# LES ÉCO-MATÉRIAUX EN ÎLE-DE-FRANCE

## QUEL DÉVELOPPEMENT, QUELLES INNOVATIONS ?

RENCONTRE POUR L'ESSOR DES FILIÈRES DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS

13/06/2024



Région îledeFrance

L'INSTITUT PARIS REGION
AREC
AGENCE RÉGIONALE ÉNERGIE-CLIMAT

# mail-
# -lons



De la ressource à la commande, pour un maillage
de la chaîne d'utilisation des matériaux bio
et géosourcés de la Vallée de la Seine

Direction de la publication : Zefco

Contribution : Ekopolis, Georges, LM Ingénieur, Ingénéco Technologies, BMF, École nationale supérieure d'architecture de Normandie, UniLasalle

Crédits images :
Schnepp-Renou : p. 14
amàco (amaco.org) : pp. 15, 19, 20
Laurent Ghesquiere, pour L.A. Linière : pp. 16, 17, 18
Ekopolis : p. 21
Nantes Métropole Aménagement : p. 51

Conception graphique : Travaux-Pratiques

Impression : Le Réveil de la Marne

Juin 2024



1 La Vallée de la Seine : un territoire d'immobilier dynamique mais contrasté p. 7

2 Des ressources abondantes qui doivent se faire une place dans l'écosystème de la construction p. 13

3 Des prototypes pour rechercher les optimums constructifs en biosourcé p. 33

4 Les enseignements du prototypage p. 45

5 Les perspectives pour le développement des matériaux bio et géosourcés p. 60

## Une équipe qui mêle recherche et conception

Le projet *Maillons* est conduit par une équipe de 9 entités, mêlant centre de formation et de recherche, centre de ressources, bureaux d'études et agence d'architecture.
Si tous les maillons ne sont pas représentés au sein de *Maillons*, ceux couvrant les techniques constructives jusqu'à l'architecture sont au cœur des compétences du groupement.

**Ekopolis, ARPE**
Centres de ressources respectivement de l'Île-de-France et de la Normandie. Ces associations recueillent, centralisent et mettent à disposition des ressources et proposent des formations notamment en matière de construction bio et géosourcée

**Georges**
Agence d'urbanisme, de paysage et d'architecture

**LM Ingénieur**
Bureau d'étude structure et thermique, spécialisé dans l'étude de solutions constructives alternatives, mettant l'accent sur l'utilisation de matériaux biosourcés et géosourcés

**Zefco**
Bureau d'études environnement, positionné sur l'accompagnement des politiques publiques pour la transition environnementale, et la conception environnementale de projets urbains ou de bâtiments

**Ingénéco Technologies**
Cabinet d'ingénierie-conseil, d'expertise, de recherche et de formation spécialisé dans le management des innovations bas-carbone. Animateur de plusieurs chaires industrielles et membre de nombreuses commissions de normalisation au niveau français et européen

**BMF**
Bureau d'études en économie du bâtiment

**ENSAN**
École nationale supérieure d'architecture de Normandie

**UniLasalle**
École d'ingénieur et centre de recherche en agronomie



## Massifier l'usage des matériaux bio et géosourcés

Les matériaux bio et géosourcés sont mobilisés dans tous les scénarios d'atténuation du changement climatique. Poussés par la réglementation, ils jouent un rôle dans les stratégies nationales et locales. L'hypothèse d'un maillage territorial de leur production et de leur usage semblerait profiter à la fois au climat et au développement économique. Typiquement la Vallée de la Seine offre la perspective d'un territoire de ressources et de commandes diversifiés pertinent. Cependant ces filières sont encore trop limitées à quelques acteurs engagés pour jouer pleinement tous ces rôles.

Le postulat de *Maillons* est que pour une diffusion large de ces matériaux il faut s'intéresser à chaque maillon de la chaîne de production bâtie. Co-financée par les régions Île-de-France et Normandie, par l'ADEME, dans le cadre du CPIER[1], et par les membres du consortium, cette recherche investigue ce qui détermine l'emploi ou non de ces produits. Sa particularité réside dans le fait de croiser sourçage (lecture de l'écosystème) avec prototypage (conception et évaluation d'architectures).

Le sourçage a investigué une cinquantaine d'échantillons immobiliers et une cinquantaine de systèmes constructifs à partir de 9 filières bio et géosourcées de la Vallée de la Seine.

Le prototypage a ensuite imaginé 5 prototypes de conception, chacun déclinés en 3 variantes, pour permettre de décrire les résultats en termes normatifs, économiques et carbone.

La stratégie identifie les axes d'action pour enclencher la massification des matériaux bio et géosourcés dans la construction.

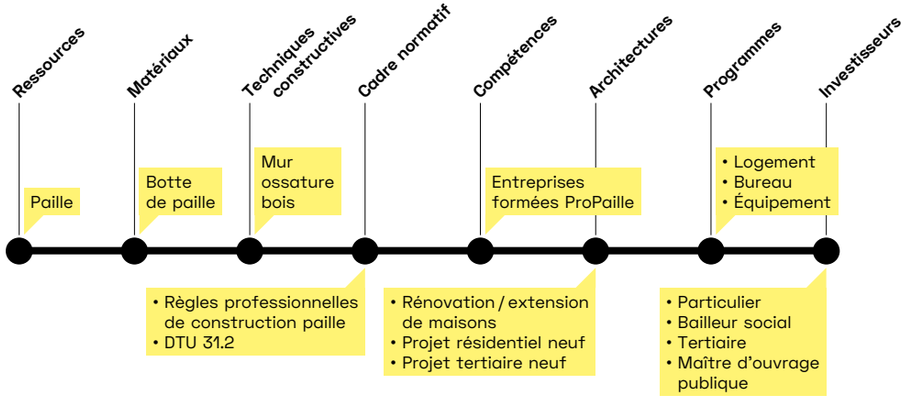
1. Contrat de plan interrégionaux État-Régions

### Les maillons de la chaîne de production bâtie

De la ressource au programme immobilier, les maillons décrivent les différentes étapes de transformation, d'études, de conception ou de financement nécessaires à l'utilisation des matériaux bio et géosourcés dans la construction. Une chaîne complète de maillons nécessite un certain nombre de prérequis.

Dans le cas de la paille, pour que cette ressource devienne un matériau de construction, il faut travailler sur un format de pose, en botte par exemple. Ensuite ce matériau doit être intégré dans une technique constructive, ici le mur ossature bois. L'assurance de la sécurité de cette mise en œuvre et de sa longévité est cadré par des règles professionnelles et un DTU. Puis, la pose mobilise des entreprises formées à la ProPaille. Tout cela doit se coupler en amont de la chaine avec le savoir-faire d'un architecte qui aura su intégrer les atouts et les contraintes de la technique MOB botte de paille, et l'engagement d'un investisseur prêt à soutenir la démarche dans un programme donné.

**Exemple d'une chaîne complète de maillons, à partir de la ressource paille**






# La Vallée de la Seine : un territoire d'immobilier dynamique mais contrasté

**La Vallée de la Seine accueille 21% des logements et 27% des emplois métropolitains sur seulement 7% du territoire. Entre le cœur de l'Île-de-France et les ruralités normandes, ces volumes globaux embrassent des situations urbaines très différentes et traduisent une très grande diversité de dynamiques immobilières, tant sur le neuf que sur la rénovation.**

## Portrait des programmes de la Vallée de la Seine

Avec 36,5 milliards d'euros de chiffre d'affaires du bâtiment en 2021, l'Île-de-France concentre 25 % du marché immobilier national contre 5 % en région Normandie[1].

Dans la perspective d'une massification du recours aux matériaux bio et géosourcés, il nous a semblé indispensable de sonder cette diversité. La répartition économique du marché montre la dominance de l'immobilier résidentiel (54 %) par rapport à l'immobilier d'entreprise (37 %). L'immobilier des services publics (9 %) n'est pas traité dans cette étude en raison du caractère singulier de chacun de ces bâtiments.

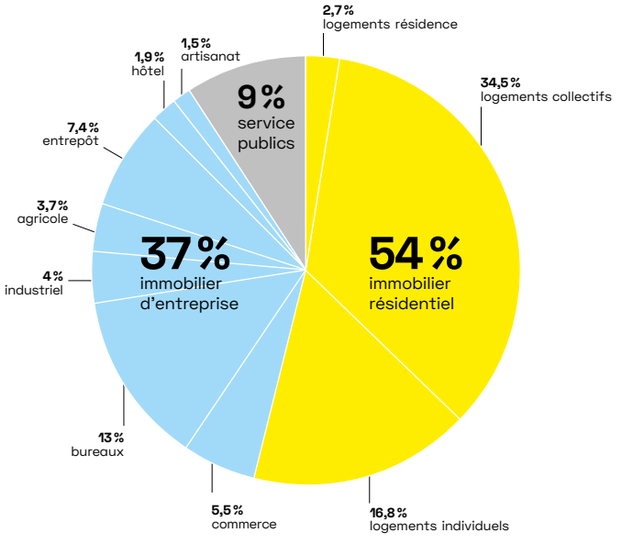
La répartition territoriale des dynamiques immobilières, est effectuée à partir du nombre de logements construits annuellement par l'Établissement de Coopération Intercommunale (EPCI). De fortes disparités de dynamiques de construction sont constatées. Elles soulignent les écarts entre centre urbain dense / territoire rural détendu, littoral / rétro littoral et site urbanisé / site industriel.

1. Source : réseau des CERC

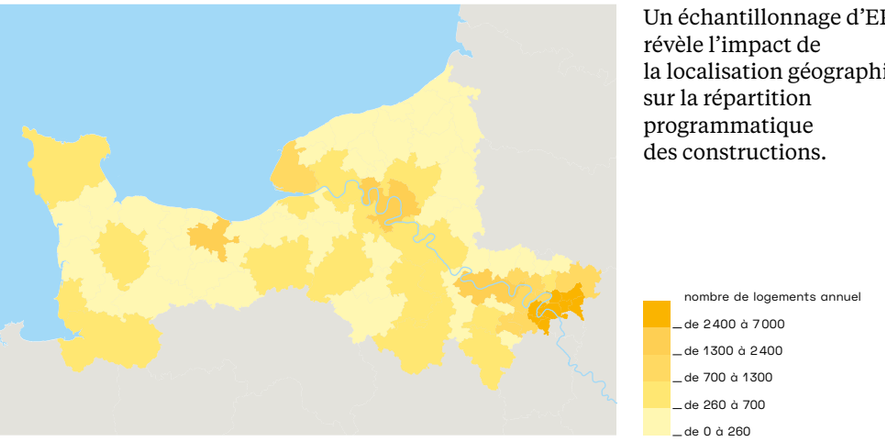


## Répartition des surfaces de constructions neuves sur le territoire de la Vallée de la Seine

Source : Sitadel2 (2012-2021)



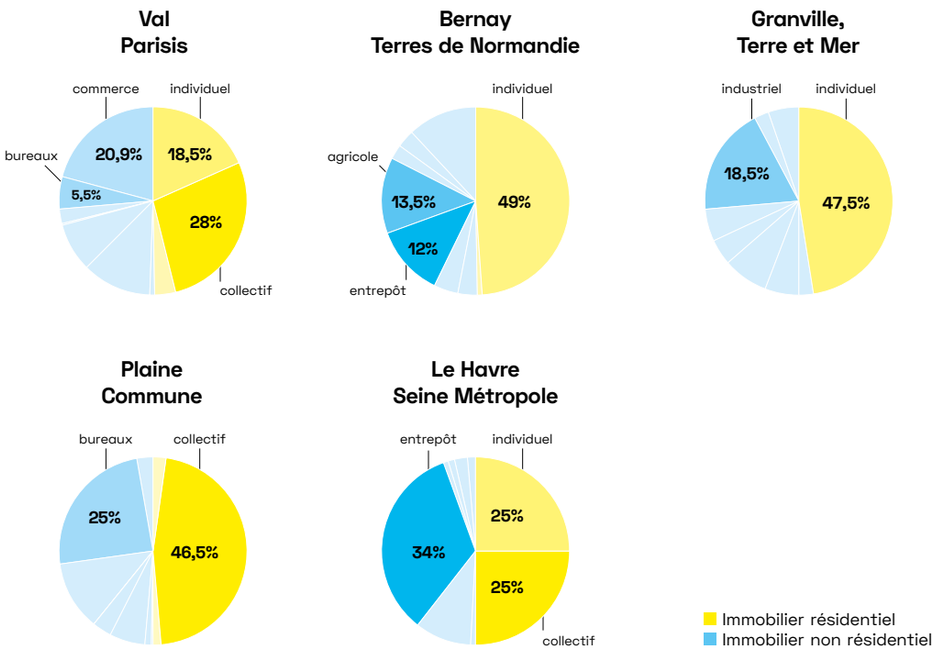

## Les dynamiques immobilières sur le territoire de la Vallée de la Seine




Un échantillonnage d'EPCI révèle l'impact de la localisation géographique sur la répartition programmatique des constructions.

Graphique établi à partir du nombre de logements produits par an et par EPCI (moyenne annuelle sur la période 2008-2018). Source : INSEE

## Les disparités de répartition du marché immobilier




Les disparités de répartition du marché immobilier nécessitent vraisemblablement des approches différenciées pour la massification des matériaux bio et géosourcés :

- Les territoires denses qui développent des hauteurs plus élevées,
- Les sites attractifs qui peuvent imposer des cahiers des charges ambitieux,
- Les territoires moins denses qui peuvent être moteurs pour les mises en œuvre sobres et simples.

Globalement, la raréfaction du foncier nécessite un changement de paradigme de la commande immobilière, pour engager la transition vers la rénovation bâtiments existants.

Sur cette base, nous avons identifié une sélection de projets immobiliers récents, représentatifs des volumes de construction par EPCI et par type de programme que nous nommons « échantillons ».

Une première sélection de 48 échantillons neufs, complétée d'une analyse des opérations de réhabilitation et rénovation, a servi de base à un travail d'enquête auprès de promoteurs, de bailleurs et d'aménageurs impliqués dans leur réalisation. L'objectif était d'apprécier la réceptivité des porteurs de projets et des programmes à la transition vers des matériaux bio et géosourcés.



