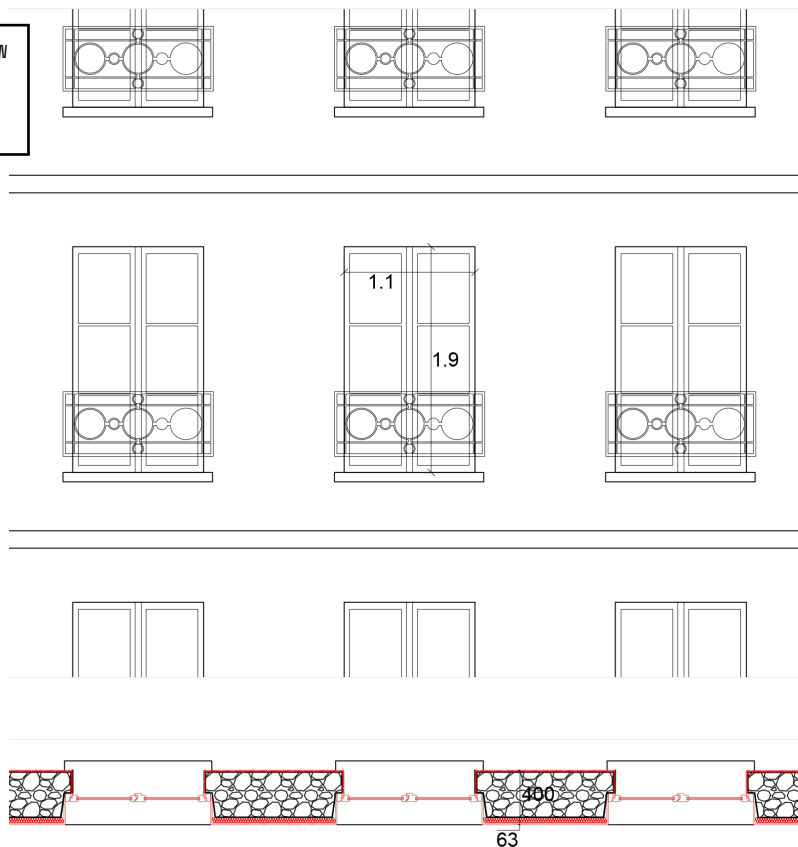


façade
isolation

- Polystyrène
- Laine minérale
- Fibres de bois
- Quate de cellulose en vrac
- Panneau à base de quate de cellulose
- Bottes de paille (22cm, 36cm)
- Paille hachée insufflée
- Béton de chanvre
- Laine de chanvre
- Bloc Bâtilin
- Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
- Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
- Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)

façade
revêtement
extérieur

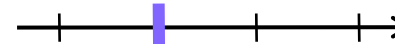
- Enduit ciment
- Enduit chaux
- Enduit sur support ventilé
- Bardage métallique
- Bardage bois
- Véture en pierre et assimilés
- Bardage support d'enduit
- Enduit chaux-chanvre
- Enduit chaux-sable
- Enduit en terre



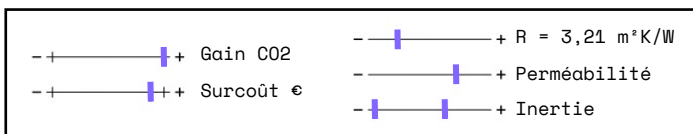
Le collectif patrimonial rénové

Réalisable

REALISABLE



Pour compléter une isolation intérieure en béton de chanvre, un enduit hygrothermique, c'est-à-dire un enduit comprenant des fibres végétales, permet d'augmenter la résistance thermique sans empiéter sur la surface intérieure et de parer aux ponts thermiques.

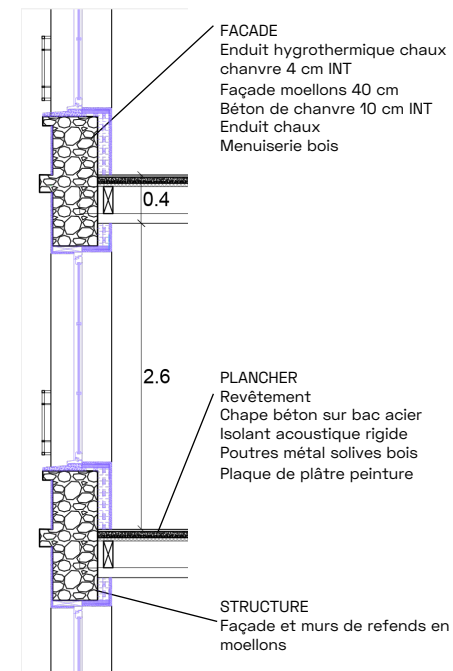


façade
isolation

- Polystyrène
- Laine minérale
- Fibres de bois
- Ouate de cellulose en vrac
- Panneau à base de ouate de cellulose
- Bottes de paille (22cm, 36cm)
- Paille hachée insufflée
- Béton de chanvre
- Laine de chanvre
- Bloc Bâtilin
- Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
- Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
- Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)

façade
revêtement
extérieur

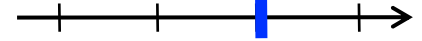
- Enduit ciment
- Enduit chaux
- Enduit sur support ventilé
- Bardage métallique
- Bardage bois
- Vêtire en pierre et assimilés
- Bardage support d'enduit
- Enduit chaux-chanvre
- Enduit chaux-sable
- Enduit en terre



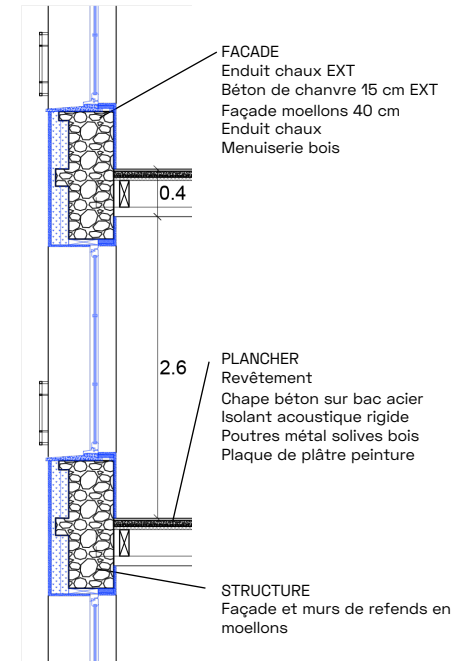
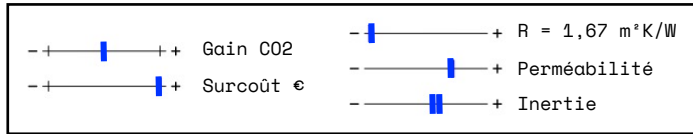
Le collectif patrimonial rénové

Atteignable

ATTEIGNABLE



Le béton de chanvre est constitué d'un mélange à la chaux et de chènevotte, dont les proportions conditionnent la conductivité thermique. Sa mise en œuvre par projection plutôt que par banchage permet généralement de mieux contrôler le mélange et de garantir une mise en œuvre plus rapide.

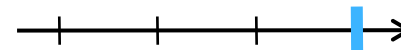


- façade isolation**
- Polystyrène
 - Laine minérale
 - Fibres de bois
 - Ouate de cellulose en vrac
 - Panneau à base de ouate de cellulose
 - Bottes de paille (22cm, 36cm)
 - Paille hachée insufflée
 - Béton de chanvre
 - Laine de chanvre
 - Bloc Bâtilin
 - Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
 - Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
 - Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)
- façade revêtement extérieur**
- Enduit ciment
 - Enduit chaux
 - Enduit sur support ventilé
 - Bardage métallique
 - Bardage bois
 - Vêtue en pierre et assimilés
 - Bardage support d'enduit
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit chaux-sable
 - Enduit en terre

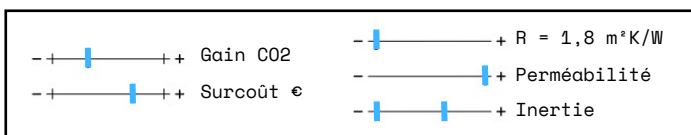
Le collectif patrimonial rénové

Novatrice

NOVATRICE



Une rénovation pertinente du bâti ancien s'appuie sur ses qualités existantes (inertie, perspirance) pour les renforcer (notamment en augmentant la résistance thermique). Les solutions en isolants "lourds", constitués d'un liant et de fibres, comme le terre chanvre, le permettent. Le terre chanvre est ici mis en œuvre banché, contre un support en lattis de bois. L'épaisseur de mélange qui peut être appliquée en intérieur est conditionnée par le temps de séchage.

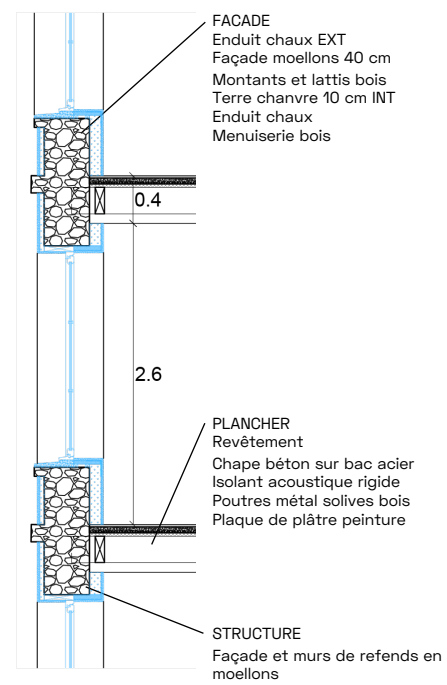
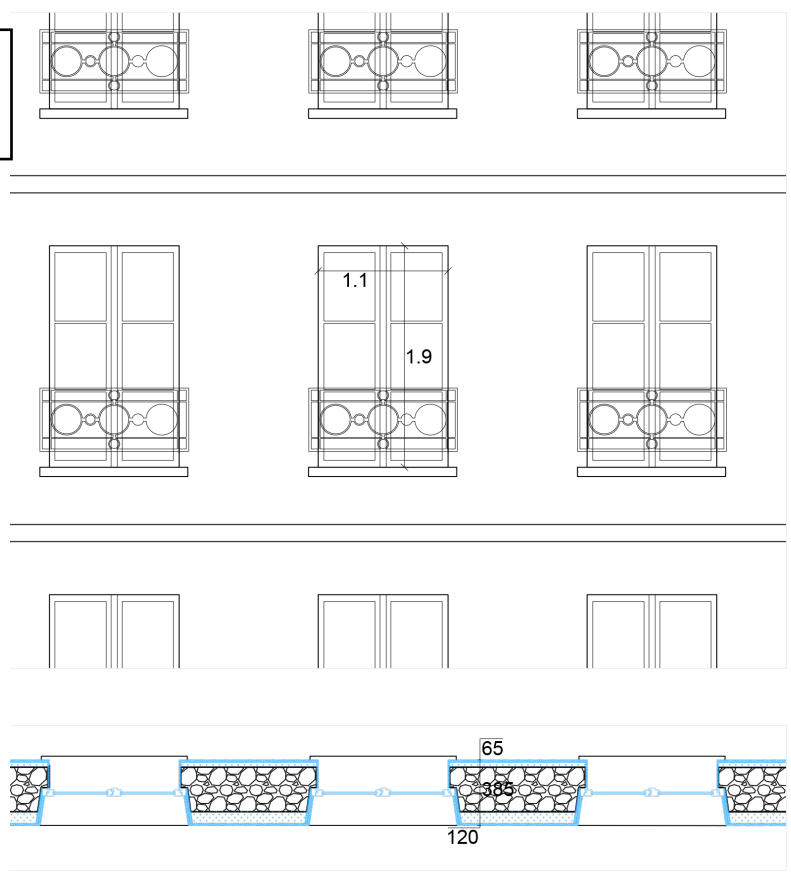


façade isolation

- Polystyrène
- Laine minérale
- Fibres de bois
- Ouate de cellulose en vrac
- Panneau à base de ouate de cellulose
- Bottes de paille (22cm, 36cm)
- Paille hachée insufflée
- Béton de chanvre
- Laine de chanvre
- Bloc Bâtilin
- Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
- Terre crue et de fibres végétales (Torchis)
- Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)

façade revêtement extérieur

- Enduit ciment
- Enduit chaux
- Enduit sur support ventilé
- Bardage métallique
- Bardage bois
- Vêtue en pierre et assimilés
- Bardage support d'enduit
- Enduit chaux-chanvre
- Enduit chaux-sable
- Enduit en terre



Le collectif patrimonial rénové

L'évaluation cadre normatif

Pour toutes les variantes un diagnostic poussé de l'existant devra être réalisé de façon à vérifier si celui-ci ne conduit pas de facto à exclure les solutions envisagées. Par ailleurs, une attention particulière devra être portée au niveau de tous les points singuliers de façon à ce qu'ils ne remettent pas en question la pérennité de l'ouvrage, notamment au droit des menuiseries et aux jonctions mur extérieur / plancher.

Variante Réalisable (Isolation par l'intérieur en béton de chanvre et enduit hygrothermique extérieur)

Cette variante intègre différents points qui ne sont pas visés dans le référentiel technico-réglementaire existant, dont:

- L'emploi du béton de chanvre en isolation par l'extérieur ;
- L'emploi pour des hauteurs de façades supérieures à R+2 .

Des données scientifiques visant à justifier de l'aptitude à l'emploi prévu pour cette variante semblent exister, elles seront toutefois à valider et à compléter avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet

Variante Atteignable (Isolation par l'extérieur béton de chanvre)

Cette variante intègre différents points qui ne sont pas visés dans le référentiel technico-réglementaire existant, dont:

- L'emploi du béton de chanvre en isolation par l'extérieur ;
- L'emploi pour des hauteurs de façades supérieures à R+2 .

Des données scientifiques visant à justifier de l'aptitude à l'emploi prévu pour cette variante semblent exister, elles seront toutefois à valider et à compléter avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

Variante Novatrice (ITI en terre allégée)

La solution constructive proposée d'isolation par l'intérieur en terre chanvre ne correspond à aucun procédé existant à date. Un nombre conséquent de données scientifiques et techniques sera à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

⇒ Cette solution relevant de la R&D, il n'est pas possible à cette heure de définir un mode d'évaluation technique adapté

Le collectif patrimonial rénové

L'évaluation économique

Ensemble fonctionnel

L'évaluation économique est limitée à un fragment de façade. Seul l'ensemble fonctionnel enveloppe sera utilisé pour l'étude. Les coûts de dépose et curage de matériaux existants ne sont pas pris en compte.

Hypothèses constructives

	BAU	Réalisable	Atteignable	Novatrice
Enveloppe	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque : mur en moellons existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures PVC - Isolation intérieure non biosourcée compris plaque de plâtre - Vêtture : enduit 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque : mur en moellons existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures bois - Complexe isolant intérieur : béton de chanvre projeté (ép. suivant plan) + enduit chaux sable (ép. suivant plan) sur béton de chanvre - Extérieur : enduit hygrothermique béton de chanvre (ép. suivant plan) - Vêtture : enduit chaux - sable (ép. suivant plan) 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque : mur en moellons existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures bois - Ossature bois support chaux-chanvre - Complexe isolant extérieur : chaux - chanvre projeté (ép. suivant plan) - Vêtture : enduit chaux - sable (ép. suivant plan) sur mélange chaux-chanvre 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque : mur en moellons existant - Partie vitrée : menuiseries extérieures bois - Complexe isolant intérieur : Terre - chanvre projeté (ép. suivant plan) - Intérieur : enduit chaux sur complexe terre-chanvre (ép. suivant plan) - Vêtture : enduit chaux - sable (ép. suivant plan) sur moellons

Résultats économiques (base 100)

PAR ENSEMBLES FONCTIONNELS

Bilan en Base 100

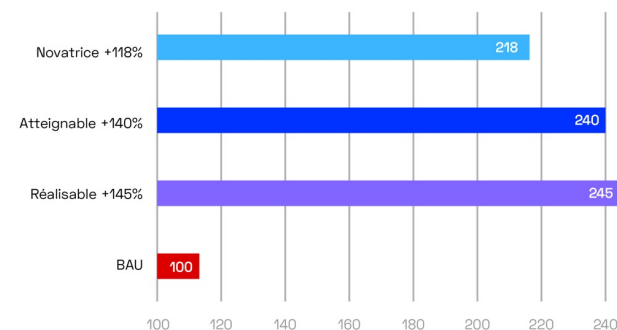
ENVELOPPE DU BATIMENT - périmètre étude partiel

BAU	Réalisable	Atteignable	Novatrice
Ratios Prix	Ratios Prix	Ratios Prix	Ratios Prix
base 100	base 100	base 100	base 100
100	245	240	218
100	245	240	218

On constate que l'impact économique de la rénovation biosourcée et géosourcée par rapport à celle du BAU est de l'ordre de +140% via l'utilisation de matériaux d'isolation à base de chanvre et via des systèmes de mise en œuvre connus.

En considérant des systèmes novateurs de type terre - chanvre, il est envisageable d'optimiser ces coûts de rénovation de façades de l'ordre de -22 à -27%.

Le collectif patrimonial rénové - Economie base 100



Le collectif patrimonial rénové

L'évaluation environnementale

Des gains carbone inversés par rapport à la progressivité des variantes

L'ensemble des variantes présente une optimisation de l'impact carbone par rapport au BAU.

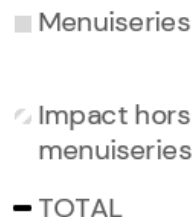
- La variante « novatrice » est celle qui permet la plus grande baisse d'empreinte, à -40% par rapport au BAU.

Cela reflète l'impact majeur du liant à base de chaux utilisé dans la fabrication du béton de chanvre. La solution terre-chanvre (variante « novatrice ») permet ainsi de bénéficier des propriétés du chanvre tout en limitant les émissions carbone associées au liant.

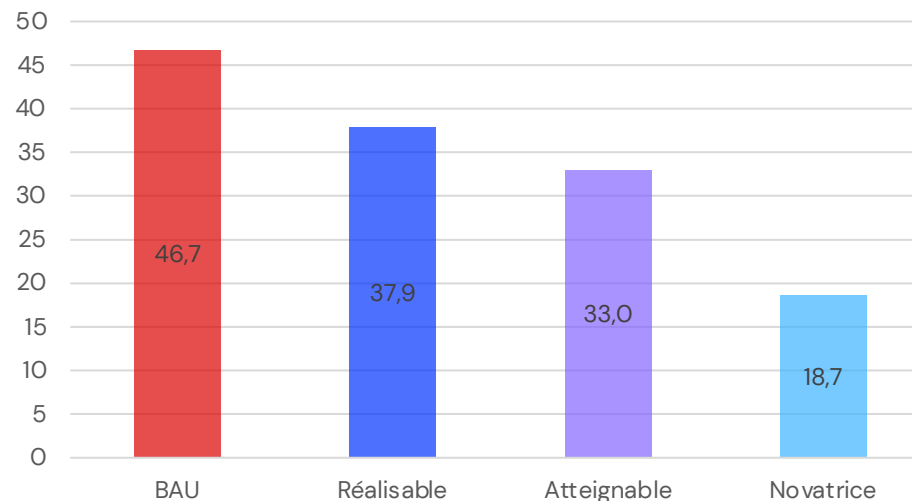
L'ossature bois, présente en ITE béton de chanvre dans la variante « atteignable », participe à réduire l'impact de la rénovation, au détriment de l'ITI pour laquelle une ossature bois n'est pas nécessaire.

- Cette comparaison fait ressortir une des limites de l'indicateur carbone seul : dans ce cas, l'économie de matière n'est pas valorisée par l'évaluation carbone du système constructif.

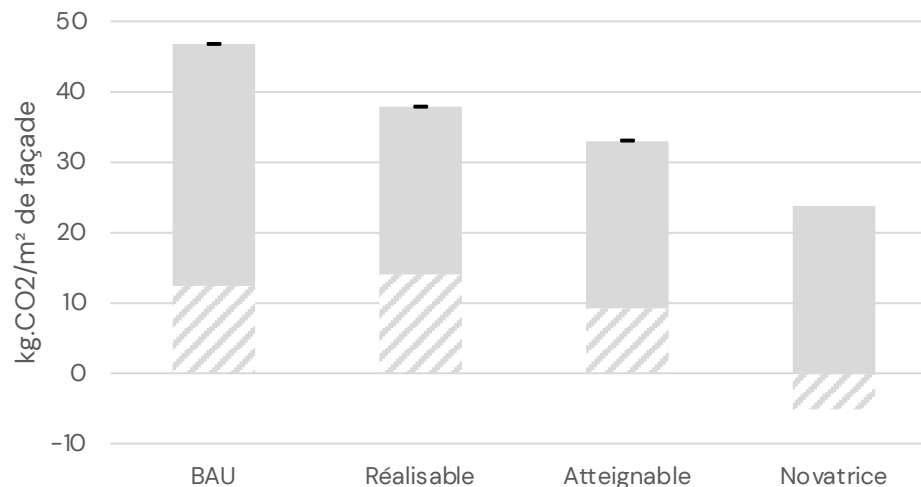
L'évaluation carbone de ce prototype met en évidence la difficulté à valoriser le béton de chanvre au regard de l'unique indicateur carbone. Une des pistes d'optimisation serait de développer une filière de valorisation du béton de chanvre en fin de vie. Aujourd'hui, les FDES considèrent une élimination par enfouissement de 100% du béton de chanvre, ce qui est défavorable.



Le collectif patrimonial rénové - ACV dynamique



Le collectif patrimonial rénové - ACV dynamique



Le collectif patrimonial rénové

Mise en regard de l'avantage carbone et du coût économique

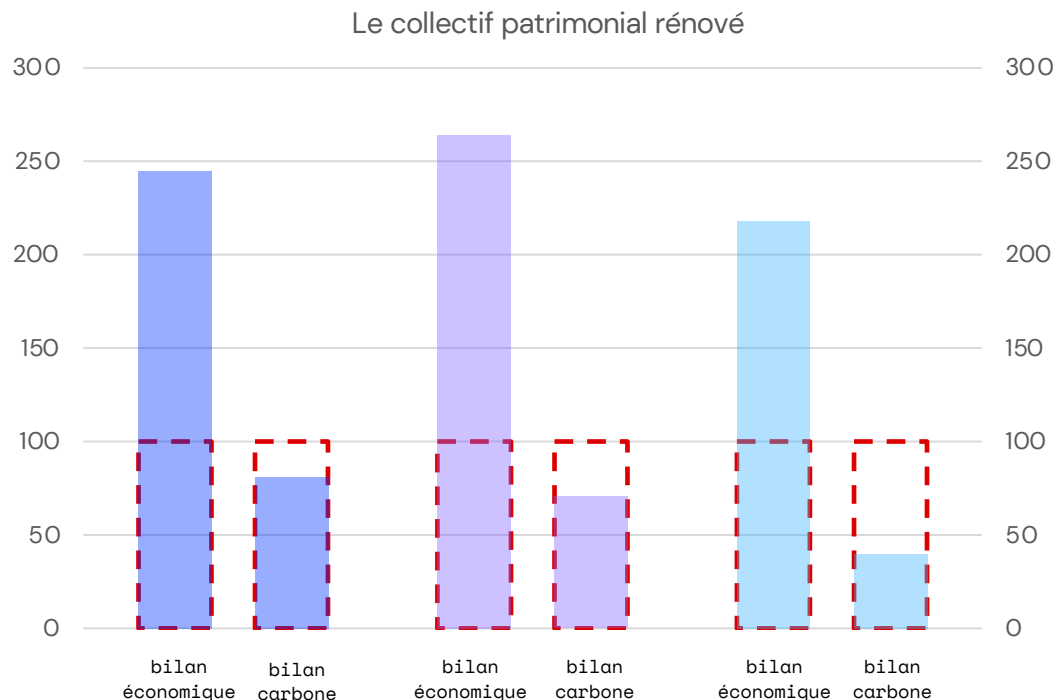
Des gains carbone qui peuvent être optimisés, des surcoûts significatifs

De même que le prototype rénové précédent, les trois variantes étudiées présentent un surcoût important par rapport à une rénovation standard, même si celui-ci est plus modéré que sur le prototype collectif béton rénové.

Les mêmes nuances peuvent être apportées :

- Le focus sur un fragment de façade est forcément un prisme très déformant puisqu'il ne décrit qu'une fraction limitée du bâtiment
- Rénover un bâtiment permet vraisemblablement de rallonger sa durée de vie, ce qui a forcément un impact financier (non évalué)
- D'un point de vue technique, une rénovation avec des matériaux non respirant apposée sur une structure ancienne respirante peut créer des pathologies, souvent observées dans la pratique par manque de connaissance des matériaux traditionnels.
- Une étude en coût global, intégrant l'exploitation du bâtiment rénové, permettrait d'intégrer les bénéfices des matériaux biosourcés en exploitation. En effet, la perspiration du matériau permet d'éviter les phénomènes de paroi froide en hiver, et de paroi chaude en été. Cela engendre plus de confort pour les occupants à température d'air constante, et peut permettre de diminuer les températures de consigne et de réduire les consommations d'énergie liées au chauffage.

En conclusion, pour mener à bien cette analyse coût carbone pour la réhabilitation, il faudrait élargir la focale avec une vision plus globale des apports économiques et des risques à ne pas utiliser de matériaux biosourcés pour la rénovation des bâtis anciens.



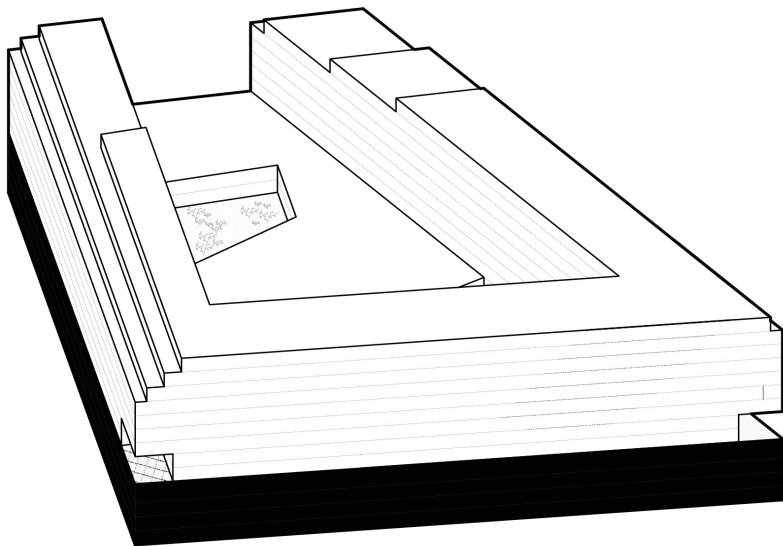
2.2.3 L'îlot tertiaire neuf

L'îlot tertiaire neuf

Description de l'archétype existant

13% du marché immobilier de la Vallée de la Seine

Les produits immobiliers tertiaires sont représentatifs des dynamiques de territoires denses à forte attractivité. Cette situation urbaine donne la possibilité d'imposer des cahiers des charges ambitieux et une opportunité pour expérimenter des innovations bas carbone. C'est également un enjeu de densité à relever en proposant des procédés constructifs aptes à monter en hauteur.



Synthèse des caractéristiques du prototype étudié :

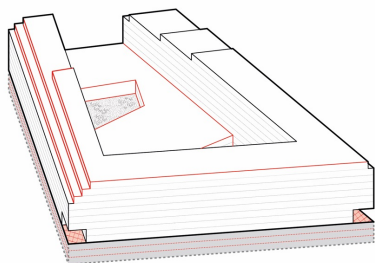
localisation	Aubervilliers Plaine Commune (93)
programme	Bureaux Commerce en RDC Parking en sous-sols
Classement incendie	ERT+ ERP 5e catégorie
Surface parcelle	10 850 m ²
Emprise au sol	9 190 m ²
Surface de plancher Surface utile (ratio 98%)	48 300 m ² 47 334 m ²
SDP étage courant SU courant (ratio 98%)	5 800 m ² 5 680 m ²
Nombre d'étages	R+7 3 niveaux de sous-sols
Hauteur du plancher bas du dernier niveau	27m
Hauteur façade à l'acrotère	29m
Profondeur bâtie	18m
Coefficient de compacité	0,15
Zone sismique	1
Zone climatique	H1a
Zone vent	2
Hygrométrie des locaux	EA, EB
Budget travaux base	121 millions

Échelle du bâtiment

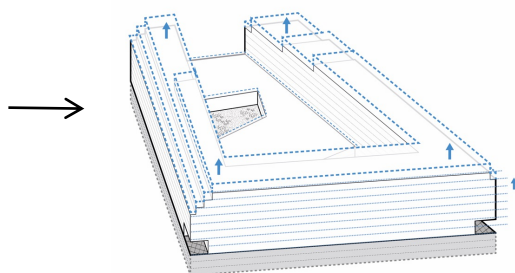
L'îlot tertiaire neuf

Variantes morphologiques

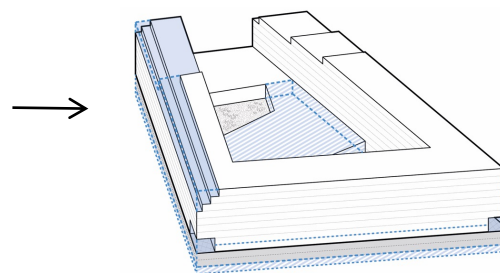
"Business as usual"
archétype existant



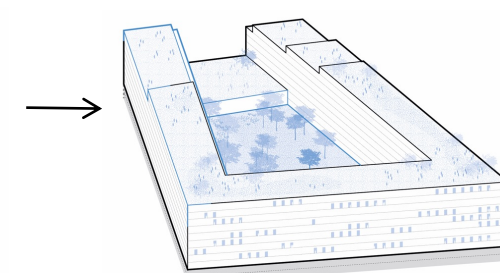
1 - Transition
intégration de matériaux bio-géo-sourcés



2 - Transformation
Ajustements morphologiques



3 - Augmentation
Valeurs ajoutées



Traquer le carbone

L'archétype existant est une réalisation référence pour sa représentativité et concrétisation de transitions en cours, tant d'ordre constructif que morphologique. A partir de celui-ci, une analyse multi critères sur l'ensemble de la conception du bâtiment est opérée afin de déceler tous les leviers potentiels pour diminuer le bilan carbone de l'opération. Un ensemble de modifications constructives, programmatiques et morphologiques sont présentées, pouvant être combinées entre elles ou être choisies séparément selon le niveau d'ambition visé. Cette première étape de conception à l'échelle du bâtiment mène à la conception d'un prototype "VO", support des variantes constructives.

Structure biosourcée et surélévation

Le passage d'une structure béton à une structure bois engendre une augmentation des sections de structure. Le bois ne permettant pas de réaliser de réservations, les fluides sont placés en dessous. En conséquence le pas d'étage est augmenté par rapport à l'archétype existant. L'ensemble du bâtiment est donc surélevé, le volume intérieur ainsi que la surface des façades est donc augmentée.

>> Le Décret n° 2023-173 du 8 mars 2023 permet une augmentation de 2,50m par rapport au plafond de hauteur du PLU dans le cas de bâtiment bas carbone et / ou énergie positive.

Compacité & bioclimatisme

La morphologie du bâtiment est ajustée afin de limiter la consommation de matières et d'optimiser les apports passifs que peut apporter l'environnement du bâtiment. Les espaces extérieurs sont rapportés évitant ainsi des reprises structurelles, limitant les déperditions de l'enveloppe et, placés au Sud, protègent les espaces intérieurs des surchauffes estivales. Le regroupement de plusieurs programmes au sein d'un seul et même établissement au sens de la sécurité incendie, évite autant que possible le recours à des matériaux incombustibles au lourd impact carbone afin d'assurer l'isolation entre deux bâtiments tiers.

Le bâtiment devient un écosystème

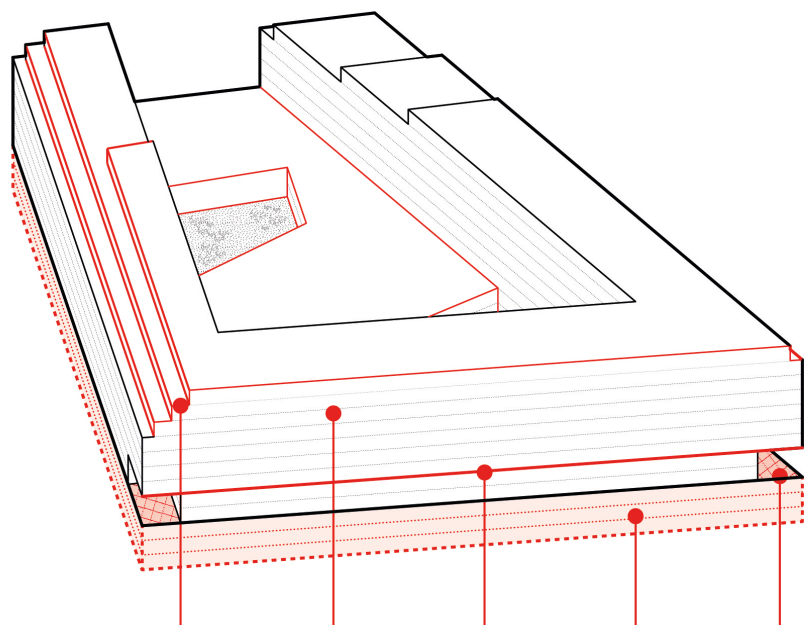
Cet archétype représentatif des territoires denses doit relever le défi de limiter les emprises au sol. La compacité du bâtiment permet de libérer des surfaces au sol de pleine terre et ainsi améliorer la biodiversité en ville mais également de réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain. Les plantations bien orientées et bien calibrées devant les bâtiments permettent de remplacer les matériaux conventionnels tels que des brise-soleil. Pour pouvoir répondre à la pression foncière, tout en ménageant des espaces de sol de pleine terre, l'enjeu est de proposer des procédés constructifs bio et géosourcés qui permettent de construire en hauteur.