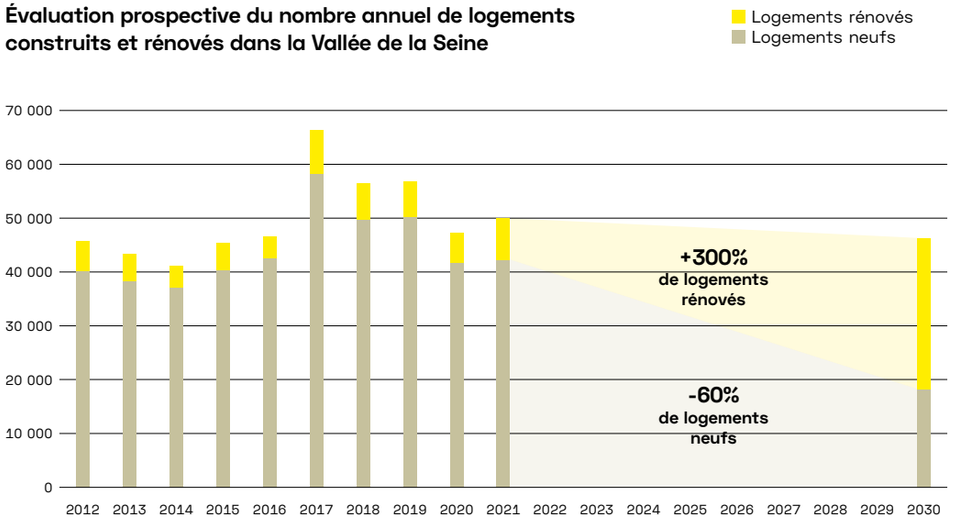
## Prospective 2030 : un changement de paradigme dans la production

La trajectoire carbone nationale, depuis la planification jusqu'à la réglementation, participe indiscutablement d'une évolution profonde des référentiels encadrant les métiers de la construction.

Se projeter à l'horizon 2030 signifie comprendre le secteur aujourd'hui. Or sur la période d'étude, entre 2021 et 2024, le marché a connu plusieurs perturbations macroéconomiques majeures. La crise de l'immobilier actuelle, décrite par les opérateurs comme un effet « ciseaux » entre, d'une part, une évolution rapide des coûts de la construction, et, d'autre part une l'évolution des conditions d'accès au crédit, rend l'approche tendancielle incertaine, même à court terme.

L'application de scénarios prospectifs comme ceux de «Transition 2050» (ADEME), implique des bouleversements structurels dont on peine à mesurer l'ensemble des effets directs comme indirects. Sur le territoire de la Vallée de la Seine, si la construction neuve domine largement actuellement, avec 85% des opérations en résidentiel en 2021, l'application des scénarios nationaux implique un rythme diminué de plus de la moitié, et une part de réhabilitation prépondérante. Cette seule variable suppose un repositionnement massif de l'ensemble du système d'acteurs, une refonte des chaînes de valeur, une révision profonde de la manière dont on envisage le patrimoine, et la consolidation de la réglementation environnementale encadrant la rénovation.

**Évaluation prospective du nombre annuel de logements construits et rénovés dans la Vallée de la Seine**



**Précautions de lectures pour le travail de *Maillons*:**

La méthodologie utilisée a été l'objet de nombreux échanges et la représentation du marché du territoire de la Vallée de la Seine qui en découle a été jugée comme pertinente par l'ensemble des acteurs rencontrés.
Elle présente cependant les limites suivantes:

- Nous sommes partis du postulat que la perspective « massification » concerne d'abord les volumes de construction ou rénovation les plus significatifs: elle ne saisit pas les programmes ou destinations « de niche » (type « artisanat », « résidence » ou « hôtel »). Le périmètre de la présente étude n'inclut pas certains lots – comme les réseaux par exemple – dont le dimensionnement suppose une technicité incompatible avec les données, délais et moyens disponibles dans le cas de la présente étude.
- La mise en discussion des échantillons porte pour partie sur des environnements techniques, réglementaires et économiques spécifiques. Les programmes ou destinations englobant des bâtiments trop hétérogènes ont été écartés (type « services publics » qui englobent des hôpitaux, des piscines, des écoles...).
- Certains opérateurs identifiés n'ont pas donné suite à nos sollicitations: une partie de l'échantillon n'a donc pas pu être mise en discussion de manière qualitative.

Les deux extrémités de notre spectre d'analyse ont été l'objet d'une approche différenciée:

- Les Établissements Publics Territoriaux les plus proches de Paris présentent des volumes, des produits et un système d'acteurs très différents du reste du territoire de la Vallée de la Seine. Nous avons par ailleurs rencontré de grosses difficultés à identifier les opérateurs intervenant sur les communautés de communes présentant les volumes de construction les plus faibles et ainsi à mettre au travail une partie de notre échantillon (maisons individuelles en tissu rural).



# Des ressources abondantes qui doivent se faire une place dans l'écosystème de la construction

*Maillons* prend comme point de départ les ressources agricoles ou minérales de la Vallée de la Seine: la terre crue, la pierre, la paille, le chanvre, le lin, le roseau, le bois, le maïs, le tournesol et le miscanthus. Les maillons sont ensuite déclinés par systèmes constructifs qui réunissent une manière d'utiliser la ressource et un contexte technico-normatif. Le sourçage dresse un état des lieux des possibilités d'utilisation de ces ressources comme matériaux pour la construction. Cette analyse est nécessairement située dans le temps, car nos connaissances sur ces ressources, ainsi que la structuration des filières, évoluent vite.



Paysage de terres excavées

Paysage de terres excavées



Champ de lin

Récolte du lin



Balle de lin

Briques de terre crue

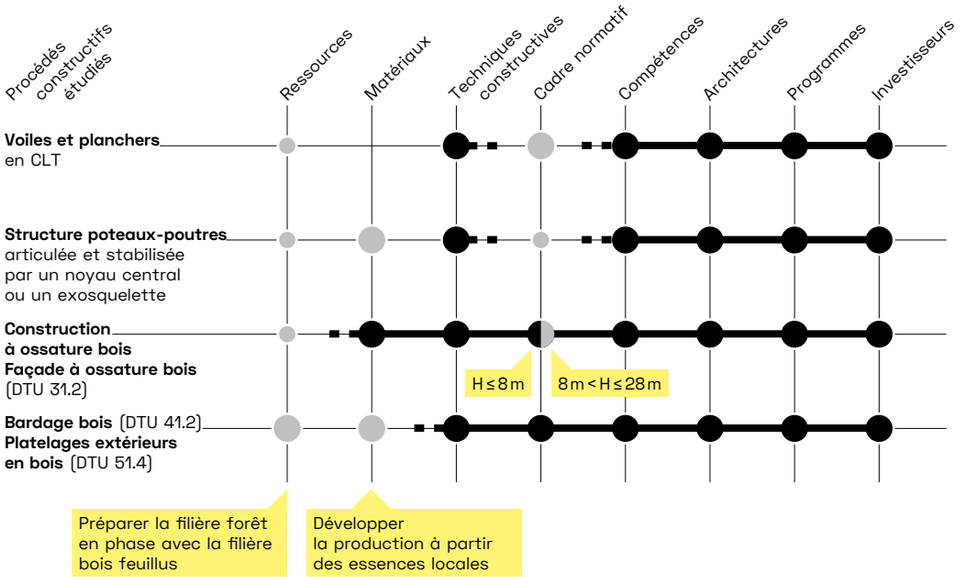


Mur en pisé

La Ferme du rail, bâtiment de serre productive, Paris 19e

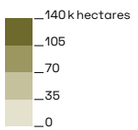
## Le bois

Le bois est la filière biosourcée la plus mature au niveau français, encadrée par plusieurs Normes et DTUs pour des essences de bois de type résineux. Or la Vallée de la Seine dispose de ressource feuillue, moins connue et souvent plus chère du fait de sa valorisation plus habituelle en mobilier. À l'autre bout de la chaine, les maillons de la commande et de la maitrise d'œuvre sont mûrs, dynamisés par les Pactes Bois et Biosourcés. Le cadre normatif est le maillon à faire évoluer entre les deux pour étendre les limites du domaine d'emploi du feuillu.





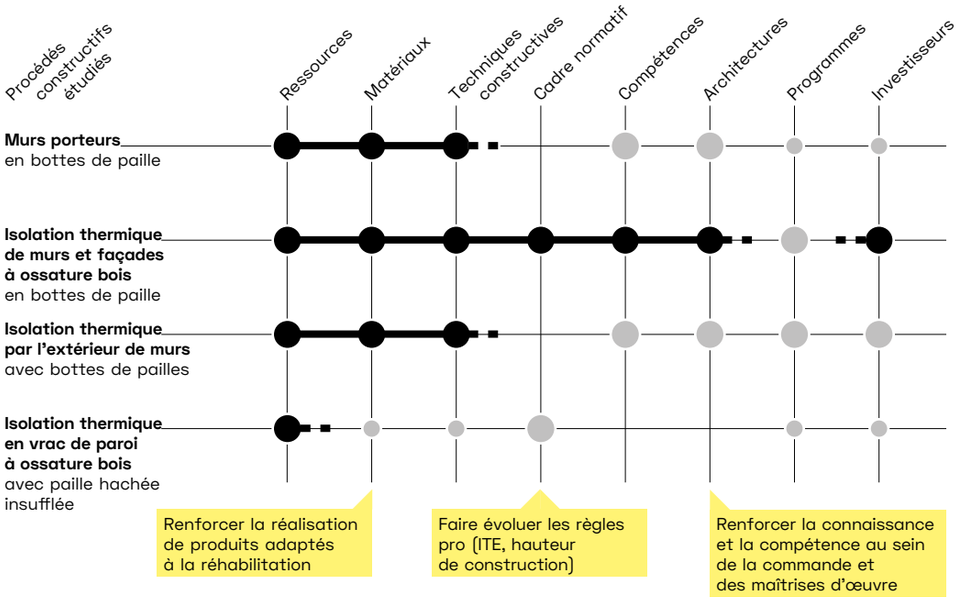

**Production de bois de forêt par département en milliers d'hectares (part de bois feuillus)**
Source: inventaire forestier national de l'IGN (2016-2020). Les départements du 78, 91, 92, 93, 94 et 95 ont été groupés.

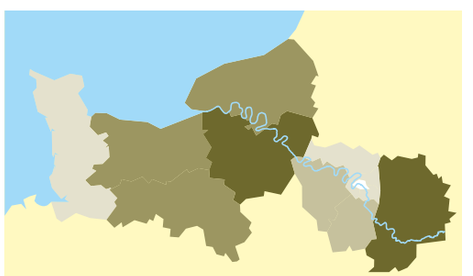




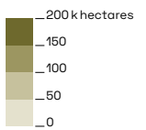

## La paille

La paille est abondante sur la Vallée de la Seine, riche en cultures de blé. Cependant, elle est encore peu utilisée en construction malgré les nombreux avantages du matériau et une filière constructive bien structurée. Le travail se poursuit pour renforcer les domaines d'application des règles professionnelles, améliorer la connaissance scientifique ou développer de nouveaux matériaux paille. En parallèle, le recensement des divers usages évitera d'éventuelles concurrences entre apports au sol, litière animale, valorisation énergétique, chimie verte et construction.



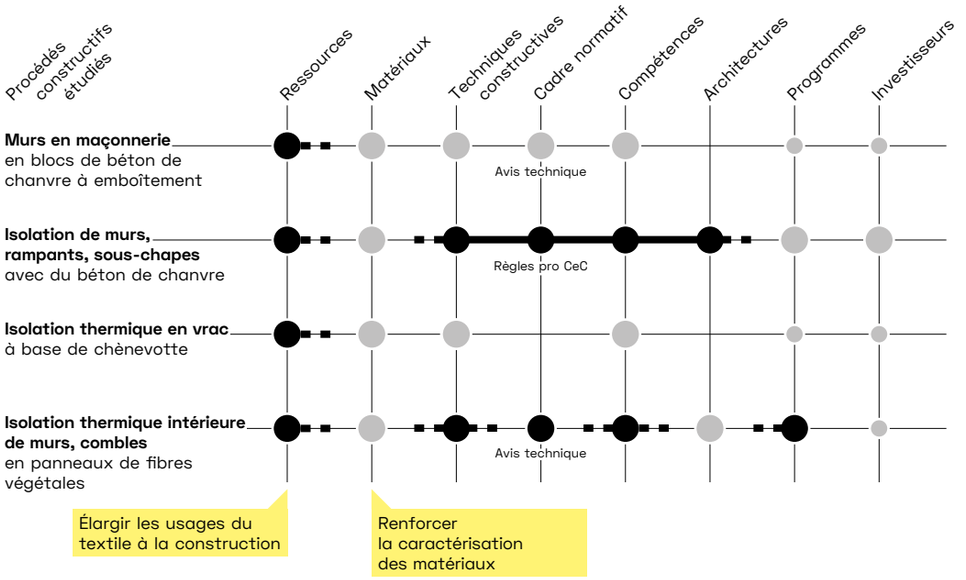



**Production de paille de blé par département en milliers d'hectares**
Source: Agreste



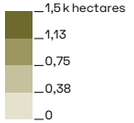
## Le chanvre

Le chanvre est une culture bien implantée en Île-de-France et en développement en Normandie, mais encore peu répandue dans le domaine de la construction. Pour les procédés d'isolation, qui utilisent les coproduits de la production textile, la filière est mature et prête pour la massification. Pour les procédés qui utilisent le chanvre en tant qu'agrégat dans un béton, le développement repose sur le renforcement de la reconnaissance via l'évolution de ses règles professionnelles et le travail sur la mise en valeur de ses bénéfices, par exemple sur la gestion de l'hygrométrie.