L'îlot tertiaire neuf

Variantes morphologiques

"Business as usual" - archétype existant

Identification des freins à la construction bas carbone



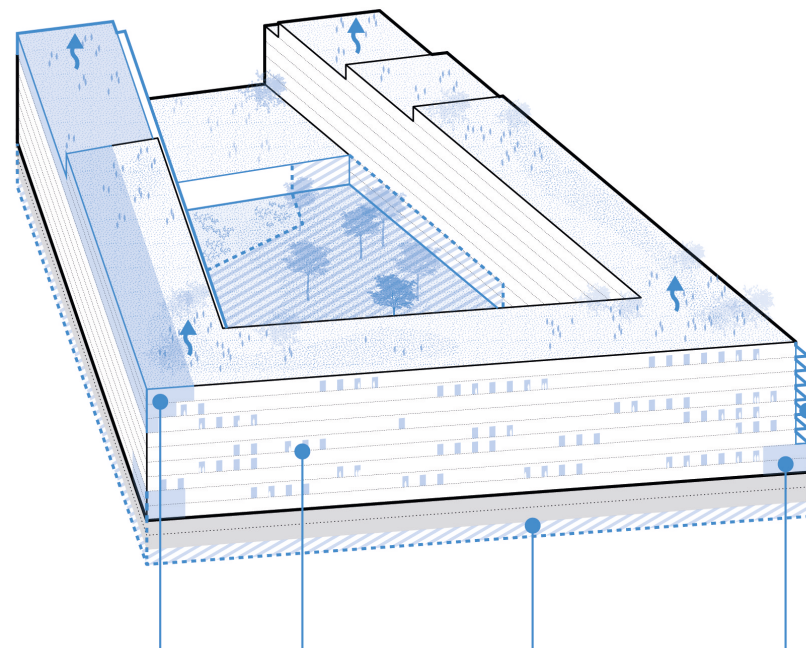
- Démultiplication des terrasses étanchées
- Façade mur rideau
- Plancher CF entre établissements différents
- 3 sous-sols : espaces communs et parking
- Espace extérieur à isoler et étancher + Point porteur extérieur

Coefficient de compacité ★ 0.15

Coefficient de biotope ★ 0.32

Prototypage - méthode maillons

Identification des leviers vers la construction bas carbone



- Simplification des volumes déperditifs au Nord
- Ouvertures ponctuelles compatibles bottes de paille
- Limitation à deux niveaux de sous-sol : dégradation du programme
- Entrée via jardin d'hiver + espaces extérieurs, planchers rattachés et protection solaire

★ 0.14

★ 0.68

L'îlot tertiaire neuf

De la trame programmatique à la trame constructive

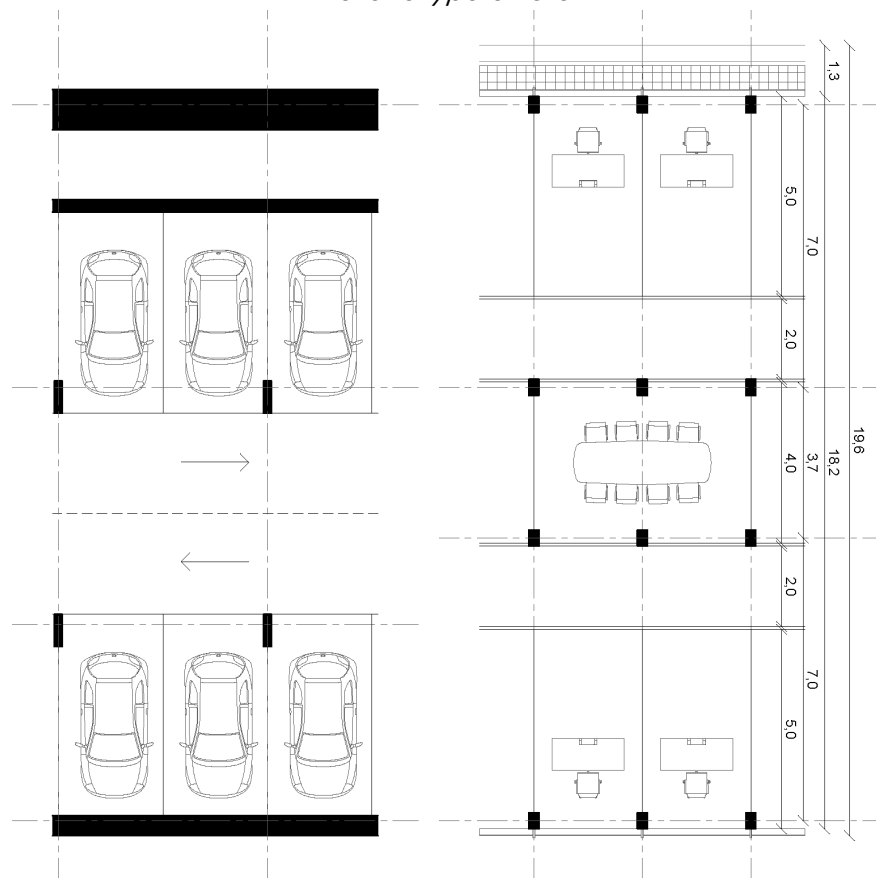
Le béton est largement employé dans la structure des constructions actuelles. Ce matériau permet une flexibilité de trame constructive permettant de s'adapter au plus proche des demandes programmatiques. Introduire des matériaux bio et géo-sourcés dans la structure nécessite de renverser le paradigme structurel et de partir de la capacité du matériau pour y adapter les dimensions des espaces :

- les portées importantes sont réduites en répartissant les trames régulièrement,
- l'épaisseur du bâtiment est réévaluée améliorant l'apport de lumière naturelle en partie

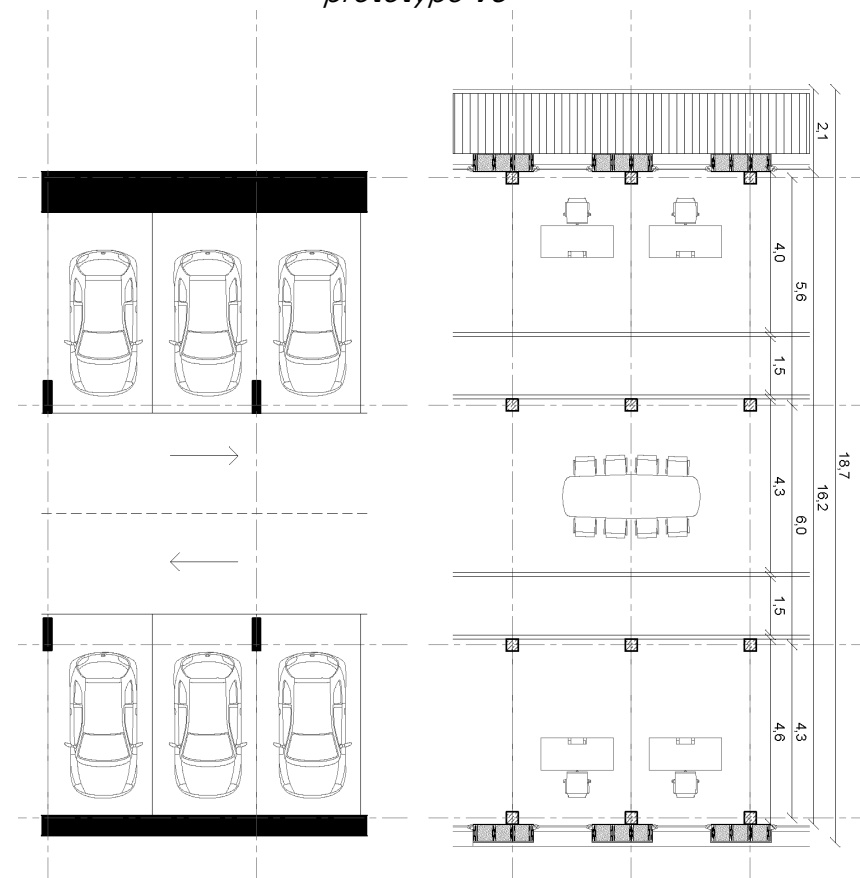
centrale,

- L'infrastructure est réduite en hauteur et en profondeur,
- Les trames constructives de chaque niveau sont ajustées de manière à se superposer,
- Les espaces extérieurs sont redimensionnés de manière à devenir support d'usages,
- Les espaces sont conçus pour être réversibles : les bureaux d'aujourd'hui peuvent devenir des logements demain.

Business as usual
archétype existant



Méthode "Maillons"
prototype V0



L'îlot tertiaire neuf

Vers une nouvelle esthétique frugale

Le passage en conception bas carbone bio- et géo-sourcée d'un bâtiment implique une redéfinition complète de son architecture.

L'archétype référence, représentatif de la tendance actuelle de la construction qui a déjà enclenché une transition, porte déjà des qualités environnementales reconnues : il est labellisé HQE et BREEAM, et a été sélectionné en tant que projet pilote pour le label Biodiversity. Largement vitré, il se caractérise par une architecture de mur-rideau, protégée de brise-soleil, induisant une importante technologie de ventilation intérieure.

Le prototype Maillons s'inspire du bâtiment de bureau construit par l'agence Baumschlager Eberle à Lustenau, en Autriche. Bien que hors marché car situé en dehors de la France et dans un contexte technico réglementaire différent, il constitue une importante référence de conception frugale. Un mur épais est percé ponctuellement de

"Business as usual"
archétype existant



Siège social Veolia à Aubervilliers / Maîtrise d'ouvrage : SCI 68 Victor Hugo / Maîtrise d'œuvre : Dietmar Feichtinger

baies, dans une conception passive. L'immeuble de bureau 2226 est constitué d'une enveloppe de 81,50 cm d'épaisseur, en briques monomur. Compact et monolithique, ce bâtiment n'a pas d'installation technique de chauffage, de ventilation ou de refroidissement. Les sources de chaleur émises par les usagers et les ordinateurs suffisent à compléter les apports calorifiques passifs de l'environnement. La température intérieure y varie passivement de 22°C à 26°C. Seuls certains volets en bois sont automatisés.

>> Dans cette opération, Baumschlager Eberle est Maîtrise d'Œuvre et Maîtrise d'Ouvrage, ce qui lui permet d'adopter une conception innovante en adaptant de manière flexible le programme et les espaces.

Méthode "Maillons"
prototype V0



Bureaux 2226 à Lustenau / Maîtrise d'ouvrage : Baumschlager Eberle / Maîtrise d'œuvre : Baumschlager Eberle / conception passive bioclimatique : monolithe en briques monomur, ouvertures réduites, ventilation naturelle, chauffage par sources de chaleur existantes

Échelle du fragment

L'îlot tertiaire neuf

Récapitulatif des variantes constructives

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de l'archétype existant à partir duquel sont déclinés trois prototypes principaux utilisant des procédés constructifs avec des matériaux bio et géosourcés.

En bleu sont représentés les ouvrages modifiés par rapport à la variante précédente.

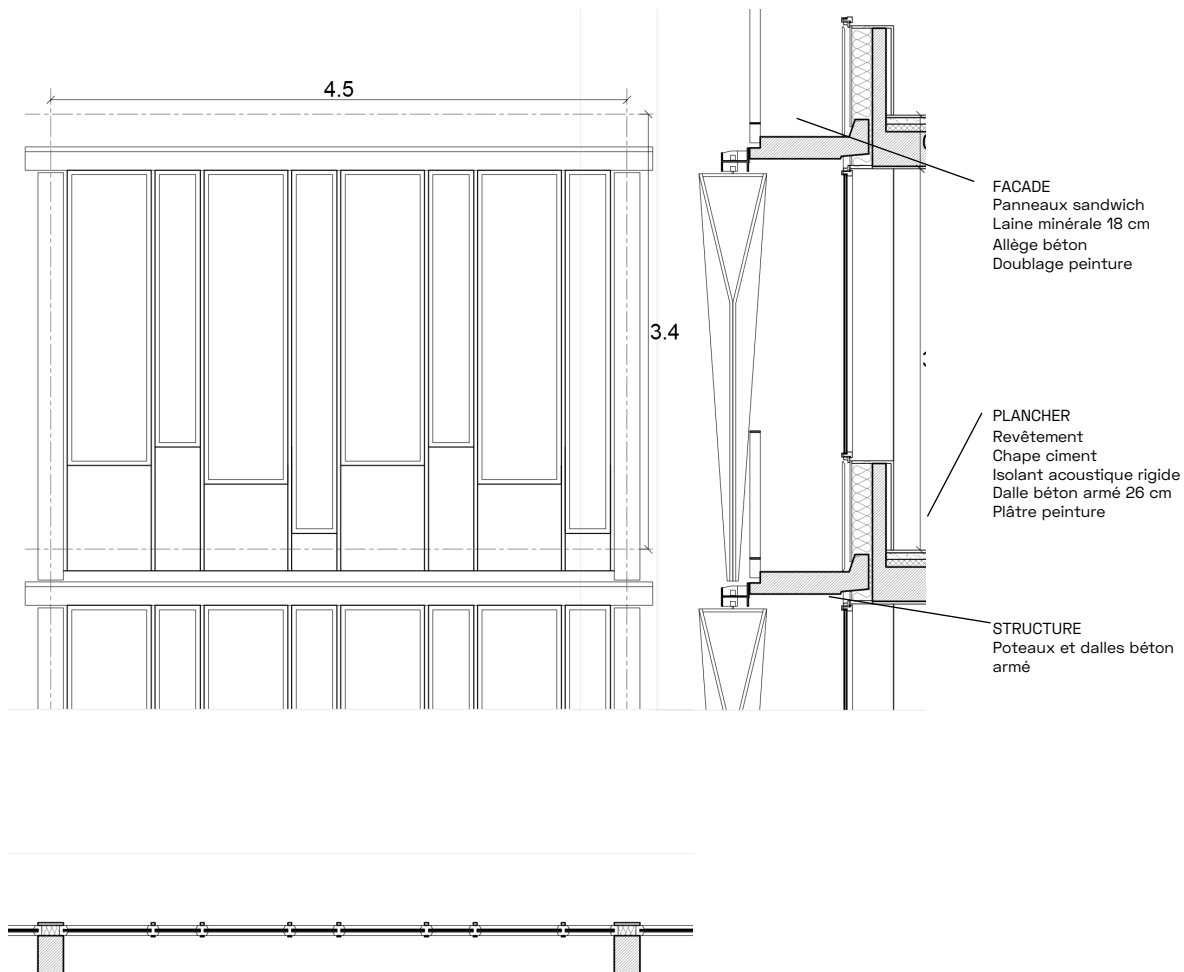
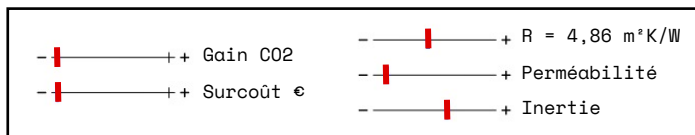
En gris sont indiqués les ouvrages qui ne sont pas analysés dans le cadre de cette étude.

	Archétype existant	Prototype Réalisable	Prototype Atteignable	Prototype Novateur
Hauteur	Hauteur libre par étage 2,70m Pas d'étage 3,40m RDC 4,10m Hauteur totale de façade 28m	Hauteur libre par étage 2,50m Pas d'étage 3,80m RDC 3,80m Hauteur totale de façade 30m	Hauteur libre par étage 2,50m Pas d'étage 3,80m RDC 3,80m Hauteur totale de façade 30m	Hauteur libre par étage 2,50m Pas d'étage 3,80m RDC 3,80m Hauteur totale de façade 30m
Porteur	Poteaux poutre béton armé Trame 4,50m	Poteaux poutres BLC de hêtre trame 3,60m	Poteaux poutre BLC hêtre trame 3,60m	Poteaux poutre BLC hêtre, trame 3,60m
Plancher courant	Plancher béton Faux plancher 10cm Faux plafond acoustique métalliques	Plancher bois-béton 23cm Faux plancher de réemploi correction acoustique intégrée sur panneaux rayonnant	Plancher CLT chape plâtre coulée en place, isolant acoustique rigide, faux plafond plâtre	Plancher Bois Faux plancher de rempli Solives bois remplissage marins de terre crue Panneau bois, laine de bois Panneau et enduit terre crue
Toiture	Plancher béton Végétalisation extensive inaccessible Végétalisation intensive accessible	Plancher mixte bois béton Végétalisation extensive inaccessible Végétalisation intensive accessible	Plancher CLT Végétalisation extensive inaccessible Végétalisation intensive accessible	Plancher bois Végétalisation extensive inaccessible Végétalisation intensive accessible
Espaces extérieurs	Plancher béton Terrasses étanchées et isolées (gradins) Dallettes minérales sur plots	Plancher mixte bois béton rupteur de pont thermique Dallettes minérales sur plots Poteaux bois	Plancher CLT rupteur de pont thermique Dallettes minérales sur plots Poteaux bois	Plancher CLT rupteur de pont thermique Dallettes minérales sur plots Poteaux bois
Infrastructure	3 niveaux de sous-sol	1 niveau de sous-sol	1 niveau de sous-sol	1 niveau de sous-sol
Façade courante	allèges opaques béton Isolation laine minérale 40 cm	FOB remplissage bottes de paille 36cm extérieur : bardage rapporté avec système d'enduit à la chaux sur plaque, écran thermique, panneau bois, laine minérale 6cm Intérieur : enduit terre appliquée directement sur bottes de paille 53 cm	FOB remplissage bottes de paille 22 cm Extérieur : bardage bois ventilé, écran thermique Intérieur : enduit terre appliquée directement sur bottes de paille 34 cm	FOB remplissage paille hachée 22cm Extérieur : enduit plâtre sur panneau thermique Intérieur : enduit terre appliquée sur doublage avec bois 41 cm
Façade vitrée	Mur rideau vitré menuiseries métalliques ouvrant à la française panneaux sandwich isolés Occultations ext métalliques amovibles	menuiseries bois ouvrant oscillo battant main courante bois Stores extérieurs BSO	Châssis ponctuels menuiseries bois Ouvrant oscillo battant sur allège vitrée fixe Stores extérieurs textile	Châssis ponctuels menuiseries bois Ouvrant oscillo battant, main courante bois Stores extérieurs amovibles bois

L'îlot tertiaire neuf

"Business as usual"

Actuellement, les bâtiments de bureau sont majoritairement construits avec des façades très largement vitrées. En conséquence, des ouvrages sophistiqués d'occultation motorisés sont mis en place pour limiter les surchauffes estivales. Situés en territoire dense, l'optimisation des espaces mène à construire avec des portées importantes, permises par le recours au béton armé. A cela s'ajoutent des charges d'exploitation augmentées en tertiaire engendrant une structure plus lourde.

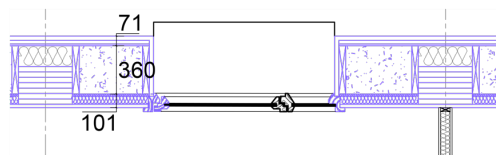
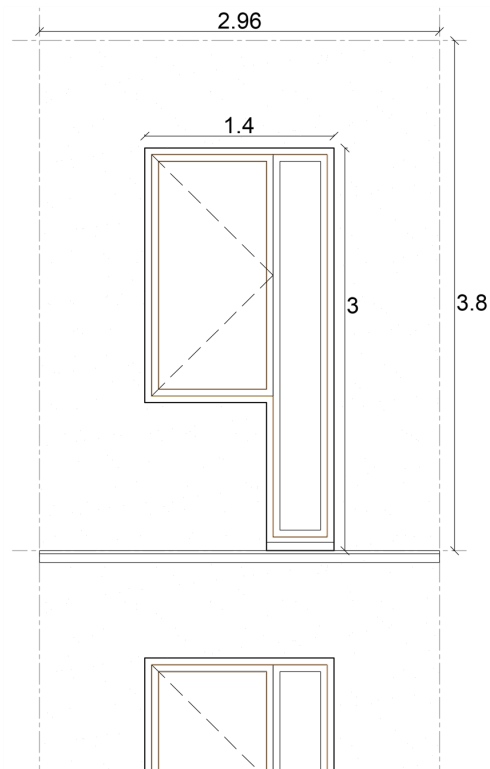
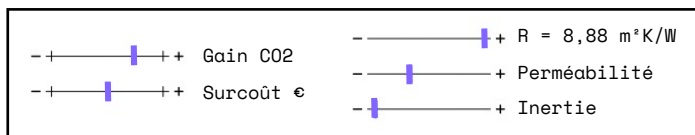


L'îlot tertiaire neuf

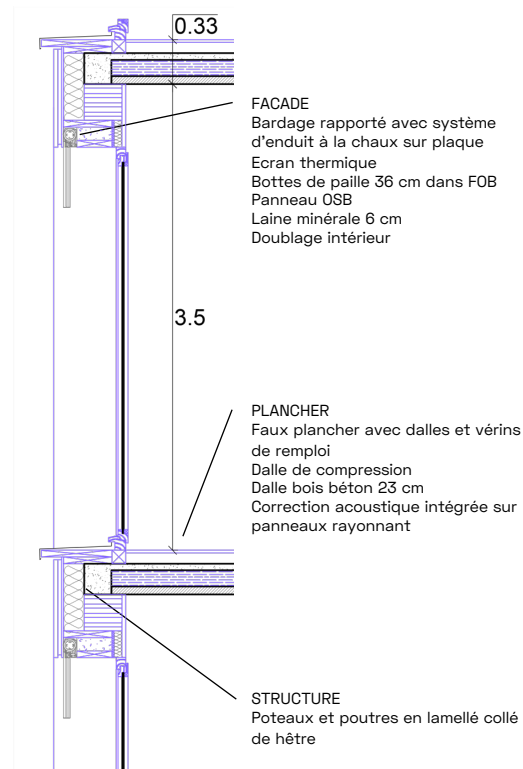
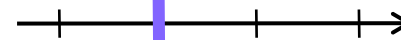
Réalisable

Le passage d'un mur rideau vitré à un mur à ossature bois percé modifie l'architecture du bâtiment. Le vitrage est optimisé, localisé et quantifié selon les besoins. Les déperditions et surchauffes sont limitées ainsi que le recours aux occultations permettant de réaliser des économies de coût et de carbone tout en réduisant généralement la consommation d'énergie du bâtiment.

Dans cette première variante, les planchers comportent encore du béton, permettant de limiter les surcoûts et d'amener de l'inertie à la construction. L'innovation porte sur la montée en hauteur de murs à ossature bois avec remplissage bottes de paille.



REALISABLE

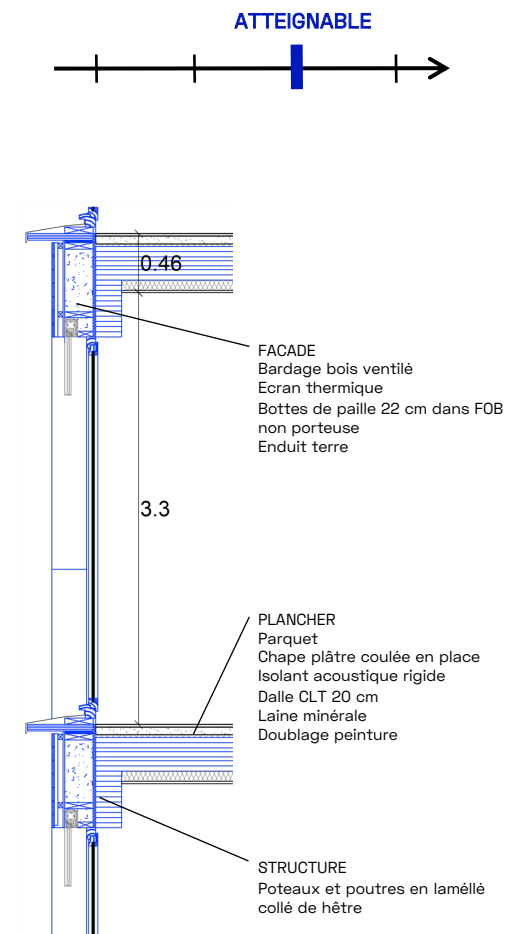
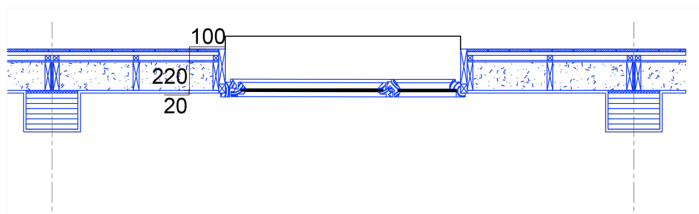
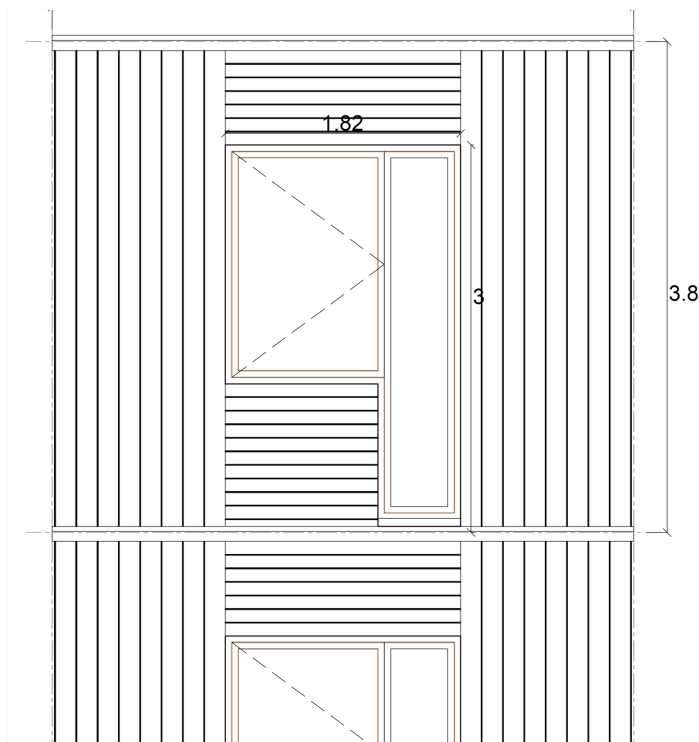
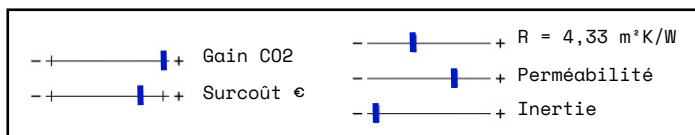


L'îlot tertiaire neuf

Atteignable

Les poutres, poteaux et planchers en bois lamellé collé sont fabriqués en usine par assemblage de planches de bois massif croisée et collées. Cette technique permet de s'affranchir des limites de section du bois massif et de mieux contrôler le matériau ; en contrepartie la présence de colle réduit un peu les performances environnementales du matériau et sa recyclabilité. Le plancher CLT permet de satisfaire les exigences de portée de ce type de bâtiment.

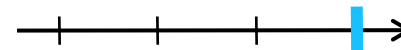
En façade, le passage d'une botte de paille de 36 à 22cm permet d'optimiser l'épaisseur de façade et les coûts. En plancher, l'absence de béton allège la structure. L'introduction d'une chape de plâtre permet de ramener de l'inertie et ainsi mieux gérer les écarts de température.



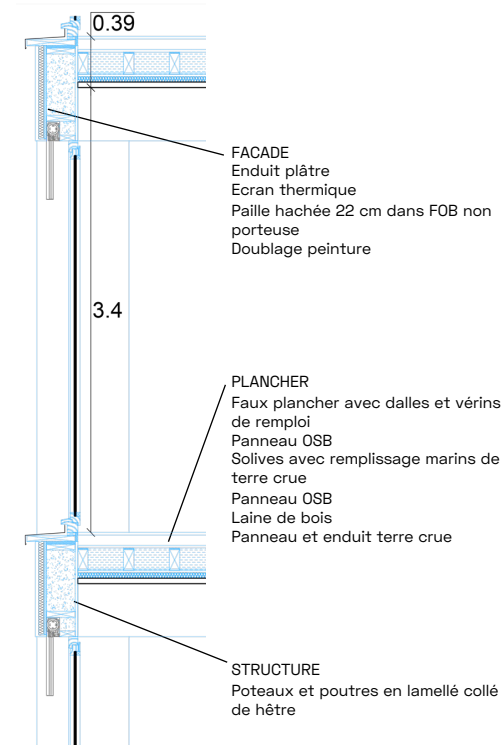
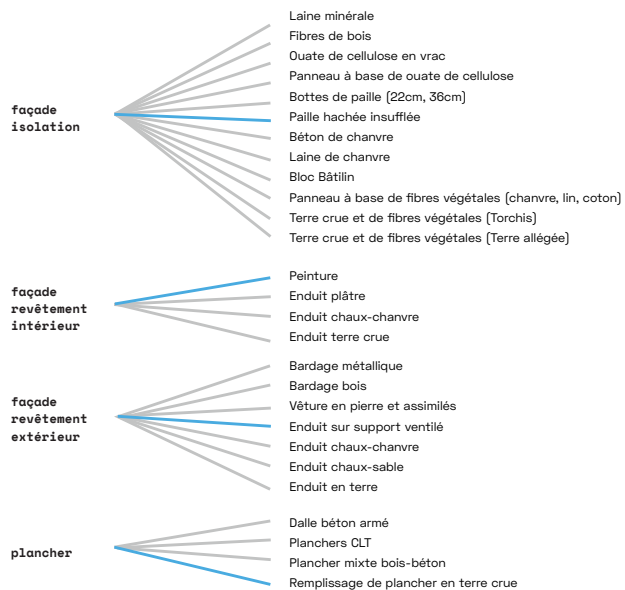
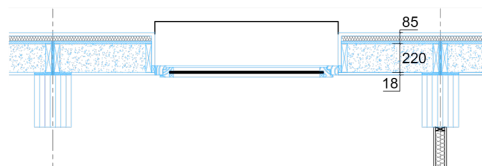
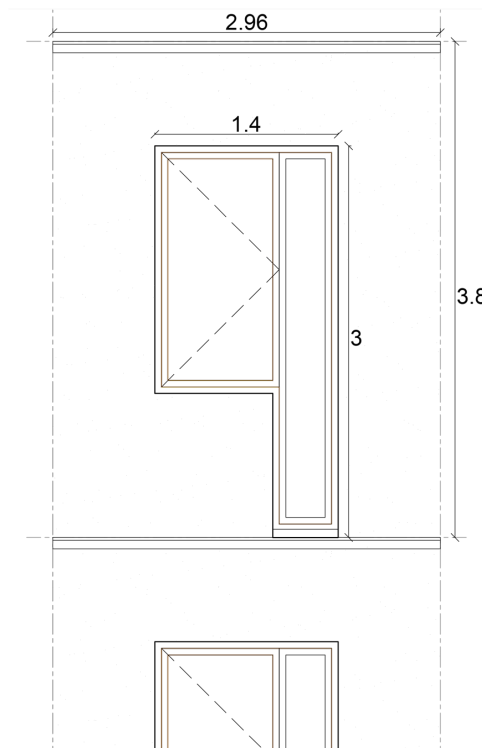
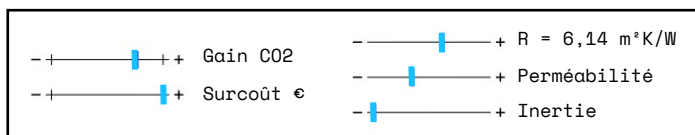
L'îlot tertiaire neuf

Novatrice - Déclinaison 1

NOVATRICE



Le bois et la paille étant des matériaux légers, leur emploi exclusif entraîne un bâtiment à inertie faible.
Le remplissage des vides entre les solives de plancher avec de la terre crue ou du tout-venant est une technique ancienne qui apporte de l'inertie au bâtiment pour mieux réguler le confort intérieur.
La paille est ici hachée et mise en place en vrac pour réaliser des panneaux préfabriqués optimisés.



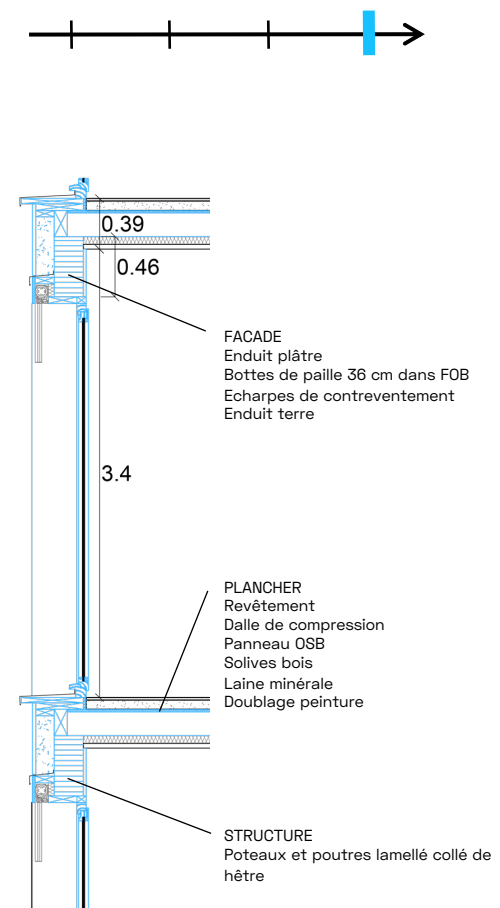
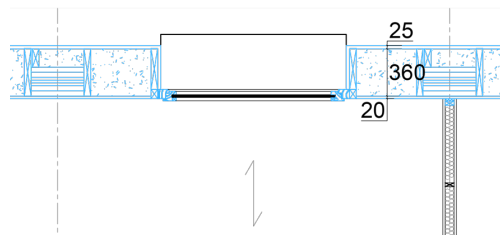
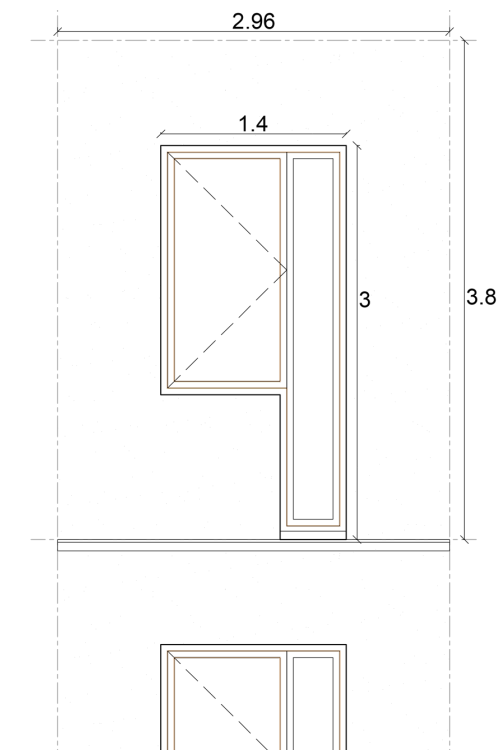
L'îlot tertiaire neuf

Novatrice - Déclinaison 2

NOVATRICE

La façade en bottes de paille directement enduites est perméable à la vapeur d'eau, contrairement à la mise en œuvre en panneaux FOB classiques avec pare-pluie, économique en coût et en matière, et relativement rapide à mettre en œuvre. Le plancher collaborant bois béton, avec des solives en bois solidarisées à une dalle de compression béton, présente des qualités structurales, acoustiques et économiques intéressantes.

- + - + - +	Gain CO2	- + - +	$R = 7,17 \text{ m}^2\text{K/W}$
- + - + - +	Surcoût €	- + - +	Perméabilité
- + - + - +		- + - +	Inertie



- façade isolation**
 - Laine minérale
 - Fibres de bois
 - Ouate de cellulose en vrac
 - Panneau à base de ouate de cellulose
 - Bottes de paille [22cm, 36cm]
 - Paille hachée insufflée
 - Béton de chanvre
 - Laine de chanvre
 - Bloc Bâtilin
 - Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
 - Terre crue et de fibres végétales [Torchis]
 - Terre crue et de fibres végétales [Terre allégée]
- façade revêtement intérieur**
 - Peinture
 - Enduit plâtre
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit terre crue
- façade revêtement extérieur**
 - Bardage métallique
 - Bardage bois
 - Vêture en pierre et assimilés
 - Enduit sur support ventilé
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit chaux-sable
 - Enduit en terre
- plancher**
 - Dalle béton armé
 - Planchers CLT
 - Plancher mixte bois-béton
 - Remplissage de plancher en terre crue

L'îlot tertiaire neuf

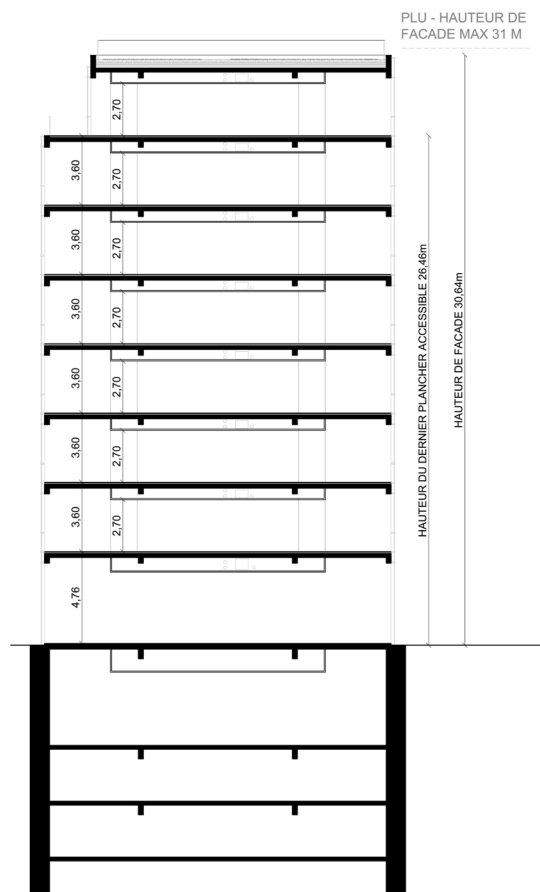
L'évaluation cadre normatif

Les matériaux bio et géosourcés étaient historiquement employés pour construire mais les formes bâties ainsi que les garanties de durabilité ont évolué.

A la date de rédaction de ce rapport, les règles professionnelles de la construction à ossature bois avec remplissage en bottes de paille encadrent des constructions dont la

hauteur est limitée à 8m pour le dernier plancher accessible. Une évolution du cadre technico réglementaire est nécessaire pour généraliser ce type de procédé constructif pour les formes bâties contemporaines.

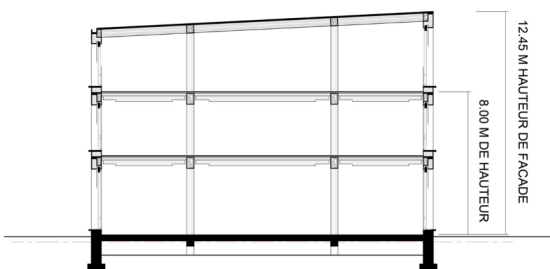
Business as usual
archétype existant



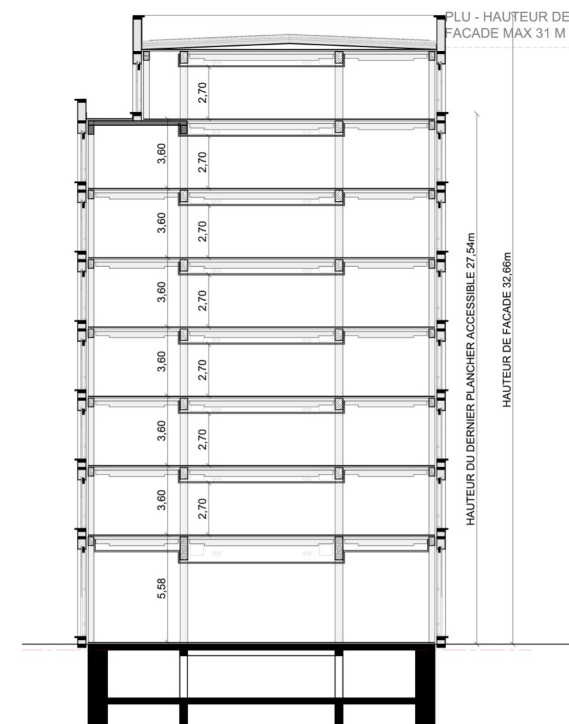
Enduit sur construction à ossature bois remplissage paille
Cadre technico réglementaire existant



Transitions constructives,
programmatives, morphologiques



Méthode "Maillons"
prototype V0



L'îlot tertiaire neuf

L'évaluation cadre normatif

Variante Réalisable

Cette variante intègre différents points de qui ne sont pas visés par le référentiel technico-règlementaire et génèrent ainsi différentes innovations (au sens de ce qui a été décrit précédemment) :

A. Structure : Poteaux-Poutres en bois lamellé-collé de hêtre

Le NF DTU 31.1 et le référentiel associé n'excluent pas spécifiquement le Hêtre, ils ne la visent pas non plus explicitement. Il est ainsi considéré que le système constructif **n'est pas visé** par le référentiel.