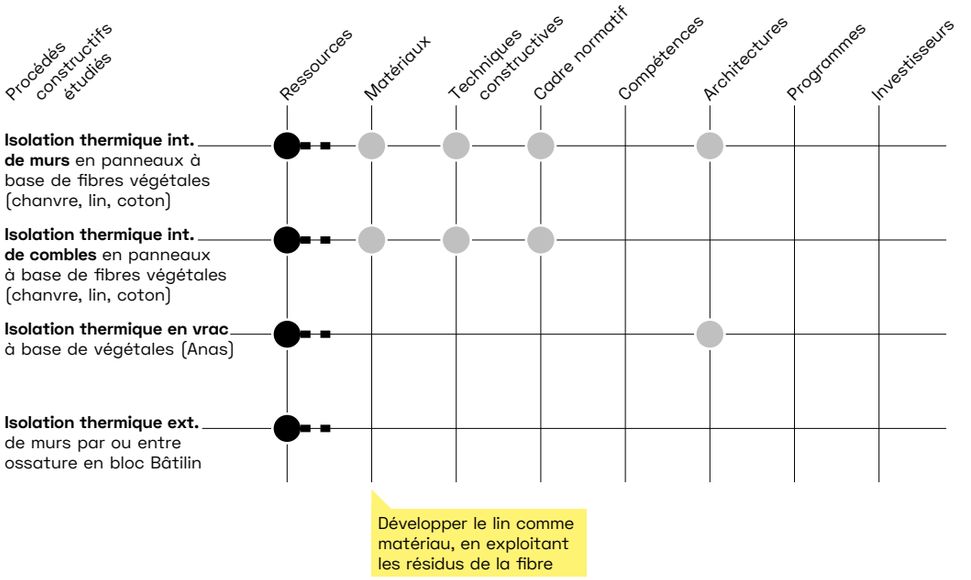

**Production de chanvre par département en milliers d'hectares**
Source : https://www.interchanvre.org/interchanvre (données de 2017)

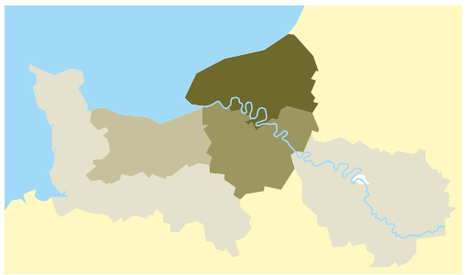




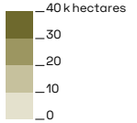

## Le lin

La Normandie est la première région productrice de lin au monde. La valorisation de la chènevotte et des anas de lin en construction représente une complémentarité intéressante avec la filière textile, mais nécessite un travail important de développement de matériaux et d'un cadre normatif adaptés. En isolation intérieure, il existe cependant des avis techniques pour les panneaux de lin qui peuvent être de ce fait facilement déployés. Il faut noter cependant que les sécheresses récentes du territoire impactent ses rendements et incitent à réfléchir à d'autres périodes de culture.



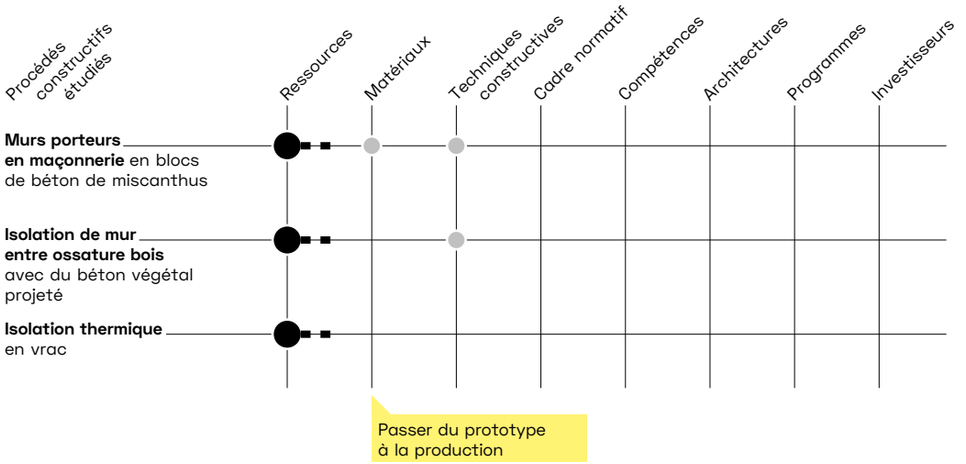



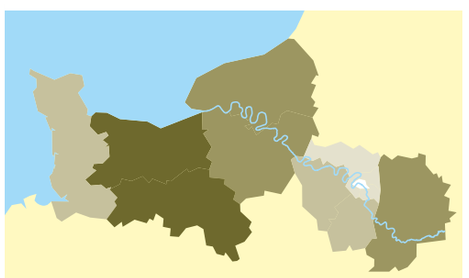
**Production de lin textile par département en milliers d'hectares**
Source : Agreste



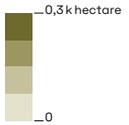
## Le miscanthus

Le miscanthus est une fibre qui émerge sur le territoire de la Vallée de la Seine. Il se développe progressivement sur des espaces impropres aux cultures annuelles habituelles. Il reste en effet en place pendant 15 à 20 ans, et ne peut pas rentrer dans les systèmes de rotations. Le passage à l'échelle de la construction nécessite cependant d'aller au-delà du stade des prototypes.



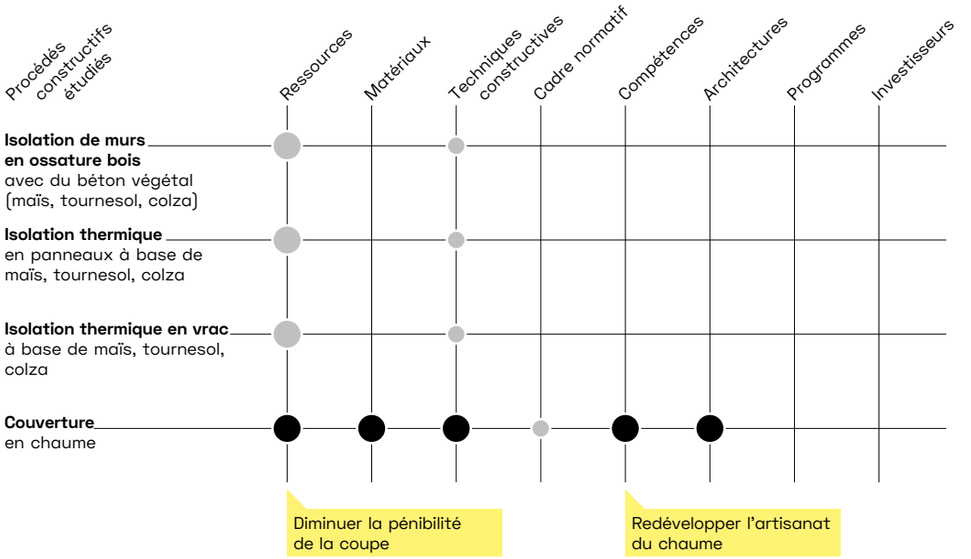
**Production de miscanthus par département en milliers d'hectares**
Source: Agreste





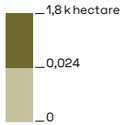

## Le roseau

Le roseau est à la base du chaume, matériau millénaire pour la construction, et très certainement un emblème normand. La ressource est abondante et spontanée sur les zones humides, ce qui en fait une ressource très sobre. Elle nécessite cependant des techniques de coupe aujourd'hui tombées en désuétude. Remettre ce matériau dans le panel des solutions classiques demande un investissement sur la partie amont de la coupe, et une action pour développer son corpus réglementaire, mais offre une palette diversifiée de possibilités de mise en œuvre.






**Surfaces de roselières par région en milliers d'hectares**
Source: Office français de la Biodiversité, rapport « Les roselières en France métropolitaine: premier inventaire (1998-2008) »



## Le maïs, le tournesol, le colza

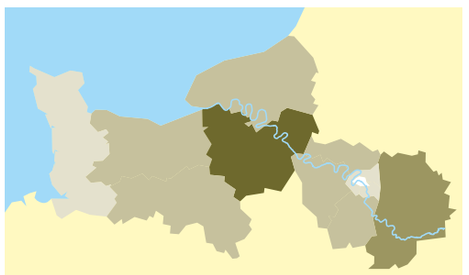
Si les ressources en maïs, tournesol ou colza sont abondantes sur le territoire, les coproduits sous forme de tiges ou de balles sont relativement peu développés. Pour la construction, leur usage est aujourd'hui au stade de l'expérimentation et aucun cadre normatif n'existe. Pour autant, la diversification sur un maximum de ressource est en enjeu clef, avec des bétons ou des panneaux isolants, car elle permet de diminuer les aléas liés à la production agricole : si une année est mauvaise pour un type de culture, elle pourra être compensée par une autre.




**Production de maïs par département en milliers d'hectares**
Source : Agreste




**Production de tournesol par département en milliers d'hectares**
Source : Agreste

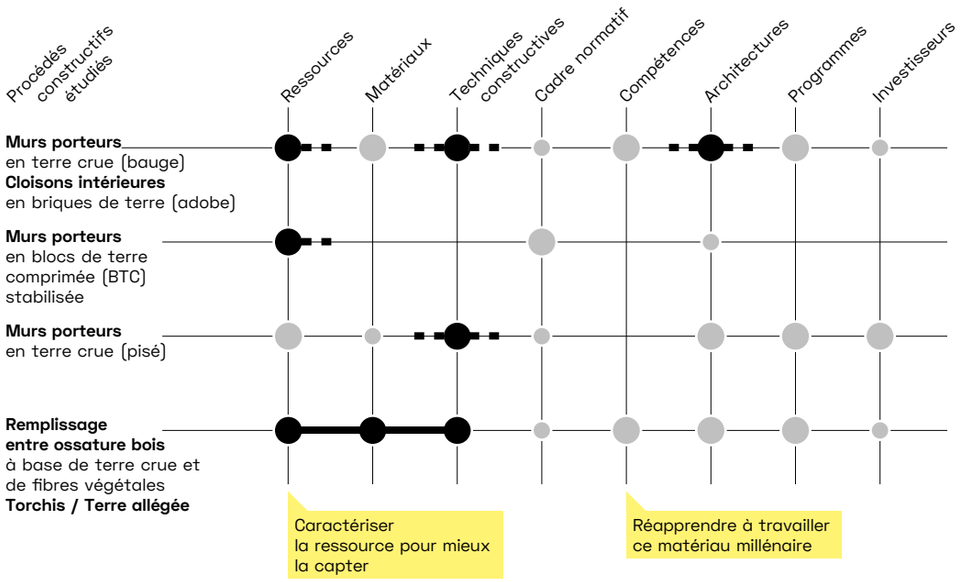



**Production de colza par département en milliers d'hectares**
Source : Agreste



## La terre crue

Les excavations fournissent une ressource de terre abondante. Laissée crue, elle mobilise peu d'énergie pour sa transformation en matériaux de construction, et offre de nombreux atouts, comme l'inertie ou la gestion de l'hygrométrie. Pour autant, elle nécessite des compétences peu répandues aujourd'hui, notamment sur la caractérisation de la ressource et sa mise en œuvre. La filière se formalise cependant, avec des guides de bonnes pratiques et des ATEx pour la BTC francilienne. Le Projet National Terre en cours va poursuivre la production de données scientifiques.

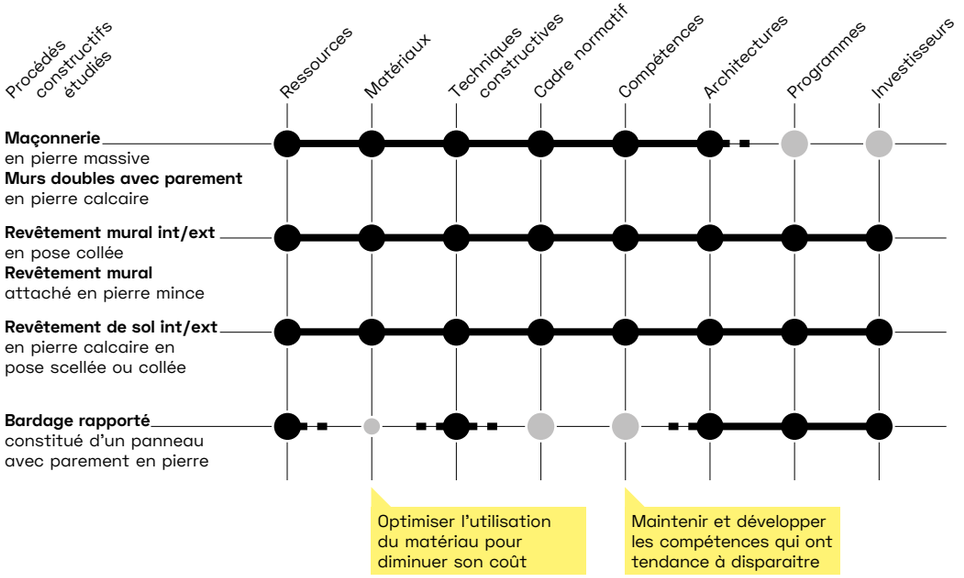


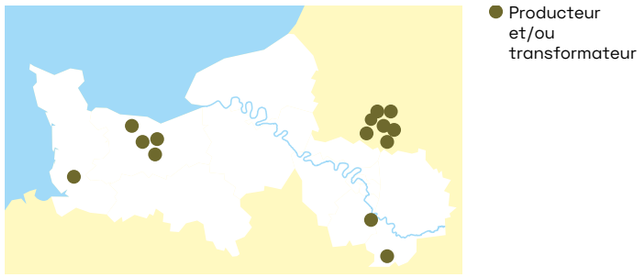



**Disponibilité de terre excavée**
Répartition géographique

## La pierre

La pierre est un matériau durable qui, même s'il nécessite de l'énergie d'extraction, a une durée de vie quasi infinie. Son cadre normatif est étoffé et permet aujourd'hui d'envisager de nombreuses mises en valeur en construction. Il existe ainsi des DTU pour les maçonneries en pierre massive, les parements collés en pierre, les bardages en pierre minces. Le point à renforcer est le métier de tailleur de pierre, difficile, et la valorisation de toute la matière extraite pour retrouver une économie de la pierre, car aujourd'hui seulement 40 % de la pierre extraite est valorisée.






## Les enseignements transversaux en filières

Si chaque ressource a ses développements et caractéristiques propres, nous avons pu isoler quelques traits communs en analysant leurs différents maillons :

**Enseignement n°1**
**Le bio et géosourcé en architecture : une image à valoriser**

Les matériaux biosourcés sont en général encore peu utilisés en construction, et pâtissent même parfois d'interrogations plus ou moins légitimes sur leur robustesse réelle (syndrome des 3 petits cochons).

Un chose demeure cependant : ils présentent des spécificités notamment vis-à-vis de l'humidité et du risque incendie que les écosystèmes d'acteurs rencontrés sont peu habitués à gérer. Une attention particulière à la bonne gestion de la qualité et à la réduction des contre-références est primordiale.

Leurs performances environnementales peinent par ailleurs à être valorisées face à des communications très efficaces et bien diffusées des matériaux conventionnels sur leur impact : béton dit « bas carbone », béton recyclé, laine minérale en économie circulaire, etc.

Pour *Maillons*, accroître l'attractivité des matériaux bio et géosourcés nécessite de traduire leur intérêt environnemental avec des échelles communes, comme on peut l'avoir avec le nutriscore alimentaire : impact carbone, besoin en énergie, consommation de ressources, intérêt pour la santé, intérêt pour l'adaptation au changement climatique…

**Enseignement n°2**
**La nécessité de développer les connaissances et compétences**

Les besoins de formation sont forts à tout niveau, du CAP au BAC+5, de la mise en œuvre à la conception si l'on souhaite massifier les bio et gésosourcés. En effet, quelle que soit la filière, les méconnaissances révélées par le sourçage touchent autant les propriétés des matériaux que les modalités de leur intégration dans un projet ou la réception par les utilisateurs finaux.

Concevoir avec des bio et géosourcés implique de se poser la question de la matière et de ses caractéristiques, ce qui constitue une nouveauté par rapport aux caractéristiques standardisées du béton de ciment. Si des formations spécifiques existent pour de nombreuses filières (Pro Paille, Construire en Chanvre, etc.), elles sont peu intégrées aux formations initiales et relèvent d'engagements individuels.

Appréhender la question de la matière permet par ailleurs d'être mieux outillé pour aborder la rénovation du bâti ancien, qui implique de bien comprendre les comportements des matériaux en place.

Afin de développer ces compétences, *Maillons* pointe le besoin d'une politique régionale de formation, mobilisant les écoles d'enseignements supérieurs, pour intégrer à leur programme un enseignement plus territorialisé, basé sur les ressources locales. Du CAP au Bac Pro, toute la chaîne de la conception à la mise en œuvre doit être couverte pour faire face aux besoins en expansion. À l'instar de la terre à Grenoble, les écoles de Normandie et d'Île-de-France pourraient par exemple développer un pôle sur la construction en paille ou la rénovation en chanvre.

Concernant la mise en œuvre, les compétences existent aujourd'hui mais sont associées à des projets localisés et/ou de petites échelles, et menés par des entreprises artisanales ou de petite

taille. Pour accompagner la montée en puissance du tissu d'entrepreneurs, il faut pouvoir généraliser l'allotissement pour correspondre aux capacités de réponse des petites structures, et en parallèle permettre aux acteurs conventionnels de monter en compétences sur ces matériaux.

**Enseignement n°3**
**Le cadre normatif : une condition nécessaire pour la massification**

Beaucoup des pratiques actuelles, du fait de leur faible échelle, se dispensent du respect strict du domaine d'usage des matériaux et procédés constructifs : elles reposent beaucoup sur la confiance entre un artisan expert et un maître d'ouvrage engagé. Ce système, risqué sur le plan du droit, peut fonctionner tant qu'il n'y a pas de problème. Le passage à une plus grande échelle nécessite cependant de s'inscrire dans un cadre plus robuste, qui permette d'intégrer un plus grand nombre d'acteurs en limitant les risques de désordres et en permettant les recours normaux présents dans les chaînes de valeur habituelles.

Pour rappel, la souscription d'une assurance dommage-ouvrage est obligatoire et, pendant les dix premières années après la réception, elle soutient l'hypothèque du financement octroyé : il y a donc un véritable enjeu de solvabilité qui est associé à la démonstration de fiabilité.

Si plusieurs filières ont commencé à bâtir ce cadre technico-normatif (chanvre, paille, terre, bois), celui-ci requiert des approfondissements pour embrasser la diversité des demandes qui, de leur côté, auront à gagner à se recentrer sur des cas en nombre limité.
Certaines filières (miscanthus, anas de lin) n'ont pas encore de cadre de reconnaissances normatives et nécessitent, pour ce faire, de développer un corpus de connaissances sur leur usage en construction.

**Enseignement n°4**
**La question de l'accès à la ressource et au matériau**

Les produits bio et géosourcés ne sont pas toujours accessibles au plus grand nombre. En effet, les processus d'approvisionnement et de commercialisation sont souvent moins structurés que pour les matériaux conventionnels, ce qui contribue à ne pas en faire un choix de facilité. L'entrée par les canaux de distribution est un facteur clef de visibilité, même si les conditions tarifaires pour y entrer découragent les filières les plus artisanales.

Par ailleurs, une réflexion s'impose sur la chaîne de transformation de la matière première qui nécessite un réseau d'acteurs complémentaires et territoriaux comme ont pu le faire ressortir nos différents entretiens. Elle concerne le stockage, permettant de lisser la disponibilité de cultures par essence ponctuelles, le format de mise à disposition pour faciliter les usages constructifs, ou encore les sites de transformation intermédiaire pour travailler les fibres brutes.

Enfin, même si les ressources agricoles et sylvicoles sont abondantes sur le territoire de la Vallée de la Seine, le risque existe de développer des concurrences avec d'autres formes de valorisation, en cours de développement, comme la valorisation énergétique ou la synthèse de polymère pour remplacer le plastique pétrochimique. La massification de l'emploi dans la construction doit tenir compte de cet équilibre et rechercher la diversification des sources pour permettre des ajustements conjoncturels. La préservation des espaces agricoles et naturels est aussi plus que jamais primordiale.



# Des prototypes pour rechercher les optimums constructifs en biosourcé

**Le travail à partir de prototypes permet de réfléchir aux évolutions nécessaires pour intégrer les matériaux bio et géosourcés. La proposition de plusieurs variantes permet de cibler celles qui sont réalisables dès aujourd'hui sans difficulté majeure, notamment technico-normative.**
**Ce travail permet aussi d'évaluer les impacts sur les coûts de production et sur la baisse des émissions carbone.**

## Des prototypes représentatifs

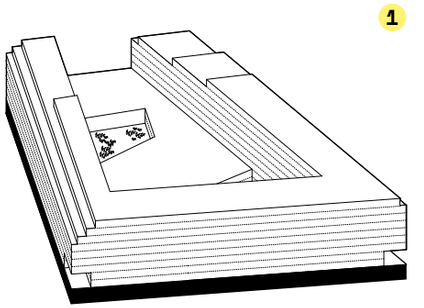
L'analyse quantitative et qualitative de la commande a permis de sélectionner un ensemble de douze bâtiments récents représentatifs de l'actualité immobilière du territoire de la Vallée de la Seine : les archétypes. Au sein de ce premier échantillon « d'archétypes », nous avons élaboré un second échantillon plus resserré de « prototypes », c'est-à-dire un ensemble d'opérations propices à la perspective de massification du recours au matériaux bio et géosourcés.

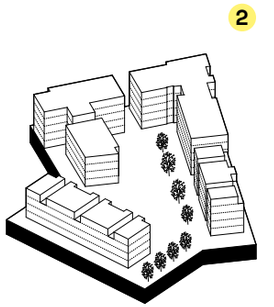
Ce panel est principalement appréciée pour le volume de construction concerné aujourd'hui (pour le logement neuf notamment) ou à horizon 2030 (pour les rénovations/réhabilitations notamment), ou parce que leur cadre technico-économique semble favorable à dire d'experts (pour le bureau neuf notamment).

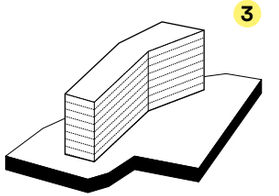
Les prototypes se répartissent de cette manière :

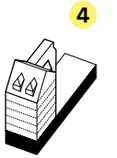
- deux constructions neuves : un îlot tertiaire 1 et un îlot résidentiel 2 ;
- deux rénovations de logements collectifs, l'un en structure béton 3, l'autre en moellons 4 ;
- une opération mixte d'une maison individuelle intégrant rénovation et extension (en cours et donc hors de cette synthèse) 5.













### 1 L'îlot tertiaire neuf

| | |
|---|---|
| Localisation | **Aubervilliers** |
| Époque de construction | **Années 2015 - 2020** |
| Part de marché immobilier Vallée de la Seine | **12 %** |
| Part du neuf | **13 %** |
| Hauteur | **R+7** |
| Catégorie sécurité incendie | **Code du travail** |

### 2 L'îlot résidentiel neuf

| | |
|---|---|
| Localisation | **Colombelles** |
| Époque de construction | **Années 2015 - 2020** |
| Part de marché immobilier Vallée de la Seine | **34 %** |
| Part du neuf | **34 %** |
| Hauteur | **R+3** |
| Catégorie sécurité incendie | **Habitation 2e famille** |

### 3 La rénovation de logements collectifs en béton

| | |
|---|---|
| Localisation | **Cherbourg** |
| Époque de construction | **Après 1940** |
| Part de marché immobilier Vallée de la Seine | **6 %** |
| Part de la réhabilitation | **76 %** |
| Hauteur | **R+7** |
| Catégorie sécurité incendie | **Habitation 3e famille** |

### 4 La rénovation de logements collectifs en moellons

| | |
|---|---|
| Localisation | **Paris** |
| Époque de construction | **Avant 1940** |
| Part de marché immobilier Vallée de la Seine | **6 %** |
| Part de la réhabilitation | **76 %** |
| Hauteur | **R+5** |
| Catégorie sécurité incendie | **Habitation 3e famille** |

### 5 La rénovation/extension d'une maison individuelle

| | |
|---|---|
| Localisation | **Vétheuil** |
| Époque de construction | **Années 1820 - 1919** |
| Part de marché immobilier Vallée de la Seine | **1 %** |
| Part de la réhabilitation | **14 %** |
| Hauteur | **R+1 + combles** |
| Catégorie sécurité incendie | **Habitation 1re famille** |

## Des prototypes évalués sur 3 axes

Chacune de ces réalisations, aux meilleurs standards de notre époque, représente le « Business as usual » ou BAU, c'est à dire l'éprouvette à partir de laquelle nous développons des variantes qui intègrent davantage de matériaux bio et géosourcés locaux.

Chaque variante est évaluée en dessins et en chiffres au regard du BAU sur 3 indicateurs quantifiables et 3 indicateurs évalués à dire d'experts.

Indicateurs quantifiés :

- Le caractère innovant défini par la maturité du cadre technico-normatif
- Le gain en kg $CO_2$
- L'impact économique

Indicateurs évalués à dires d'expert :

- La résistance thermique
- La perméabilité à la vapeur d'eau
- L'inertie thermique



## 3 niveaux de difficultés de mise en œuvre

Ces indicateurs d'analyse permettent de proposer un classement de difficulté de mise en œuvre selon l'état actuel du cadre de la construction :

### La variante réalisable

Elle peut être mise en place dès aujourd'hui, à l'exception de certains ouvrages pour lesquels il a été admis d'employer des techniques relevant plutôt de la variante atteignable.

### La variante atteignable

Elle nécessite plusieurs démarches d'adaptation et de justification.

### La variante novatrice

Elle implique une évolution générale du cadre actuel de la construction.

L'objectif est d'identifier les freins et leviers permettant de faire évoluer cette situation.

**Précautions de lectures sur l'approche par prototypes :**

- La méthode de prototypage ne saurait se substituer à une véritable approche de projet. Elle consiste en une simplification drastique de cette dernière, dimensionnée pour les besoins spécifiques de la présente étude. Il s'agit de prendre le projet d'origine en tant qu'éprouvette représentative du marché puis d'apprécier de manière relative l'introduction de quelques ensembles fonctionnels nouveaux.
- Le périmètre de la présente étude n'inclut pas certains lots – comme les réseaux par exemple – dont le dimensionnement suppose une technicité incompatible avec les données, délais et moyens disponibles dans le cas de la présente étude.
- Pour les besoins de l'étude, nous nous sommes concentrés sur un nombre resserré de filières locales (4 filières sur les 9 étudiées en phase 1 : terre crue, paille, bois et chanvre) et sur un nombre limité de systèmes constructifs. Parmi les très nombreuses possibilités, nous avons sélectionné d'une part les filières qui nous paraissaient les plus développées sur le territoire (terre, bois, paille, chanvre), et d'autres part les applications constructives sur lesquelles nous avions le plus de données (prix, carbone, domaine d'usage). La sélection opérée a permis de pousser les analyses au niveau de définition requis mais ne saurait être entendu comme un outil de sélection des filières ou systèmes constructifs à massifier.

## Le prototype du tertiaire neuf à la loupe

Le prototype tertiaire neuf est présenté ici en détails pour illustrer la méthodologie du prototypage.

**Étape 1**
**Identification du prototype**

Cette sélection s'appuie sur des échanges avec les opérateurs locaux. L'échantillon retenu a été identifié comme étant représentatif de l'immobilier d'entreprise des secteurs dynamiques de la Vallée de la Seine. Selon nos interlocuteurs, cet échantillon pourrait intégrer une part significative de matériaux bio et géosourcés car il se positionne sur une gamme de prix élevée et susceptible d'absorber des surcoûts.

Le « Business as usual » à partir duquel nous élaborons notre prototype se situe dans le bassin parisien. Il s'agit d'une opération de bureau de 48 000 m² livrée en 2016 et conçue par Dietmar Feichtinger architectes. Elle est labellisée HQE Exceptionnel et BREEAM Excellent.

Organisé sur huit niveaux en superstructure et trois niveaux souterrains, l'édifice se déploie en U sur un cœur d'îlot paysager. La structure poteau/dalle contreventée par les noyaux est en béton. Sur rue, les parois très largement vitrées sont habillées de brise-soleils dynamiques en métal déployé ; sur jardin, la protection solaire est assurée par les stores extérieurs.

Du fait de la localisation du projet initial et de la configuration du programme, c'est la filière paille qui est associée prioritairement à cet échantillon. En effet, les règles professionnelles paille, si elles ne couvrent pas à ce jour la morphologie du programme concerné, constituent un référentiel technico-normatif robuste soutenu par un réseau d'acteurs dynamiques.