Il semblerait qu'il existe des données scientifiques et techniques pour justifier en partie l'aptitude à l'emploi du système constructif : elles restent donc à compléter, mais dans une mesure a priori réalisable.

=> Au regard des connaissances actuelles il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable sous conditions que les acteurs du projet aient bien les connaissances indiquées précédemment dans la méthodologie de définition des variantes.

Dans une stratégie de premiers retours d'expérience reconnue et réussie, le recours à des Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) de cas b, semble être le bon véhicule de portage de ce système constructif. Une Appréciation de Laboratoire sera à obtenir sur la base d'essais de résistance au feu afin de justifier de leur performance de résistance au feu.

B. Façade : Bardage ventilé sur FOB remplie de botte de paille de 36cm.

Les points ci-dessous ne sont pas visés dans le référentiel technico-règlementaire existant:

- L'emploi d'un isolant en botte de paille de 36cm dans une FOB n'est ni visée par le NF DTU 31.4, ni par les règles professionnelles « *Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit* ».
- L'emploi d'un bardage ventilé sur un support FOB n'est à date visé par aucune évaluation technique,

Des données scientifiques permettant de justifier de l'aptitude à l'emploi d'un bardage sur FOB et d'un isolant en botte de paille dans une FOB avec un bardage ventilé existent déjà mais seront à compléter, en particulier pour l'emploi de l'isolant en botte de paille dans la paroi (comportement hygrothermique, etc.).

=> Au regard des connaissances actuelles il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable sous conditions que les acteurs du projet aient bien les connaissances

indiquées précédemment dans la méthodologie de définition des variantes.

Dans une stratégie de premiers retours d'expérience reconnue et réussie, le recours à des Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) de cas b, à condition qu'elle soit favorable, semble être le bon véhicule de portage des « innovations » des façades. Une appréciation de Laboratoire traitant des dispositions à prendre pour atteindre les objectifs de sécurité incendie des façades dans le cas d'un emploi de botte de paille dans une FOB avec un bardage ventilé sera à obtenir. Elle pourra s'appuyer sur les données scientifiques déjà disponibles sur cette thématique.

C. Complexe de sol : Faux plancher de réemploi

L'emploi de faux plancher de réemploi n'est pas visé par le NF DTU 57.1.

Une organisation de la collecte des faux-plancher et de la caractérisation de ceux-ci sera à mettre en place de façon à justifier de leur aptitude à l'emploi.

Il ne semble pas y avoir d'infaisabilité à ce stade du développement de la technique.

L'îlot tertiaire neuf

L'évaluation cadre normatif

Variante atteignable

Cette variante intègre différents points de qui ne sont pas visés par le référentiel technico-règlementaire et génèrent ainsi différentes innovations (au sens de ce qui a été décrit précédemment) :

A. Structure : Poteaux-Poutres en bois lamellé-collé de hêtre

Pour ce procédé, les constatations sont identiques à celles émises pour la variante Réalisable.

B. Façade : Bardage ventilé sur FOB remplie de botte de paille de 22cm.

Les points ci-dessous ne sont pas visés dans le référentiel technico-règlementaire existant:

- L'emploi d'un isolant en botte de paille de 22cm dans une FOB n'est ni visée par le NF DTU 31.4, ni par les règles professionnelles « *Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit* ».
- En complément, l'emploi d'un enduit terre appliquée directement sur des bottes de pailles, pour les hauteurs du projet n'est pas visé par les règles professionnelles « *Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit* ».
- L'emploi d'un bardage ventilé sur un support FOB n'est à date visé par aucune évaluation technique.

Des données scientifiques permettant de justifier de l'aptitude à l'emploi d'un bardage sur FOB et d'un isolant en botte de paille dans une FOB avec un bardage ventilé existent déjà mais seront à compléter, en particulier pour l'emploi de l'isolant en botte de paille dans la paroi (comportement hygrothermique, etc.).

L'emploi d'un enduit de terre appliqué directement sur les bottes de paille appelle à recueillir un nombre conséquent de données scientifiques et techniques avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

⇒ Néanmoins, il n'est pas possible à cette heure de définir un mode d'évaluation technique adapté.

C. Complexe de sol : Chape sèche à base de plâtre sur sous-couche isolante

Plusieurs procédés de chape sèche sur sous-couche isolante sur support bois sont visés par un Avis Technique ou Document Technique d'Application et sur liste verte de la C2p. Le domaine d'emploi de ces évaluations techniques vise a priori celui de cette variante.

=> Il n'est donc a priori pas nécessaire de prévoir d'évaluation technique complémentaire.

Variante Novatrice

La solution constructive proposée est composée d'enduit sur botte de paille dans une FOB, de surcroit pour un bâtiment de 29m de haut n'est visé par aucun référentiel à date.

Il en est de même pour un plancher solivé avec remplissage marins de terre crue.

Un nombre très conséquent de données scientifiques et techniques sera à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

=> Cette solution relevant de la R&D, il n'est pas possible à cette heure de définir un mode d'évaluation technique adapté.

L'îlot tertiaire neuf

L'évaluation économique

Ensemble fonctionnel

L'évaluation économique se rapporte à la superstructure de l'ouvrage du rez-de-chaussée au R+7. Les ensembles fonctionnels utilisés sont l'enveloppe, les séparatifs intérieurs, partiellement les aménagements intérieurs et les constructions extérieures.

Hypothèses constructives

		BAU	Réalisable	Atteignable	Novateur
Enveloppe	Plancher bas	- Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois	- Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois	- Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois	- Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois
	Façades	- Partie opaque béton : panneaux sandwich isolé (non biosourcé) - Partie vitrée : ensemble menuisé standard intégré aux panneaux sandwich technologie mur rideau bois - hypothèse 53.3% de vitrage en façade - Isolation non biosourcée (panneau de fermeture intérieur) - Occultations : stores textiles intérieurs motorisés	- Partie opaque type FOB compris panneaux de contreventement - Partie vitrée : ensemble menuisé standard - hypothèse 22.1% de vitrage en façade - Complexe isolant botte de paille 36cm - Intérieur : OSB + laine minérale + peinture - Véture de façade : système bardage ventilé - Protections solaires type BSO - Bloc-portes extérieures vitrées et opaques	- Partie opaque type FOB compris panneaux de contreventement - Partie vitrée : ensemble menuisé standard - hypothèse 22.1% de vitrage en façade - Complexe isolant botte de paille 22cm - Intérieur : enduit terre sur bottes de paille - Véture de façade : bardage bois ventilé - Protections solaires type BSO - Bloc-portes extérieures vitrées et opaques	- Partie opaque type FOB compris panneaux de contreventement - Partie vitrée : ensemble menuisé standard - hypothèse 22.1% de vitrage en façade - Complexe isolant paille hachée 22cm - Intérieur : doublage fermacel - Véture de façade : enduit plâtre + pare-pluie + OSB - Protections solaires type BSO
	Plancher haut	- Structure béton - Etanchéité sur support béton - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc.	- Structure mixte bois béton - Etanchéité - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc.	- Structure CLT - Etanchéité sur support bois - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc.	- Structure bois - Etanchéité sur support bois - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc.

	BAU	Réalisable	Atteignable	Novateur
Séparatifs intérieurs verticaux et horizonraux	- Refends béton - Cloisons : Hors périmètre étude - Dalle béton - Chape acoustique : sans objet (mise en œuvre de plots antivibratiles sous le plancher technique) - Poteaux / Poutres béton - Escaliers béton	- Refends béton - Cloisons : Hors périmètre étude - Dalle mixte bois/béton - Sous-face de dalle en placoplâtre pour stabilité au feu : sans objet - Chape : sans objet - Poteaux / Poutres bois - Escaliers béton	- Refends Béton - Cloisons : Hors périmètre étude - Dalle CLT - Sous-face de dalle en placoplâtre pour stabilité au feu - Chape (plâtre et granulat) - Poteaux / Poutres bois - Escaliers béton	- Refends Béton - Cloisons : Hors périmètre étude - Dalle type plancher caisson bois avec remplissage de terre crue - Sous-face de dalle en placoplâtre pour stabilité au feu - Chape sèche - Poteaux / Poutres bois - Escaliers béton
Aménagements intérieurs	- Faux planchers techniques	- Faux planchers techniques - réemploi	- Faux planchers techniques - réemploi	- Faux planchers techniques - réemploi

L'îlot tertiaire neuf

L'évaluation économique

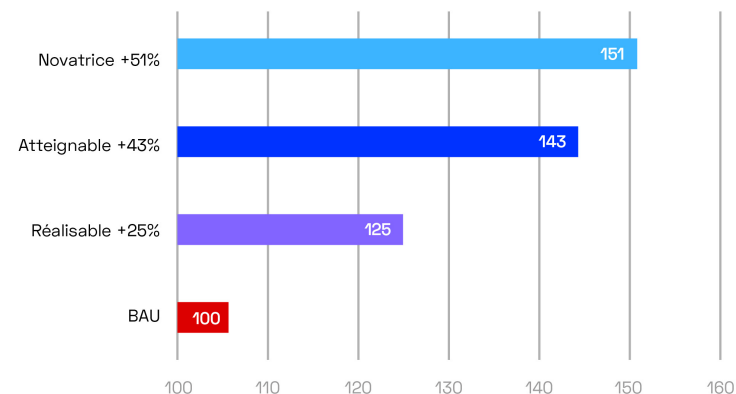
	BAU	Réalisable	Atteignable	Novateur
Contructions extérieures	Terrasse étanchée sur parking : - Dalle béton - Etanchéité - Dallettes béton sur plots	Terrasse étanchée sur parking : sans objet Balcons : - Dalle mixte bois béton rapportée - Poteaux / Poutres bois - Etanchéité - Dalles sur plots	Terrasse étanchée sur parking : sans objet Balcons : - Dalle mixte bois béton rapportée - Poteaux / Poutres bois - Etanchéité - Dalles sur plots	Terrasse étanchée sur parking : sans objet Balcons : - Dalle mixte bois béton rapportée - Poteaux / Poutres bois - Etanchéité - Dalles sur plots

Résultats économiques (base 100)

PAR ENSEMBLES FONCTIONNELS

	BAU Ratios Prix base100	Réalisable Ratios Prix base 100	Atteignable Ratios Prix base 100	Novateur Ratios base 100
Bilan en Base 100	100	125	143	151
ENVELOPPE DU BATIMENT	100	107	100	92
SEPARATIFS VERTICAUX - périmètre étude partiel	100	128	128	128
SEPARATIFS HORIZONTAUX - périmètre étude partiel	100	168	266	325
AMENAGEMENTS INTERIEURS - périmètre étude partiel	100	130	130	130
CONSTRUCTIONS EXTERIEURES DU BATIMENT	100	107	112	112

L'îlot tertiaire neuf - Economie base 100



L'îlot tertiaire neuf

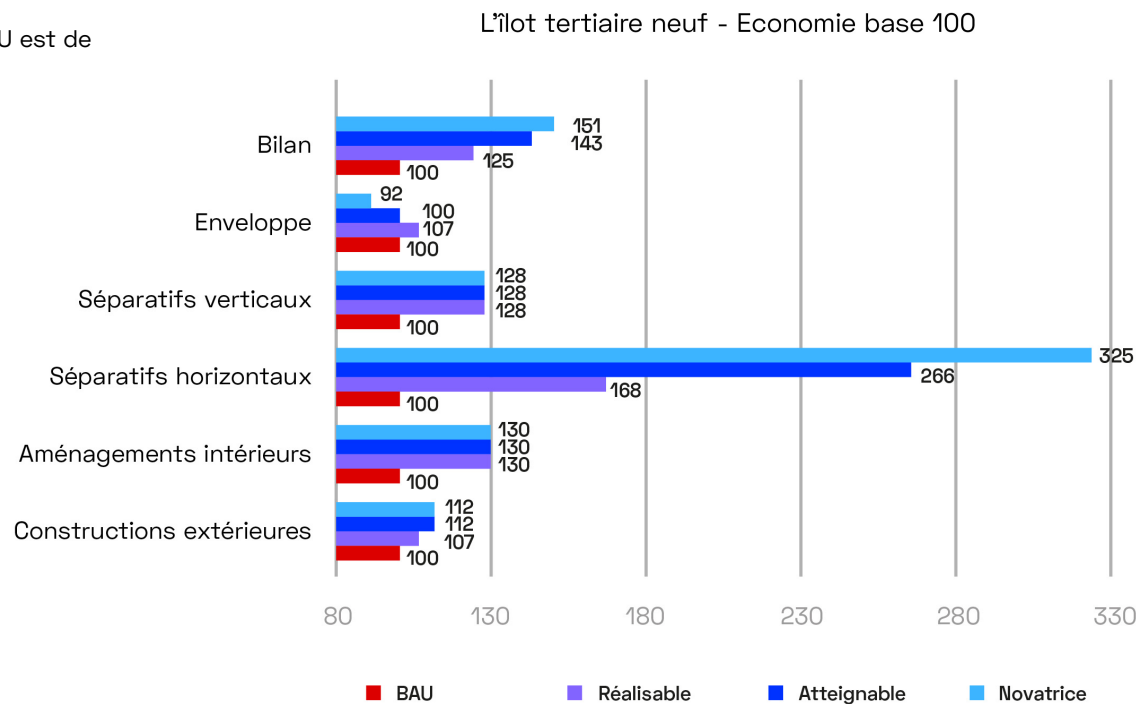
L'évaluation économique

L'impact économique majeure d'une construction biosourcée et géosourcée par rapport à celle du BAU réside principalement dans le choix constructif du système porteur « plancher + poteaux / poutres ». En effet, en fonction du système choisi, on observe des coûts multipliés entre 1,7 et 3,2 fois vis-à-vis du BAU.

Par ailleurs, on constate que l'évolution des coûts de l'enveloppe varie peu par rapport au BAU : entre -8% et +7%. Cela s'explique par le changement de proportion des surfaces vitrées en façade (53 à 22%) et s'explique aussi par la non-réalisation d'un plancher bas étanché sur parking pour les variantes (le parking est construit à la verticale de la superstructure et ne possède aucun débord sur l'extérieur).

Globalement, le surcoût constructif des variantes par rapport au BAU est de

l'ordre de +25 à +50% suivant le périmètre fonctionnel étudié (hors équipements techniques).



L'îlot tertiaire neuf

L'évaluation carbone - seuils réglementaires

Des gains carbone très significatifs, qui permettent de passer sous le seuil RE2031, à mettre en regard du surcoût économique

L'ensemble des variantes étudiées permet d'atteindre une réduction carbone significative sur les lots analysés, de -74% à -105%.

- La variante « atteignable » permet ainsi de se situer sous les seuils réglementaire les plus ambitieux, sans avoir encore travaillé à l'optimisation des autres lots techniques.

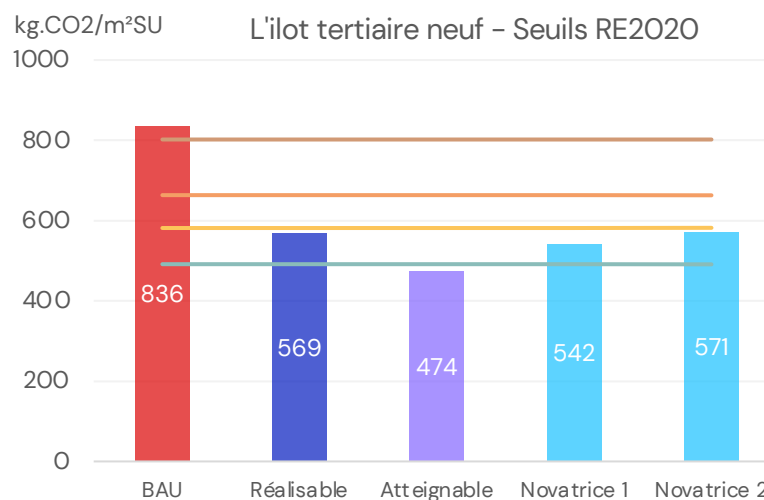
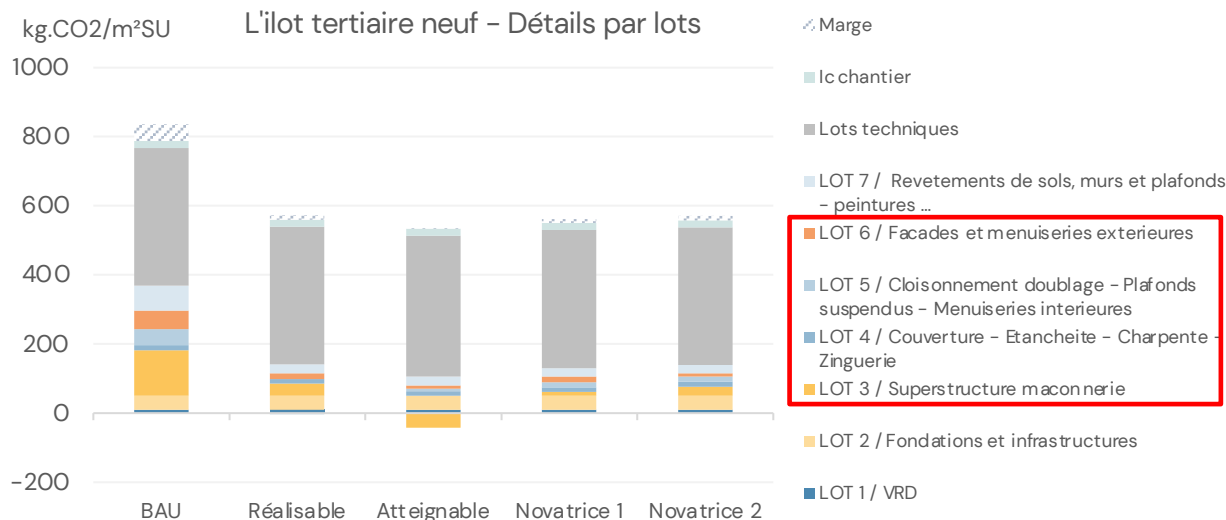
L'étude comparative des variantes de ce prototype met en évidence le poids des planchers dans le bilan carbone de l'opération. En effet, le recours aux planchers mixtes bois/béton* et CLT permet un gain respectif de 70% et 150% sur ce poste par rapport au BAU.

Ce résultat est à nuancer cependant par le poids financier induit sur cet ouvrage (voir slide précédente).

Les limites liées à la donnée disponible

La variante « atteignable » présente l'impact carbone le plus faible pour ce prototype, alors que les versions « novatrices » semblaient plus prometteuses. Cela souligne deux choses :

- d'une part, la limite liée aux données disponibles : certains systèmes constructifs ont des fiches d'empreinte carbone optimisée, notamment pour les produits les plus commercialisés. Ces données optimisées traduisent un investissement pour récolter et produire les Fiches de Données Environnementales et Sanitaires (FDES). **Permettre de généraliser cet investissement permettrait de valoriser des procédés constructifs plus nombreux.**
- D'autre part, en combinant une façade très bas-carbone: FOB paille/bardage bois, une structure poteaux/poutres bois et des planchers en CLT, on maximise l'effet du bois, qui est plus avantageux dans les fiches disponibles, avec les réserves mentionnées en préambule sur le risque de surexploitation du bois si l'on favorise trop ce matériau.



*L'impact carbone des planchers mixtes bois/béton sont issus de FDES individuelles, caractérisant des procédés constructifs spécifiques (Dalle BB pour la variante « réalisable », Hybridal pour la variante « Novatrice 2 »).

L'îlot tertiaire neuf

L'évaluation carbone - simulations

Test de sensibilité carbone

Afin de dépasser l'ACV réglementaire et d'inscrire les prototypes dans le contexte des Accords de Paris, nous avons réalisé des tests de sensibilité, et examiné les leviers permettant de tendre vers un facteur de réduction plus ambitieux des émissions carbone du BAU, en lien avec les Accords de Paris (division par 6 au global).

Les matériaux bio et géo-sourcés étant encore « jeunes » dans le processus d'élaboration des fiches FDES, nous anticipons qu'un travail d'optimisation pourrait encore en améliorer les données, même si un grand pas a déjà été franchi en remplaçant petit à petit les fiches par défaut par des fiches collectives ou individuelles.

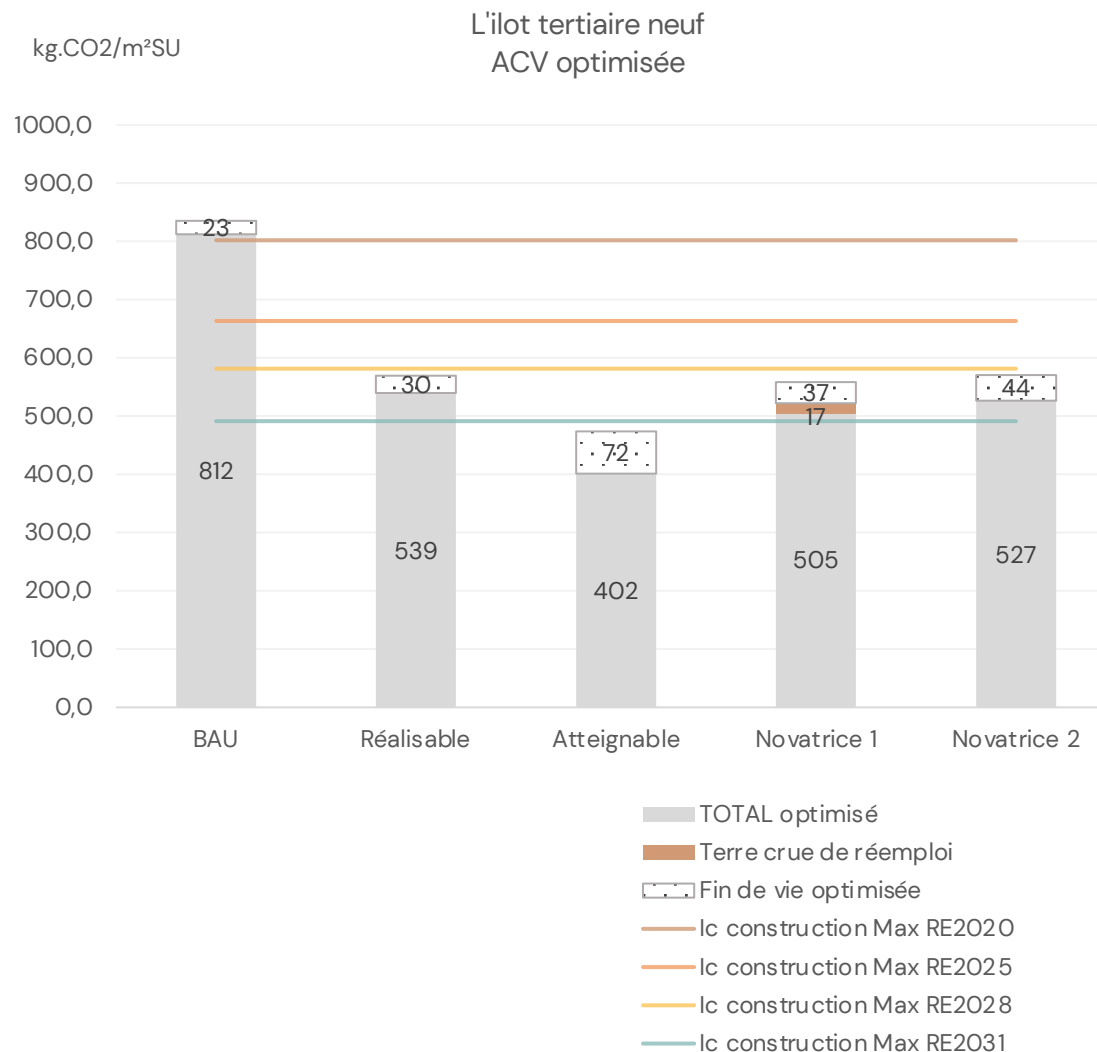
Les pistes d'optimisation

Ainsi, avec la massification de l'usage des matériaux bio et géo-sourcés, les filières de valorisation/recyclage en fin de vie vont progressivement se structurer. **Nous faisons l'hypothèse que cela pourrait permettre de réduire par 2 l'impact en fin de vie de ces matériaux.**

La terre, matière géosourcée, ne stocke pas de carbone biogénique, et reste ainsi peu valorisée par l'indicateur carbone. La filière terre crue s'inscrivant pour partie dans une démarche de réutilisation des terres excavées, et avec des process de fabrication peu énergivores, nous avons considéré une piste d'optimisation qui consiste à **considérer la terre comme un matériau de réemploi, et donc compté avec un impact carbone nul.**

Des gains carbone complémentaires à évaluer

Il ressort de cet exercice qu'une fois les éléments de façades et structurels optimisés, il reste une contribution très élevée des lots techniques. Nous disposons actuellement de peu de retours d'expérience, néanmoins l'utilisation de matériaux biosourcés et géo-sourcés tend à réduire les consommations des bâtiments et réduire les équipements techniques nécessaires au fonctionnement du bâtiment tels que la climatisation.



L'îlot tertiaire neuf

Mise en regard de l'avantage carbone et du coût économique

Des investissements avec des effets carbone contrastés

Si l'on se concentre sur l'aspect carbone, une performance carbone de l'€ investi peut être calculée, toujours à partir des bases 100 calculées.

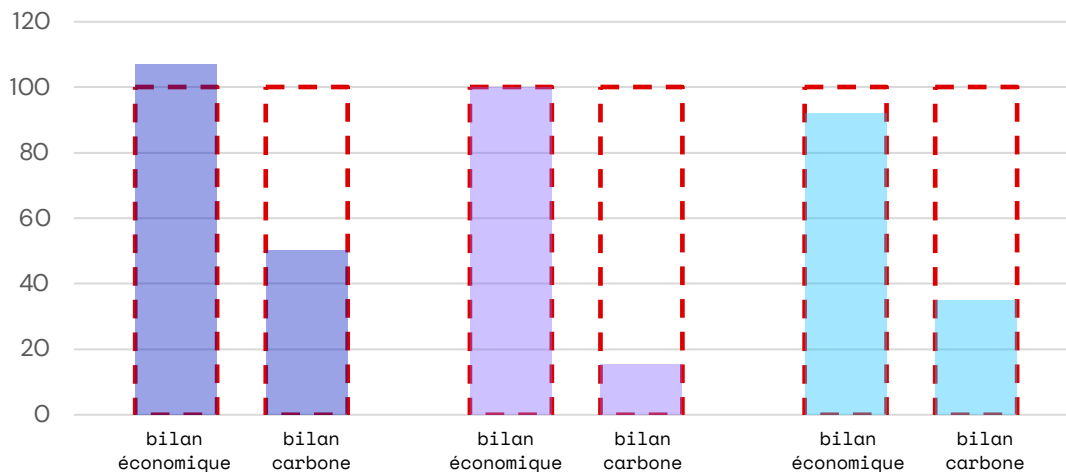
Sur ce prototype, la conception s'est attachée à faire évoluer le plancher, compris dans les séparatifs horizontaux. La variante « réalisable » est celle qui apporte le plus d'efficacité pour l'€ investit (complexe bois-béton), mais pas le maximum de gain carbone, apporté par la variante « atteignable » et son plancher CLT.

Concernant l'enveloppe, la variante « atteignable » et sa FOB remplissage bottes de paille de 22 cm semble être un optimum entre le cout, le gain carbone, la complexité réglementaire. **Cette variante permet de réduire le bilan carbone sans générer de surcoût.**

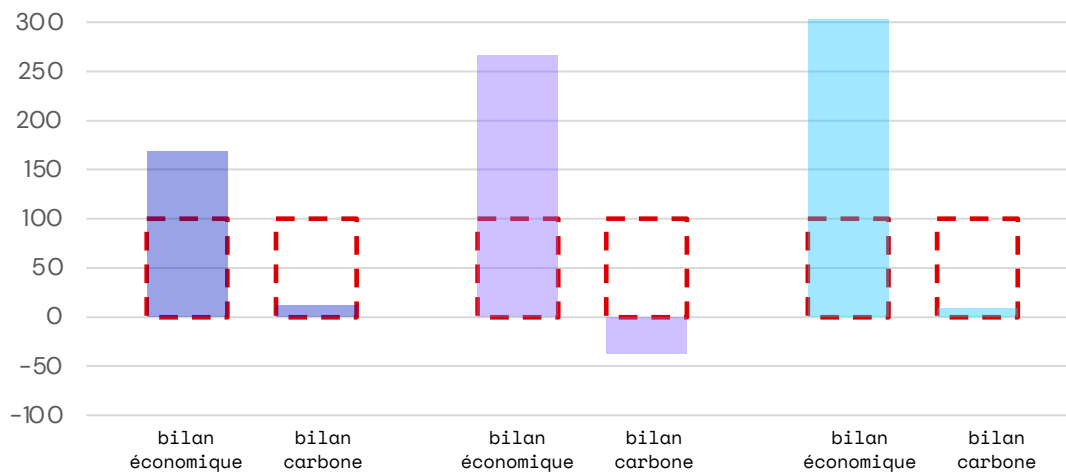
Au-delà du carbone

L'isolation en paille génère un fort déphasage thermique permettant en été de décaler le pic de chaleur. Particulièrement adaptée dans les bureaux inoccupés le soir

Enveloppe du bâtiment



Séparatifs horizontaux



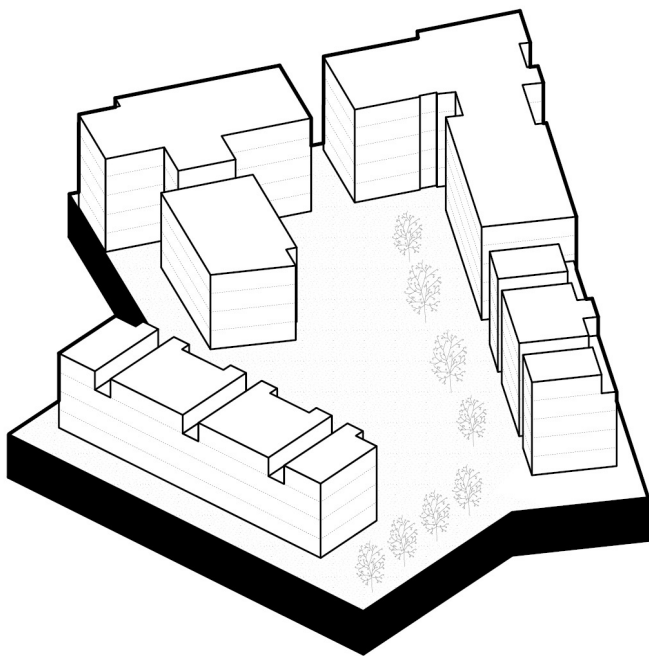
2.2.4 Les logements collectifs neufs

Les logements collectifs neufs

Description de l'archétype existant

34% du marché immobilier de la Vallée de la Seine

Les logements collectifs de moyenne hauteur constituent une opportunité pour expérimenter des innovations bas carbone. La réglementation incendie pour les logements de 2e famille permet une certaine souplesse constructive et la présence de sols pollués impose une réflexion sur des alternatives aux constructions béton en infrastructure.



Synthèse des caractéristiques du prototype étudié :

localisation	ZAC Jean Jaurès, Colombelles CU Caen-la-mer (14)
programme	Logements collectifs Parking en RDC
Classement incendie	habitations 2e famille
Surface parcelle	6 650m ²
Emprise au sol	2 680 m ²
Surface de plancher Shab ratio 90%)	7 950m ² 7 150 m ²
SDP étage courant Shab courant (ratio 90%)	2 380 m ² 2 145 m ²
Nombre d'étages	R+2 à R+3
Hauteur du plancher bas du dernier niveau	8,2 m
Hauteur façade à l'acrotère	12,2 m
Profondeur bâtie	13,3 m
Coefficient de compacité	0,40
Zone sismique	1
Zone climatique	H1a
Zone vent	2
Hygrométrie des locaux	EA, EB, EB+p
Prix de vente moyen	2 135 € à 4 271 € /m ² source : meilleursagents.com

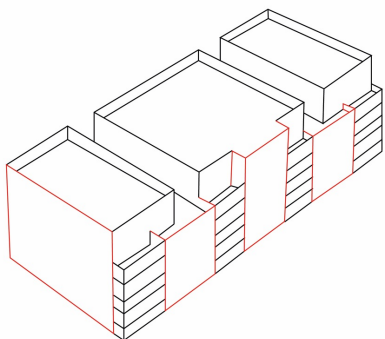
Échelle du bâtiment

Les logements collectifs neufs

Variantes morphologiques

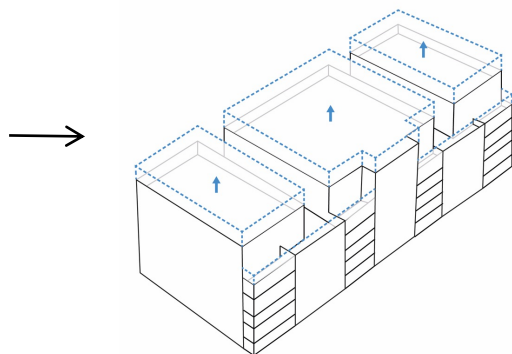
Business as usual

archétype existant



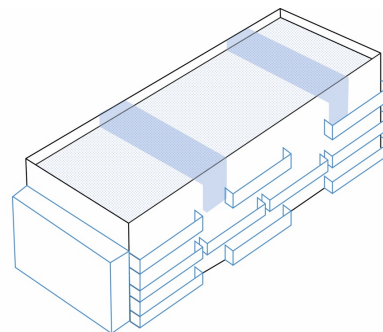
1 - Transition

intégration de matériaux bio-géo-sourcés



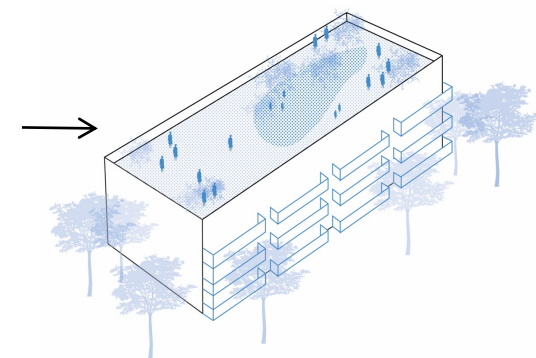
2 - Transformation

Ajustements morphologiques



3 - Augmentation

Valeurs ajoutées



Traquer le carbone

A partir de l'archétype existant, une analyse multi critères sur l'ensemble de la conception du bâtiment est opérée afin de déceler tous les leviers potentiels pour diminuer le bilan carbone de l'opération. Un ensemble de modifications constructives, programmatiques et morphologiques sont présentées, pouvant être combinées entre elles ou être choisies séparément selon le niveau d'ambition visé.

Cette première étape de conception à l'échelle du bâtiment mène à la conception d'un prototype "V0", support des variantes constructives.

Structure biosourcée et surélévation

Le passage d'une structure béton à une structure bois engendre une augmentation des sections de structure. Le bois ne permettant pas de réaliser de réservations, les fluides sont placés en dessous. En conséquence le pas d'étage est augmenté par rapport à l'archétype existant. L'ensemble du bâtiment est donc surélevé, le volume intérieur ainsi que la surface des façades est donc augmentée.

>> Le Décret n° 2023-173 du 8 mars 2023 permet une augmentation de 2,50m par rapport au plafond de hauteur du PLU dans le cas de bâtiment bas carbone et / ou énergie positive.

Compacité & bioclimatisme

La morphologie du bâtiment est ajustée afin de limiter la consommation de matières et d'optimiser les apports passifs que peut apporter l'environnement du bâtiment. Les espaces extérieurs sont rapportés évitant ainsi des reprises structurelles, limitant les déperditions de l'enveloppe et, placés au Sud, protègent les espaces intérieurs des surchauffes estivales. Les circulations des bâtiments sont intégrées au volume bâti de manière à améliorer la compacité. Le jeu de volumes en façade est retrouvé par un agencement d'ouvrages rapportés limitant le développé de façades.

Le bâtiment devient un écosystème

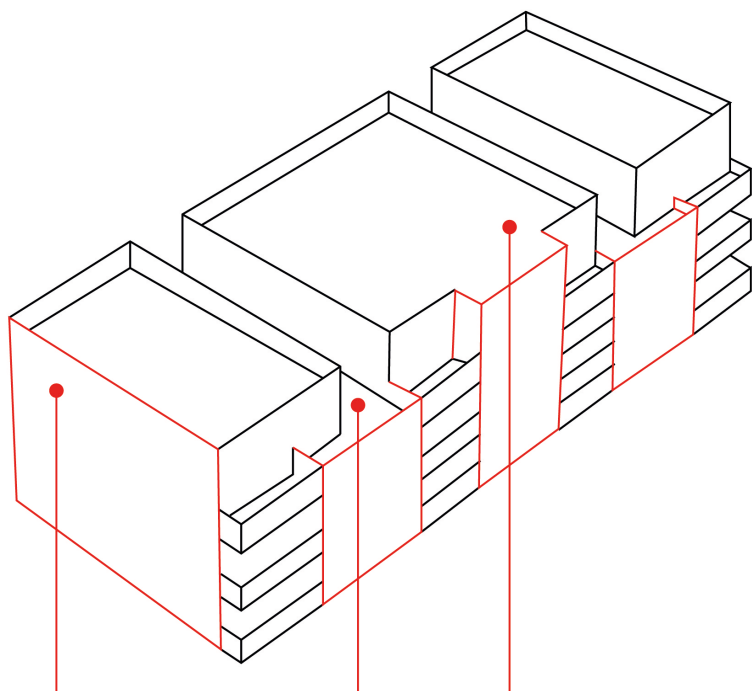
Bien que la pression foncière soit moins forte, il est toujours nécessaire d'optimiser chaque surface construite. Il s'agit ici notamment de réinvestir les toitures avec une végétalisation diversifiée voire même d'envisager de la rendre accessible aux habitants pour partager un espace en commun. Les plantations bien orientées et bien calibrées devant les bâtiments permettent de remplacer les matériaux conventionnels tels que des brise-soleil.

Les logements sont tous traversants permettant d'améliorer le confort intérieur et de limiter le recours à des équipements techniques.

Les logements collectifs neufs

Variantes morphologiques

Business as usual - archétype existant
 Identification des freins à la construction bas carbone



Redents dans le volume qui dégradent le coefficient de compacité

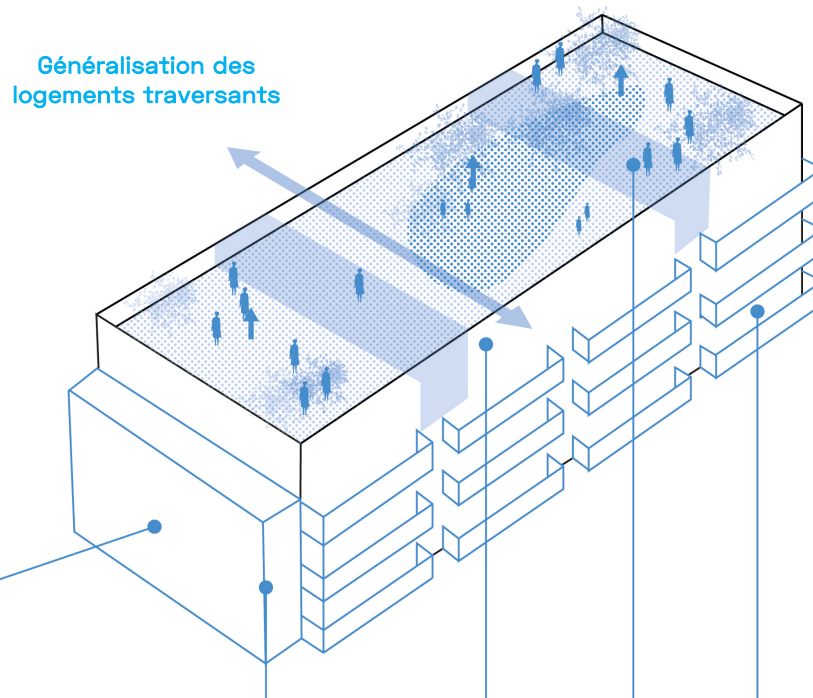
Circulations extérieures qui dégradent le coefficient de compacité

Toitures étanchées sans qualité paysagère

Coefficient de compacité ★ 0.40

Coefficient de biotope ★ 0.34

Prototypage - méthode maillons
 Identification des leviers vers la construction bas carbone



Généralisation des logements traversants

Circulations extérieures limitant l'isolation coupe-feu

Structure poteaux-poutres bois permet des ouvertures en façades latérales + Augmentation du pas d'étage

Compacité en réunifiant les volumes

Végétalisation des toitures

Généralisation des espaces extérieurs au Sud en protection solaire

★ 0.32

★ 0.50

Les logements collectifs neufs

Variantes morphologiques

Le béton est largement employé dans la structure des constructions actuelles. Ce matériau permet une flexibilité de trame constructive permettant de s'adapter au plus proche des demandes programmatiques. Introduire des matériaux bio et géosourcés dans la structure nécessite de renverser le paradigme structurel et de partir de la capacité du matériau pour y adapter les dimensions des espaces :

- Les trames constructives de chaque niveau sont ajustées de manière à se superposer
- La structure est dissociée de la façade et des cloisonnements permettant une plus grande flexibilité de cloisonnements
- La trame constructive devient un optimum entre le programme d'une part et la structure et ossature d'autre part

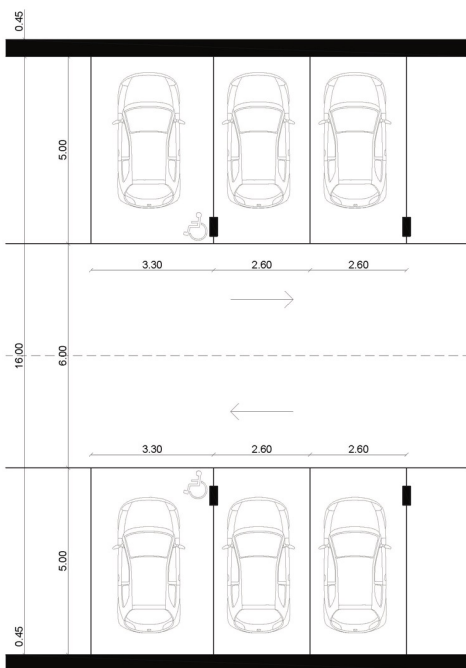
Business as usual - archétype existant

La trame constructive s'adapte à chaque programme

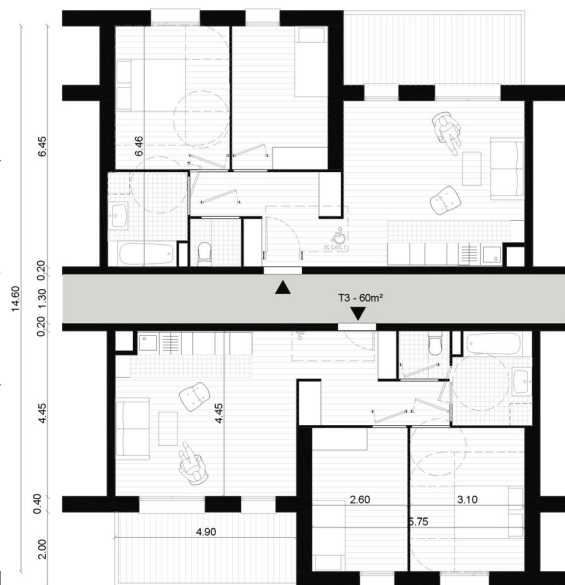
Prototypage - méthode maillons

Le programme s'adapte à une trame constructive rationnelle

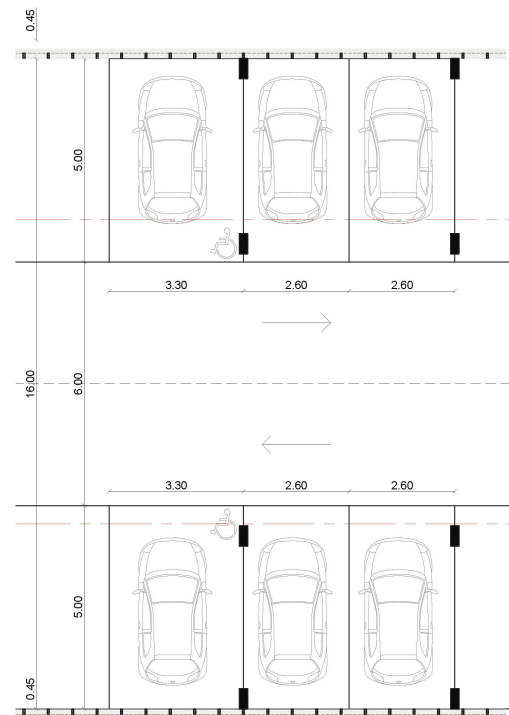
PARKING



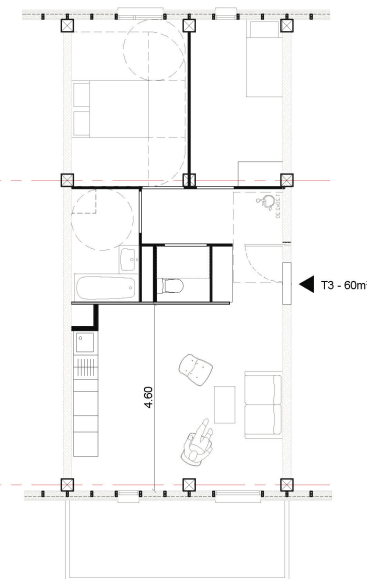
LOGEMENTS



PARKING



LOGEMENTS



Prototype #112 - logements collectifs

Adaptations morphologiques et constructives

Le dessin bas carbone bio- et géo-sourcé du logement implique une réflexion sur le statut des espaces et leurs conditions d'évolution. Le "business as usual" des logements collectifs en Ile-de-France et en Normandie se caractérise par des volumes fractionnés, qui intègrent des espaces extérieurs privatifs relativement réduits, un toit-terrasse le plus souvent technique, en structure béton et isolation en laine minérale.

Le prototype étudié par Maillons s'inspire de la Ferme du Rail, construit par la SCOP Grand Huit architecture dans le cadre de l'appel à projets urbains innovants Réinventer Paris, soit un contexte hors marché. Ce projet allie des réflexions constructives et programmatiques. Les logements collectifs (15 de réinsertion et 5 étudiants) sont ainsi liés à une serre urbaine, aux espaces de pleine terre et en toiture de potagers, et au restaurant associé. Le bâtiment de logement, en construction bois (COB et MOB) et remplissage paille (bottes

de 36cm), revêt un bardage en bois non déligné. Des coursives en structure bois recouvrent et occultent le soleil de la façade, permettant de potentiels jardins d'hiver. La toiture terrasse, également en structure bois isolée paille, permet à un potager en sacs de prendre place. Les fenêtres ainsi que le parquet, les carrelages, le mobilier, les pierres des murs de soutènement et les garde-corps métalliques sont issus de réemploi - tant de pierres de voiries que de déchets de la Fashion Week.

>> Livré en 2020, ce projet est lauréat du premier Réinventer Paris, donc propice à l'expérimentation et à l'innovation. De plus, si ce projet a été porté par Réhabail en tant que maîtrise d'ouvrage, les décisions ont été prises en concertation avec l'ensemble des partenaires de la Ferme du Rail : Bail pour tous, Travail & Vie, Association Atoll 75, Passage à Niveau.

Business as usual - archétype existant

Une architecture fonctionnelle



Logements collectifs à Colombelles, ZAC Jean Jaurès

Prototypage - méthode maillons

Une architecture bioclimatique



La ferme du Rail à Paris / Maîtrise d'ouvrage : Réhabail / Maîtrise d'oeuvre : Grand Huit Scop, architectes ; Mélanie Drevet, paysagiste / bois, paille, terre et réemploi

Échelle du fragment

Les logements collectifs neufs

récapitulatif des variantes constructives

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques de l'archétype existant à partir duquel sont déclinés trois prototypes principaux utilisant des procédés constructifs avec des matériaux bio et géosourcés.

En bleu sont représentés les ouvrages modifiés par rapport à la variante précédente.

En gris sont indiqués les ouvrages qui ne sont pas analysés dans le cadre de cette étude.

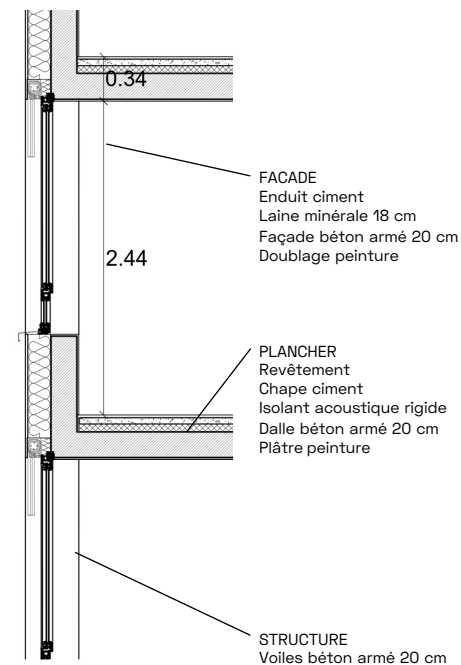
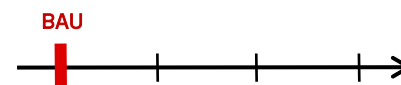
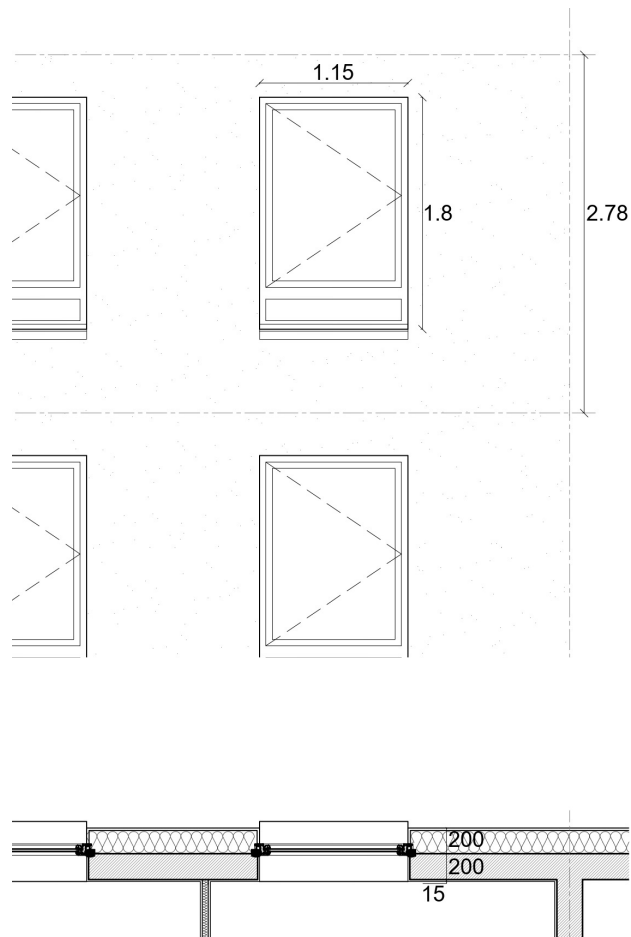
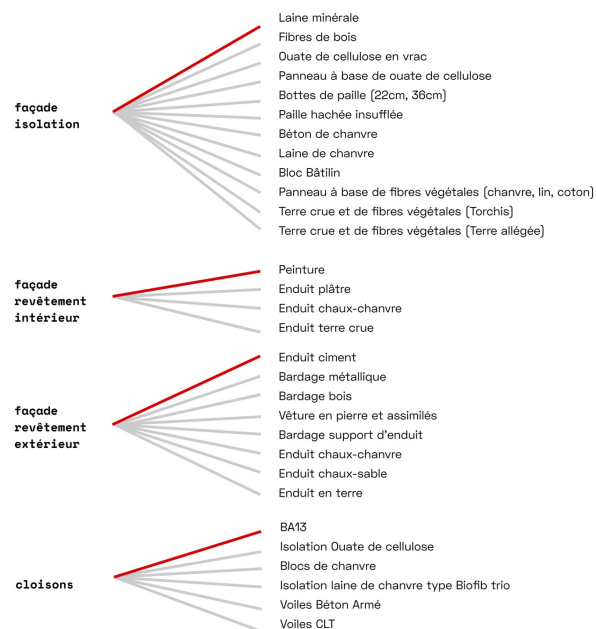
	Archétype existant	Prototype Réalisable	Prototype Atteignable	Prototype Novateur
Porteur	Voiles refends béton pas de trame régulière	Poteaux poutre BLC hêtre trame 3,60m	Poteaux poutre BLC hêtre trame 3,60m	Poteaux poutre BLC hêtre, trame 3,60m
Plancher courant	Plancher béton chape béton, sol PVC	Plancher mixte bois-béton chape sèche, parquet bois, faux plafonds CF en sous face	Plancher CLT chape sèche, parquet bois faux plafonds CF en sous face	Plancher CLT chape sèche, parquet bois faux plafonds CF en sous face
Toiture	Plancher béton Etanchéité, inaccessible	Plancher mixte bois béton Végétalisation extensive inaccessible	Plancher mixte bois béton Végétalisation extensive inaccessible	Plancher mixte bois béton Végétalisation extensive inaccessible
Espaces extérieurs	Plancher béton Terrasses étanchées et isolées (gradins) Dallettes minérales sur plots	Plancher mixte bois béton rupteur de pont thermique Dallettes minérales sur plots Poteaux bois	Plancher CLT rupteur de pont thermique Dallettes minérales sur plots Poteaux bois	Plancher CLT rupteur de pont thermique Dallettes minérales sur plots Poteaux bois
Façade courante	Mur béton, laine minérale enduit ciment, bardage bois et métal 40 cm	FOB remplissage laine de chanvre Extérieur : bardage bois ventilé, écran thermique, déflecteurs acier Intérieur : contreventement OSB, lattis, support d'enduit terre crue + PV 30 cm	COB remplissage béton de chanvre Extérieur : enduit chaux-sable appliqué direct sur béton de chanvre Intérieur : enduit terre crue 38 cm	Mur porteur terre crue, isolation terre allégée Extérieur : enduit chaux Intérieur : enduit terre crue 63 cm
Façade vitrée	menuiseries PVC, ouvrant à la française Occultations extérieures volets roulants	menuiseries bois, ouvrant à la française Occultations extérieures bois	menuiseries bois, ouvrant à la française Occultations extérieures bois	menuiseries bois, ouvrant à la française Occultations extérieures bois
Cloison séparative	voiles refends béton 20 cm	voiles CLT 16 cm	BTC type Cycle Terre 24 cm	BTC terre locale (ATEX ou autre à passer) 24 cm
Cloison distributive	cloisons BA13 7 cm	cloisons blocs de chanvre enduites à la chaux 12 cm	fermacell isolation ouate de cellulose 12 cm	cloisons à isolation laine de chanvre type Biofib trio 15 cm

Les logements collectifs neufs

"Business as usual"

Le logement collectif "business as usual" comporte du béton dans de nombreux ouvrages : en structure, en plancher, en façade, en cloisonnements. Au-delà de l'important impact carbone, ce sont des matériaux qui se recyclent peu. Les cloisonnements béton confondus avec la structure rendent les espaces difficilement réversibles pour d'autres programmes et la faible qualité des matériaux employés pose la question de la durabilité du bâtiment.

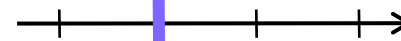
-	++	Gain CO2	-	+	R = 4,85 m²K/W
-	++	Surcoût €	-	+	Perméabilité
-	++		-	+	Inertie



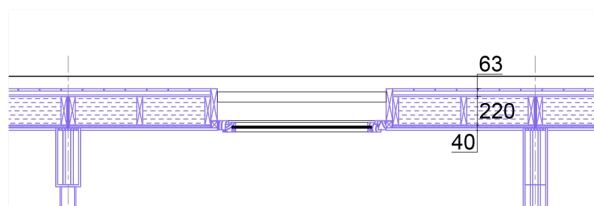
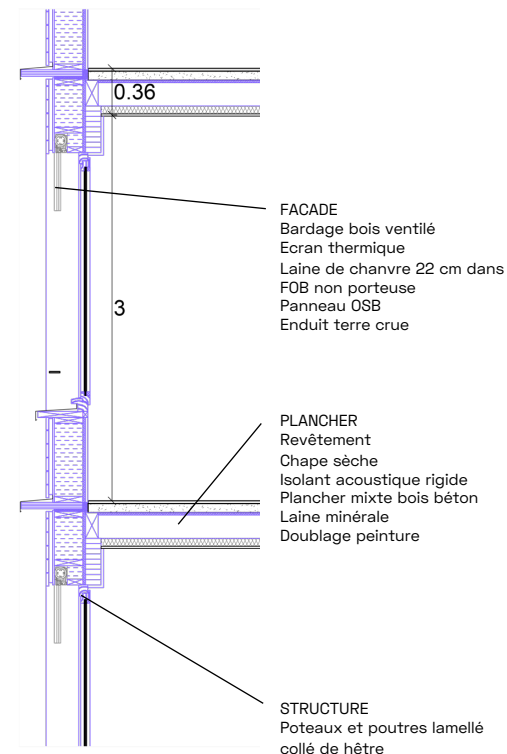
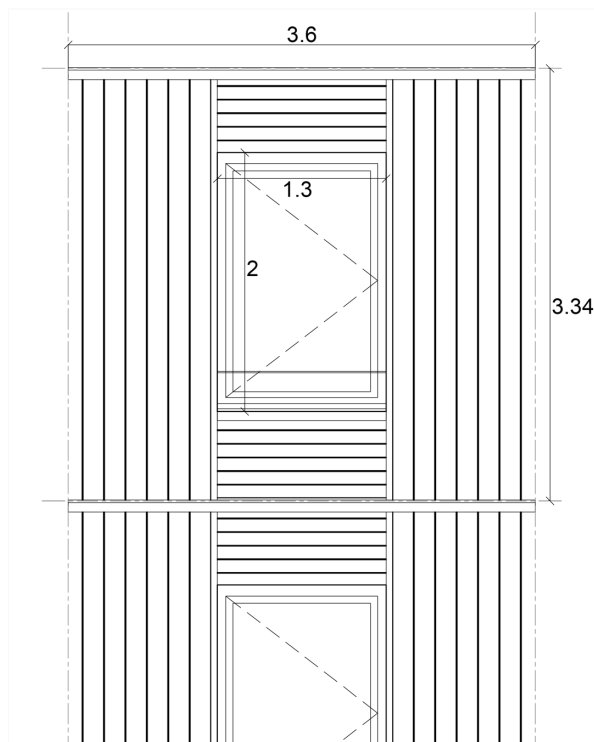
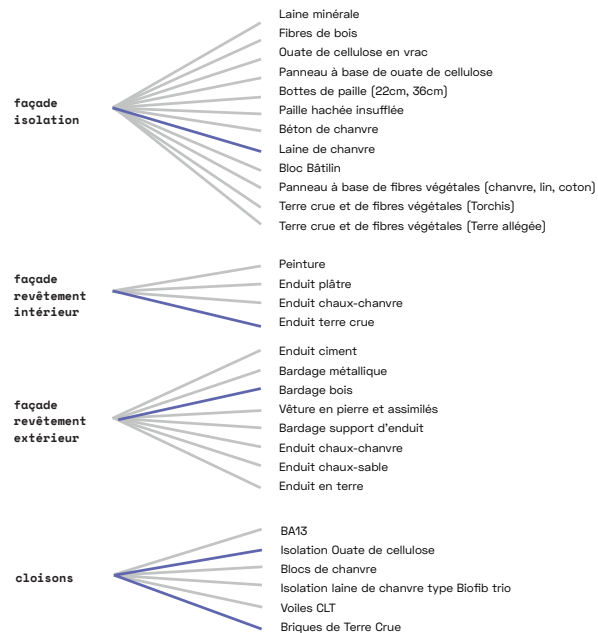
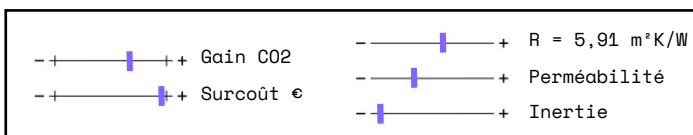
Les logements collectifs neufs

Réalisable

REALISABLE



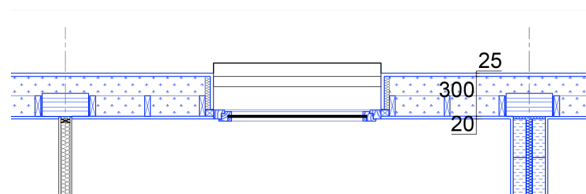
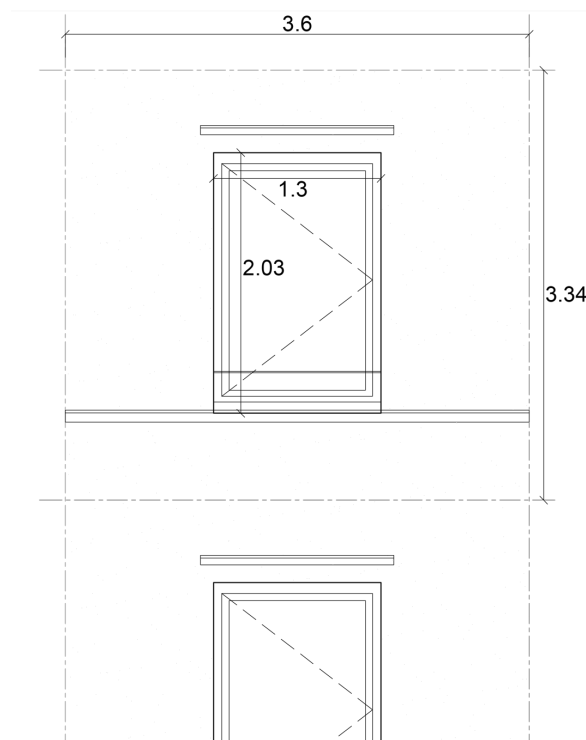
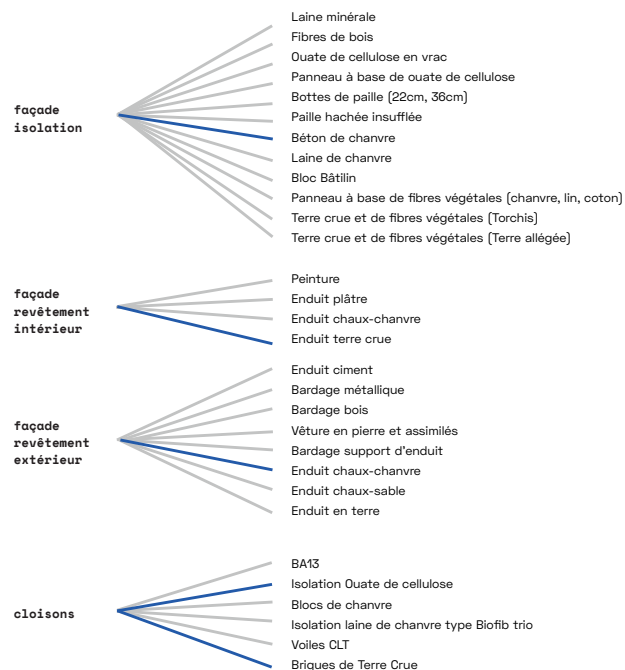
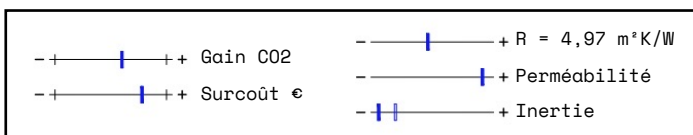
Dans cette première variante le béton est conservé pour ses qualités d'inertie et pour limiter les surcoûts engendrés par des ouvrages annexes tels que les doublages d'isolation feu. Le revêtement de façade gagne en qualité avec un bardage bois qui nécessitent également de nombreux ouvrages métalliques afin de limiter la propagation au feu : déflecteur à chaque niveau et mise en place d'un C+D.



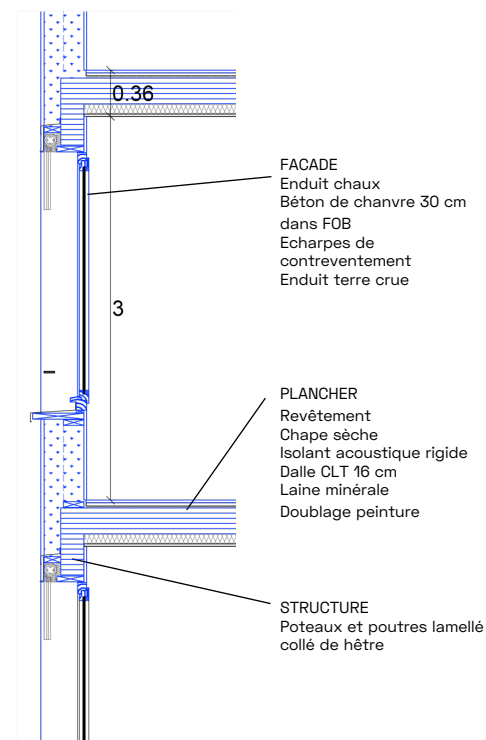
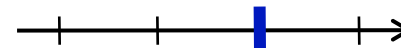
Les logements collectifs neufs

Atteignable

Cette seconde variante met de côté le béton du plancher. L'inertie est amenée en façade avec du béton de chanvre ainsi qu'avec des cloisonnements séparatifs entre logements en terre crue. Les panneaux préfabriqués en façade sont directement enduits et assemblés sur site permettant de gagner en temps de mise en œuvre.



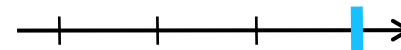
ATTEIGNABLE



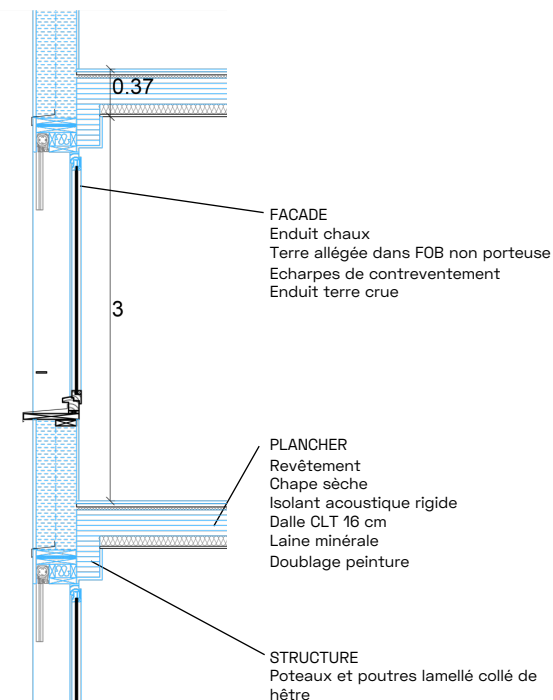
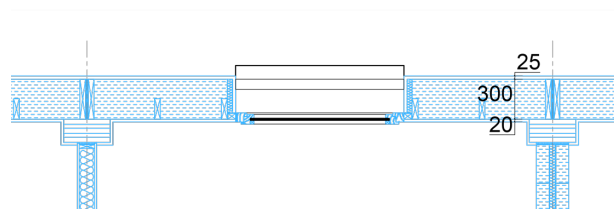
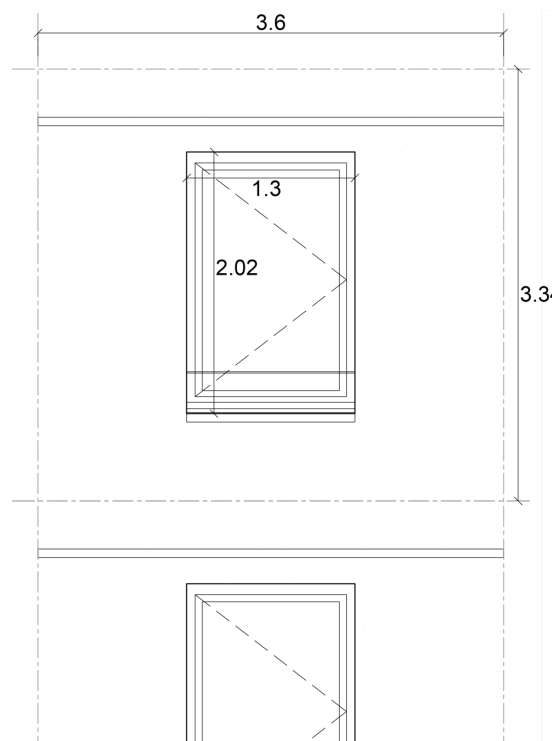
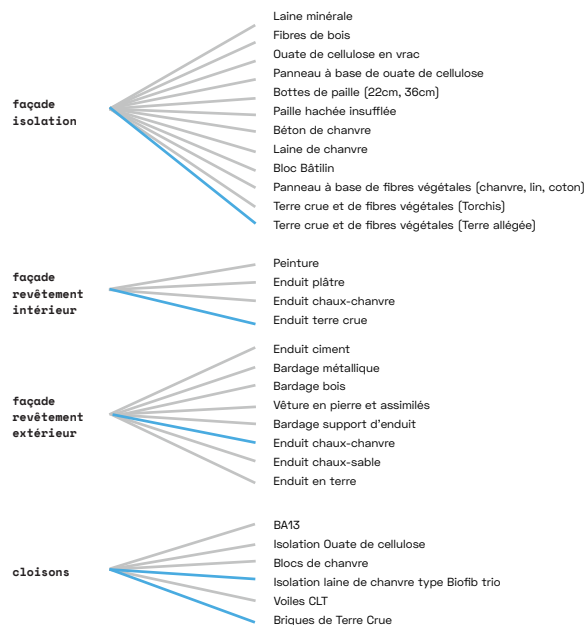
Les logements collectifs neufs

Novatrice - Déclinaison 1

NOVATRICE



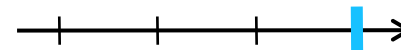
La structure légère en bois est associée à une façade en terre allégée et des cloisonnements séparatifs entre logements en terre crue permettant de participer à l'inertie de la construction et à réguler le confort intérieur. Le passage de MOB à FOB permet de gagner en flexibilité de mise en œuvre. La structure dissociée de la façade allège les panneaux de façade. La façade filante devant la structure a plus de souplesse sur l'accroche des panneaux.



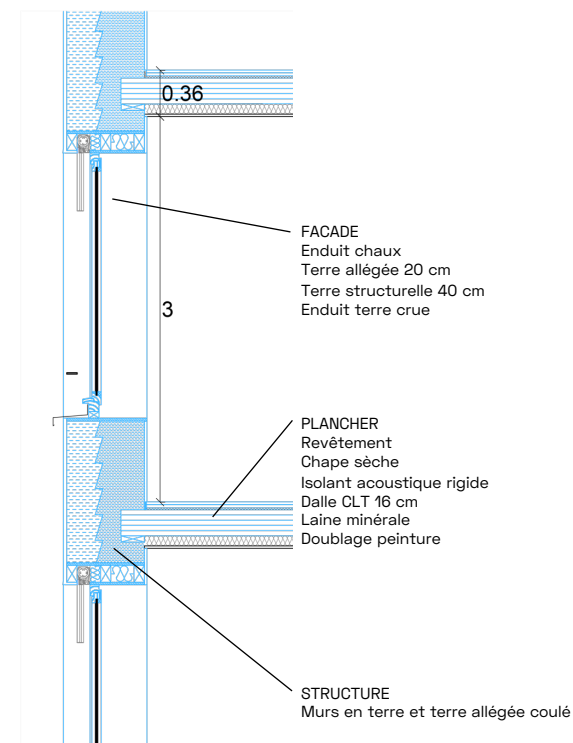
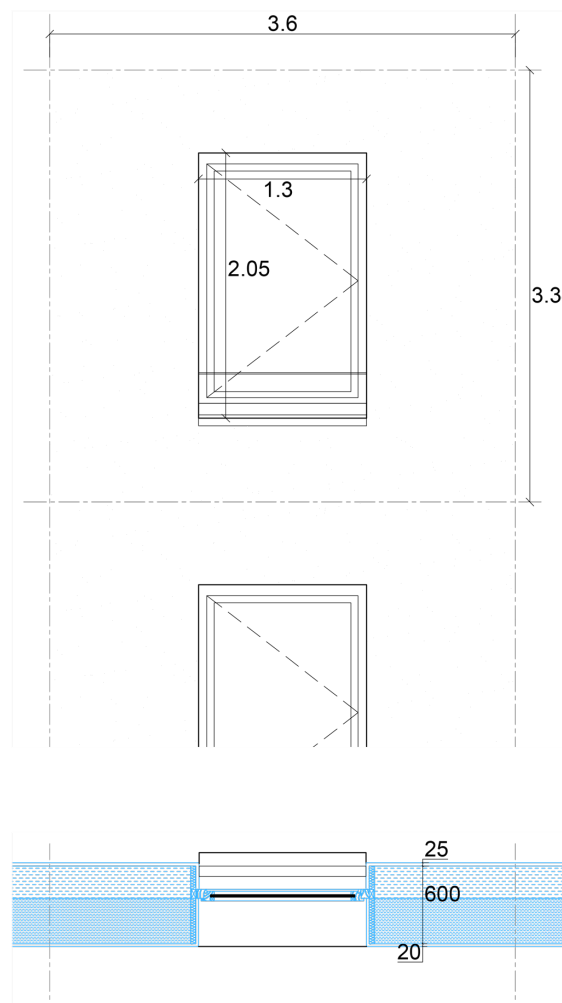
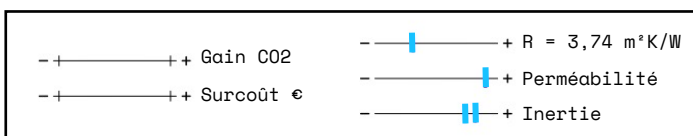
Les logements collectifs neufs

Novatrice - Déclinaison 2

NOVATRICE



La structure dans cette variante retrouve de la masse avec l'introduction de la terre crue en élément porteur. Cette variante propose une alternative au bois qui est une ressource limitée par l'emploi de terre crue locale et potentiellement issue de réemploi, de la terre étant excavée pour chaque chantier de construction neuve. Le poids de la terre limite néanmoins la massification de ce type de procédé pour des bâtiments en hauteur et contraint les possibilités de transport et de préfabrication.