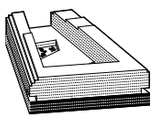
Pour passer de l'archétype au prototype, c'est-à-dire pour envisager un projet comparable accueillant davantage de matériaux bio et géosourcés, un certain nombre d'adaptations sont nécessaires :

- Changer d'imaginaire en matière d'écriture architecturale : le principe de parois vitrées protégées par une vêture pare-soleil pilotée est par nature peu propice à la performance carbone ;
- Engager une optimisation du coefficient de compacité – c'est-à-dire simplifier la morphologie pour limiter les surfaces déperditives, les complexes à étancher, et rationaliser les volumes ;
- Repenser la relation entre le programme et la structure pour limiter les situations rendant l'acier et le béton indispensables : limiter le volume de la coque de stationnement en infrastructure, faire plomber les descentes de charges, limiter les grandes portées et porte-à-faux, etc.



## Les échantillons étudiés pour définir le prototype du tertiaire

**Îlot tertiaire neuf**
Plaine Commune



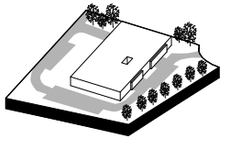
**coefficient d'emprise au sol**
clairsemé — dense

**coefficient d'occupation du sol**
détendu — dense

**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotipe**
anthropisé — biodiversité

**Entrepôt neuf**
Métropole Rouen Normandie



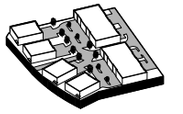
**coefficient d'emprise au sol**
clairsemé — dense

**coefficient d'occupation du sol**
détendu — dense

**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotipe**
anthropisé — biodiversité

**Entrepôt neuf**
Le Havre Seine Métropole



**coefficient d'emprise au sol**
clairsemé — dense

**coefficient d'occupation du sol**
détendu — dense

**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotipe**
anthropisé — biodiversité

**Bâtiment tertiaire et commercial neuf**
Le Havre Seine Métropole



**coefficient d'emprise au sol**
clairsemé — dense

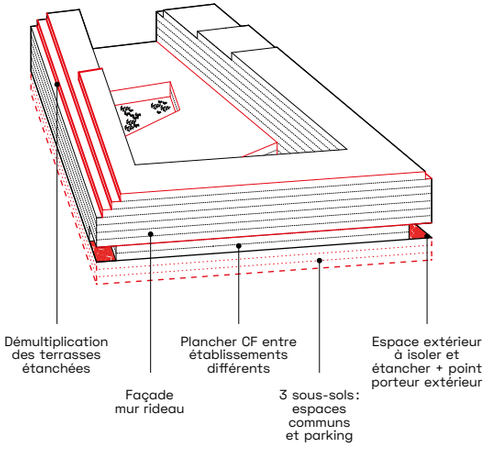
**coefficient d'occupation du sol**
détendu — dense

**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotipe**
anthropisé — biodiversité

## Modifications morphologiques d'une construction neuve tertiaire pour tendre vers une construction bas carbone

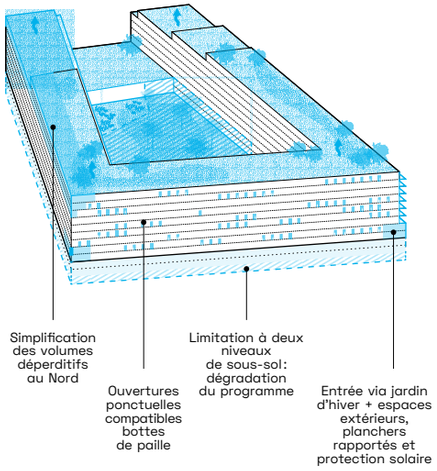
**« Business as usual » — archétype existant**
Identification des freins à la construction bas carbone




**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotope**
anthropisé — biodiversité

**Prototypage — méthode *Maillons***
Identification des leviers vers la construction bas carbone




**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotope**
anthropisé — biodiversité

**Étape 2**
**Développement technique des variantes**
Des variantes constructives mettant en œuvre de la paille sont ensuite déclinées et classées par ordre croissant d'innovation.

**• La variante réalisable : façade à ossature bois (FOB) avec remplissage bottes de paille**
Le revêtement de façade est rapporté.
La structure poteau/poutre et dalle béton est remplacée par une structure poteau/poutre bois (encapsulée) avec des planchers béton spécifiques intégrant un isolant en fibre de bois de remplissage en coffrage perdu permettant de limiter les surcoûts et d'amener de l'inertie à la construction.

NB : le remplissage en botte de paille employé en FOB et les hauteurs du prototype ne sont, au moment de la réalisation de l'étude et de cette synthèse, pas couverts par les règles professionnelles susnommées. Des justifications spécifiques et une évaluation technique (par exemple ATEx de cas b) seraient à entreprendre pour que ce prototype soit réalisé.

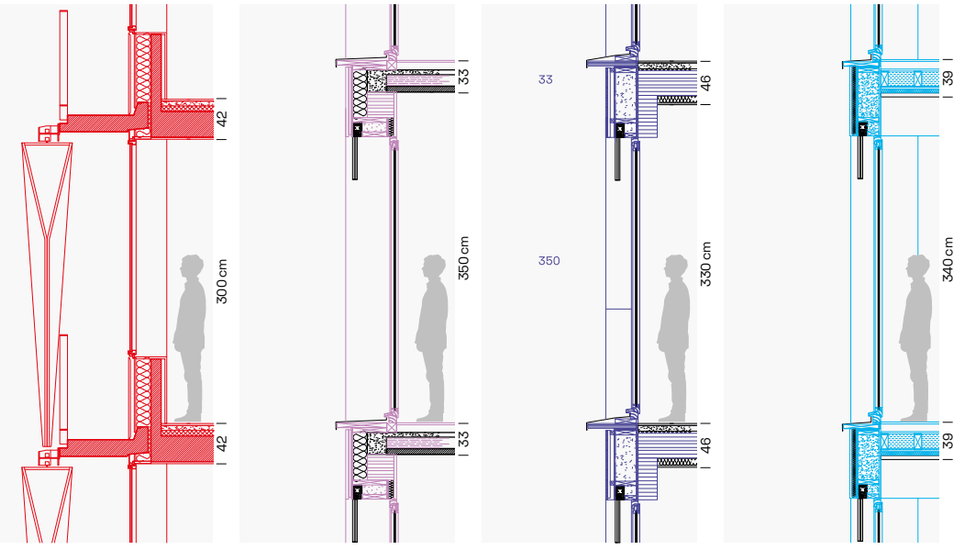
**• La variante atteignable**
Les bottes de paille en façade sont réduites à 22 cm d'épaisseur (bottes de pailles « à façon ») et les planchers évoluent vers une solution bois de type CLT (encapsulé).

**• La variante novatrice**
La botte de paille est remplacée par de la paille hachée insufflé dans des caissons et revêtus côté extérieur d'un bardage ventilé de type enduit sur plaque. Ce dernier complexe de façade étant moins onéreux, la variante novatrice est l'occasion d'évaluer la mise en œuvre d'un plancher en terre crue pour amener de l'inertie au bâtiment.

**Étape 3**
**Estimation des coûts économiques et carbone**
L'ensemble des ensembles fonctionnels embarqués par l'échantillon de base « Business as usual » et les variantes est l'objet d'une estimation des coût économiques et carbone.



# Variantes de fragments de façades biosourcées comparées au Business as usual d'une construction neuve tertiaire.




## Business as usual

**FAÇADE**
Panneaux sandwich
Laine minérale
Allège béton
Doublage peinture

**PLANCHER**
Revêtement
Chape ciment
Isolant acoustique rigide
Dalle béton armé
Plâtre peinture

**STRUCTURE**
Poteaux et dalles
en béton armé

Gain $CO_2$
Surcoût €
R= 4,86 m²K/W
Perméabilité
Inertie

## Variante réalisable

**FAÇADE**
Bardage rapporté
avec système d'enduit
à la chaux sur plaque
Écran thermique
FOB bottes de paille
Panneau OSB
Laine minérale
Doublage intérieur

**PLANCHER**
Faux-plancher avec dalles
et vérins de réemploi
Dalle de compression
Dalle bois béton
Correction acoustique
intégrée sur panneaux
rayonnants

**STRUCTURE**
Poteaux et poutres
en lamellé collé de hêtre

Gain $CO_2$
Surcoût €
R= 8,88 m²K/W
Perméabilité
Inertie

## Variante atteignable

**FAÇADE**
Bardage bois ventilé
Écran thermique
FOB bottes de paille
Enduit terre

**PLANCHER**
Parquet
Chape plâtre
Isolant acoustique rigide
Dalle CLT
Laine minérale
Doublage peinture

**STRUCTURE**
Poteaux et poutres
en lamellé collé de hêtre

Gain $CO_2$
Surcoût €
R= 4,86 m²K/W
Perméabilité
Inertie

## Variante novatrice

**FAÇADE**
Enduit plâtre
Écran thermique
FOB paille hachée
Doublage peinture

**PLANCHER**
Faux-plancher avec dalles
et vérins de réemploi
Panneaux OSB
Solives avec remplissage
marins de terre crue
Panneau et enduit terre
crue

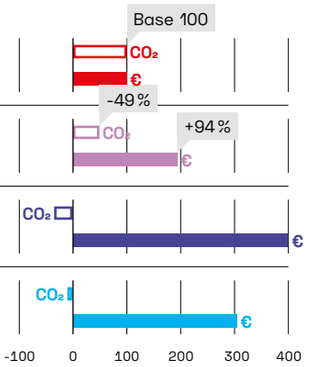
**STRUCTURE**
Poteaux et poutres
en lamellé collé de hêtre

Gain $CO_2$
Surcoût €
R= 4,68 m²K/W
Perméabilité
Inertie

# Bilan : des performances carbone dimensionnantes mais des pas réglementaires ou économiques souvent élevés

### La rénovation de logements collectifs en béton / Façade

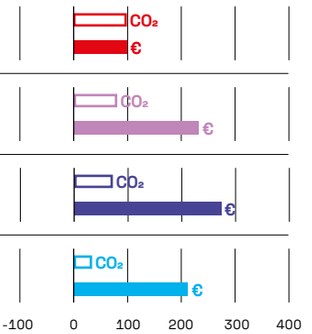
En plus d'isoler le bâtiment, la paille permet de stocker du carbone, ce qui donne un résultat carbone très favorable. Des surcoûts très importants apparaissent cependant. Ce résultat doit néanmoins être relativisé : en ne regardant qu'un fragment de façade pour la rénovation, les écarts de prix sont accentués par les faibles quantités analysées. Par ailleurs, l'ossature bois associée à l'isolant mobilise plus de matière et de main d'œuvre par rapport à un panneau.




| | |
|---|---|
| **Variante Business as usual** | Mur béton, enduit, plâtre, peinture |
| **Variante réalisable** | ITE fibre de bois 18 cm<br>Extérieur : enduit à la chaux |
| **Variante atteignable** | FOB remplissage paille hachée 20 cm<br>Extérieur : bardage bois ventilé |
| **Variante novatrice** | FOB remplissage bottes de paille 22 cm<br>Extérieur : enduit sur panneau pare-pluie |

### La rénovation de logements collectifs en moellons / Façade

L'évaluation carbone met en évidence la difficulté à valoriser le béton de chanvre au regard de l'unique indicateur carbone, car il pâtit de l'adjonction de chaux. Pour le surcoût économique, on observe également cet effet grossissant du fragment de façade. À noter que le matériau en lui-même ne coûte pas plus cher, mais que c'est la mise en œuvre, plus manuelle, qui génère une grande partie des écarts.



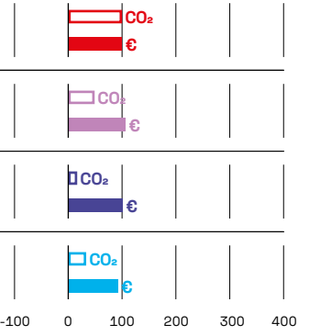

| | |
|---|---|
| **Variante Business as usual** | Façade moellons |
| **Variante réalisable** | ITI béton de chanvre 10 cm<br>Extérieur : enduit à la chaux<br>Intérieur : enduit hygrothermique 4 cm |
| **Variante atteignable** | ITE béton de chanvre 15 cm<br>Extérieur : enduit à la chaux<br>Intérieur : enduit chaux-sable |
| **Variante novatrice** | ITI terre-chanvre projeté 10 cm<br>Extérieur : enduit chaux-sable<br>Intérieur : enduit à la chaux |



Les graphiques ci-dessous explicitent les résultats économiques et carbone pour chacun des prototypes. Les deux résultats sont présentés en base 100, c'est-à-dire une unité qui met en valeur la différence proportionnelle par rapport au Business as usual. Ceci permet d'éviter une obsolescence trop rapide des données, notamment sur la partie économique.

### L'îlot tertiaire neuf / Façade

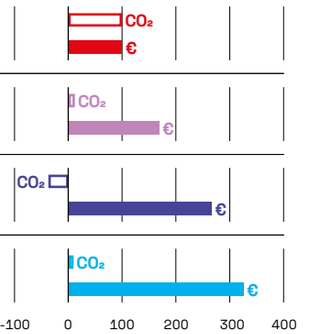
La variante « atteignable » et sa FOB remplissage bottes de paille de 22 cm semble être un optimum entre le coût, le gain carbone et la maturité du cadre technico-normatif. Cette variante permet de réduire le bilan carbone sans générer de surcoût par rapport au BAU par l'optimisation des surfaces vitrées et protections associées.




| | |
|---|---|
| **Variante Business as usual** | Mur rideau vitré, allèges opaques, béton<br>Isolation laine minérale |
| **Variante réalisable** | FOB remplissage botte de paille 36 cm<br>Extérieur : bardage, écran thermique et laine minérale 6 cm<br>Intérieur : enduit terre |
| **Variante atteignable** | FOB remplissage botte de paille 22 cm<br>Extérieur : bardage bois ventilé, écran thermique<br>Intérieur : enduit terre sur botte de paille |
| **Variante novatrice** | FOB remplissage paille hachée 22 cm<br>Extérieur : enduit plâtre sur panneau<br>Intérieur : enduit terre sur doublage avec bois |

### L'îlot tertiaire neuf / Plancher

Le passage en biosourcé pour les ouvrages de structure présente des surcoûts importants, accentués par l'adjonction de doublages obligatoires pour la sécurité incendie. La variante « réalisable » est celle qui apporte le plus d'efficacité pour l'€ investi (complexe bois-béton) mais pas le maximum de gain carbone, apporté par la variante « atteignable » et son plancher CLT.