- façade isolation**
 - Laine minérale
 - Fibres de bois
 - Ouate de cellulose en vrac
 - Panneau à base de ouate de cellulose
 - Bottes de paille (22cm, 36cm)
 - Paille hachée insufflée
 - Béton de chanvre
 - Laine de chanvre
 - Bloc Bâtilin
 - Panneau à base de fibres végétales (chanvre, lin, coton)
 - Terre crue et de fibres végétales [Torchie]
 - Terre crue et de fibres végétales (Terre allégée)
- façade revêtement intérieur**
 - Peinture
 - Enduit plâtre
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit terre crue
- façade revêtement extérieur**
 - Enduit ciment
 - Bardage métallique
 - Bardage bois
 - Vêture en pierre et assimilés
 - Bardage support d'enduit
 - Enduit chaux-chanvre
 - Enduit chaux-sable
 - Enduit en terre
- cloisons**
 - BA13
 - Isolation Ouate de cellulose
 - Blocs de chanvre
 - Isolation laine de chanvre type Biofib trio
 - Voiles CLT
 - Briques de Terre Crue

Les logements collectifs neufs

L'évaluation technico réglementaire

Les matériaux bio et géosourcés étaient historiquement employés pour construire mais les formes bâties ainsi que les garanties de durabilité ont évolué.

A la date de rédaction de ce rapport, les règles professionnelles de la construction à ossature bois avec remplissage en béton de chanvre encadrent des constructions dont la

hauteur est limitée à 8m pour le dernier plancher accessible. Une évolution du cadre technico réglementaire est nécessaire pour généraliser ce type de procédé constructif pour les formes bâties contemporaines. On constate néanmoins que le pas à franchir est réduit pour ce type d'opération qui pourra aller chercher un niveau d'ambition plus élevé.

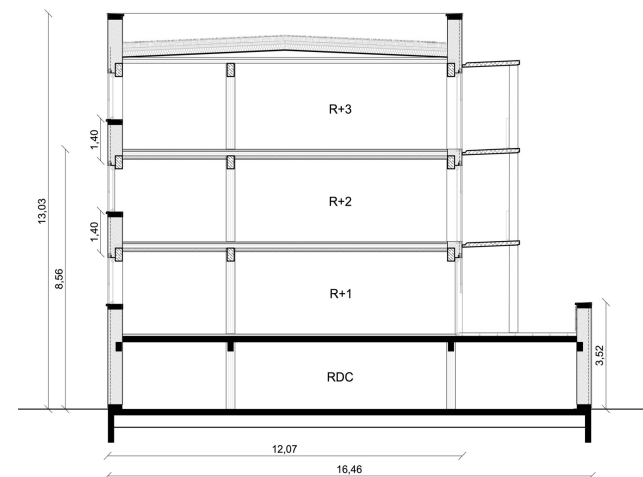
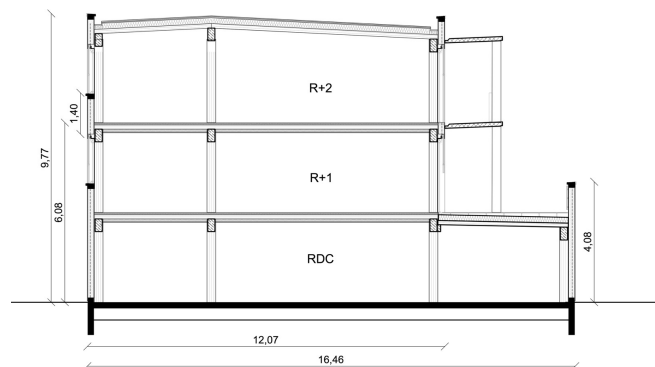
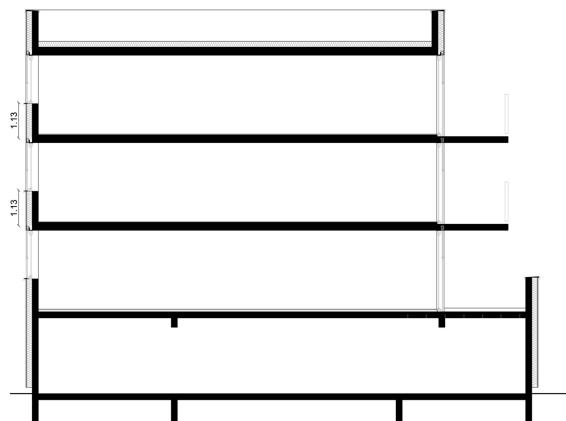
Business as usual
archétype existant

Enduit sur construction à ossature bois remplissage béton de chanvre
Cadre technico réglementaire existant

Méthode "Maillons"
prototype V0



Transitions constructives,
programmatiques, morphologiques



Les logements collectifs neufs

L'évaluation technico réglementaire

Quelle que soit la variante, une attention particulière sera à porter l'application de ce prototype de logements collectifs neufs, classés en habitation de la 2^{ème} au sens de l'arrêté du 31 janvier 1986 modifié, de façon à ce que les objectifs définis dans la réglementation incendie soient atteints.

- Cela peut par exemple se traduire par le fait de retenir d'appliquer les dispositions décrites dans l'Appréciation de Laboratoire « construction bois et propagation du feu par les façades », y compris en matière de recoupement des lames d'air et d'utilisation d'un écran thermique coté extérieur et intérieur des façades à ossature bois.

Par ailleurs les éléments biosourcés combustibles des circulations horizontales et verticales seront systématiquement protégées par un écran thermique plaqué directement contre l'élément à protégé sans passage de réseau à l'arrière de cet écran.

Variante Réalisable

Cette variante intègre différents points qui ne sont pas visés par le référentiel technico-réglementaire et génèrent ainsi différentes innovations (au sens de ce qui a été décrit précédemment) :

A. Structure : Poteaux-Poutres en bois lamellé-collé de hêtre

Le NF DTU 31.1 et le référentiel associé n'excluent pas spécifiquement le Hêtre, ils ne la visent pas non plus explicitement. Il est ainsi considéré que le système constructif **n'est pas visé** par le référentiel.

Il semblerait qu'il existe des données scientifiques et techniques pour justifier en partie l'aptitude à l'emploi du système constructif : elles restent donc à compléter, mais dans une mesure a priori réalisable.

=> Au regard des connaissances actuelles il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable sous conditions que les acteurs du projet aient bien les connaissances indiquées précédemment dans la méthodologie de définition des variantes.

Dans une stratégie de premiers retours d'expérience reconnue et réussie, le recours à des Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX) de cas b, semble être le bon véhicule de portage de ce système constructif. Une Appréciation de Laboratoire sera à obtenir sur la base d'essais de résistance au feu afin de justifier de leur performance de résistance au feu.

B. Façade : Bardage bois ventilé sur FOB remplie de laine de chanvre

Les points ci-dessous ne sont pas visés dans le référentiel technico-réglementaire existant:

- L'emploi d'un isolant en laine de chanvre botte dans une FOB n'est ni visée par le NF DTU 31.4, ni par un autre référentiel.

- L'emploi d'un bardage bois sur un support FOB n'est à date visé par aucune évaluation technique,

Des données scientifiques permettant de justifier de l'aptitude à l'emploi d'un bardage sur FOB et d'un isolant en laine de chanvre dans une FOB avec un bardage ventilé existent déjà mais seront à compléter, en particulier pour l'emploi de l'isolant en botte de paille dans la paroi (comportement hygrothermique, etc.).

C. Façade : enduit intérieur sur FOB remplie de laine de chanvre

Ce procédé d'enduit intérieur n'est pas visé par le référentiel technico-réglementaire, De nombreuses de données scientifiques et techniques seront à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

=> Outre ce procédé revêtement intérieur qui nécessitera des investigations poussées, et pour lequel il sera possible de passer sur une solution visée par le référentiel technico-réglementaire, il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable sous conditions que les acteurs du projet aient bien les connaissances indiquées précédemment dans la méthodologie de définition des variantes.

Les logements collectifs neufs

L'évaluation technico réglementaire

Variante atteignable

Cette variante intègre différents points de qui ne sont pas visés par le référentiel technico-règlementaire et génèrent ainsi différentes innovations (au sens de ce qui a été décrit précédemment) :

A. Structure : Poteaux-Poutres en bois lamellé-collé de hêtre

Pour ce procédé, les constatations sont identiques à celles émises pour la variante Réalisable.

B. Façade : Enduit à la chaux sur béton de chanvre dans une Construction à Ossature Bois porteuse (COB) et enduit de terre crue à l'intérieur

Les points ci-dessous ne sont pas visés dans le référentiel technico-règlementaire existant:

- i. L'emploi d'un isolant en béton de chanvre dans une paroi de COB à des hauteur de 13m (R+3) ;
- ii. L'emploi d'un enduit de terre crue appliqué sur la paroi en revêtement intérieur.

Des données scientifiques visant à justifier l'aptitude à l'emploi au regard du i. ci-dessus existent déjà a priori mais seront à compléter.

Le ii. Nécessite de recueillir de données scientifiques et des retours d'expérience, notamment au regard du comportement global de la paroi complète.

⇒ Au regard des connaissances actuelles il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable sous conditions que certaines adaptations soient apportées et que les acteurs du projet aient bien les connaissances indiquées précédemment dans la méthodologie de définition des variantes.

Variante Novatrice

La solution constructive proposée de porteuse en terre crue n'est visée par aucun référentiel à date.

Un nombre très conséquent de données scientifiques et techniques sera à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise et mise en application sur un projet.

=> Cette solution relevant de la R&D, il n'est pas possible à cette heure de définir un mode d'évaluation technique adapté.

Les logements collectifs neufs

L'évaluation économique

Ensemble fonctionnel

L'évaluation économique se rapporte à la superstructure de l'ouvrage du rez-de-chaussée au R+3 et R+4. Les ensembles fonctionnels utilisés sont l'enveloppe, les séparatifs intérieurs et les constructions extérieures.

Hypothèses constructives

		BAU	Réalisable	Atteignable	Novateur
Enveloppe	Plancher bas	<ul style="list-style-type: none"> - Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois - Chape thermo-acoustique 	<ul style="list-style-type: none"> - Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois - Chape thermo-acoustique 	<ul style="list-style-type: none"> - Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois - Chape thermo-acoustique 	<ul style="list-style-type: none"> - Plancher bas béton sur parking - Isolant en sous-face type fibre de bois - Chape thermo-acoustique
	Façades	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque béton - Partie vitrée : ensemble menuisé standard PVC - hypothèse 24.2% de vitrage en façade - Isolation non biosourcé - Véture de façade standard sur parties opaques - Occultations / Protections solaires : volets roulants PVC - Bloc-portes extérieures vitrées et opaques 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque type MOBE - Partie vitrée : ensemble menuisé standard bois - hypothèse 23.3% de vitrage en façade - Complexe isolant dans le MOBE : chanvre en laine - Doublage de fermeture intérieur : OSB + enduit terre crue - Véture de façade sur parties opaques : bardage bois ventilé - Occultations / Protections solaires : volets bois coulissants - Bloc-portes extérieures vitrées et opaques 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque type MOBE - Partie vitrée : ensemble menuisé standard bois - hypothèse 23.3% de vitrage en façade - Complexe isolant dans le MOBE : béton de chanvre - Doublage de fermeture intérieur : enduit terre crue - Véture de façade sur parties opaques : enduit chaux sable - Occultations / Protections solaires : volets bois coulissants - Bloc-portes extérieures vitrées et opaques 	<ul style="list-style-type: none"> - Partie opaque ossature bois + Terre Crue - Partie vitrée : ensemble menuisé standard bois - hypothèse 23.3% de vitrage en façade - Doublage de fermeture intérieur : enduit terre crue - Véture de façade sur parties opaques : enduit chaux 20mm - Occultations / Protections solaires : volets bois coulissants - Bloc-portes extérieures vitrées et opaques
	Plancher haut	<ul style="list-style-type: none"> - Structure béton - Etanchéité sur support béton - Protection d'étanchéité par gravillons - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Structure mixte bois béton - Etanchéité - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Structure mixte bois béton - Etanchéité - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Structure mixte bois béton - Etanchéité - Protection d'étanchéité par végétalisation extensive et platelage bois - Eléments en plancher haut : châssis de désenfumage, eaux pluviales, garde-corps, etc.

Les logements collectifs neufs

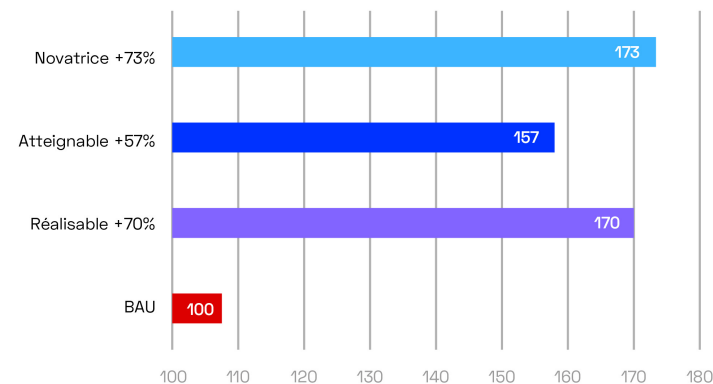
L'évaluation économique

	BAU	Réalisable	Atteignable	Novateur
Séparatifs intérieurs verticaux et horizontaux	<ul style="list-style-type: none"> - Refends béton séparatifs entre logements et entre logements / circulations - Cloisons de distribution avec laine de verre - Dalle béton - Chape acoustique - Poteaux / Poutres béton - Escaliers béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Refends CLT - noyaux - Doublage placoplâtre des noyaux en CLT - Cloisons de distribution logements en bloc de chanvre enduit 2 faces - Dalle mixte bois béton - Sous-face de dalle en placoplâtre pour stabilité au feu - Chape acoustique sèche - Poteaux / Poutres bois + encapsulage CF1h par plaque de plâtre de la structure - Escaliers béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Refends CLT - noyaux - Doublage placoplâtre des noyaux en CLT - Refends séparatifs entre logements et entre logements / circulations : Béton de Terre Crue - Cloisons de distribution logements en Fermacel avec isolation par laine de chanvre - Dalle bois CLT - Sous-face de dalle en placoplâtre pour stabilité au feu - Chape acoustique sèche - Poteaux / Poutres bois + encapsulage CF1h par plaque de plâtre de la structure - Escaliers béton 	<ul style="list-style-type: none"> - Refends CLT - noyaux - Doublage placoplâtre des noyaux en CLT - Refends séparatifs entre logements et entre logements / circulations : Terre Crue locale - Cloisons de distribution logements en Fermacel avec isolation par laine de chanvre - Dalle bois CLT - Sous-face de dalle en placoplâtre pour stabilité au feu - Chape acoustique sèche - Poteaux / Poutres bois + encapsulage CF1h par plaque de plâtre de la structure - Escaliers béton
Contructions extérieures	<ul style="list-style-type: none"> - Escaliers extérieurs métalliques + Garde-corps métal 	<ul style="list-style-type: none"> - Escaliers extérieurs métalliques : sans objet - Balcons : dalle CLT rapportée + Poteaux / Poutres bois + étanchéité + Dalles sur plots + Garde-corps bois 	<ul style="list-style-type: none"> - Escaliers extérieurs métalliques : sans objet - Balcons : dalle CLT rapportée + Poteaux / Poutres bois + étanchéité + Dalles sur plots + Garde-corps bois 	<ul style="list-style-type: none"> - Escaliers extérieurs métalliques : sans objet - Balcons : dalle CLT rapportée + Poteaux / Poutres bois + étanchéité + Dalles sur plots + Garde-corps bois

Résultats économiques [base 100]

PAR ENSEMBLES FONCTIONNELS	BAU Ratios Prix base100	Réalisable Ratios Prix base 100	Atteignable Ratios Prix base 100	Novateur Ratios Prix base 100
Bilan en Base 100	100	170	157	173
ENVELOPPE DU BATIMENT	100	141	130	152
SEPARATIFS VERTICAUX - périmètre étude partiel	100	196	147	160
SEPARATIFS HORIZONTALS - périmètre étude partiel	100	222	227	227
CONSTRUCTIONS EXTERIEURES DU BATIMENT	100	341	341	341

Le logement collectif neuf - Economie base 100



Les logements collectifs neufs

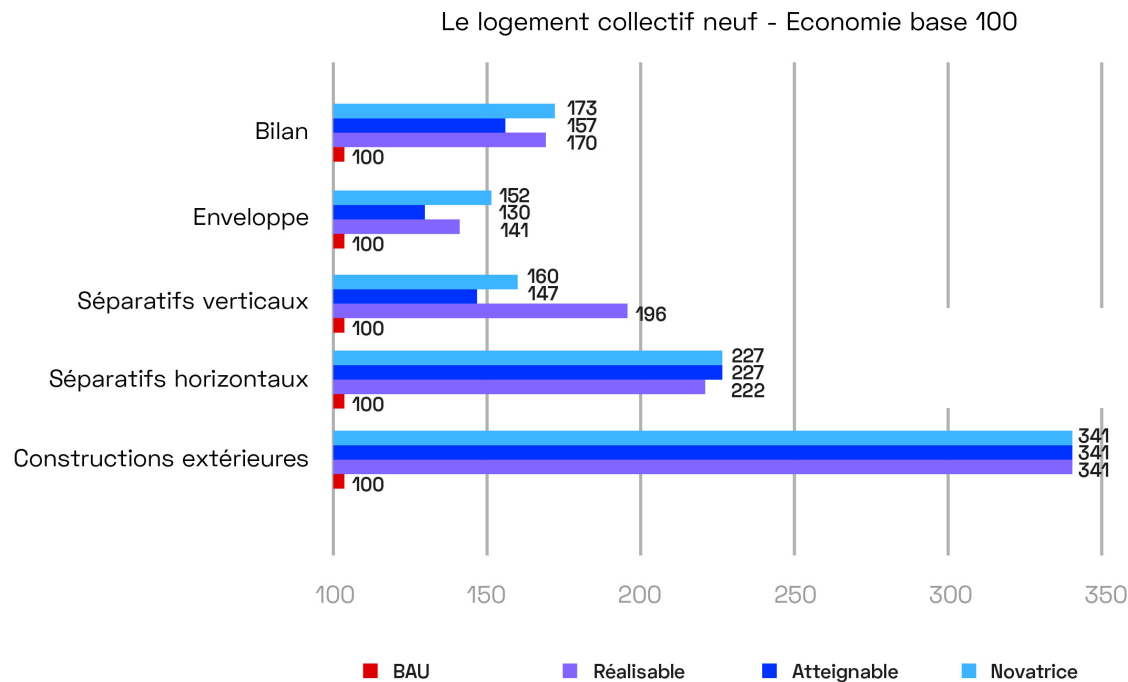
L'évaluation économique

L'impact économique majeure d'une construction biosourcée et géosourcée par rapport à celle du BAU réside une nouvelle fois dans le choix constructif du système porteur « plancher + poteaux / poutres ». En effet, en fonction du système choisi, on observe des coûts multipliés par 2,3 fois vis-à-vis du BAU.

Par ailleurs, on constate que l'évolution des coûts de l'enveloppe varie fortement entre 1,6 à quasiment 1,7 fois par rapport au BAU suivant le complexe de façade. Il en est de même pour le choix des matériaux des séparatifs verticaux des variantes : 1,5 à 2 fois plus coûteux par rapport au BAU.

Concernant l'impact des constructions extérieures, il reste élevé mais doit être décorrélé du reste car le BAU n'a pas de balcons à contrario des variantes.

Globalement, le surcoût constructif des variantes par rapport au BAU est de l'ordre de +60 à +75% suivant le périmètre fonctionnel étudié (hors aménagements intérieurs et équipements techniques).



Les logements collectifs neufs

L'évaluation carbone - réglementaire

Des gains carbone significatifs, qui permettent de converger vers le seuil RE2031

L'ensemble des variantes étudiées permet d'atteindre une réduction carbone significative sur les lots analysés, de -54% à -60%.

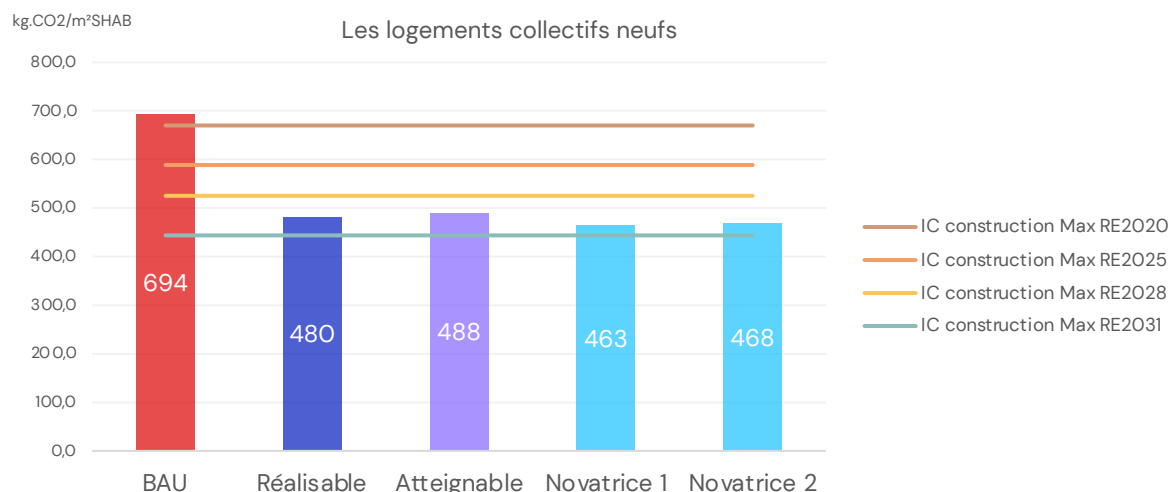
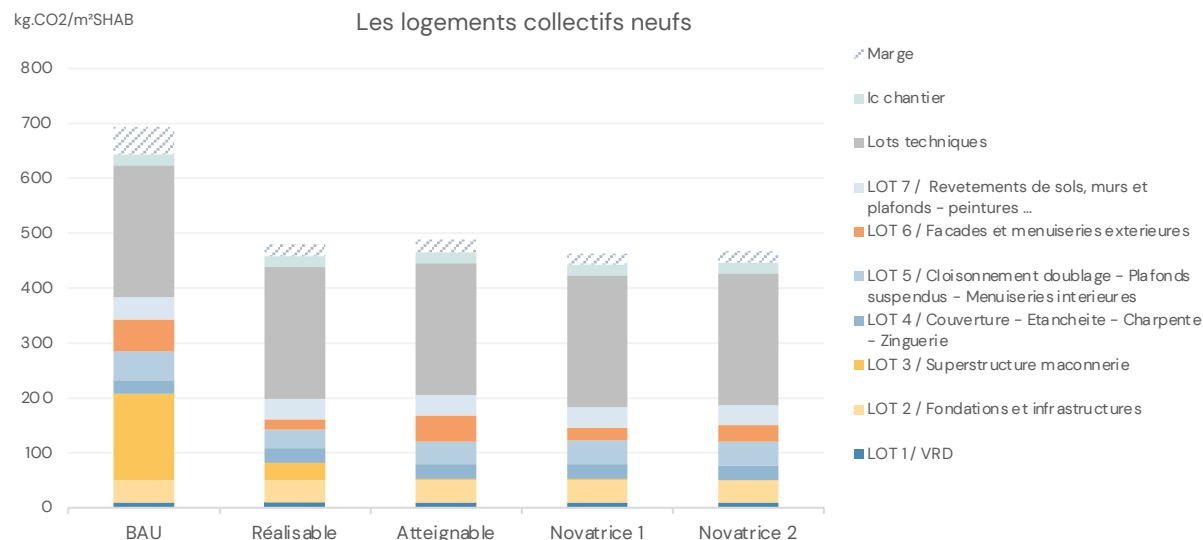
L'étude comparative des variantes de ce prototype met en évidence le poids des planchers dans le bilan carbone de l'opération. En effet, le recours aux planchers mixtes bois/béton* et CLT permet un gain respectif de 70% et 150% sur ce poste par rapport au BAU.

Les limites liées à la donnée disponible

Les variantes testées ne montrent pas d'écarts significatifs sur les empreintes carbone alors que les matériaux choisis ont a priori des impacts plus faibles, que ce soit la BTC locale ou le moindre usage de la chaux. Cela traduit le manque de données précises pour réaliser les calculs à ce jour, et le besoin de poursuivre les investissements dans les fiches FDES.

De même, la variante «réalisable» présente un impact carbone plus faible pour ce prototype, alors que la version «atteignable» semblait plus prometteuse, notamment sur le plancher CLT. Mais le choix de certaines solutions se révèle moins avantageux en termes de carbone: le béton de chanvre enduit est ainsi moins favorable que la laine de chanvre avec bardage bois.

* L'impact carbone des planchers mixtes bois/béton sont issus de FDES individuelles, caractérisant des procédés constructifs spécifiques (Dalle BB pour la variante «réalisable», Hybridal pour la variante «Novatrice 2»).



Les logements collectifs neufs

L'évaluation carbone - simulation

Test de sensibilité carbone

Les matériaux bio et géo-sourcés étant encore « jeunes » dans le processus d'élaboration des fiches FDES, nous anticipons qu'un travail d'optimisation pourrait encore en améliorer les données, même si un grand pas a déjà été franchi en remplaçant petit à petit les fiches par défaut par des fiches collectives ou individuelles.

Les pistes d'optimisation

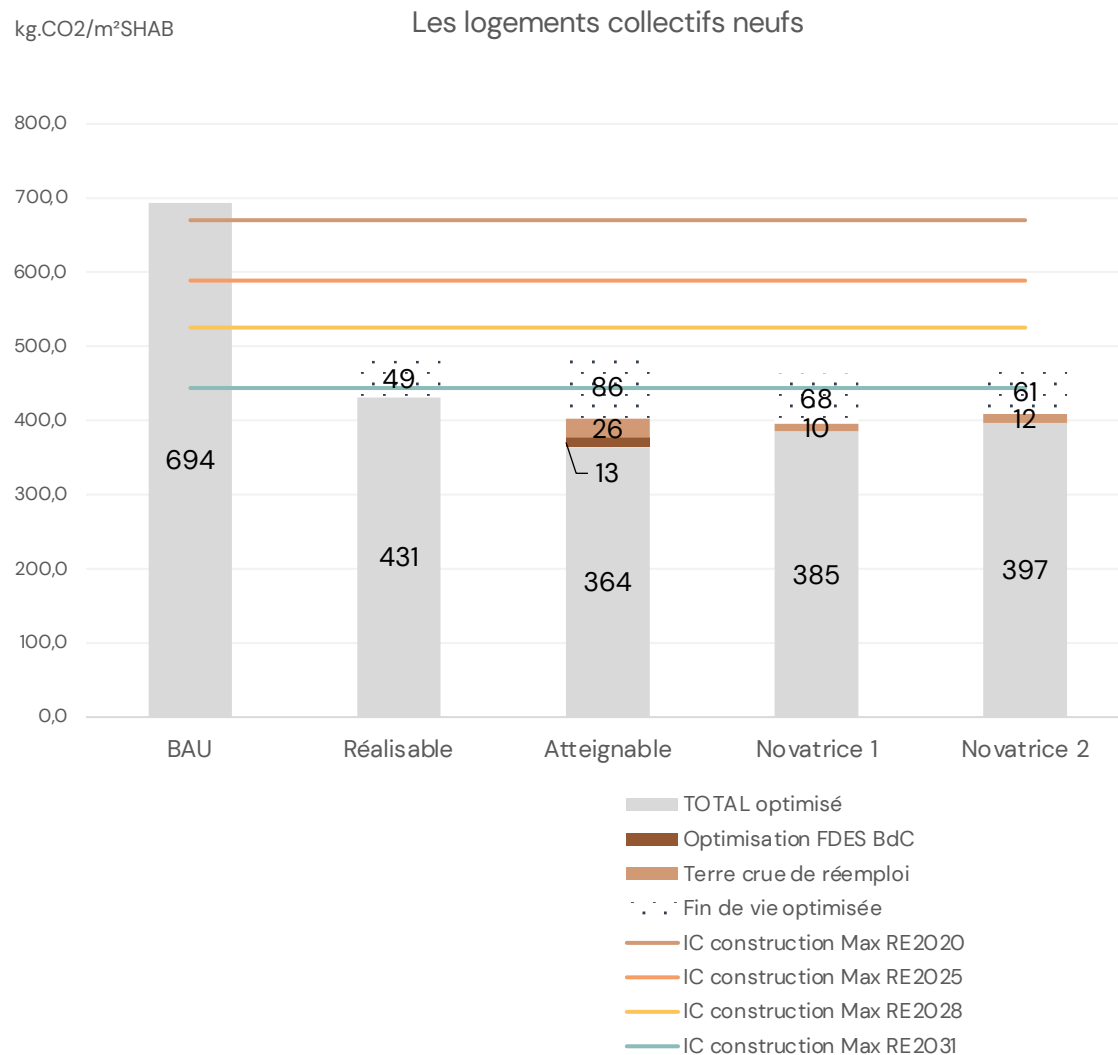
Ainsi, nous retrouvons les deux pistes explorées pour le bâtiment tertiaire :

- l'hypothèse de réduction par 2 de l'impact en fin de vie de ces matériaux
- l'hypothèse de considérer la terre comme un matériau de réemploi, et donc comptée avec un impact carbone nul.

Nous ajoutons le test consistant à remplacer une FDES collective pour le béton de chanvre par une FDES individuelle optimisée.

Des gains carbone complémentaires à évaluer

De la même manière que pour le tertiaire, il reste une contribution très élevée aux émissions carbone représentée par les lots techniques. L'hypothèse à évaluer est que l'utilisation de matériaux biosourcés et géo-sourcés tend à réduire les consommations des bâtiments et réduire les équipements techniques nécessaires au fonctionnement du bâtiment tels que la climatisation.



Les logements collectifs neufs

Mise en regard de l'avantage carbone et du coût économique

Des investissements avec des effets carbone contrastés

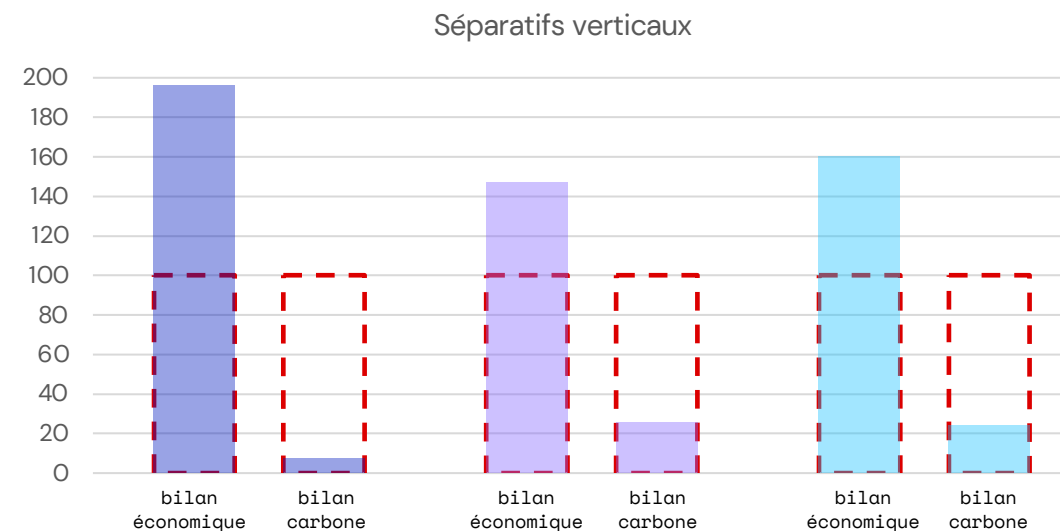
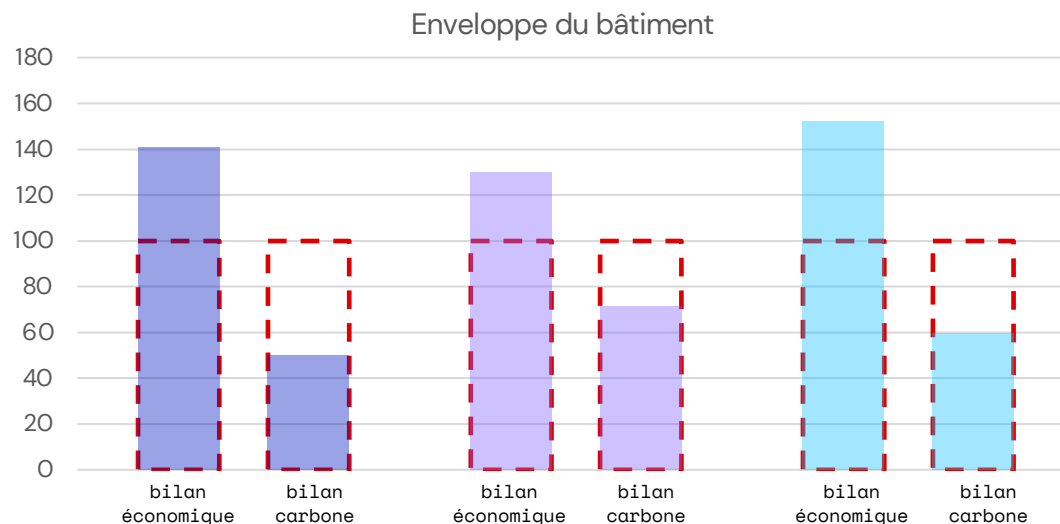
Si l'on se concentre sur l'aspect carbone, une performance carbone de l'€ investi peut être calculée, toujours à partir des bases 100 calculées.

Sur ce prototype, la conception s'est attachée à faire évoluer les cloisons, compris dans les séparatifs verticaux. La variante « atteignable » est celle qui apporte le plus d'efficacité pour l'€ investit (cloisons BTC), mais pas le maximum de gain carbone, apporté par la variante « novatrice » et ses BTC fabriquées avec la terre locale.

Concernant l'enveloppe, la variante « réalisable » et sa FOB remplissage en laine de chanvre semble être un optimum entre le coût, le gain carbone, la complexité réglementaire.

Au-delà du carbone

Le béton de chanvre et le terre-chanvre génèrent un confort thermique bien supérieur à une isolation plus standard en laine minérale. Ils bénéficient d'une capacité de régulation hygrothermique des parois, en associant inertie et perspiration, supprimant ainsi les effets de paroi froide.



3. Du prototypage à la stratégie

3.1 Bilan des prototypes

Bilan des prototypes

Les enjeux de la construction bio et géosourcé

Le travail de prototypage qui fait passer d'un Business As Usual à une variante Maillons souligne le caractère systémique d'un bâtiment, et plus encore d'un bâtiment biosourcé : le programme, la conception les matériaux ne sont pas indépendants et s'optimisent en lien permanent. **Le matériau seul ne pourra pas répondre au besoin d'une production bas carbone.**

Le croisement des sourçage filières et commandes immobilières a permis de dégager les grandes lignes des défis à relever pour généraliser ce type de procédés constructifs :

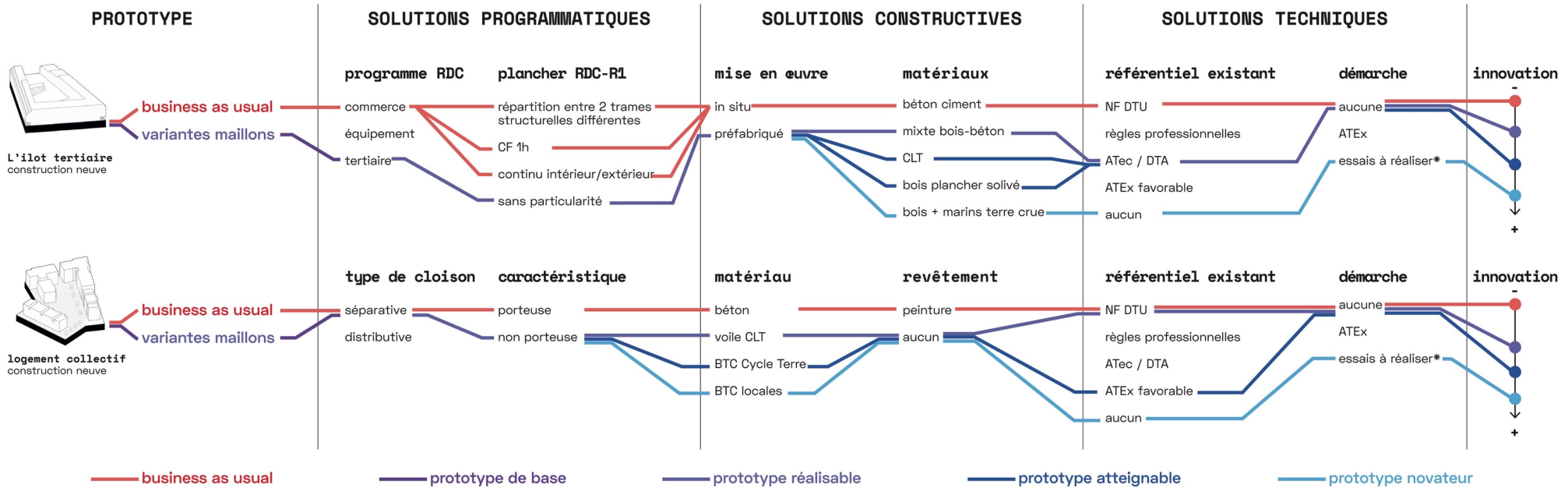
- La **hauteur** :
 - si des procédés constructifs existent et sont déjà encadrés par des règles professionnelles (telles que les règles professionnelles de la construction en paille et en béton de chanvre), ils sont restreints dans leur domaine d'application par la hauteur. Or la commande immobilière du territoire de la Vallée de la Seine doit répondre à une contrainte de densité et donc de montée en hauteur pour préserver et limiter les emprises bâties.
 - Les bâtiments de grande hauteur nécessitent également de développer un nouvel écosystème d'acteurs : la quantité de construction n'est pas encore en adéquation avec la taille des entreprises employant les matériaux bio et géosourcés qui sont en général plutôt des TPE.
- Le choix des **revêtements** :
 - au-delà du cadre normatif des procédés constructifs, les matériaux bio et géosourcés sont contraints par les conditions de mise en œuvre, comme par exemple l'enduit sur botte de paille qui implique de longs délais de pose et de séchage.
- La sécurité incendie :
 - une réflexion doit être menée pour imaginer des procédés alternatifs pour répondre aux enjeux de tenue au feu, que ce soit par la conception architecturale, en évitant par exemple de devoir créer des protections au feu, ou constructive par l'emploi de matériaux alternatifs notamment.
- **L'économie du projet** :
 - si l'utilisation des matériaux bio et géosourcés engendrent aujourd'hui des surcoûts, des facteurs conjoncturels peuvent modifier la balance tels que le coût de l'énergie (voir partie 3.3):
 - Si l'on considère uniquement le coût de la matière première, le biosourcé est le choix le plus compétitif pour une construction.

- Mais la mise en œuvre est souvent plus coûteuse en raison notamment de la non standardisation des procédés constructifs. Pourtant, en portant un regard prospectif sur l'évolution du coût de l'énergie, le biosourcé pourrait devenir le choix le plus compétitif.
- C'est également une réflexion sur le coût global des opérations à mener de manière à redistribuer les surcoûts là où ils sont nécessaires en actionnant des leviers tels que le montage de projet ou la réduction de la TVA sur certains matériaux

Le diagramme en page suivante présente les trajectoires Maillons traitées dans cette étude pour les prototypes neufs sur les façades.

Celles-ci peuvent se rencontrer ou s'éloigner selon les choix mis en avant, chacun d'eux enclenchant un pas de côté vers des solutions bas carbone.

Bilan des prototypes



*Des essais et études sont à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise, mise en application sur un ou des projets et de pouvoir mener une évaluation technique.

Fig19 : trajectoires de conception selon le degré d'innovation envisagé pour les **façades** avec l'exemple des prototypes neufs

Le "business as usual" est l'opération existante support de cette étude. Les prototypes sont les variantes étudiées dans la partie 2 : "prototype de base" ou V0 est développé à l'échelle du bâtiment. Puis à l'échelle du fragment sont élaborées des variantes selon le degré d'innovation par rapport aux techniques actuelles de construction : réalisable, atteignable, novateur.

* Règles professionnelles acceptées par la C2p

Bilan des prototypes

Vers de nouvelles variantes

Un nombre restreint de combinaisons de variantes a été développé dans le cadre de cette étude. Il s'agit d'exemples de déclinaison d'une méthodologie destinée à être déclinée soit sur d'autres ouvrages ou avec d'autres filières.

Les variantes peuvent être combinées entre elles ou il est possible également de ne réaliser en bio et géosourcé qu'une partie de bâtiment selon le degré d'innovation recherché, de manière à rester dans une économie de projet viable.

Le rôle prépondérant de la conception

L'exemple de l'ilot tertiaire neuf démontre le poids de la conception pour aboutir à une démarche économiquement viable et environnementalement sobre. En effet le passage d'un mur rideau largement vitré à une façade à ossature bois ponctuellement percée représente un gain carbone marqué sans engendrer de surcoût substantiels. Cela s'explique par la rationalisation de l'emploi de la matière utilisée au bon endroit et en quantité optimisée.

Cet exemple démontre qu'au-delà du changement de matériaux, réduire le bilan carbone d'une construction est possible par l'exploration d'un ensemble de solutions programmatiques, constructives et techniques. Celles-ci pourront se mettre en place en mobilisant un ensemble de compétences d'acteurs.rices formées et éclairées.

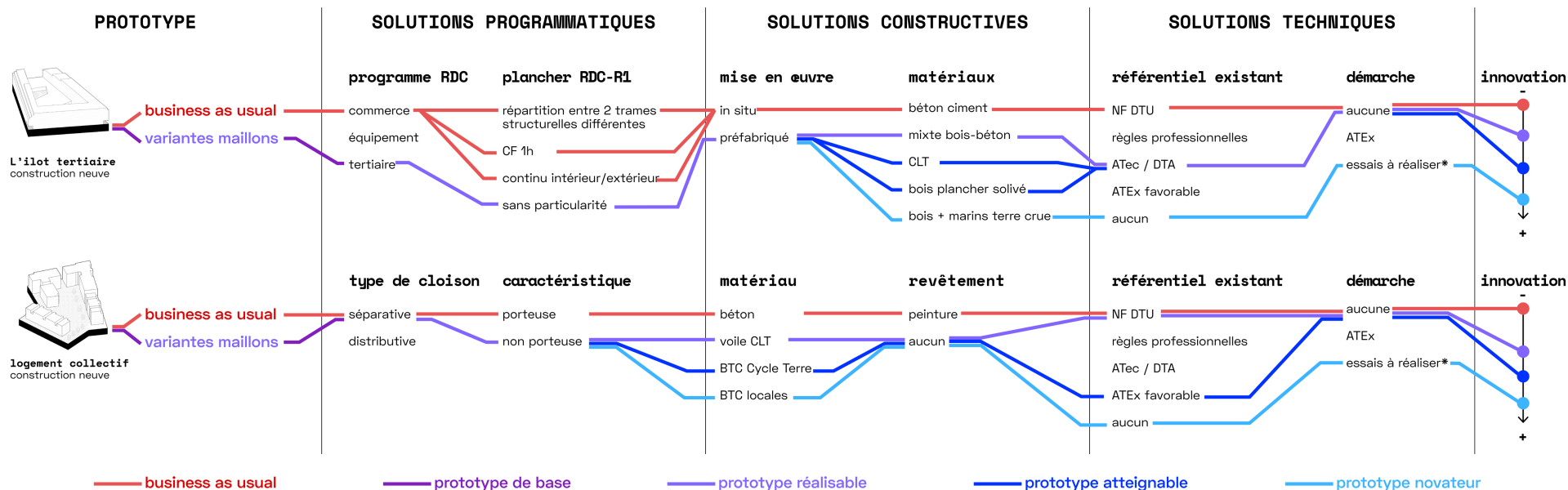
Si la transition globale vers le biosourcé peut sembler difficile à aborder, il faut avant tout établir une stratégie pour identifier où mobiliser les efforts et cibler les compétences à rassembler. Il peut être judicieux par exemple de choisir un combat à mener jusqu'au bout. Le choix peut être fait de choisir uniquement un ouvrage de bâtiment – la façade par exemple – pour pousser l'innovation très haut. A l'inverse, une autre démarche peut consister à mettre en place des variantes biosourcés sur l'ensemble du bâtiment, avec un degré d'innovation modéré.

Faire un pas de côté c'est déjà amener une pierre à l'édifice global pour faire bénéficier les opérations futures. Chaque bâtiment construit employant des procédés constructifs alternatifs sera une avancée pour les filières et permettra de pousser plus haut l'innovation pour le projet suivant.

Le diagramme en page suivante présente les trajectoires abordées dans cette étude pour les prototypes neufs sur les planchers et les cloisons.

Les trajectoires peuvent se rencontrer ou s'éloigner selon les choix mis en avant, chaque étape enclenchant un pas de côté vers des solutions bas carbone.

Bilan des prototypes



*Des essais et études sont à recueillir avant que cette solution puisse être réellement entreprise, mise en application sur un ou des projets et de pouvoir mener une évaluation technique.

Fig20 : trajectoires de conception selon le degré d'innovation envisagé pour les **planchers et cloisons** avec l'exemple des prototypes neufs

Le "business as usual" est l'opération existante support de cette étude. Les prototypes sont les variantes étudiées dans la partie 2 : "prototype de base" ou V0 est développé à l'échelle du bâtiment. Puis à l'échelle du fragment sont élaborées des variantes selon le degré d'innovation par rapport aux techniques actuelles de construction : réalisable, atteignable, novateur.

* Règles professionnelles acceptées par la C2p

Bilan des prototypes

La préfabrication comme levier économique

Bien que l'impact de solutions préfabriquées puisse être difficile à évaluer, en termes de bilan carbone et d'économie de projet, elles apparaissent être des pistes intéressantes pour la construction biosourcée.

Aussi appelée "construction hors-site", la préfabrication peut se faire en atelier, sur un chantier externe à côté du site d'assemblage, ou bien directement sur le chantier de la construction. Les éléments préfabriqués sont généralement des éléments répétitifs ou complexes et peuvent être de nature et d'ampleur diverses; la préfabrication va de la production d'une poutre à la construction modulaire. Les planchers et les murs préfabriqués sont couramment mis en œuvre.

La prise en compte du carbone, les nuisances des chantiers, une mise en œuvre accélérée, le respect des délais et le prix sont généralement des arguments qui jouent en faveur de la préfabrication. Toutefois ce mode de construction a aussi ses limites et seule une analyse comparative avec la construction in situ permet de choisir la meilleure solution pour le projet.

Les critères à analyser par exemple peuvent être :

- Coût : outil de production amorti, meilleur rendement lors de la fabrication versus coût du transport, coût des assemblages in situ, coût du stockage
- Délai : éléments préparés en temps masqué, temps de séchage éventuel, temps de pose des éléments, prévention face aux aléas climatiques
- Qualité : précision de l'élément préfa par rapport à la tolérance sur chantier versus dégâts lors du transport, qualité des assemblages
- Sécurité : ouvriers moins exposés aux conditions dangereuses versus complexité de l'assemblage de l'élément préfa
- Environnement : transport des matières premières et de l'élément préfa, levage

Par ailleurs, la construction en fibre associée à la préfabrication permet de créer des éléments légers, ce qui facilite le transport et la manutention.

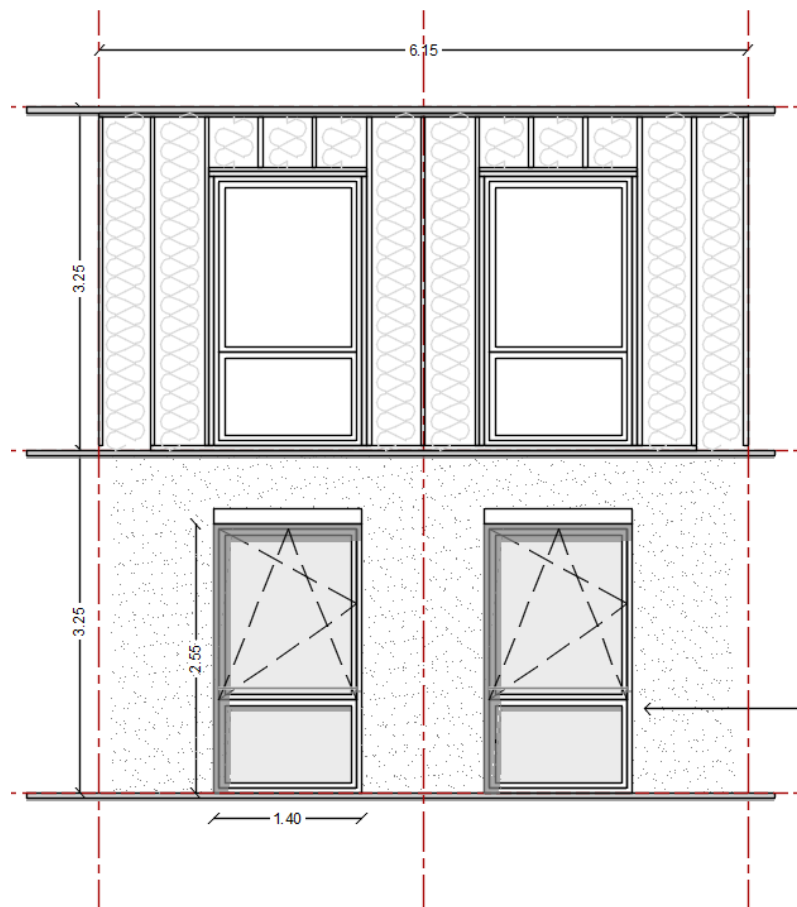


Fig21 : extrait de façade avec calepinage des châssis inséré dans une trame d'ossature bois remplissage bottes de paille

Bilan des prototypes

Modules de façade et rationalisation

L'optimisation des éléments de façade préfabriqués est un enjeu important pour la construction en matériaux bio-sourcés, puisque c'est un levier de réduction des coûts et des temps de mise en œuvre. Les voies d'optimisation actuelles, outre l'évolution du cadre technico-normatif, résident dans l'allègement des ossatures bois et dans leur fixation.

La figure 22 représente une série d'hypothèses possibles liées à la préfabrication d'une façade en MOB remplissage béton de chanvre. Les solutions pour lesquelles le plancher et la façade ne doivent pas être montés en même temps et les solutions FOB apparaissent mieux adaptées.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| A Hauteur d'étage / largeur de trame | A MOB remplissage |
| B Panneaux en U | B FOB filant devant les nez de dalle |
| C Panneaux en L | C Semi-préfa |
| D Nez de dalle / tableau de baie | D Ossature noyée |
| E Trumeau / allège | E Structure bois |
| F Allège / trumeau | F Ossature engravée |
| ... | ... |

La préfabrication comme hypothèse de projet

Le recours à la mise en œuvre d'éléments préfabriqués en phase chantier constitue une donnée d'entrée primordiale lors de la conception du projet. Il s'agit d'intégrer bien en amont du projet les paramètres liés au système constructif de préfabrication. La préfabrication, au-delà d'impacter la forme, peut parfois s'exprimer architecturalement et participer à l'identité du projet.

La préfabrication implique un dessin plus approfondi lors de la conception du projet. Il est nécessaire de mettre en adéquation le dessin architectural avec la définition des modules de matière, leurs jonctions, leurs dimensions. Dans le cas d'une façade MOB avec remplissage en paille, la préfabrication permet de s'interroger sur la dimension d'une ossature bois adaptée à la taille des bottes, le calepinage des modules de paroi, les joints entre eux, les dimensions de ces modules compatibles avec les véhicules de transport, l'intégration ou non des ouvertures et menuiseries, etc.

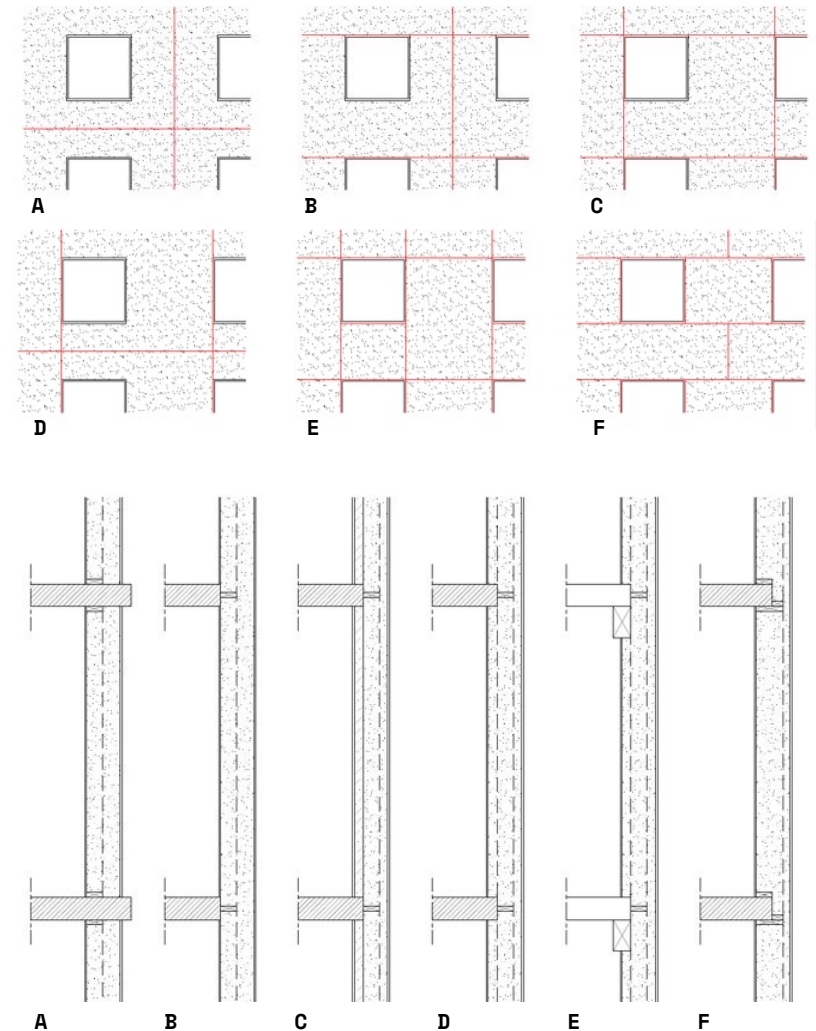


Fig22 : Calepinages possibles et diverses relations à la structure pour une façade préfabriquée.

3.2 Les maillons stratégiques

Les maillons stratégiques

Les pages suivantes reprennent les matrices de synthèse réalisées en première phase de sourçage filières. Les descriptions des différents procédés constructifs s'appuient sur l'étude de sourçage établi en phase 1 de l'étude Maillons.

La partie intégrale des informations pourra être retrouvée dans le livrable de sourçage filières Maillons.

Les procédés constructifs présentés sont uniquement ceux développés dans les prototypes, comme étant les plus compatibles vis-à-vis des bâtiments retenus pour cette étude. Pour mémoire, ces bâtiments ont été sélectionnés comme étant les plus représentatifs de la commande immobilière actuelle. Les autres procédés constructifs ne sont pas ici développés et pourraient être mobilisés selon l'évolution de la commande immobilière.

Les matrices de synthèse sont augmentées de maillons en pointillés bleus sélectionnés et identifiés lors de cette phase de prototypage comme élément stratégique pour la construction en matériaux bio et géosourcés.

Les maillons stratégiques

Rappel des indicateurs de maturité

	à l'échelle des deux régions		à l'échelle nationale		à l'échelle des deux régions		à l'échelle nationale		ACTUEL	STRATEGIE
	RESSOURCE (échelle locale)	MATÉRIAUX (échelle locale)	TECHNIQUES CONSTRUCTIVES (échelle nationale)	CADRE NORMATIF (échelle nationale)	COMPETENCES (échelle locale)	ARCHITECTURE (échelle nationale)	PROGRAMME (échelle nationale)	INVESTISSEURS (échelle nationale)		
Niveau 0	Pas de ressource disponible sur aucune des 2 régions	Performances non caractérisées	Pas de prototype (ni échelle 1:1 ni procédé constructif)	Pas de cadre normatif existant	Pas d'entreprise qualifiée sur le territoire	Pas de bâtiment qui fasse référence *	Uniquement des bâtiments démonstrateurs	Pas d'investisseur intéressé hors expérimentation	<i>Pas de rond</i>	<i>Pas de rond</i>
Niveau 1	Ressource disponible ET Application identifiée ou pressentie	Performances caractérisées (thermique, acoustique, environnement : idéalement FDES) ET < 2 entreprises de fabrication	Au moins 1 prototype (échelle 1:1 du procédé constructif) déjà réalisé dans un cadre expérimental (à l'échelle nationale)	Référentiel classé en technique non courantes et non traditionnelles	1 entreprise qualifiée	1 référence * architecturale significative	Application du système technique sur une seule typologie de programmes (usages : bureaux, logements individuels, collectifs, équipements ..., nbr de niveaux, etc.)	Uniquement des MOA directes (investisseurs utilisateurs en propre, hors bailleur social)		
Niveau 2	A minima une exploitation agricole ET Application identifiée	Performances caractérisées (thermique, acoustique, environnement : idéalement FDES) ET Entre 2 et 4 entreprises de fabrication	Entre 1 et 10 bâtiments livrés, considérés comme des « expériences réussies et reconnues » (à l'échelle nationale)	Au moins un référentiel classé en technique courantes mais non traditionnelles (ATEX, ATEc, ...)	Plusieurs entreprises qualifiées ET Quelques MOE formées	Plusieurs références * architecturales significatives	Application du système technique sur plusieurs typologies de programmes (usages : bureaux, logements individuels, collectifs, équipements ..., nbr de niveaux, etc.)	Une diversité de MOA intéressée : directe et indirecte, bailleur social, ...		
Niveau 3	Niveau 2 + Ressource abondante	Performances caractérisées (thermique, acoustique, environnement : idéalement FDES) ET Au moins 5 entreprises de fabrication	Plus de 10 bâtiments livrés considérés comme des « expériences réussies et reconnues » (à l'échelle nationale)	Référentiel classé en techniques courantes et traditionnelles (Règles Pro, DTU, ...)	Plusieurs entreprises qualifiées ET Nbreuses MOE formées	Nombreuses références* architecturales significatives	Tout programme, toute hauteur	Tous les types d'investisseurs sont intéressés		
Niveau 4		Niveau 3 + Standardisation de produits sur le marché	Optimisation des techniques reconnues pour concurrencer les techniques BAU	Extension de référentiel classé en techniques courantes et traditionnelles (Règles Pro, DTU, ...)	Plusieurs entreprises qualifiées ET Toute la MOE formée	Massification des références* architecturales significatives	Niveau 3 + Le matériau devient un prérequis des cahiers des charges	Niveau 3 + Les investisseurs privilégient cette solution au BAU		

* La notion de « référence » architecturale assume ici une dimension qualitative : appréciation de la reconnaissance d'un projet par les acteurs de la construction

Les maillons stratégiques

La filière bois

Une filière puissante et mature

La filière bois est globalement très structurée avec des systèmes constructifs bénéficiant d'un cadre technico normatif mature. Les procédés constructifs qui emploient le bois et développés ici sont généralement préfabriqués en atelier permettant une optimisation des délais de chantier.

Si la ressource en bois est abondante localement, un effort est à réaliser pour tracer l'origine du bois et privilégier les bois locaux, à savoir les feuillus sur le territoire étudié de la Vallée de la Seine. L'emploi de ces bois feuillus devra s'accompagner de certaines évolutions technico normatives pour l'inclure explicitement dans les textes de référence.

L'essor du bois dans la construction peut également mener à une nouvelle filière de bois réemployé issu de chantiers de déconstruction.

Le bois est compatible et nécessaire pour l'emploi d'une grande variété d'autres matériaux bio et géosourcés. Le rythme des constructions sera néanmoins à questionner de manière à ne pas peser trop lourdement sur la filière et la ressource. Cela va dans le sens d'une nécessaire réduction des constructions neuves au profit de rénovations et extensions d'édifices existants.

Un bilan carbone très favorable mais des surcoûts importants pour la structure

Au regard de l'application de la RE2020, le recours au bois permet d'intégrer des données négatives dans le bilan carbone. L'exemple des planchers met ainsi en évidence la réduction du bilan carbone de 150% pour un plancher CLT en remplacement d'un plancher béton. Mais c'est également une source de surcoût important entre 1,7 et 3,2 fois le coût d'une structure béton. Cela est dû à un surdimensionnement de la structure bois pour atteindre des portées permises avec le béton. A cela s'ajoutent des ouvrages supplémentaires afin d'atteindre les performances du béton. Que ce soit pour l'acoustique, la tenue au feu ou l'inertie du bâtiment, il est nécessaire pour répondre aux contraintes réglementaires actuelles de compléter un plancher bois avec une chape et/ou un plafond.

L'utilisation du bois doit donc s'accompagner d'une évolution de la commande immobilière. En attendant, le recours au béton n'est pas totalement à rejeter pour répondre aux besoins notamment en territoire dense pour des formes urbaines de grande portée et à mixité programmatique. Pour la suite, il s'agira de trouver des solutions alternatives une piste d'évolution telle que l'emploi de la terre crue dans des procédés constructifs préfabriqués ou de béton recyclé.

Les procédés constructifs étudiés sont détaillés ici en se focalisant sur les opportunités offertes et les obstacles actuels à franchir :

Voile et plancher en panneau bois lamellé-collé croisé (CLT – "Cross Laminated Timber")

Il s'agit d'une solution alternative biosourcée connue et largement employée pour des bâtiments d'une hauteur de plancher bas du dernier niveau entre 8 et 28m, couvert par des Avis Techniques et des Documents Techniques d'Application.

La limite du domaine d'application concerne les revêtements extérieurs limitant la hauteur de façade selon les évaluations à 18m ou 9m et les revêtements de sol en pièce humide avec douche sans ressaut.

La majorité des produits sont actuellement fabriqués à partir d'essences résineuses de type épicéa et sapin. Une attention doit être portée sur la ressource pour privilégier des essences de bois locales.

Poteaux-poutres lamellé collé de hêtre

Ce procédé constructif est cadré par le NF DTU 31.1 pour des bâtiments dont la hauteur du plancher bas du dernier niveau au sens de la réglementation incendie est comprise entre 8 mètres et 28 mètres, ce qui permet de répondre aux enjeux de la commande immobilière.

Cependant, ce référentiel ne vise pas explicitement certains bois locaux tels que le hêtre que l'on retrouve sur le territoire normand, sans pour autant l'exclure. Il ne semble pas y avoir de difficulté infranchissable à employer cette essence. Portée par de premiers retours d'expériences réussies, une extension du cadre normatif à des essences de bois locales permettrait d'en promouvoir l'usage.

[Voir la suite page suivante](#)

Les maillons stratégiques

La filière bois

Construction à Ossature Bois (COB)

Les parois à ossature bois permettent d'optimiser la quantité de bois employée par rapport à des parois massives. Ce procédé est visé par le NF DTU 31.2 pour une hauteur du plancher bas du dernier niveau inférieure à 8m. Les COB peuvent également être utilisées en attique ou en surélévation de bâtiments existants, dans la limite de 4 niveaux cumulés et d'une hauteur de plancher bas du dernier niveau à 28m au sens de la réglementation incendie.

Cette technique est engageante pour répondre aux demandes de la commande immobilière sur constructions existantes mais c'est généralement le procédé de revêtement extérieur qui limite le domaine d'emploi. En effet, les procédés de revêtement extérieur sous évaluation technique disponibles actuellement couvrent, au mieux, un emploi pour une hauteur de façade jusqu'à 18m, mais la majorité des évaluations sont plutôt limitée à une hauteur de façade à 9m.

De nombreuses actions sont engagées par les acteurs pour que les limites de hauteur atteignent des valeurs plus élevées, on peut notamment citer le travail d'Adivbois et du Club Des Industriels d'Adivbois (voir les publications du Club pour plus de précision).

Façade à Ossature Bois (FOB)

Les Façade à Ossature Bois sont des éléments de façades rapportés directement sur la superstructure du bâtiment. Elles sont non porteuses et non contreventantes, ces fonctions étant assurées par la superstructure du bâtiment.

Ce type de procédé est visé par le NF DTU 31.4 pour les bâtiments d'une hauteur du plancher bas du dernier niveau au sens de la réglementation incendie comprise entre 8 mètres et 28 mètres.

Cette technique est prometteuse pour répondre aux besoins de la commande immobilière en construction neuve avec des facteurs limitants sur le remplissage de l'ossature et le procédé de revêtement extérieur qui nécessiteront des évolutions.

Bardage extérieur en bois

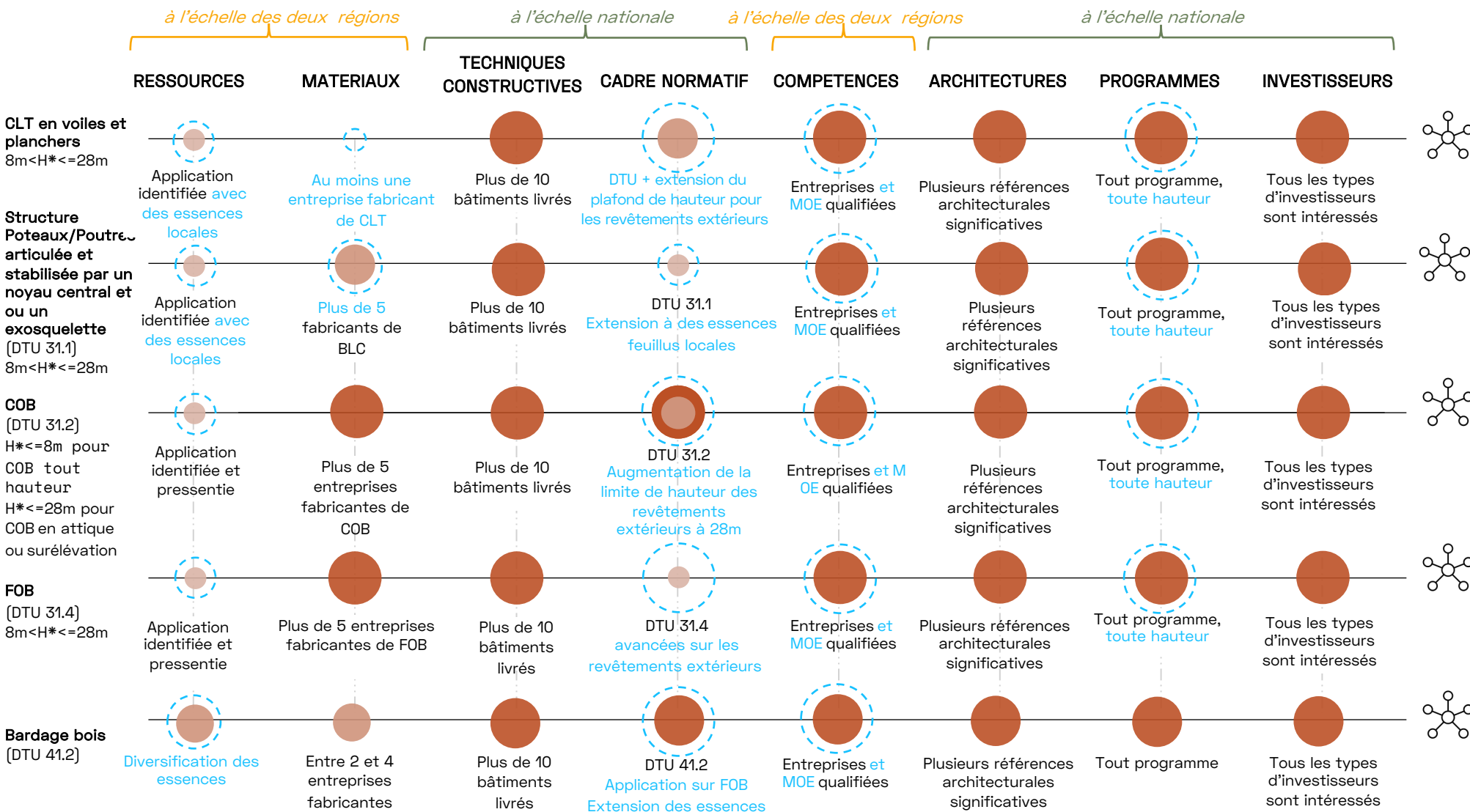
Ce procédé constructif est visé par le NF DTU 41.2 pour des bâtiments d'une hauteur jusqu'à 28 mètres.

Si le chêne et le hêtre sont bien visés, toutes les essences de bois ne le sont pas. Le support du bardage bois est également à interroger. En effet, l'emploi d'un bardage bois sur support FOB n'est actuellement visé par aucun référentiel.

La matrice de la page suivante résume ces différentes observations de manière schématique et synthétique.

Les maillons stratégiques

La filière bois



Les maillons stratégiques

La filière paille

Un réseau actif et engagé pour un produit prometteur

Ressource abondante sur le territoire, la paille est un matériau très économique. La structuration de la filière permet de développer un réseau d'acteurs. rices formés et engagés permettant de diffuser des retours d'expérience de plus en plus nombreux.

Si des règles professionnelles existent, elles ne visent que la paille de blé. Dans une optique de diversification, l'extension à différentes pailles - riz ou seigle par exemple - ouvriraient de nouveaux potentiels.

La paille est conditionnée en bottes dans les dimensions sont contraintes aux botteleuses actuelles. Le développement de nouveaux équipements offrirait des dimensions de bottes réduites pour répondre notamment aux contraintes d'optimisation foncière en secteur tendu.

Les procédés constructifs étudiés sont détaillés ici en se focalisant sur les opportunités offertes et les obstacles actuels à franchir :

Isolation thermique de murs à ossature bois avec des bottes de pailles (COB)

Cette technique consiste à remplir des murs à ossature bois de bottes de paille. Ce procédé est économiquement très compétitif et la préfabrication des panneaux permet de réduire les délais de chantier.

Dans le cas de la Construction à Ossature Bois (COB) les murs sont porteurs. Cette technique est visée par les Règles Professionnelles de la Construction en Paille pour des bâtiments dont la hauteur du plancher bas est limitée à 8m. La limitation en hauteur est un frein pour répondre aux enjeux actuels de la commande. L'objectif est donc d'augmenter le plafond de hauteur ou d'identifier la limite de hauteur pas uniquement à partir du sol. En effet, les COB paille présentent l'avantage de la légèreté et représentent ainsi un potentiel pour les extensions sur bâtiments existants.

Isolation thermique de façades à ossature bois avec des bottes de pailles (FOB)

Les façades à Ossature Bois sont également des caissons bois remplis de bottes de paille sans caractéristique structurelle.

Ce procédé n'est pas visé par les Règles Professionnelles de Construction en Paille. Le DTU 31.4 relatifs aux FOB n'inclue pas le remplissage en bottes de paille. Ce dernier référentiel étant paru récemment pourrait conduire à faire évoluer les Règles Professionnelles pour inclure le procédé de FOB. Cette technique offre une opportunité pour la montée en hauteur et répondre aux demandes de la commande immobilière en secteur tendu.

ITE de murs avec bottes de pailles (enduit ou ossature secondaire)

L'isolation thermique en paille consiste à fixer des bottes de paille directement à la structure existante ou à remplir une ossature complémentaire avec des bottes de paille.

Les bottes de paille de dimensions standard de 36cm conduisent à un complexe de façade très important. Le poids d'une telle isolation est à considérer avec un diagnostic structure préalable.

En rénovation, le recours à une ossature bois pour la mise en œuvre d'une isolation est beaucoup plus onéreuse que l'installation isolant par panneaux chevillés sur la structure existant : c'est un surcoût de + 170% par rapport au Business As Usual.

Cependant cette technique permet également de réaliser un bilan carbone négatif à l'opération là où aucune réglementation ne l'exigeait. Une piste d'optimisation est le recours à des mise en œuvre alternatives sans recours au bois telle que la technique des sangles développée en ITE à Paris 15^e.

Aucun référentiel ne vise ce type de procédé, bien qu'il puisse se rapprocher de la conception d'une COB remplissage paille. Face à l'enjeu actuel que représente la rénovation, il est essentiel que les cadres technico normatifs étendent leur domaine d'application à ce marché.

Paille hachée insufflée : isolation thermique en vrac de paroi à ossature bois

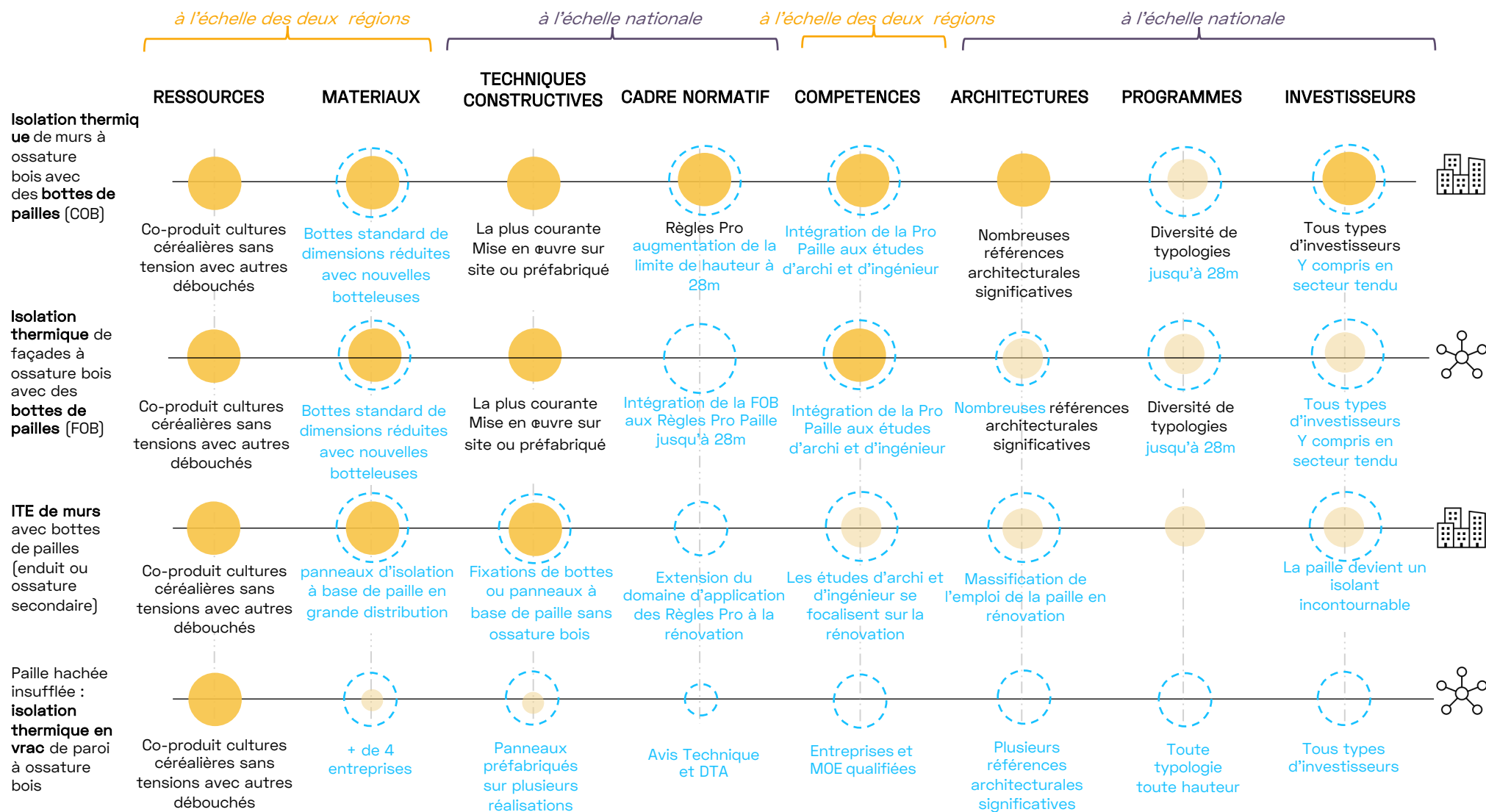
La paille hachée insufflée en vrac n'est visée actuellement par aucun référentiel technico normatif mais plusieurs opérations font actuellement l'objet d'ATEX de cas B avec un suivi d'expérimentation.