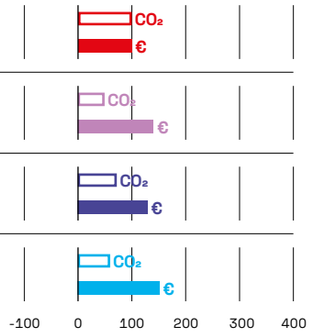



| | |
|---|---|
| **Variante Business as usual** | Plancher béton<br>Faux-plancher 10 cm, faux-plafond acoustique métallique |
| **Variante réalisable** | Plancher bois-béton 23 cm<br>Faux-plancher de réemploi, correction acoustique intégrée sur panneau rayonnant |
| **Variante atteignable** | Plancher CLT<br>Chape plâtre coulée en place, isolant acoustique rigide, faux-plafond plâtre |
| **Variante novatrice** | Plancher bois, faux-plancher de réemploi<br>Solives bois remplissage marins de terre crue<br>Panneau bois, laine de bois, panneau et enduit terre crue |

**L'îlot résidentiel neuf / Façade**

La variante « réalisable » et sa FOB remplissage en laine de chanvre semble être un optimum entre le coût, le gain carbone et la complexité réglementaire. La façade de logements collectifs est optimisée à l'échelle du fragment. Une analyse à l'échelle du bâtiment serait nécessaire pour absorber le surcoût résiduel.

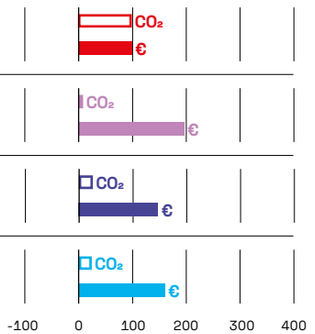
| | | |
|---|---|---|
| **Variante Business as usual** | Mur béton, laine minérale, enduit ciment, bardage bois et métal | |
| **Variante réalisable** | FOB remplissage laine de chanvre<br>Extérieur : bardage bois ventilé, écran thermique, déflecteur<br>Intérieur : contreventement OSB, lattis et enduit terre | |
| **Variante atteignable** | COB remplissage béton de chanvre<br>Extérieur : enduit chaux-sable sur béton de chanvre<br>Intérieur : enduit terre crue | |
| **Variante novatrice** | Mur porteur en terre crue, isolation terre allégée<br>Extérieur : enduit chaux<br>Intérieur : enduit terre crue | |




**L'îlot résidentiel neuf / Cloisonnement**

La variante « atteignable » est celle qui apporte le plus d'efficacité pour l'€ investi (rapport gain carbone / euro) avec les cloisons BTC. Le maximum de gain carbone, en valeur absolue, est apporté par la variante réalisable et son voile CLT.

| | | |
|---|---|---|
| **Variante Business as usual** | Voile refend béton<br>Cloison plâtre | |
| **Variante réalisable** | Voiles CLT<br>Cloisons bloc de chanvre, enduit à la chaux | |
| **Variante atteignable** | BTC type Cycle Terre<br>Panneau fibre-gypse isolation ouate de cellulose | |
| **Variante novatrice** | BTC terre locale<br>Cloison à isolation laine de chanvre (type Biofib Trio) | |






# Les enseignements du prototypage

**Ces différents résultats permettent de réinterroger notre façon d'appréhender le bâtiment, neuf ou réhabilité, et mettent en évidence les défis variés. *Maillons* en tire 6 enseignements.**

ENSEIGNEMENT N°1

## Assumer le surcoût dès le début du projet

Les simulations du projet *Maillons* sur les prototypes étudiés permettent d'atteindre une forte diminution des émissions carbone réglementaires, mais sont globalement associées à des surcoûts significatifs.
Ce surcoût est identifié par l'ensemble des acteurs de la commande interrogés mais les entretiens ne permettent pas d'identifier de stratégies pour les absorber : la plupart des opérateurs le reporte vers l'aval ou l'amont de la chaîne de création de valeurs.

On remarque que les initiatives à l'œuvre visent plutôt à :

- Le mesurer, à l'occasion d'opérations pilotes, pour ensuite le compenser par des économies sur d'autres postes. C'est notamment le cas de promoteurs tablant sur une réduction du recours aux systèmes de ventilation, de refroidissement et de chauffage permise par le potentiel des matériaux bio et géosourcés en matière de confort intérieur.
- Le valoriser, en communiquant sur de nouveaux indicateurs qualitatifs. C'est par exemple le cas des isolants, aujourd'hui principalement appréciés depuis la problématique « confort d'hiver », mais demain aussi appréciés au regard des problématiques « confort d'été » pour lesquelles la laine de verre et la laine de roches présentent des caractéristiques médiocres.
- Le relativiser, par un changement d'approche vis-à-vis du produit immobilier. Des opérateurs engagés dans des démarches patrimoniales valorisent des approches de type « coût global » au sein desquelles la construction ne représente plus que 30 à 40%[1] des dépenses consacrées au bâtiment.

Ce surcoût à court et moyen terme doit être assumé.

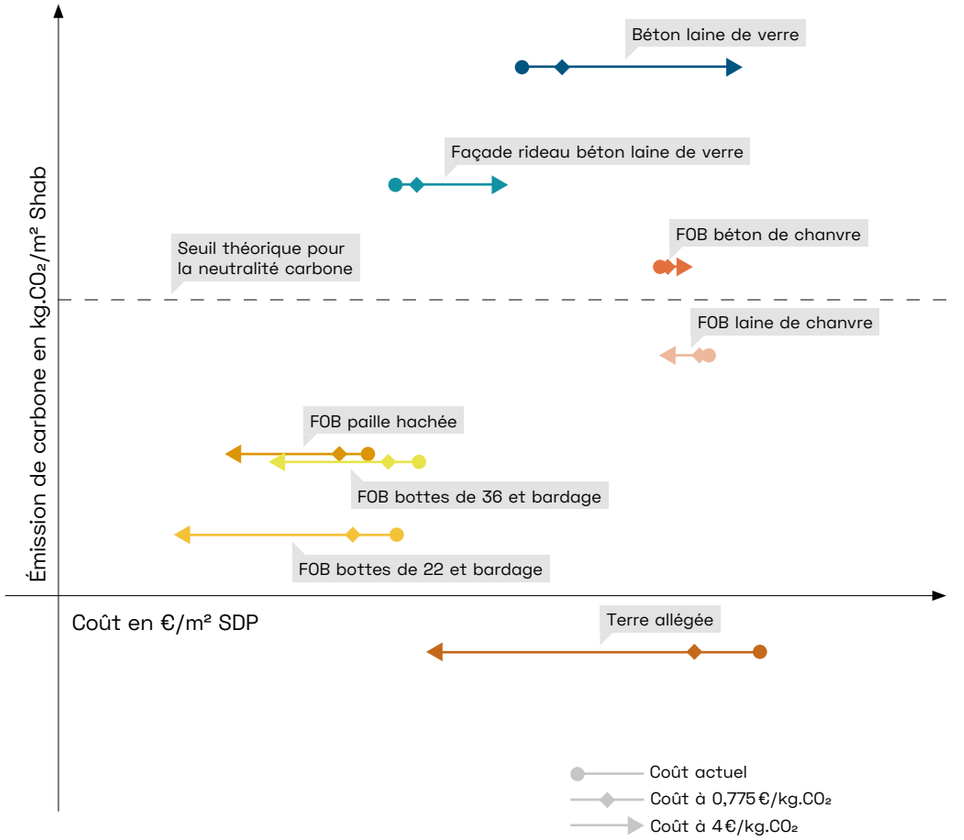
Les effets macroéconomiques auront vraisemblablement un rôle insuffisant pour gommer ces surcoûts :

- La simulation d'une augmentation prévisible du prix de l'énergie ne suffit pas à lisser les écarts observés : même en doublant les coûts associés, la laine de verre par exemple reste moins chère que des isolants comme la paille ou la fibre de bois,
- L'application d'un coût carbone, en prenant par exemple la valeur tutélaire à horizon 2030 préconisée par le rapport Quinet, ne change pas non plus les grands équilibres : la laine de verre reste plus intéressante sur le plan économique.

1. Chiffre d'après l'outil en ligne Reseco



## Évolution des prix des isolants selon l'évolution du marché carbone entre 775 € la tonne et 4 000 € la tonne



ENSEIGNEMENT N°2

## Monitorer une métrique en évolution

Les calculs opérés dépendent de la donnée disponible. Pour le carbone, les dernières années ont vu une progression très significative des données produites, notamment grâce aux financements de l'ADEME. Ceux-ci ont permis la création massive de fiches de déclaration environnementales individuelles ou collectives, évitant ainsi les données par défaut très défavorables. Cependant, pour une partie des systèmes biosourcés les résultats restent insuffisamment affinés, et nécessitent encore d'investir dans la précision de la donnée.
La qualité de la donnée dépend en effet de 2 éléments dimensionnants :

- L'investissement financier : pour optimiser au mieux les calculs carbone tout au long de la chaîne de transformation, et ainsi minimiser les coefficients de sécurité et les données par défaut pour les intrants secondaires (visseries, produits de mise en œuvre).
- Le volume de production : pour optimiser la production, les rebuts, les circuits de récupération des matériaux. Par exemple, le placo et la laine de verre sont assez neutres, parce qu'ils récupèrent toutes les chutes, ainsi que l'énergie fatale.

Ce travail de prototypage se heurte également à la pertinence des indicateurs actuels appliqués à ces matériaux. Par exemple, la résilience du bâtiment face aux fortes chaleurs, via des phénomènes inertiels et hygrothermiques, observés dans les bâtiments utilisant les biosourcés, reste encore peu décrite, éprouvée et partagée. La dimension sanitaire ou la réparabilité à long terme ne font pas partie de notre lecture de la performance non plus.

- Il faudra donc à l'avenir développer des métriques communes pour valoriser les atouts des matériaux bio et géosourcés, qui appartiennent aujourd'hui au domaine de la perception.

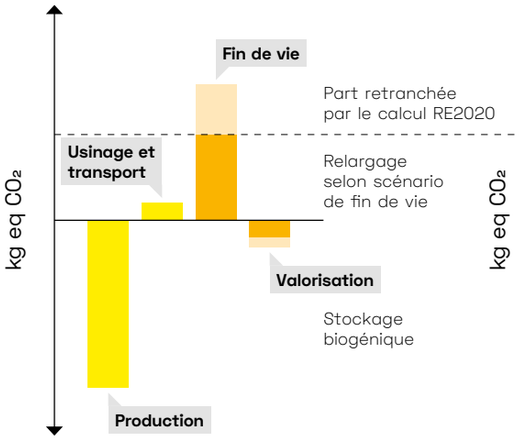


## L'évolution de la métrique environnementale : NF+A2, ACV sur 100 ans ou plus, autres postes ACV

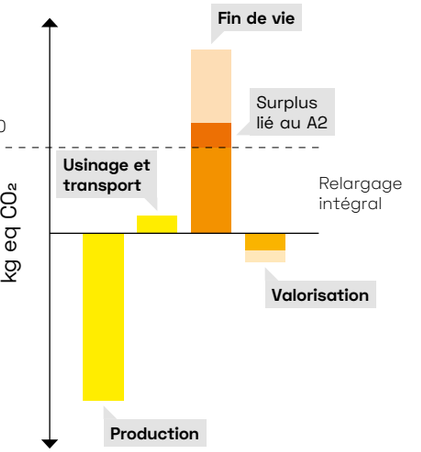
L'arrivée du complément A2 de la norme NF EN 14805 marque une augmentation globale de l'impact carbone des produits biosourcés, dans des ordres de grandeur variables selon les matériaux.
Afin de limiter cette hausse, le levier de la valorisation doit être pleinement exploité, comme c'est en partie le cas pour la filière bois.

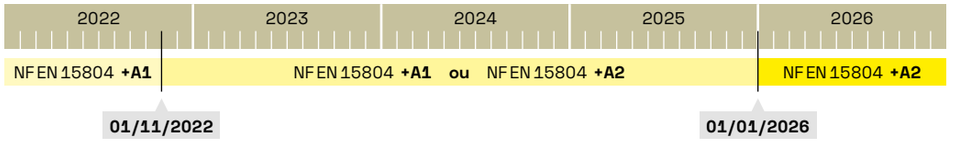
L'étude des différents schémas de fin de vie montre un effet carbone positif des valorisations matières ou énergétiques. Les schémas reposant sur les services écosystémiques de l'amendement et de la décomposition dans les sols, sont en revanche peu ou pas valorisés.

**RE2020 complément A1**




**RE2020 complément A2**




À noter que cohabiteront jusqu'en 2025 des FDES réalisées sur l'ancien et le nouveau complément, risquant de générer des disparités dans les calculs RE2020 au sein des filières biosourcées, à produits pourtant équivalents.

ENSEIGNEMENT N°3

## Modifier la commande pour permettre la transition vers le bio et géosourcé

Réduire le bilan carbone d'une construction est possible par l'exploration d'un ensemble de solutions programmatiques, constructives et techniques, à anticiper dès les prémisses du projet. Le programme joue donc un rôle clef dans la massification des matériaux bio et géosourcés.

Par exemple, la réduction du nombre de sous-sol réduit le coût carbone en construction et en fonctionnement. Cette adaptation du programme libère des moyens pour la façade en plus de travailler à une décarbonation plus globale de la mobilité.

L'intégration de matériaux biosourcés nécessite d'adapter l'ensemble de la chaîne de production du bâtiment à cet objectif : celui-ci peut être le choix d'une filière, d'un ouvrage, d'un niveau de bilan carbone ou d'une part de biosourcé à intégrer. L'innovation doit rester atteignable en s'appuyant sur l'expérience des acteurs mobilisés. Chaque pas de côté bénéficiera de manière incrémentale aux opérations futures et à la progression des filières.