Cette technique ouvre un nouveau champ de possible pour la paille sans contrainte des dimensions des bottes. Insufflée en vrac en plancher ou en mur, cette technique peut répondre à la demande de massification en rénovation comme en construction neuve dans une enveloppe économique modérée.

La matrice de la page suivante résume ces différentes observations de manière schématique et synthétique.

Les maillons stratégiques

La filière paille



Les maillons stratégiques

La filière chanvre

Engagée vers la massification mais une faible production locale de ressource

La filière est structurée et bénéficie d'un cadre technico réglementaire avec des Règles Professionnelles. Des produits préfabriqués en béton de chanvre sont en essor, démarche engageante pour la massification de cette ressource dans la construction. Le chanvre peut être employé grâce à un cadre normatif permettant de construire des bâtiments dont la hauteur peut aller jusqu'à 8m. Une piste d'évolution est l'extension de ces règles professionnelles à des bâtiments dont la hauteur du dernier plancher peut aller jusqu'à 28m.

Cependant, la valorisation de la fin de vie du béton de chanvre est à développer. Si la France est le deuxième producteur mondial, localement le territoire d'étude ne comporte pas d'importantes cultures. La proximité de l'Ile-de-France et de la forte demande en construction peut être un argument pour l'installation de nouveaux producteurs.

Les procédés constructifs étudiés sont détaillés ici en se focalisant sur les opportunités offertes et les obstacles actuels à franchir :

Murs en maçonnerie en blocs de béton de chanvre à emboîtement

Le bloc de béton de chanvre se présente comme un substitut sain et écologique au bloc de béton de granulats ou de terre cuite couramment utilisé pour la construction de maison individuelle. Il a les mêmes dispositions générales, mais a quelques avantages sur le plan de la mise en œuvre, comme sa légèreté et sa pose par emboîtement sans mortier. Le prix du système est attractif. En revanche, sa faible capacité portante limite son emploi à des bâtiments en R+1 maximum avec toiture légère.

A la date de rédaction, il n'existe pas de référentiel technique traditionnel visant ce procédé, mais il existe un Avis Technique (ATec) sur liste verte de la C2P pour le procédé de blocs de chanvre à emboîtement BIOSYS. Ce procédé vise les murs en maçonnerie en bloc de béton de chanvre à emboîtement, associés à une structure porteuse en béton armée de type poteau-poutre coulé. La dissociation du béton de cette technique constructive est souhaitable pour améliorer le bilan carbone. En attendant, cela demeure une alternative pour les projets de rénovation.

Isolation de mur (Entre ossature bois, Intérieur en doublage) avec du béton de chanvre

Le béton de chanvre peut être utilisé en remplissage de MOB ou projeté mécaniquement sur une surface verticale ou en déversement sur des surfaces obliques ou entre des banches. Les panneaux peuvent être préfabriqués optimisant les délais de chantier. Son

point faible est un temps de séchage entre 8 et 12 semaines. Cette technique est visée par Les Règles Professionnelles pour des bâtiments visés sont les logements jusqu'à R+2+combles et les établissements recevant du public de 5ème catégorie dont la hauteur est limitée à R+2. Pour répondre aux enjeux actuels de la commande immobilière il faudrait augmenter le plafond de hauteur du plancher bas à 28m et intégrer le procédé constructif de FOB avec remplissage béton de chanvre. Sa capacité d'adaptation à toutes les géométries bâties en fait une solution idéale pour les projets de rénovation.

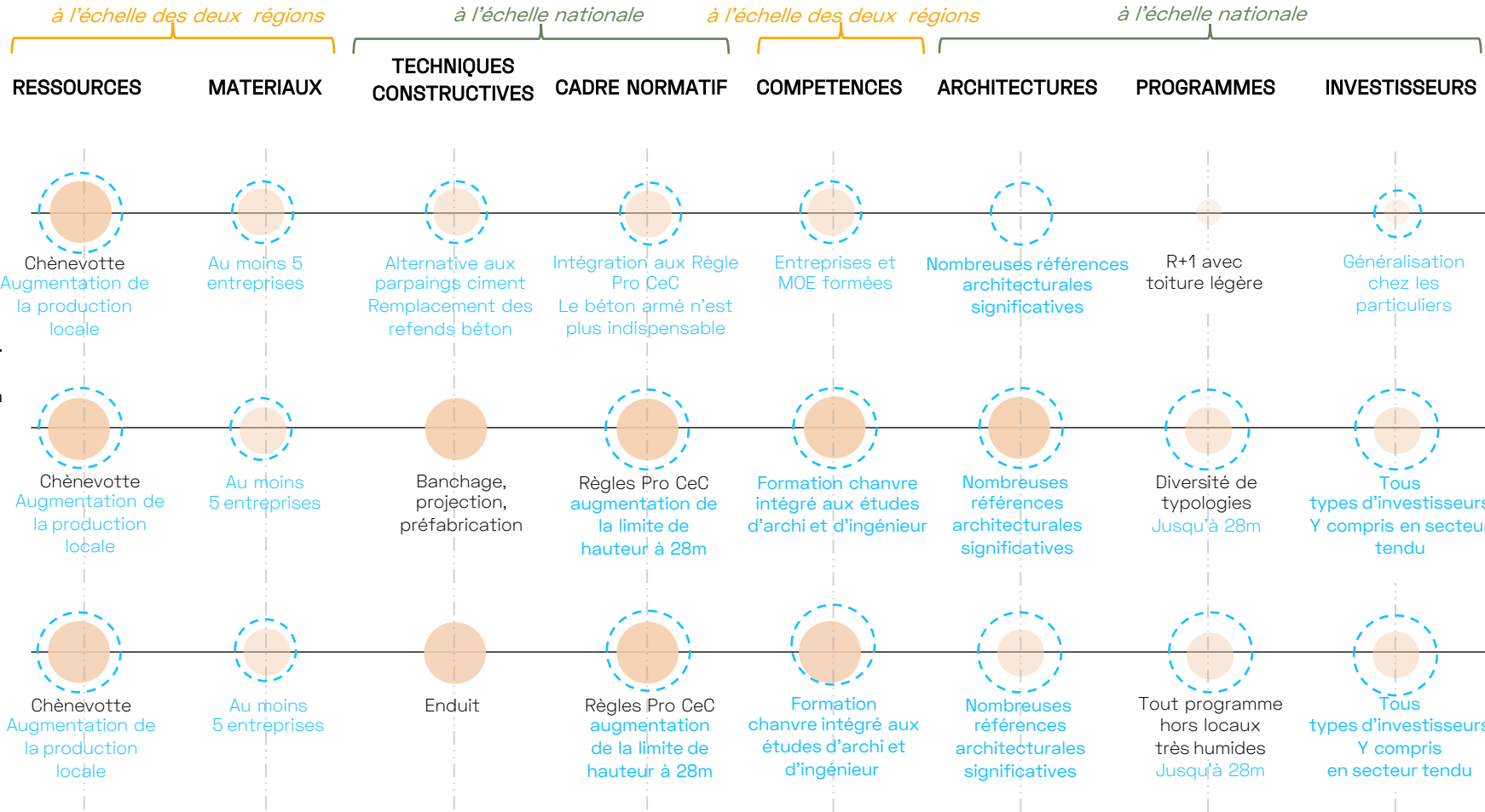
Enduit mural Int/ext en mortier de chanvre

L'enduit chanvre peut être mis en place manuellement ou mécaniquement, en projection, en intérieur comme en extérieur. Les enduits assurent les fonctions d'isolation thermique, d'esthétique et améliorent l'acoustique des pièces dans lesquelles ils sont mis en œuvre. L'enduit chaux-chanvre peut être utilisé sur des supports variés tels que la pierre, la brique, etc. et il permet de conserver l'inertie des murs anciens tout en enlevant la sensation de paroi froide. Il est ainsi particulièrement indiqué en rénovation pour homogénéiser un support fait de plusieurs matériaux ou sujet à fissures et pour éviter les ponts thermiques. Il corrige les défauts de planéité des murs traditionnels car il peut s'appliquer en très forte épaisseur (jusqu'à 8cm). A la date de rédaction de ce rapport, cette technique est visée par les règles professionnelles « Exécution d'ouvrages en béton de chanvre : Mur en béton de chanvre, isolation de sol en béton de chanvre, isolation de toiture en béton de chanvre, enduits en mortiers de chanvre » pour des bâtiments visés sont les logements jusqu'à R+2+combles et les établissements recevant du public de 5ème catégorie dont la hauteur est limitée à R+2. Tout comme le béton de chanvre, l'enjeu ici est la montée en hauteur pour s'adapter aux demandes du marché immobilier.

La matrice de la page suivante résume ces différentes observations de manière schématique et synthétique.

Les maillons stratégiques

La filière chanvre



Les maillons stratégiques

La filière terre

Une ressource abondante

La terre crue est un matériau massif qui apporte un grand confort d'usage : inertie, gestion de l'hygrométrie, tenue au feu, affaiblissement acoustique et confort d'été. Associé à des matériaux d'isolation adaptés, elle permet de répondre aux enjeux environnementaux du secteur du bâtiment. L'emploi de la terre crue représente une excellente association avec les autres matériaux biosourcés légers et peut devenir une alternative au béton grâce à ses caractéristiques acoustiques et de tenue au feu.

Si la ressource est abondante partout, ses caractéristiques sont très variables d'un gisement à un autre. Un levier pour l'emploi de la terre crue dans la construction serait la généralisation sur le territoire de plateforme de récupération de terres excavées issues de chantiers, triées en utilisation potentielles : que ce soit en substrat pour les plantations ou en tant que matériau de construction. Dès lors, la terre crue pourra être considérée comme matériau de réemploi et ainsi mieux comptabilisée dans le bilan carbone des opérations.

L'ensemble des acteurs.rices de la chaîne de production sont représentés.es mais en trop faible nombre et les qualités de ce matériau reste encore assez méconnu chez les prescripteurs.rices. L'atelier autour de la filière terre crue a fait émerger le fort potentiel de la terre allégée pour la massification dans la construction. Le développement de ce type de procédé notamment en panneaux préfabriqués pourrait améliorer l'intégration de ce matériau dans les constructions.

A la date de rédaction, il existe un référentiel technique de type guide de bonnes pratiques pour des terres crues. Celui-ci est subdivisé en 6 procédés : bauge, briques de terre crue, enduit terre, pisé, terre allégée, et torchis. Mais ce guide et les procédés développés ne sont pas reconnus en technique courante. Pour la prescription et l'emploi de ces procédés sur une opération, il est donc nécessaire de qualifier le risque et de réaliser les tests pour démontrer la viabilité du procédé constructif. Les constructeurs.rices devront vérifier leur capacité à assurer des travaux en technique non courante ou avoir recours à des démarches de types ATEX pour que le procédé soit considéré comme une technique courante.

Les procédés constructifs étudiés sont détaillés ici en se focalisant sur les opportunités offertes et les obstacles actuels à franchir :

Murs porteurs en terre crue avec des fibres végétales (Bauge) (Paille, Chanvre)

La bauge est une technique ancestrale et régionale offrant de nombreux atouts pour le confort intérieur des constructions. Traditionnellement les murs sont montés sur site et des entreprises mécanisent le mélange ou la mise en œuvre notamment à l'aide banche. Un temps de séchage conséquent de l'ordre de 3 semaines est à intégrer à l'organisation de chantier. S'il existe un premier référentiel utile de guide de bonnes pratiques, cela ne permet pas encore d'identifier ce procédé constructif comme technique courante. Il conviendra donc d'identifier les performances recherchées et les risques associées pour définir un protocole d'essais à réaliser et dont les résultats devront être reconnus par le contrôleur technique.

Cloison en maçonnerie de briques de terre compressée

Plusieurs entreprises réalisent et produisent ce type de procédé encore méconnu. Esthétique et garant d'un confort intérieur tempéré en toute saison, les cloisons de briques de terre crue demeurent un produit onéreux par rapport à des techniques conventionnelles en béton de ciment. Il existe une ATEX de cas « a » favorable permettant d'identifier ce procédé en technique courante. Ce procédé est destiné à la réalisation de cloisons en maçonnerie de Briques de Terre Compressée (BTC), destinées aux bâtiments de type établissement recevant du public, maisons individuelles, bâtiments de logements en collectif, bâtiments pour bureaux, constructions scolaires et tous types de bâtiments à usage commercial, industriel ou agricole. A noter que cet ATEX arrive à échéance fin 2023. Le prototypage a fait ressortir ce procédé comme un optimum entre gain carbone et surcoût économique mais plutôt adapté pour des projets de petite échelle. Les BTC ont une contrainte de poids important ce qui peut poser des difficultés de mise en œuvre dans le cas de bâtiments de grande hauteur.

Remplissage entre ossature bois à base de terre crue et de fibres végétales - Terre allégée

L'emploi de terre allégée est une adaptation de la technique du torchis aux demandes actuelles du marché immobilier.

La terre allégée accepte une multitude de fibres végétales, la plus connue est le mélange terre-paille, légèrement tassé manuellement entre des banches. Cette technique emploie des matériaux peu onéreux mais demande beaucoup de main d'œuvre et un temps de séchage important (selon l'épaisseur du mur, jusqu'à 6 mois environ). Quelques artisans réalisent des essais avec d'autres fibres comme les anas de lin ou des roseaux broyés. La terre du site peut être utilisée, il est aussi possible d'utiliser de la terre prête à l'emploi. Ce procédé constructif est visé par le référentiel du guide de bonnes pratiques mais reste considéré comme une technique non courante. Il s'agit pourtant d'une technique prometteuse pour la massification de la terre crue dans la construction, alliant les qualités hygrothermiques de la terre crue en réduisant son poids par l'alliance avec des fibres.

Les maillons stratégiques

La filière terre

Enduit mural int/ ext de terre crue ou de chaux et fibres végétales

Appliqué à l'intérieur, en plus de sa fonction décorative, l'enduit a pour fonction de protéger son support, pour des parois d'enveloppe ou de cloisonnements intérieurs. Il assure aussi l'étanchéité à l'air du bâtiment, sous réserve que tous les points singuliers, notamment les jonctions avec les autres matériaux et parois, soient étudiées et réalisées avec soin. Il apporte de l'inertie dans le bâtiment et ses capacités hygroscoPIques lui permettent de réguler naturellement l'ambiance hygrométrique, assurant un confort de grande qualité. L'apport d'inertie a un effet favorable sur le confort acoustique. Sous forme d'enduit, le bâtiment peut bénéficier de toutes les qualités de la terre crue sans pénaliser par sa contrainte de poids. En cloisonnement, l'enduit terre crue sur ossature bois est une bonne alternative aux BTC et participe au confort acoustique des espaces par une mise en œuvre des matériaux selon le principe masse- ressort – masse.

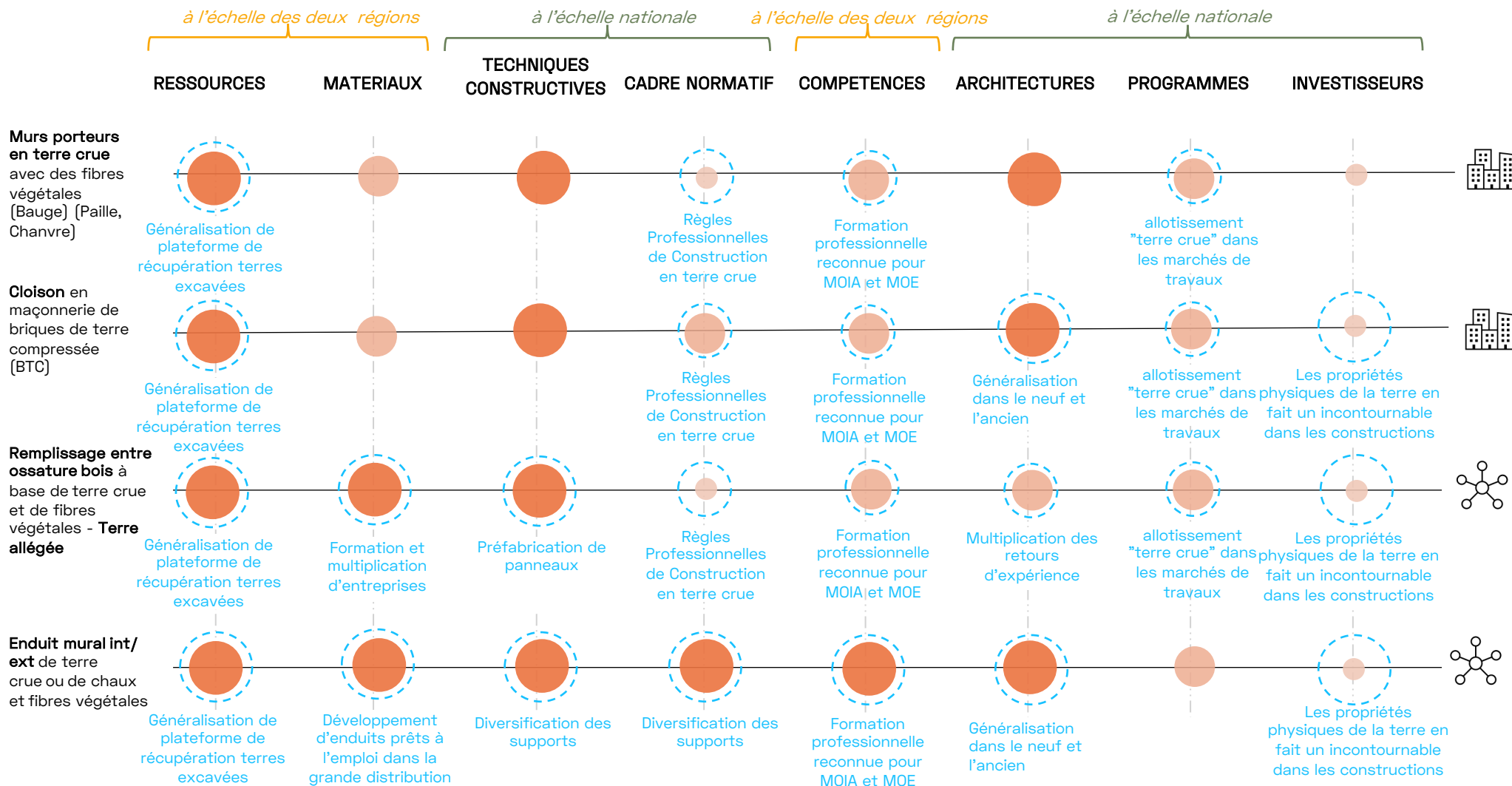
L'enduit terre est assez fragile et doit être ou protégé dans les zones de passage générant des frottements réguliers, ce qui ne le rend pas adapté à tous types d'usages.

A la date de rédaction, il existe un référentiel de règles professionnelles « Construction en paille, remplissage isolant et support d'enduit » acceptées par la C2P sans un suivi nécessaire du retour d'expérience (RP-A). Ces règles regroupent deux procédés dont le procédé d'enduit mural intérieur et extérieur de terre crue sur un support botte de paille. Ainsi, dans la mesure où le référentiel est respecté en tous points, le présent procédé est reconnu en technique courante.

La matrice de la page suivante résume ces différentes observations de manière schématique et synthétique.

Les maillons stratégiques

La filière terre



3.3

Vers une transition des référentiels de construction

Des données changeantes à anticiper

Un cadre amené à évoluer rapidement

L'analyse présentée se fait avec les données connues à ce jour, en termes de réglementation, de prix, de marché carbone. Vu les objectifs que s'assignent les pays notamment lors des COP, et vu les discussions européennes sur le pacte vert, on peut imaginer que le cadre de l'action va évoluer rapidement dans les années à venir.

Seuils réglementaires

La réglementation environnementale s'applique depuis quelques mois. Cette première version définit d'ores et déjà 3 seuils d'émission pour les constructions neuves, dont le dernier est en 2030. Pour l'instant l'acte de rénovation n'est pas limité en carbone, mais si l'on envisage que les années futures se porteront plutôt sur la rénovation de l'existant pour des questions d'émission carbone notamment, il paraît probable que la réglementation environnementale s'étende à la rénovation. Ceci serait un levier puissant pour activer l'usage du biosourcé sur les rénovations.

Evolution rapide des biosourcés

Le marché des biosourcés est émergent. Jusqu'à présent il se développait auprès d'un public engagé et investit sur les questions environnementales. La transition vers des réalisations bas carbone généralisées crée une dynamique, notamment sur la création de données, du type FDES. De la même manière, plus d'acteurs impliqués dans la construction biosourcée permettra de débloquer des fonds pour les tests nécessaires au développement du cadre technique et normatif.

Evolution du prix de l'énergie

Les modes constructifs développés depuis l'après-guerre sont gourmands en énergie. Nous avons vu récemment que notre système énergétique était vulnérable et sensible à la situation géopolitique (guerres, choc de demande suite au Covid) et environnementale (sécheresse), ce qui s'est traduit par des hausses très importantes sur les prix de l'énergie. Les graphiques des pages suivantes montrent que ce prix a un impact fort sur les matériaux usuels (béton ou laine de verre), et peu sur les matériaux biosourcés.

Evolution du prix du carbone

Concernant le carbone, l'analyse présentée dans les pages suivantes simule l'impact d'un marché carbone avec des prix élevés sur le prix des matériaux biosourcés. Il faut une combinaison de prix de marché élevés et de seuil d'émission très bas pour qu'il en résulte un impact significatif sur les prix de matériaux peu émissifs.

Evolution du prix de l'énergie et impact sur les matériaux

Proposition de décomposition du prix

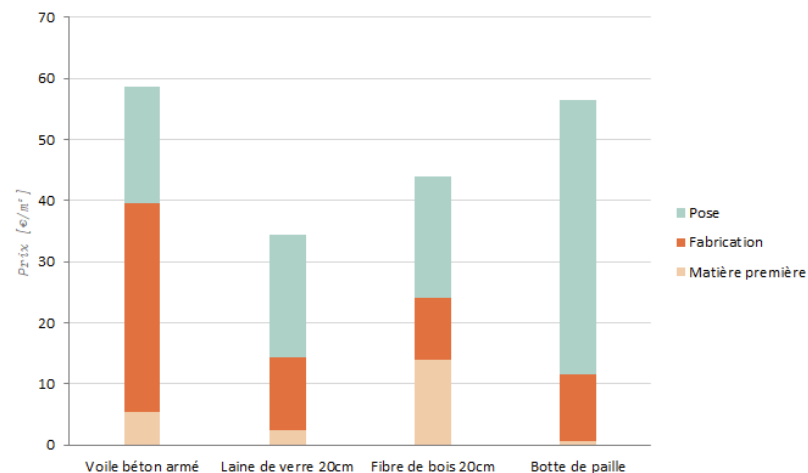
Les coûts de quelques-uns des matériaux ont été décomposés selon la répartition suivante : matière première / fabrication / pose. Les matériaux bio et géo-sourcés se distinguent par une faible transformation de la matière première voire pas de transformation du tout et sont souvent issus de coproduits de l'agriculture. On constate donc logiquement que la part liée à la pose représente la majeure partie du coût de l'ouvrage. Dans le cas des matériaux non bio et géo-sourcés, ce rapport est inversé.

Hypothèses sur l'influence du coût de l'énergie

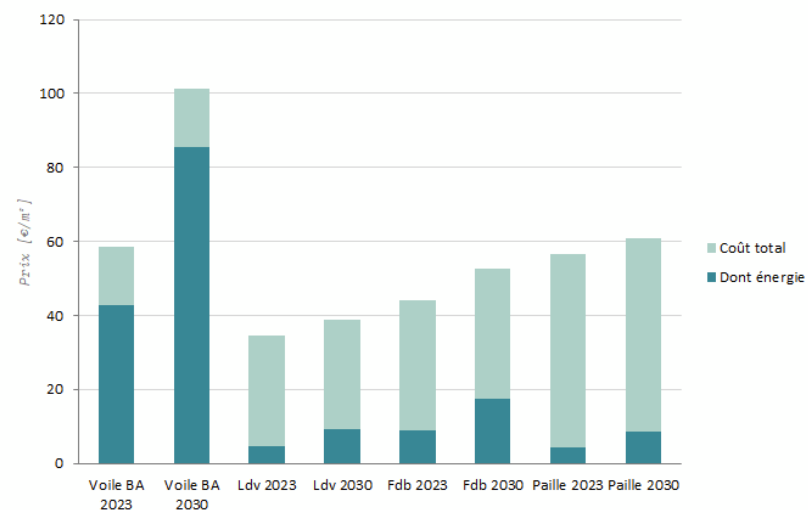
Dans un contexte de raréfaction des ressources, il est probable que le secteur de la construction continue de subir la hausse des prix de l'énergie. Nous avons tenté de modéliser l'impact que de telles augmentations auraient sur le coût total. Dans le cas d'une augmentation de 100% du coût de l'énergie, les matériaux bio et géo-sourcés amortissent fortement cet aléa tandis que le béton risque de connaître de fortes variations de prix.

Les consommations énergétiques de fourniture et pose sont estimées d'après les données FDES des produits suivants : Laine de verre ECOSE 200mm Acoustiplus / Fibre de bois 200m d'épaisseur Parexlanko / Paille agriculture biologique RFCP.

Décomposition du prix pour quelques matériaux



Sensibilité du prix au coût de l'énergie



Evolution du prix du carbone et impact sur les matériaux

Marché / fiscalité carbone

A date, le marché du carbone concerne quelques secteurs spécifiques : les installations industrielles liées à la production d'électricité, la sidérurgie, les raffineries de pétrole ou les cimentiers mais aussi la chimie ou le chauffage urbain et, depuis 2012, l'aviation est ciblée avec les compagnies aériennes pour les vols commerciaux intra-européens. Ces marchés ne concernent pas le secteur de la construction de bâtiments à l'heure actuelle. En juillet 2021 la Commission européenne a présenté une proposition de réforme du marché européen du carbone. Il est envisagé, pour 2026, la création d'un nouveau marché carbone pour le transport routier et le chauffage des bâtiments

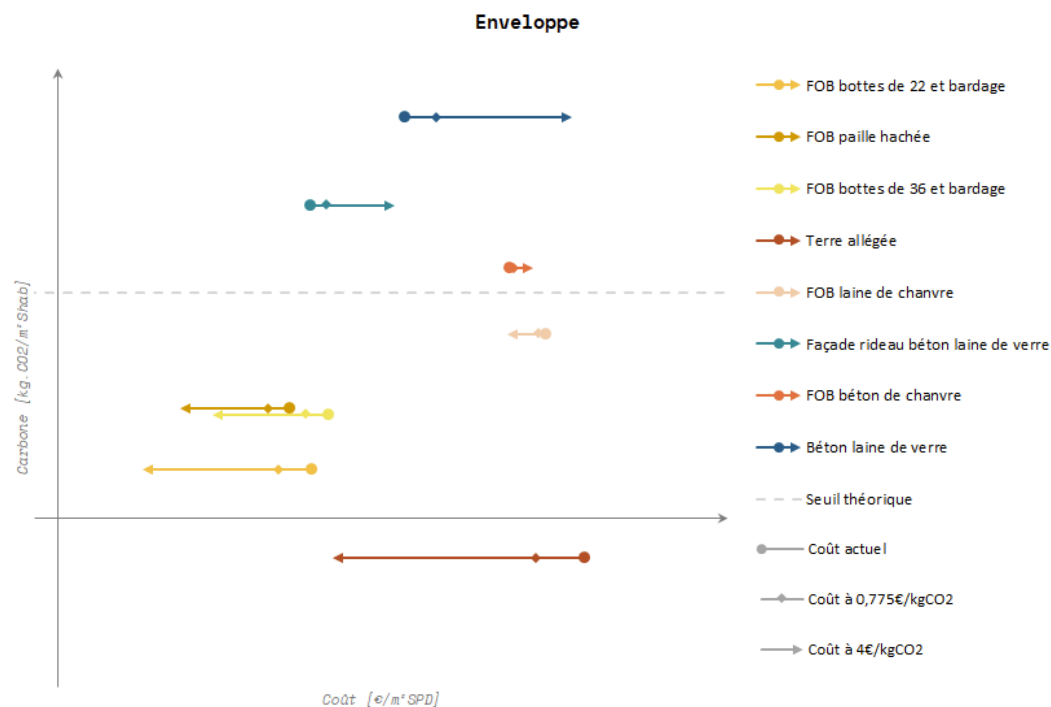
L'article premier de la loi sur la transition énergétique pour une croissance verte trace une trajectoire croissante de la composante carbone jusqu'en 2030, « le Gouvernement se fixe pour objectif, pour la composante carbone intégrée aux tarifs des taxes intérieures sur la consommation des produits énergétiques [...] d'atteindre une valeur de la tonne carbone de 30,50 € en 2017, 39 € en 2018, 47,5 € en 2019, 56 € en 2020 et 100 € en 2030. » Ces chiffres sont basés sur la valeur tutélaire du carbone établie par le Centre d'analyse stratégique (mission présidée par Alain Quinet, 2008).

Le rapport Quinet II, remis au gouvernement en 2019, conclut qu'il faudra une valeur tutélaire carbone d'environ 250 euros par tonne de CO2 en 2030 et jusqu'à 775€ en 2050, afin de respecter les objectifs climatiques de la France tel que définis dans la Stratégie nationale bas carbone.

La figure ci-contre simule l'influence de l'intégration du secteur de la construction au marché du carbone. Le principe reste le même que pour le système d'échange de quotas d'émissions : pour construire en continuant à émettre au-dessus d'un certain seuil, on doit payer une redevance. Les recettes servent à subventionner les systèmes qui se placent sous le seuil, d'un montant proportionnel à la quantité de CO2 évitée.

Avec un prix du carbone fixé à 775€ la tonne de CO2, les coûts des différentes variantes commencent à évoluer. En imaginant aller plus loin, si le kilo de CO2 coûte encore 5 fois plus cher que cette valeur tutélaire, alors les cartes sont complètement rebattues. Construire en terre allégée devient plus économique que mettre en œuvre un voile béton isolé en laine de verre.

*Source : Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires



Recherche du meilleur rapport réduction carbone-prix

Synthèse par ensemble fonctionnel

Economie de carbone et surcoût

Les modes constructifs proposés se répartissent sur un large champ de prix, certains représentent un faible surcoût par rapport au BAU, certains autres permettent une forte réduction de l'impact carbone de l'ouvrage. Cette variété de possibilités invite à proposer une progressivité de l'usage des matériaux bio et géo-sourcés, avec une ambition de plus en plus élevée en termes d'efficacité carbone et en évolution pas à pas depuis les standards de coûts actuels.

Changement de référentiel économique

Plutôt que le surcoût et l'économie de carbone "bruts" associés à chacune des solutions constructives étudiées, il paraît intéressant de faire entrer en jeu un autre paramètre, Dans une optique où le carbone a un coût, le ratio de prix au mètre carré de surface de plancher ne peut plus être le seul indicateur de rentabilité d'un projet : le prix du kilo de CO2 évité devient une variable clef. Le courbe des coûts marginaux d'abattement est un outils graphique qui traduit l'impact des actions de décarbonation en termes financiers en rendant cette information accessible.

Coût d'abattement

Le coût d'abattement est le coût d'une intervention qui va réduire les émissions de gaz à effet de serre d'une tonne. En divisant le surcoût total (c'est-à-dire la somme du coût de l'investissement et de la différence de coûts de fonctionnement) par les émissions évitées, on obtient le coût d'abattement, en euro par tonne de carbone non émise.

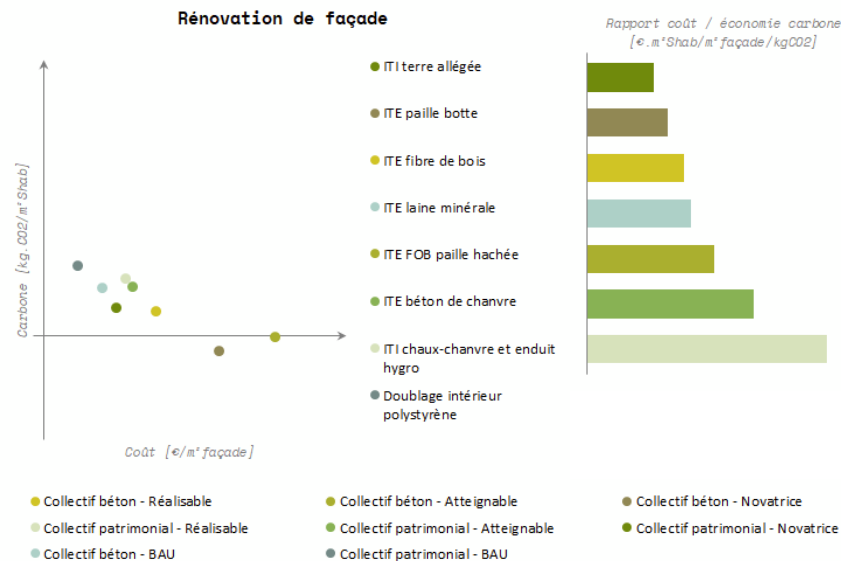
Toutefois cet outil a ses limites. Il a été créé pour réduire les émissions à la marge. Le coût d'abattement peut nous amener à sélectionner des options inefficaces, en particulier des améliorations qui empêcheraient de changer en profondeur nos méthodes de construction.

Indicateur coût / économie carbone

Les diagrammes barre ci-contre font apparaître le rapport coût/gain carbone (€/kgCO2). Cela permet de comparer les procédés constructifs entre eux selon une approche complémentaire à l'analyse purement économique. Le gain carbone est à chaque fois calculé comme la différence de coût carbone entre la solution constructive au plus fort impact et la solution constructive observée. Plus le prix du système sera faible par rapport au gain carbone qu'il représente, plus le ratio sera bas. Cet indicateur permet de faire apparaître quels systèmes constructifs représentent du CO2 moins cher.

Cette donnée du rapport coût / économie CO2 est lisible sur le graphique de droite qui fournit un nouveau classement des variantes. Nous rappelons que le choix de la solution constructive ne saurait se résumer à ce résultat.

Chaque graphique est construit sur la même échelle de carbone.

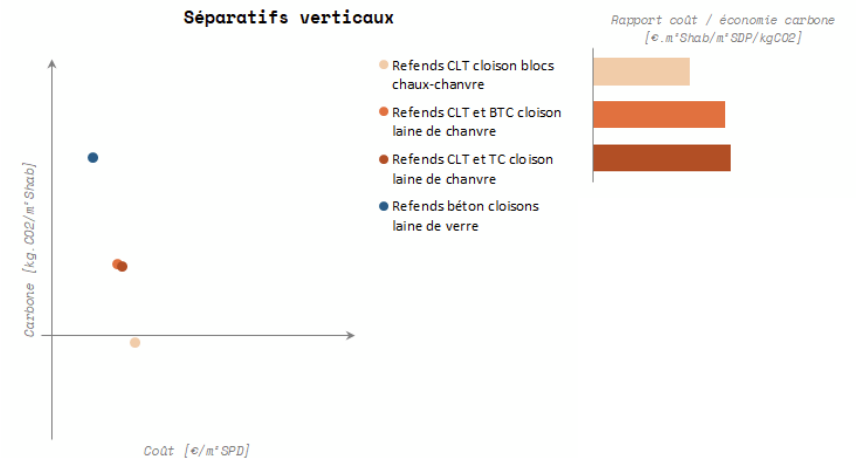
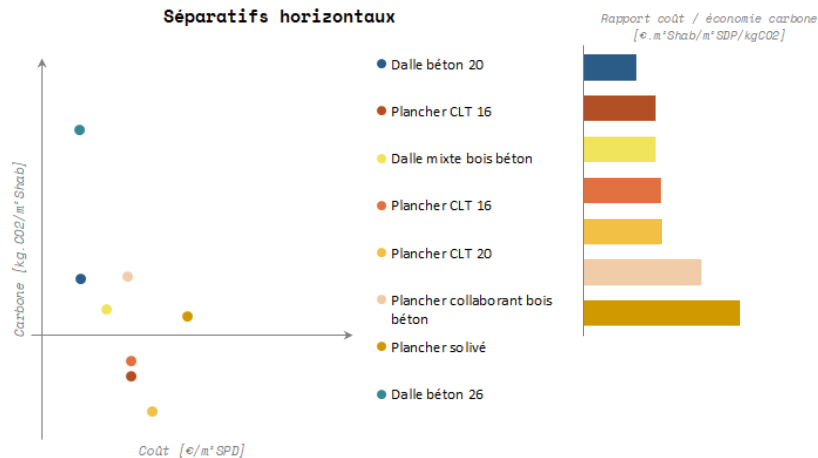
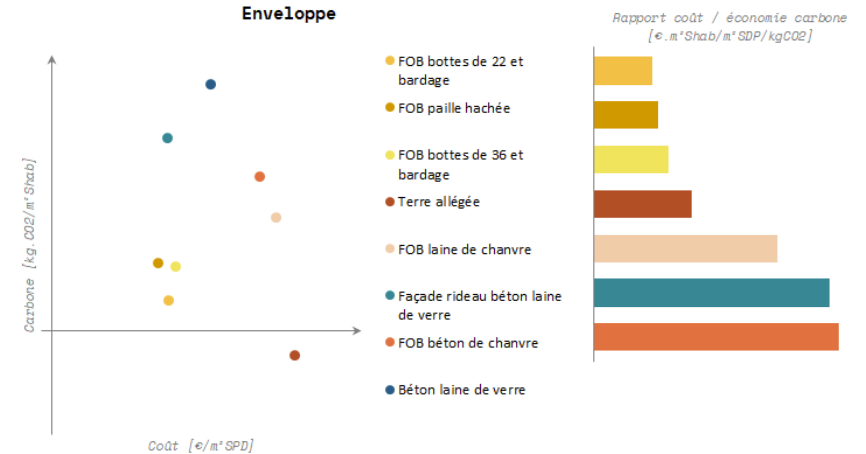


Recherche du meilleur rapport réduction carbone-prix

Synthèse par ensemble fonctionnel

Ensembles fonctionnels des prototypes neufs

Les systèmes constructifs évalués pour l'ilot tertiaire neuf et les logements collectifs neufs sont rassemblés par ensemble fonctionnel dans ces graphiques.



● Ilot tertiaire - BAU ● Ilot tertiaire - Réalisable ● Ilot tertiaire - Atteignable ● Ilot tertiaire - Novatrice ● Logements collectifs - BAU ● Logements collectifs - Réalisable ● Logements collectifs - Atteignable ● Logements collectifs - Novatrice

Une massification avec des rythmes de construction différents

Si l'on considère les perspectives du marché de la construction, autant pour des raisons carbone, énergie, ressources que des raisons démographiques, la production neuve est amenée à diminuer progressivement en France. La massification des matériaux biosourcés concernera donc de plus en plus la rénovation, qui, elle, doit monter en puissance significativement.

Le besoin pour la généralisation de ces matériaux passe donc moins par un procédé industriel rapide et standardisé, comme on a pu le voir après-guerre avec

le béton, que par une chaîne d'acteurs formée, des normes de pose et d'usage diversifiés. Sur la vitesse de production, les contraintes inhérentes aux matériaux vivants auront peu de chance d'être complètement gommées : temps de séchage, temps de pose, même si la préfabrication ouvre des perspectives intéressantes.

C'est donc une nouvelle approche de l'acte de construire et d'habiter que nous proposons ces matériaux: moins de technique et de performance embarquées dans le matériau mais plus de compétence chez les acteurs de la construction, plus de confort de pose et d'usage.

X. Annexes

X.1 Choix des systèmes constructifs

Du sourçage filières à la sélection de systèmes constructifs

Croisement des possibilités prototypes / ressources / systèmes constructifs

PROCEDES CONSTRUCTIFS			STRUCTURE DU BATIMENT																	TOITURE			ISOLATION																	
			MUR																	Paille			Chanvre			Lin			Micanthus			Ouate de cellulose			Pierre					
																																						MUR		
Prototypes	Neuf	Extension	Réháb	Désignation du prototype	Filières ->	MUR																	Paille			Chanvre			Lin			Micanthus			Ouate de cellulose			Pierre		
						1	5	6	7	8	9	10	13	28	39	40	53	26	31	54	2	3	4	14	19	21	24	29	32	36	51	33	38	43	45					
				N1	Ilôts tertiaire en U	5	5	5	8	8	SO	6	5	SO	4	4	4	8	4	3	8	7	8	6	7	8	4	SO	SO	7	4	4	SO	8	7	7	7			
				N2	Logement collectif - îlot ouvert	5	5	5	9	9	7	6	4	SO	5	6	5	8	4	5	8	7	8	6	7	8	7	SO	SO	10	5	SO	8	7	7	7				
				N3	Logement individuel en bande	8	8	9	SO	SO	9	7	8	SO	8	8	5	8	8	5	11	6	9	9	9	10	7	SO	SO	10	7	SO	8	8	8	8				
				9	Bât. de logements en béton (post année)	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	3	6	7	6	4	7	8	5	SO	SO	7	5	SO	7	4	4	4		
				10	Immeuble de rapport ou bâtiment patrin	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	5	5	5	6	7	8	SO	SO	SO	7	SO	SO	7	4	4	6	6			
				11	Construction traditionnelle	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	5	7	8	7	6	7	8	4	SO	SO	6	4	SO	7	6	6	6			
				12	Bâtiment industriel (mi XIXème s)	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	SO	4	6	7	6	6	6	7	SO	SO	SO	7	4	SO	7	4	6	6	6			

PROCEDES CONSTRUCTIFS			ISOLATION																	CLOISONS INTERIEURES			REVETEMENTS INTERIEURS / EXTERIEURS															
			TOITURE (RAMPANT ET COMBLE)							MUR ET TOITURE				SOL			Pierres			Terre			Chanvre			Terre			Bois			Pierre						
			TOITURE (RAMPANT ET COMBLE)							MUR ET TOITURE				SOL																								
Prototypes	Neuf	Extension	Réháb	Désignation du prototype	Filières ->	ISOLATION																	CLOISONS INTERIEURES			REVETEMENTS INTERIEURS / EXTERIEURS												
						16	25	37	20	22	35	18	23	30	34	15	27	42	11	50	46	41	17	44	12	47	48	49										
				N1	Ilôts tertiaire en U	4	5	6	5	6	6	8	9	SO	SO	4	4	6	7	6	4	4	8	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
				N2	Logement collectif - îlot ouvert	5	6	7	6	7	7	8	9	SO	SO	7	7	9	12	9	9	9	7	7	11	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
				N3	Logement individuel en bande	10	8	9	9	10	7	9	9	SO	SO	10	8	10	12	9	9	10	10	9	11	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
				9	Bât. de logements en béton (post année)	5	4	4	6	5	3	6	7	SO	SO	SO	6	6	9	5	SO	6	4	5	8	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
				10	Immeuble de rapport ou bâtiment patrin	6	7	7	7	8	6	6	7	SO	SO	6	6	6	7	SO	SO	6	6	6	8	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
				11	Construction traditionnelle	7	7	7	7	8	6	8	8	SO	SO	7	7	7	9	SO	SO	7	7	7	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
				12	Bâtiment industriel (mi XIXème s)	6	4	4	7	5	3	6	7	SO	SO	5	6	5	7	SO	SO	6	6	6	8	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

X.2

Détails des données par prototype

L'îlot tertiaire neuf

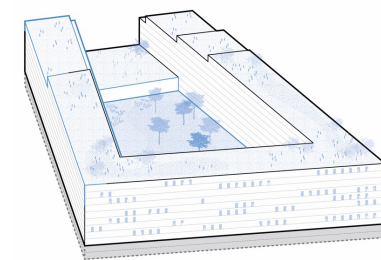
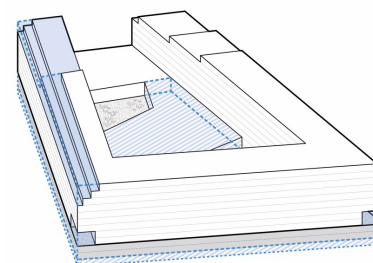
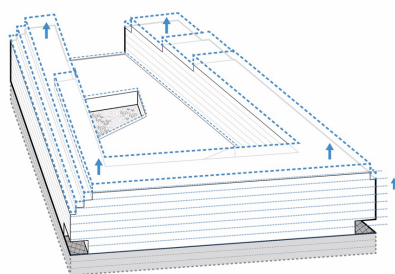
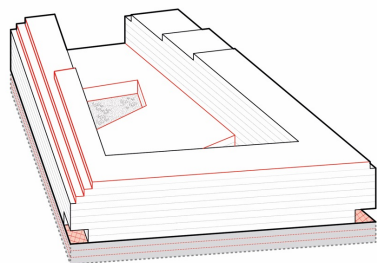
Variantes morphologiques - détails du calcul de compacité

Business as usual
archétype existant

1 - Transition
intégration de matériaux bio-géo-sourcés

2 - Transformation
Ajustements morphologiques

3 - Augmentation
Valeurs ajoutées



Compacité

CBS

Coefficient de compacité
= Surfaces déperditives / Volumes à chauffer

Coefficient de biotope = (surface de type A x coef. A)
+ (surface de type B x coef. B) + ... + (surface de type
N x coef. N) / Surface de la parcelle

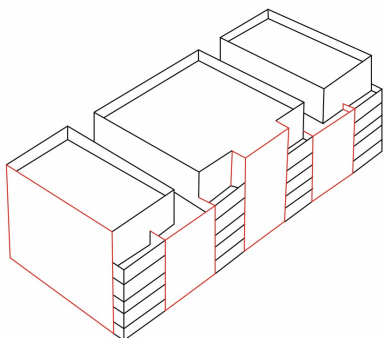
Surface de plancher	53 600 m ²	51 780 m ²
Volume chauffé	= 53 600*3,4 = 182 240 m ³	= 51 780*3,8 = 196 790 m ³
Surfaces déperditives	27 390 m ²	28 570 m ²
Coefficient de compacité	27 390 / 182 240 = 0,15	28 570 / 196 790 = 0,14

Surface de la parcelle	11 000 m ²	
Surfaces imperméables (0)	6370 m ²	197 m ²
Espaces verts sur dalle (0,5)	2200 m ²	6607 m ²
Espaces verts en pleine terre (1)	2430 m ²	4195 m ²
CBS	6370*0 + 2200*0,5 + 2430*1 / 11 000 = 0,32	= 197*0 + 6607*0,5 + 4196*1 / 11 000 = 0,68

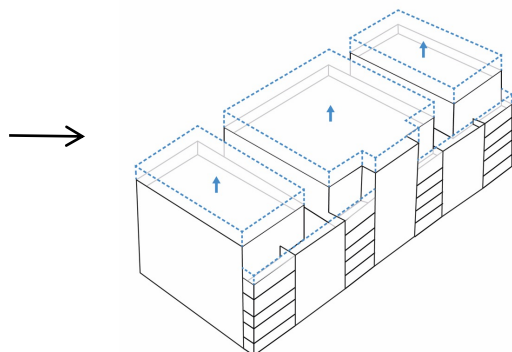
Les logements collectifs neufs

Variantes morphologiques - détails du calcul de compacité

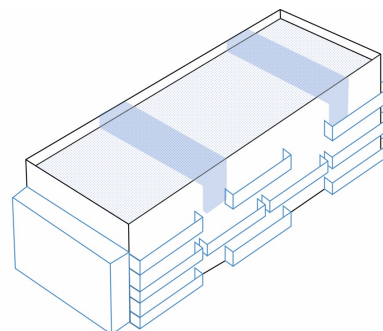
Business as usual
archétype existant



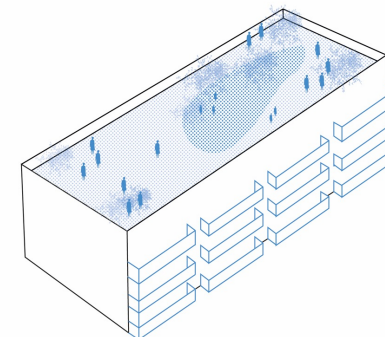
1 - Transition
intégration de matériaux bio-géo-sourcés



2 - Transformation
Ajustements morphologiques



3 - Augmentation
Valeurs ajoutées



Compacité

Coefficient de compacité
= Surfaces déperditives / Volumes à chauffer

Surface de plancher	6 995 m ²	7 410 m ²
Volume chauffé	= 6 995*2.78 = 19 446 m ³	= 7 410*3.34 = 24 750 m ³
Surfaces déperditives	7 800 m ²	7 880 m ²
Coefficient de compacité	7 800 / 19 446 = 0,40	7 880 / 24 750 = 0,32

CBS

Coefficient de biotope = (surface de type A x coef. A)
+ (surface de type B x coef. B) + ... + (surface de type
N x coef. N) / Surface de la parcelle

	6 548 m ²	
Surface de la parcelle		
Surfaces imperméables [0]	4 348 m ²	2 170 m ²
Espaces verts sur dalle [0,5]	0 m ²	2 178 m ²
Espaces verts en pleine terre [1]	2 200 m ²	2 200 m ²
CBS	4 348*0 + 0*0,5 + 2 200*1 / 4 348 = 0,34	= 2 170*0 + 2 178*0,5 + 2 200*1 / 4 348 = 0,50

X . 3

**Compte rendu des ateliers
acteurs**

Atelier du 14 mars

1. Présentation du premier prototype #N1-bureau neuf -Structure bois FOB paille

Immeuble de bureaux en Ile de France

L'immeuble existant est à Aubervilliers, en structure poteaux-poutre et mur rideau. Il s'agit du siège de Veolia (R+7) réalisé en janvier 2017. Il est représentatif du produit « bureau » moyen commercialisé en Ile de France

L'objectif est de modéliser un immeuble avec des systèmes constructifs biosourcés et ~~écosourcés~~. Des variantes, de 1 à 3, mettront en perspectives temporelles des systèmes en cours de fiabilisation, réglementaire notamment.

- ❖ u1/ FOB fibre de bois avec bardage ventilé – R+7
- ❖ u2/ FOB remplissage paille – support d'enduit ventilé (sur ~~Stoventec~~?)
- ❖ u3/ FOB remplissage paille – enduit extérieur directement appliqué sur la paille

Remarques et propositions :

La hauteur est une problématique lourde à gérer ! (Incendie, temps mise en œuvre)
Il faut d'abord maîtriser le R+2, R+3 en paille avant de viser le R+7 (par étapes)

Pour mémoire, une FOB est non porteuse, et ne participe pas à la stabilité du bâtiment. La FOB est fixée directement à la structure du bâtiment (bois, métal, ou béton). Dépend du DTU 31.4

Le mur à ossature bois (MOB ou COB) reprend des efforts horizontaux et verticaux. Dépend du DTU 31.2

Rappel simplifié de contrainte incendie :

En habitation de 1^{ère} et 2^{ème} famille (R+3), et en ERP avec plancher de moins de 8 m, assez peu de contrainte.

A partir de l'habitation de 3^{ème} famille, et l'ERP de 8 m, on applique l'IT 249 et le guide façade.

Au-dessus de 28 m (limite grande échelle des pompiers), de nombreuses contraintes.

La doctrine des pompiers de Paris, pour tout bâtiment de plancher de plus de 8m, exige l'encapsulation des structures bois, et pénalisent ainsi fortement le bilan carbone.

En complément, la problématique ici n'est pas tant le type d'isolation mais le système constructif bois, l'isolant peut être de la LDV ou de la paille, la protection au feu devra être identique.

	Retour participants	Alternative R+7	En cours	Norme
FOB Paille (porte les planchers)		fihrce de bois et façade ventilée Préférer un matériau non ventillé et inerte cela facilitera la protection au feu (type enduit avec	Crèche R+4 Agence Joly – avec ATEX	R+1 +comble Règles pro Paille

		recouplement horizontale		
			A examiner : projet R+7 à Caen	
Ouvertures	Passer d'une architecture murs rideau à murs percés			
Façade	Qualité mise en œuvre : enjeu clef de la planéité pour raccord FOB et plancher (préférer dalle béton pour sécuriser)	En escalier : 3 niveaux, puis étages suivants en retrait de quelques mètres pour le considérer comme un deuxième bâtiment R+3		IT249
Finition : Paille support d'enduit	Max 2 étages A partir 3 ^e et 4 ^e étage : le cout s'envole (3 couches et temps de séchage long), C'est pourquoi un mix bois sur le R1 et R2 puis enduit sur les niveaux suivants peut être cohérent (se renseigner auprès des fournisseurs d'enduits sur leur contrainte de hauteur sur FOB ou MOB)	Bardage de réemploi en tôle métallique		
Finition : Bardage bois	Max 28 m en hauteur (incendie) Contrainte déformation pour la FOB (moins de contrainte en MOB) + contrainte incendie (doctrine pompiers Paris qui fait fois en Normandie aussi) Et pourtant les contraintes de Paris sont différentes de celles de la Normandie !	Enduit ventilé type Stoventec (mais interdit en R+7) Nécessite une ATEX si h > 18 m		

Atelier du 14 mars

Réf:

A Namur, Paille-tech propose des enduits terre sur botte de paille en préfa (couche de corps – faire couche finition et raccords)

Perspectives:

- La paille hachée va avoir un **Avis Technique en septembre 2023**. (IELO)
 - Plus maniable que la botte de paille : un plus pour les petites entreprises
 - Au contraire sur le volet construction neuve et préfabrication cela va intéresser les entreprises qui ont un atelier de préfa et donc les moyennes ou grosses entreprises,
 - pour la partie restructuration, rénovation en effet les plus petites entreprises vont y trouver un intérêt.
 - Epaisseurs adaptables
 - Dans des caissons fermés : protection feu, l'obligation première c'est que c'est insufflé, et donc il nécessaire d'avoir un caisson fermé pour retenir la pression de l'insufflation, le feu arrivent en second plan pour moi

2. Présentation du 2e prototype #R2-logement collectif réhabilité – ITE paille

Immeuble existant à Cherbourg - ITE laine de roche – R+7
Typique de 50% du logement collectif en Normandie

Proposition Maillons : ITE botte paille sanglé (technique des bretelles) ou paille hachée insufflée

Pour les solutions v1 et V2 Facade à ossature bois (FOB préfa), qui apportera un impact minime sur le temps chantier et qui est donc un atout non négligeable sur des sites souvent encore occupé, et un gain financier car peu de temps sur site. La paille bretelle est pour moi complexe à mettre en œuvre avec très peu d'artisan capable de le faire à grande échelle. Si peu de sachant, est-il nécessaire de le proposer ?

De la même manière, trois variantes proposées :

- v1/ ITE Paille hachée – bardage ventilé avec pare-pluie – R+7
- v2/ Paille de 22 en caisson – enduit
- v3/ Paille sanglée – enduit

Discussions :

	Retour participants	Alternative R+7	En cours
Structure bois	Contraintes à partir de la 3 ^e famille	Beaucoup de réhabilitations en R+6 et R+7 en cours à Rouen pour logement	
Bardage bois	Jusqu'à R+3		
Façade	Botte de paille sur les murs plein. Ex : murs pignons	Caisson paille hachée, possible jusqu'à 13m en préfabrication	
Fenêtres	Déposer les fenêtres pour les poser au nu extérieur (pont thermique)	Concernant la gestion de l'humidité des vieux bâtiments, il est parfois préférable de ne pas isoler et de laisser les	

		fenêtres existantes perméable à l'air...	
Toit	Important pour la thermique Pas de toiture végétalisée en biosourcés	La plus simple : structure inclinée en Bardage avec isolant dessous (préfabriquer et insuffler) Le plus cher : fibre de bois + liège en étanchéité	

- En biosourcé, il faut plus de moyens en conception pour éviter aux entreprises de refaire l'AVP et ainsi diminuer les temps de mise en œuvre : il faut la compétence bois/biosourcé dès l'APS.
- Chantier : insérer délai 1 semaine entre chaque lot pour finir la réception du lot béton et éviter les interférences difficiles à gérer
 - Voir pour cela la charte de la Région Normandie sur l'achat de MOE en biosourcé : 10 fiches action (dans le pacte Bois Biosourcé)

Perspectives :

- Demande pour intégrer la FOB dans les règles pro (actuellement que de la COB). **A vérifier ? Limite de plancher à 8 m trop restrictif**
- Aujourd'hui, les contrôleurs techniques normands sont de plus en plus formés sur la botte de paille.
- Préfabrication :
 - Prendre en compte le temps de préfabrication : le délai d'étude est trop court pour les entreprises charpentes. Ou avoir un AVP très aboutis, quitte à passer en conception réalisation avec une entreprise de charpente.
 - Avoir un premier niveau en béton, ça leur donne un peu plus de temps. Ce n'est pas pour ça qu'il faut le faire, cela est un moyen de se laisser du temps, mais ce n'est pas une solution à long terme.
 - AVP bien ficelé, temps de prépa cohérent avec le projet, entreprise TCE réactive, délais de commande considéré, c'est le plus important
 - La rentabilité de la préfabrication dépend du transport : 200 m2 de façade minimum pour remplir un camion c'est une variable, mais pas la plus importante.
 - Il faut former les maîtres d'ouvrage et les AMO. Les programmatistes jouent un rôle très important.
- Le biosourcé implique plus de complexité pour les réseaux
 - CVC : Se faire accompagner sur la ventilation et les réseaux dès l'amont.
 - Il faut interdire les variantes sur chantier pour ne pas générer des problèmes d'interfaces
 - taille tuyau, grille ventilation (on ne peut pas trouver un mur en paille sur le chantier !) Un projet bien ficelé ne laisse, de fait, pas beaucoup de place aux variantes

Prix moyen :

Paille en botte : entre 250 et 350 €/m², sans livraison.

Les 4 familles d'habitation

Famille	Type	Description	Surface	Matériau	
1 ^{ère} famille	Individuelle	Habitations isolées en bande à structures non indépendantes en bande à structures indépendantes	Niveau maximum 4 R + 1 R + 0 R + 1	Blowpack Treuil mécanique & pneumatique	
2 ^{ème} famille		Habitations isolées jumelles en bande à structures non indépendantes en bande à structures indépendantes	4 R + 1 R + 1 4 R + 1		
3 ^{ème} famille	A	3 conditions: R + 7 maxi (D > 7 M2); accès escalier atteint par voie échelle	4 R + 3 (R) 4 R + 7		Blowpack Treuil électrique
	B	Hauteur < 28 m, une seule des conditions ci-dessus non satisfait. Accès aux escaliers à moins de 50 mètres d'une voie ouverte à la circulation	H < 28 m (R)		Blowpack Treuil pneumatique
4 ^{ème} famille		Accès aux escaliers protégés à moins de 50 mètres d'une voie ouverte à la circulation	H < 28 m (R) H < 50 m	Blowpack Treuil pneumatique	

3. Présentation du 3e prototype #N2-logement collectif neuf - ossature bois FOB béton de chanvre

Immeuble de logement collectif situé à Coulombel en Normandie - Hauteur de dernier plancher à 8m – 2ème famille (voire 3ème) - sol pollué, pas de parking.

Proposition des variantes :

- V1 : FOB fibre de bois et bardage ventilé – R+3 – plancher CTL
- V2 : FOB béton de chanvre – enduit ventilé - R+2 – cloison BTC
- V3 : enduit directement sur béton de chanvre
- V4 : Chanvre en vrac ?... La massification est entendue par la préfabrication...

Sur la couche de dégrais fait en atelier j'ai une question :

Sur un enduit classique il est interdit par le DTU d'avoir des recouvrements verticaux d'ITE. L'ITE type panneau de laine de bois doit être en pose croisée et sans arrêt sur une même façade.

Je me demande donc comment est-il possible de faire une couche de dégrais sur un MOB préfa sans créer des fissures sur le rendu final ?

En effet les Mob ne font pas forcément toute la longueur d'une façade, comment sont gérés ces raccords de MOB en enduit ?

J'ai un élément de réponse ci-dessous avec le joint creux mais pour moi les MOE MOA doivent être bcp plus informé s'il n'y pas d'autres solutions.

Discussions :

Atelier du 14 mars

	Retour participants	Alternative R+7	En cours
Pluie	Ajouter un enduit ventilé pour gérer la pluie en hauteur (pare-pluie non possible pour 3 ^e famille)		

Perspectives :

Règles pro à déposer à la C2P : plus de limite de hauteur, tout domaine confondu

- o Béton de chanvre support d'enduit ou de bardage
- o MOB ou FOB (remplissages non structurels)
- o 2 formulations testées
- o Dernier test en cours : résistance enduit pluie battante

4. Présentation du 4e prototype #R2-logement collectif ancien – ITI chaux chanvre

L'immeuble existant est un immeuble de rapport, exemple d'une morphologie antérieure à la guerre.

De la même manière, trois variantes proposées :

- ❖ v1/ ITI chaux-chanvre + enduit hydrothermique
- ❖ v2/ ITE chaux-chanvre
- ❖ v3/ ITI terre-chanvre (guide des bonnes pratiques en terre allégée)

Discussions :

	Retour participants	Alternative R+7	En cours
ITI chaux chanvre ou terre chanvre		Enduit correcteur hygrométrique pour diminuer épaisseur ITI	
Enduit	Le plâtre sur béton de chanvre perturbe les échanges vapeur d'eau ! (Interdit dans règles pro à venir)	Prendre des matériaux avec des capacités de tampons hydrique : -EXT : chaux-sable ou bardage -INT : terre	

Données techniques :

- **FDES**
 - o Fin de vie béton de chanvre : entièrement recyclable (en cassant le matériau)
 - Etude avec le CSTP label « SinQualité » = matériaux entièrement recyclables.
- **Pose :**
 - o Séchage du béton de chanvre : 2 cm/semaine
 - o Le chaux chanvre apporte beaucoup d'humidité : il faut prendre des précautions en bâti ancien : regarder l'encastrement des solives, et l'état de la structure et de la charpente existante
 - o Mise en place panneaux préfa:
 - Problématique de l'encastrement du plancher et du balcon filant : monter le plancher et la façade en même temps.
 - Il faut un bon maçon pour ne pas casser les panneaux préfabriqués

- Pas de préfa entre 2 planchers
- Inclure les fenêtres en préfa pour passer par le contrôle qualité de l'usine pour les joints coprobande (mieux qu'une vérification fenêtre par fenêtre sur site)
- Joints entre panneaux : jeu pare-feu
 - DTU 31.4 encadre les déformations de façades
 - DTU 26.1 pour les enduits qui oblige à marquer le joint horizontal (cf corniches d'antan)
 - o On peut traiter les joints verticaux pour les effacer
- Viser la taille de panneaux maximale pour optimiser le nombre d'opérations de levage (vers du 3m*12m, en lien avec les capacités du transport routier)
- ~~La-GOB n'est pas adaptée à la préfabrication~~ : en FOB, la cage d'escalier stabilise le bâtiment
 - COB ou MOB : le mur stabilise le bâtiment (plus accessible aux petites entrées)
 - o Plus économique
 - MOB FOB : le mur ne stabilise pas le bâtiment et nécessite d'ajouter un dispositif (ex : cage d'escalier)
 - o Plutôt pour les grosses entreprises
- o Domaine d'utilisation de la chaux : 5°-35°
- o Projeter sur 400-600 m² est épuisant !!

- Transmission acoustique :

- o La question se pose entre isolation et enveloppe (Aucun problème dans la transmission aérienne intérieur / extérieur)
 - Concerne le bruit de choc, lié à l'ossature bois
 - --> Chappe béton, ou chappe sèches

- Confort hydro-thermique :

- o Parois perméantes à la vapeur : induit un changement de comportement énergétique de la paroi
 - Non intégré dans les calculs car non mesuré : le bâtiment réel sera meilleur que dans le calcul

- Performance :

- o Le R du béton de chanvre est inférieur aux matériaux traditionnels
 - Mais la performance s'évalue sur le fonctionnement global du bâtiment en considérant enveloppe sol jusqu'à la toiture. Les murs opaques ne comptent que pour 20% des déperditions : un peu de R en moins à peu d'impact, et même un R faible suffit largement.
 - Cela le disqualifie des primes à la rénovation par contra

Prix :

Conception-réalisation plus simple pour limiter les imprévus.

Le remplissage en 30cm entre 150 et 170€ / m² HT sans enduits en projection.

En préfa, quand on est optimisé conception-réalisation :

- En moyenne, 30 cm avec plaque Ferrocem et gobetis : 210 €/m²

- o Prix moyen avec pose : 300 et 350euros pour 30cm.
- Pour 20 cm : 170€/m² + pose, levage, accastillage
- Moyenne de pose : 300-330€/30 cm

Le surcout est d'environ 20% pour les façades (+5% au global)

Normalement, on peut compenser par une économie de climatisation, de VMC double flux (Ventilation hygroR (hygroréglable), et un gain de temps chantier.

- Le surcout peut être ramené à 2%

Perspectives :

- La filière chanvre dépose un dossier France 2030 « caractérisation des matériaux » sur ITE chaux chanvre.
- Cadre réglementaire terre-chanvre en devenir : temps long de séchage et problème ossature
 - o La stabilisation permet de sécher plus vite

Atelier du 14 mars

1. Présentation du premier prototype #N1-bureau neuf -Structure bois FOB paille

Immeuble de bureaux en Ile de France

L'immeuble existant est à Aubervilliers, en structure poteaux-poutre et mur rideau. Il s'agit du siège de Veolia (R+7) réalisé en janvier 2017. Il est représentatif du produit « bureau » moyen commercialisé en Ile de France

L'objectif est de modéliser un immeuble avec des systèmes constructifs biosourcés et ~~écosourcés~~. Des variantes, de 1 à 3, mettront en perspectives temporelles des systèmes en cours de fiabilisation, réglementaire notamment.

- ❖ u1/ FOB fibre de bois avec bardage ventilé – R+7
- ❖ u2/ FOB remplissage paille – support d'enduit ventilé (sur ~~Stoventec~~?)
- ❖ u3/ FOB remplissage paille – enduit extérieur directement appliqué sur la paille

Remarques et propositions :

La hauteur est une problématique lourde à gérer ! (Incendie, temps mise en œuvre)
Il faut d'abord maîtriser le R+2, R+3 en paille avant de viser le R+7 (par étapes)

Pour mémoire, une FOB est non porteuse, et ne participe pas à la stabilité du bâtiment. La FOB est fixée directement à la structure du bâtiment (bois, métal, ou béton). Dépend du DTU 31.4

Le mur à ossature bois (MOB ou COB) reprend des efforts horizontaux et verticaux. Dépend du DTU 31.2

Rappel simplifié de contrainte incendie :

En habitation de 1^{ère} et 2^{ème} famille (R+3), et en ERP avec plancher de moins de 8 m, assez peu de contrainte.

A partir de l'habitation de 3^{ème} famille, et l'ERP de 8 m, on applique l'IT 249 et le guide façade.

Au-dessus de 28 m (limite grande échelle des pompiers), de nombreuses contraintes.

La doctrine des pompiers de Paris, pour tout bâtiment de plancher de plus de 8m, exige l'encapsulation des structures bois, et pénalisent ainsi fortement le bilan carbone.

En complément, la problématique ici n'est pas tant le type d'isolation mais le système constructif bois, l'isolant peut être de la LDV ou de la paille, la protection au feu devra être identique.

	Retour participants	Alternative R+7	En cours	Norme
FOB Paille (porte les planchers)		fihrce de bois et façade ventilée Préférer un matériau non ventillé et inerte cela facilitera la protection au feu (type enduit avec	Crèche R+4 Agence Joly – avec ATEX	R+1 +comble Règles pro Paille

		recouplement horizontale		
			A examiner : projet R+7 à Caen	
Ouvertures	Passer d'une architecture murs rideau à murs percés			
Façade	Qualité mise en œuvre : enjeu clef de la planéité pour raccord FOB et plancher (préférer dalle béton pour sécuriser)	En escalier : 3 niveaux, puis étages suivants en retrait de quelques mètres pour le considérer comme un deuxième bâtiment R+3		IT249
Finition : Paille support d'enduit	Max 2 étages A partir 3 ^e et 4 ^e étage : le cout s'envole (3 couches et temps de séchage long), C'est pourquoi un mix bois sur le R1 et R2 puis enduit sur les niveaux suivants peut être cohérent (se renseigner auprès des fournisseurs d'enduits sur leur contrainte de hauteur sur FOB ou MOB)	Bardage de réemploi en tôle métallique		
Finition : Bardage bois	Max 28 m en hauteur (incendie) Contrainte déformation pour la FOB (moins de contrainte en MOB) + contrainte incendie (doctrine pompiers Paris qui fait fois en Normandie aussi) Et pourtant les contraintes de Paris sont différentes de celles de la Normandie !	Enduit ventilé type Stoventec (mais interdit en R+7) Nécessite une ATEX si h > 18 m		

Atelier du 25 mai

PRÉSENTATION DES EXPERT-ES :

6 pieds sous terre :

- Torchis
- Enduit terre
- Terre allégée paille, en restauration et un peu neuf
- Bauge (quasiment pas)
- BTC, un peu (chez [Devulf](#))

Assurance : Après la formation OPRP (qui permet de s'inscrire à la chambre des métiers). L'assurance est "merdique", assuré en maçonnerie classique.

Que des petits chantiers.

Julien Lucas :

- Enduit (quand c'est possible avec de la terre locale)
- Terre chanvre projeté
- Terre masse (Bauge et bauge "foulée")

Assurance : En coopérative dans les Chantiers de Demain. Assurance commune à la CAE.

Peu assurer des plus gros chantiers.

70% réhabilitation + 30% neuf : L'ERP de la maison de la forêt c'est la première fois. Devis "farfelu" des parisiens.

QUESTIONS INTRODUCTIVES :

Le choix de la technique dépend :

- De la volonté du client
- Du type de terre

Type de programme :

- Réhabilitation du bâti ancien (majoritairement)
- De plus en plus de demande des architectes

-CCL : La réhabilitation n'a pas de visibilité. Pourtant il y a des questions. Exemple : ARA les [habitantes](#) se demandent où aller chercher leur terre. Il y a pas mal de gens qui se décourage parce que ce n'est pas si simple d'en trouver. Idéalement, il faudrait des dépôts de terre par type de technique constructif (type [Cycleterre](#), un projet à Evreux serait aussi en construction).

OÙ METTRE LA TERRE // QUELLE TECHNIQUE :

La **terre allégée** serait la technique constructive la plus propice à la massification.

Sinon, la préfabrication de la **terre coulée** (3x4 mètres) dans une ossature bois.

Propos faire des séparatif acoustique en **BTC** ou **blo**c de terre chanvre (en BZH "[Kelig Erreger](#)" format parpaing avec un petit pourcentage de chaux).

Enjeu de la gestion de chantier sur les temps de séchage qui sont difficilement compréhensible par les autres lots (qui n'acceptent pas de travailler dans le froid).

Attention parce des parois **BTC**, c'est très lourd. Pour faire un complexe masse-ressort-masse, ça marche bien avec des enduits de part et d'autre. En projetant sur de la **canisse**, on est sur un complexe beaucoup léger.

Question sur la Fiche FDES collective sur les terres d'excavation (et l'autorisation de stabilisation)

PLAFOND : Question sur le panneau terre d'**amacco** (type placo) au plafond. J.L. dit qu'eux ils enduisent des panneaux de fibre de bois rigides de 4cm.

Option de remplissage terre-chanvre entre solives (+ 4cm au-dessus). Fagot de châtaigner, lattage, fibre de bois, parquet

Saint Gobain se lancerait dans des placo terre avec 20% de ciment.

Assurance : COFFRAC nationale sur la terre allégée qui donne le lambda. On ne demande ici que la valeur isolante, puisqu'on est ici ni exposé, ni porteur.

GESTION DE CHANTIER :

Problématique avec le séchage // travaux lié à la saison

Pour le phasage : ils interviennent comme n'importe quel isolant, après le gros œuvre.

Tester la terre : Aujourd'hui, un artisan sait choisir sa terre. L'idée du **PNTers**, c'est d'avoir une série de tests qui mettent tous les monde d'accord. Le test de la pastille, par exemple, c'est pour valider une information que l'artisan a déjà.

ÉCONOMIE :

Maillons a chiffré la ressource terre.

Réponse : il faut prendre tout le complexe en compte (pour la terre allégée on peut enduire directement dessous, contrairement à la paille achée). ==> Très variable d'une technique à l'autre.

Les techniques qu'ils utilisent actuellement n'ont pas été pensé pour la massification (mais ils peuvent l'être), on compare ce qui n'est pas comparable.

Pour prescrire, il faut avoir un ordre d'idée du prix et les économistes (comme ils ne connaissent pas) ils augmentent le prix.

La massification va conduire à l'évolution des techniques et des mises en œuvre. Mais le prix restera toujours élevé parce qu'il est important de garder la qualité de travail (revendication écologique // social).

Atelier du 25 mai

FORMATIONS :

Y.M. : Il y a Dinan, en Alsace et dans le sud. Il en faut en Normandie, qualifiante (personne en reconversion) et non-qualifiante (architecte, BE, etc.). La formation continue en CAP doit inclure les problématiques hygrométriques et qualité. ~~PN~~Terre, il n'y a pas de devoir de moyen, mais un devoir de résultat (donner confiance à l'artisan, en lui donnant les clés de la matière sans être verrouillé par la réglementation). Il n'y a pas besoin de créer une formation, elles existent déjà.

Magali : Ça bouge en île de France. Entre autres, Noria et compagnie s'implante en île de France (formation certifiante).

FONDATION :

Y.M. : Réutilisation des dalles de béton pour faire des fondations cyclopéennes !!! Il s'en sert comme des pierres, qu'il maçonne à la chaux. En étant complètement hors réglementation.

SOL :

Il faut de la pratique. C'est assez cher. Une sorte de ~~tadlak~~ au sol enduit à l'huile de lin. Simon Martin.

RÉGLEMENTATION :

3 incendies de chantier en île de France (École Montfermeil, Médiathèque) --> la réglementation n'ira pas en s'allégeant.