La programmation est la phase cruciale qui détermine 80 % du budget d'une opération[1]. Les surcoûts et malfaçons seront évités en rassemblant les compétences appropriées dès le démarrage : bureau d'études spécialisé, bureau de contrôle, architecte expérimenté, voire entreprises et industriels.

Le déroulement des études doit s'adapter avec des missions préliminaires de sourcing des ressources matérielles et humaines disponibles sur le territoire. Les modalités de passation des marchés de travaux doivent ouvrir des brèches pour introduire des entreprises expérimentées par un allotissement spécifique (terre crue par exemple, distinct du lot maçonnerie béton), la possibilité de regroupement d'entreprises, la proposition des variantes, et l'autorisation du dépassement du domaine d'emploi du cadre technico-normatif lorsque cela est justifié.

Pour que ces concepts et ces intentions deviennent réalité et atteignent effectivement les objectifs visés de première réalité et de massification au-delà, il est indispensable de disposer dans le temps long (5-10 ans) d'un organe de gouvernance d'experts exigeants et bienveillants ayant démontré leur capacité à gérer de l'accompagnement au changement dans tout ce que celui-ci implique en termes architectural, de paysage, technique, normatif, règlementaire, juridique, économétrique, organisationnel, de fonctionnalité, etc.

Le changement à opérer est tellement profond et massif qu'il doit nécessairement faire appel à une approche holistique.

1. D'après l'outil en ligne Reseco



## Adapter le système : le retour d'expérience de l'aménagement de Pirmil-les-Isles

Cette d'expérience a été menée par une partie des membres du groupement, en dehors du projet *Maillons*.

Pirmil-les-Isles est une opération d'aménagement pilotée par Nantes Métropole Aménagement. Une des équations principales que cherche à résoudre ce projet est de réaménager un quartier en alliant exigence environnementale élevée et économie de projet maîtrisée, avec une visée d'accessibilité sociale. La réponse proposée a été de faire des « pas de côté » par rapport à un pilotage habituel.

D'une part, il s'agit de travailler avec le tissu économique local, et plus largement de structurer les filières locales à long terme, en questionnant les modes d'organisation et les modèles économiques. 150 acteurs locaux ont été rencontrés et des ateliers collectifs ont associé opérateurs, maîtres d'œuvre, acteurs de la construction, du paysage et des services. Des sessions de webinaires avec les filières de la construction ont permis de faire converger les besoins du projet urbain avec les objectifs régionaux ou nationaux de développement des filières.

D'autre part, les attendus vont au-delà ce qui est exigé habituellement dans des consultations de ce type : il a été demandé aux équipes de concevoir dès l'esquisse des détails de construction, et d'assurer la cohérence entre les coûts et les réponses architecturales. Ceci a impliqué le partage d'un bilan économique, d'une analyse carbone détaillée pour l'ensemble des lots de la construction, et le positionnement au regard du corpus technico-réglementaire actuel.

Cette phase a fait l'objet d'un suivi architectural, urbain, paysager et environnemental, incluant une contre-expertise en vue de garantir le respect des objectifs et la robustesse technique. Ceci s'est appuyé sur des modes de consultation permettant davantage d'interactions et d'anticipations. Le lancement a également permis de partager l'esprit et la méthodologie de travail auprès des équipes candidates. Enfin, des workshops intermédiaires ont permis échanges, et recadrages.



Session de travail collectif

**ENSEIGNEMENT N°4**

## Réinventer une conception à partir de la matière

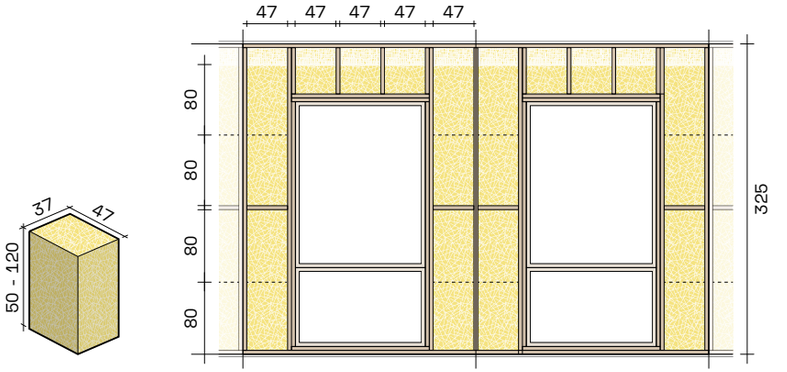
De l'aménagement à la construction, les outils conceptuels et opérationnels dont on hérite sont globalement structurés autour des vastes possibilités constructives qu'ont ouvert le béton, l'acier pour la période moderne (1920-1970). Les considérations bioclimatiques et bas carbone nous positionnent dans une situation presque inverse et nous invitent à retrouver davantage de rationalité structurelle, de maîtrise du coefficient de forme… Les limites de la technique courante pour des filières éco-sourcées encore massivement non-industrialisées resserrent fortement le champ des possibles et appellent une refonte à la fois des imaginaires et des méthodes associées à la construction.

Ainsi, en amont de l'introduction d'ensembles fonctionnels bio et géosourcés, le passage des archétypes aux prototypes a nécessité une série d'ajustements programmatiques, morphologiques, structurels et esthétiques pour anticiper les cortèges de contraintes mécaniques, chimiques, dimensionnelles… propres à chaque matériau mobilisé.

Pour les acteurs de la maîtrise d'œuvre rencontrés, la prise en compte de ces contraintes spécifiques à chaque matériau, dans un environnement technico-normatif mouvant, suppose des prises de risques et la mise en place de méthode itératives auprès d'acteurs spécialisés pour mobiliser la bonne solution au bon endroit et évacuer les fausses bonnes idées.



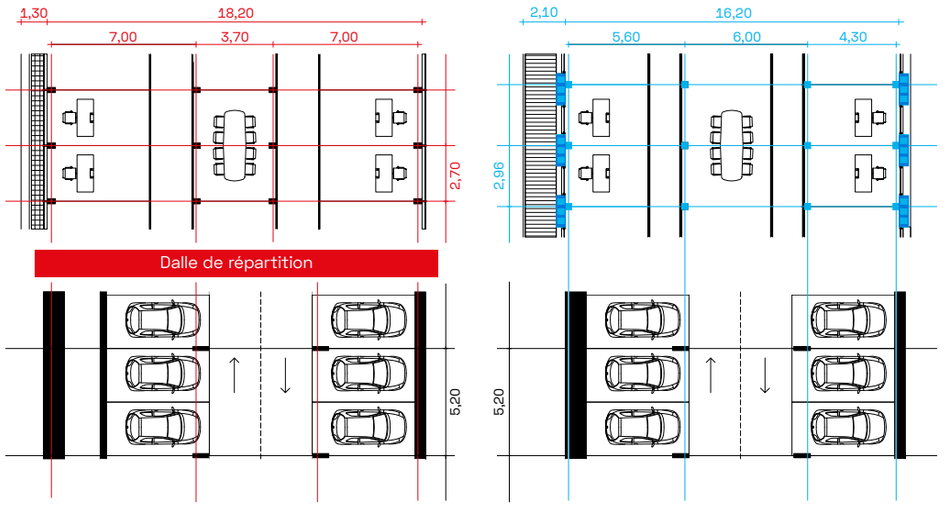
## Extrait de façade avec calepinage des châssis inséré dans une trame d'ossature bois remplissage bottes de paille




## Trames constructives d'un bâtiment « Business as usual » et d'un bâtiment biosourcé : des ajustements dimensionnels pour trouver un optimum entre fonctionnalité et bilan carbone

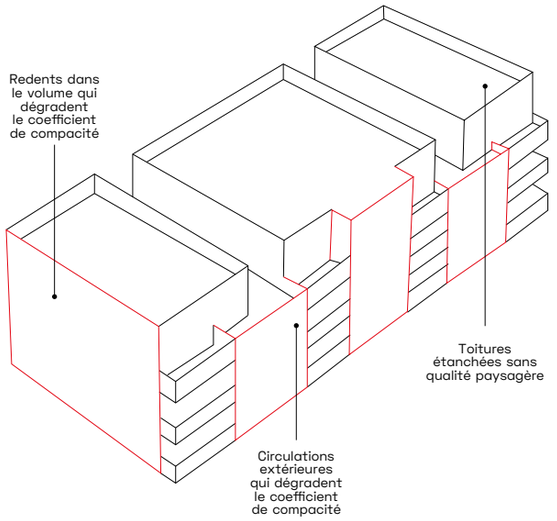
**Business as usual**

**Prototype d'un bâtiment biosourcé**



ENSEIGNEMENT N°4

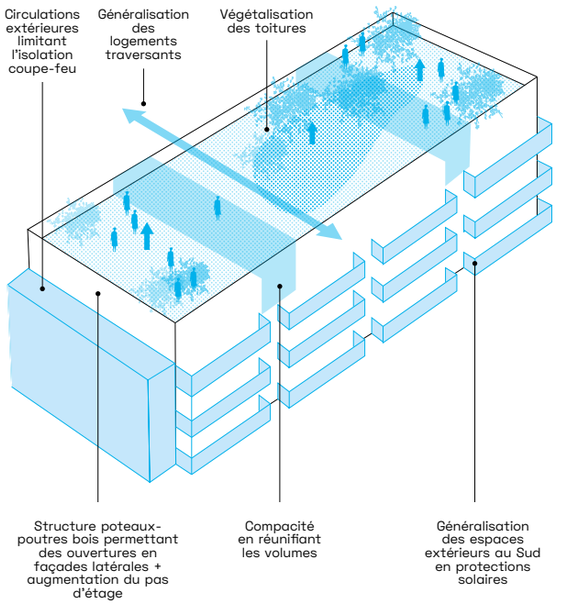
# Modifications morphologiques d'une construction neuve tertiaire pour tendre vers une construction bas carbone




**« Business as usual »**
**— archétype existant**
**Identification des freins à la construction bas carbone**

**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotipe**
anthropisé — biodiversité




**Prototypage**
**— méthode *Maillons***
**Identification des leviers vers la construction bas carbone**

**coefficient de compacité**
compact — créatif

**coefficient de biotipe**
anthropisé — biodiversité

Modifications morphologiques du « Business as usual » d'une construction neuve de logements collectifs pour tendre vers une construction bas carbone.



# Adapter la méthode : le retour d'expérience du concours de maîtrise d'œuvre de Pirmil-les-Isles

Dans le cadre d'un concours de maîtrise d'œuvre pour une opération de logement au sein de l'agglomération nantaise, l'aménageur invite les couples de promoteurs/concepteurs à travailler avec des représentants de la filière paille de Loire Atlantique de manière à rapprocher les engagements en matière d'innovation de l'actualité des besoins des acteurs locaux.

Pour adresser cette demande, l'équipe lauréate se structure dès la phase esquisse, en un pôle conception architecturale et un pôle conception technique. La première embarque les méthodes et acteurs usuels d'un concours de ce type, la seconde convoque le futur fournisseur de paille, le charpentier qui la mettra en œuvre, et des industriels fabricants d'enduits.

Les deux organes travaillent de manière itérative, le premier pilote l'interprétation de la fiche de lot, le second établit une trajectoire d'innovation atteignable, fondée sur :

- un référentiel technique issu des retours d'expérience des fabricants d'enduits dans le domaine de la rénovation d'édifice patrimoniaux franciliens ;
- des réglages issus des retours ateliers du charpentier (à la fois au sujet de la pérennité de l'ouvrage mais aussi au niveau de l'ergonomie de fabrication et des coûts induits) ;
- d'une lecture fine de l'actualité de la filière permise par l'implication du fournisseur de paille par ailleurs membre historique du RFCP.



Consultation Îlots A3, Boris Bouchet Architectes et Atelier Georges

ENSEIGNEMENT N°5

## Travailler collectivement à une extension progressive des domaines d'emploi

Certaines filières n'ont aucun cadre (miscanthus, anas de lin) et nécessitent de développer de nouveaux savoir-faire. D'autres filières ont mis au point des procédés constructifs encadrés par des règles professionnelles : ce sont les Règles Professionnelles de Construction en Paille de 2012 ou les Règles Professionnelles de Construction en Chanvre de 2012 par exemple. Mais le domaine d'application restreint la hauteur des bâtiments là où la commande immobilière des territoires denses de la Vallée de la Seine appellent de la hauteur pour limiter les emprises bâties.

L'emploi de ces procédés à des hauteurs plus importantes doit être démontré dans le cadre d'une démarche définie qui mobilise une expertise élevée, du temps et des financements (notamment pour les essais).

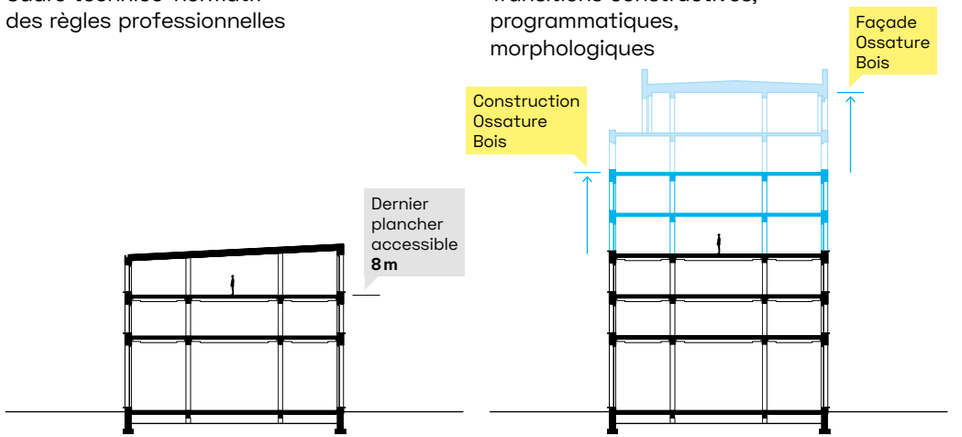
L'extension progressive des domaines d'emploi nécessite ainsi une stratégie construite en amont avec une vision à long terme. Cela démarre par une parfaite connaissance des référentiels reconnus en technique courante et de leurs limites à date. L'état de l'art étant réalisé, il est ensuite possible de porter les arbitrages mentionnés et d'engager les actions en conséquence.



## État actuel du cadre technico-normatif de la construction paille et les étapes à franchir pour répondre à la commande immobilière actuelle et suppléer le « Business as usual ».

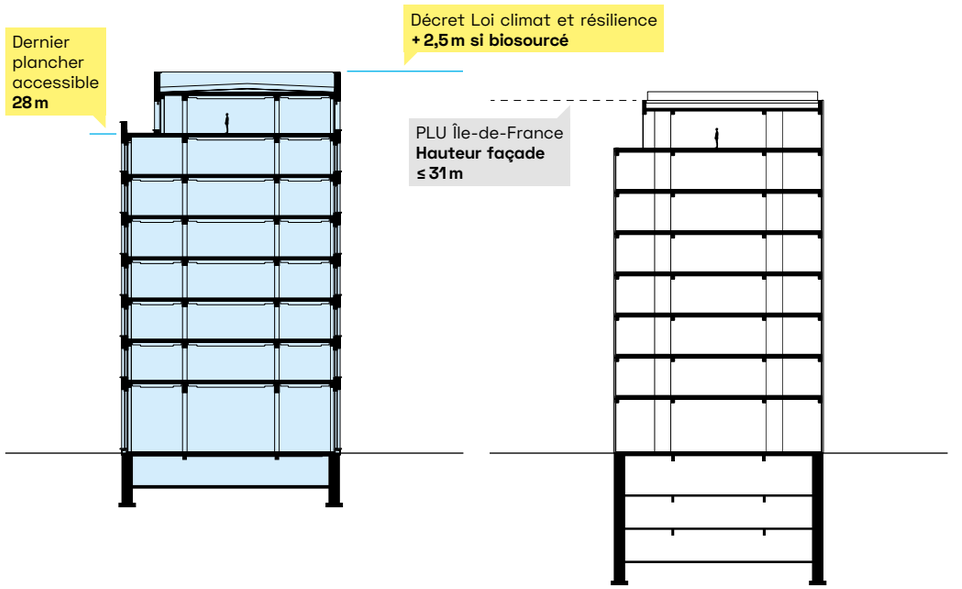
**État actuel**
Cadre technico-normatif des règles professionnelles

**Évolutions nécessaires**
Transitions constructives, programmatiques, morphologiques




**Objectif *Maillons***
Répondre à la commande immobilière avec des solutions biosourcées

**Business as usual**
Répondre à la commande immobilière



ENSEIGNEMENT N°6

# Développer de nouveaux produits de construction à partir des ressources locales

**Procéder au changement d'échelle**
Le corpus de références de constructions biosourcées portent majoritairement sur des projets de petite échelle. De la même manière, le réseau d'acteurs et actrices relève actuellement et majoritairement plutôt de l'artisanat, avec des difficultés et des risques associés pour franchir le pas vers la grande échelle. Les filières biosourcées font face à une concurrence inégale des filières industrialisées telles que le béton pour lesquelles le système actuel de construction a été conçu.

La filière bois est représentative de ce changement d'échelle. En plein essor, elle offre aujourd'hui des procédés constructifs en structure, isolation et revêtements pour répondre à tous les programmes et toutes les hauteurs de bâtiments. Ce changement d'échelle doit advenir pour les autres ressources.

**Diversifier le conditionnement**
Les ressources en fibres végétales sont abondantes sur le territoire mais sont encore peu utilisées pour la construction. Cela s'explique notamment par les dimensions des produits biosourcés qui correspondent à des standards agricoles et non aux standards actuels de la construction : la botte de paille dite « paysanne » a ainsi des mesures fixées par les botteleuses agricoles.

Des maillons sont nécessaires et en cours de développement pour proposer des conditionnements adaptés à la construction, en épaisseur ou en mode de pose.

À cela s'ajoute l'enjeu de la rénovation. Les matériaux biosourcés apportent une réponse adaptée et qualitative pour rénover le bâti ancien mais trouvent des difficultés à concurrencer les panneaux d'isolants conventionnels. Le recours à une ossature bois pour la mise en œuvre d'une isolation est beaucoup plus onéreux que l'installation d'isolant par panneaux chevillés sur la structure existante. Le prototypage a montré un surcoût de + 170% pour la mise en œuvre d'une ITE paille avec ossature bois par rapport à des panneaux de laine minérale. Il est nécessaire de développer des produits pour une mise en œuvre rapide, efficace et peu onéreuse.

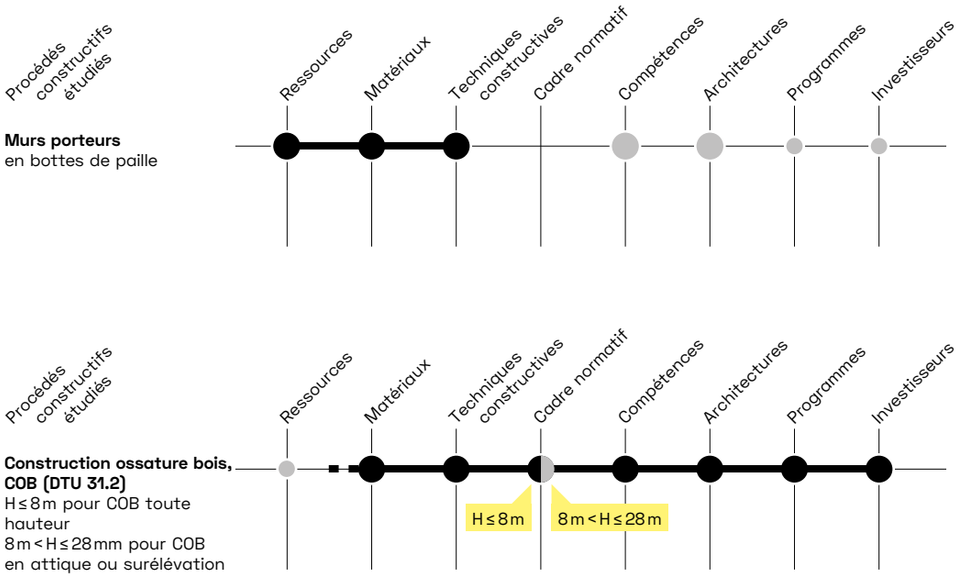
Le développement de la paille hachée, qui permet aussi d'envisager l'usage d'autres fibres que la paille de blé (orge ou autres céréales), répond à cette problématique. De la même manière, des panneaux de paille se développent en Loire Atlantique[1] et ouvrent de nouvelles possibilités.

L'enjeu est donc d'équiper le territoire du matériel nécessaire pour permettre des usages simplifiés pour la construction.

1. Projet Copano



## Comparaison des chaînes de maillons de la paille et du bois : l'une bénéficiant de ressources abondantes, l'autre est développée sur tous les maillons sauf la ressource locale.



# Les perspectives pour le développement des matériaux bio et géosourcés

**Les bio et géosourcés sont des pivots incontournables pour l'atteinte de la neutralité carbone : ils incarnent la transition vers un secteur de la construction moins gourmand en énergie et en ressources non renouvelables. Massifier l'usage des bio et géosourcés signifie développer une économie de la construction plus sobre, autant en énergie et en carbone, qu'en programme et en conception. Cela implique de revisiter l'ensemble de nos habitudes constructives.**



## La massification ne se fera pas sans coordination

La transition vers la construction bio et géosourcée ne se fera pas naturellement compte tenu des coûts occasionnés et des changements nécessaires.

Elle doit donc être pilotée. Le planning de décarbonation mondial nécessite d'agir vite et d'enclencher le changement. Pour autant, l'élaboration d'un cadre normatif appuyé sur des essais physiques et des validations d'experts demande du temps et des moyens. Ce cadre robuste, que chaque constructeur peut suivre en toute sécurité, ne sera pas atteint avant une dizaine d'années.

Dans l'intervalle, la coordination est impérative : à des échelles d'opérations d'aménagement ou d'une ville, les acteurs doivent aligner les compétences locales et les objectifs des filières pour identifier les systèmes constructifs à privilégier, et les tests nécessaires pour garantir la sécurité de la construction. Coordonné collectivement, cela permet de diminuer le risque et le besoin en connaissance de chaque constructeur.

## La proposition *Maillons* : une stratégie partenariale et incrémentale située à l'échelle de la Vallée de la Seine, coordonnée par les acteurs publics

L'entrée par les politiques publiques nous semble déterminante pour piloter le changement structurel que cela nécessite.

La matrice ci-contre reprend les différents acteurs de ces politiques, en positionnant par les ronds noirs leur domaine d'intervention actuel. Les aplats jaunes sont des propositions de *Maillons* pour enclencher un tournant systémique.

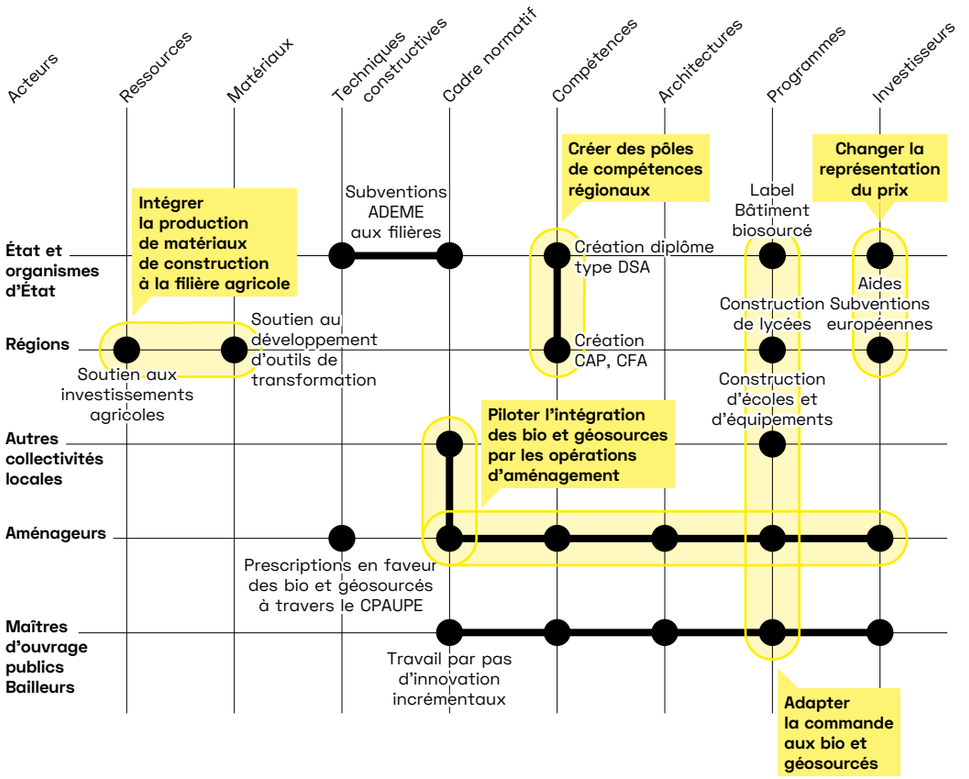
**Axe 1 : Changement de culture dans la construction, la maitrise d'œuvre et la maitrise d'ouvrage**
S'il faut assumer le surcoût des constructions en bio et géosourcés, il doit être associé à une lecture carbone, environnement, santé et confort. Au même titre que le nutriscore pour l'alimentation, un score environnemental pour les matériaux de construction doit contribuer à changer la représentation du prix. Les arbitrages ne peuvent plus se faire sur un critère économique réducteur, qui masque le coût global pour la société.
Le changement de culture passe aussi par la formation : les matériaux bio et géosourcés sont encore largement méconnus. Développer des pôles de formations régionaux spécialisés sur les ressources du territoire pourraient devenir un marqueur fort du territoire .

**Axe 2 : Soutien aux filières ressources et matériaux**
La transformation de la ressource agricole pour la construction nécessite des investissements et un accompagnement spécifique. La massification appelle notamment un panel de producteurs et de matériaux plus vaste. Les régions peuvent soutenir cette diversification, en croisant leurs compétences en matière agricole, économique et leur rôle dans l'aménagement du territoire.

**Axe 3 : Réorientation collective de la commande**
Face à la rupture que représente l'usage des matériaux bio et géosourcés, adapter sa conception au corpus normatif existant permet de simplifier la mise en œuvre opérationnelle. Pour dépasser et développer ce cadre, les innovations doivent être ciblées en concertation avec les acteurs de la filière. Maillons propose que cette démarche soit pilotée par des acteurs intégrateurs, comme peuvent l'être les aménageurs ou les bailleurs, pour proposer une montée en compétence progressive et collective. C'est un nouveau savoir-faire à développer, où le matériau devient premier dans la réflexion de l'aménagement et de la construction : faire avec les ressources présentes et disponibles, adapter la programmation à ces nouvelles données d'entrée matière au service de la sobriété.



## Matrice de synthèse



*Maillons* est un projet de recherche opérationnelle attaché à la Vallée de la Seine. Il vise à examiner les conditions du développement de l'usage et de l'offre des matériaux bio et géosourcés, en investiguant les « maillons » manquants d'une chaîne qui va du champ jusqu'aux investisseurs. Tourné vers les actrices et les acteurs des filières des régions Île-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.

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

D'une durée de 2,5 ans, de 2021 à 2024, ce projet est cofinancé par l'ADEME et les Régions Normandie et Île-de-France, dans le cadre du CPIER Vallée de la Seine et de l'AMI « Transition Écologique et Valorisation Économique », et par les membres de l'équipe. Il est mené par un groupement de bureaux d'études, d'architectes, d'écoles et de centres de ressources qui réalise un travail de synthèse sur les filières et la commande actuelles, et d'investigation de systèmes constructifs sur certaines typologies de bâtiments. La conclusion est une proposition de démarche en trois axes pour renforcer les maillons des différentes filières.

# LES ÉCO-MATÉRIAUX EN ÎLE-DE-FRANCE

RENCONTRE POUR L'ESSOR DES FILIÈRES DES MATÉRIAUX BIOSOURCÉS

## RETROUVEZ NOS PUBLICATIONS

www.arec-idf.fr

Région îledeFrance

L'INSTITUT PARIS REGION AREC AGENCE RÉGIONALE ÉNERGIE-CLIMAT