

**CURIOSITY
IS KEYS**



CONSTRUCTION HORS SITE

Construction hors site
Avantages, inconvénients &
potentiel zéro carbone

Automne 2022

Une initiative de Keys REIM

Construction hors site : Avantages, inconvénients & potentiel zéro carbone

Executive summary	<u>03</u>
1. Avantages & inconvénients du hors-site	<u>06</u>
1.1. Cadrage & définition	<u>06</u>
1.2. Un objectif des pouvoirs publics en France ?	<u>08</u>
1.3. Éléments de marché	<u>10</u>
1. Potentiel zéro-carbone : que disent les scientifiques ?	<u>20</u>
2.1. Les promesses bas carbone du hors-site	<u>21</u>
2.2. Des promesses à la réalité : il faut massifier et structurer les données	<u>25</u>
Conclusion	<u>29</u>
Bibliographie	<u>30</u>

Construction hors-site

Avantages, inconvénients & potentiel zéro carbone

AUTEURS

Curiosity Is Keys

Curiosity Is Keys is Keys AM's research & development arm, dedicated to the exploration of our building's future.

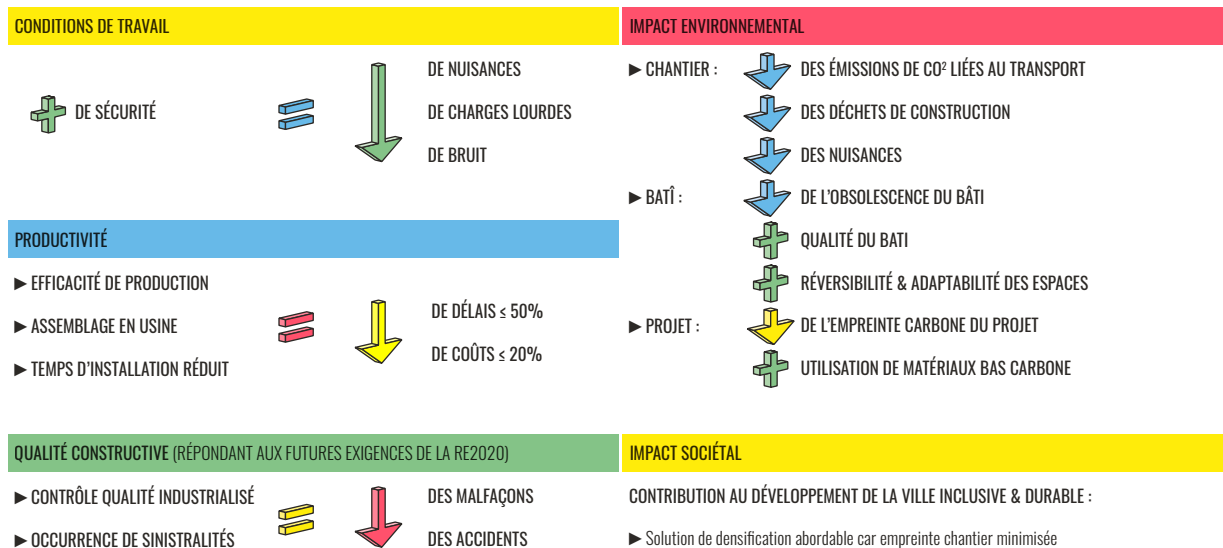
Pourquoi s'intéresser aux techniques de construction quand on est investisseur immobilier ? Ce sujet concerne en effet au premier rang les constructeurs, promoteurs et acteurs du monde du BTP. Pourtant, les procédés constructifs peuvent impacter durablement la performance financière d'une opération immobilière : la durabilité du bâti, la vitesse de construction ou encore le bilan carbone du bâtiment en dépendent. C'est pourquoi Curiosity Is Keys a choisi d'explorer la principale évolution des dernières décennies en matière de techniques de construction : le hors-site.

La construction hors-site et la construction modulaire consistent à fabriquer en usine, de manière industrielle, les principales pièces d'un bâtiment pour les assembler sur le chantier, contrairement à la construction traditionnelle où la majorité des éléments constructifs sont créés sur site.

Si le hors-site pèse aujourd'hui moins de 1 milliard d'euros sur les 293 milliards de chiffre d'affaires du secteur de la construction, selon le rapport gouvernemental publié en janvier 2021 sur le sujet (page 37), il progresse vite : 25 à 30 % par an en moyenne au niveau mondial. Et en France, il pourrait atteindre 2,8 milliards d'euros en 2030 selon le rapport « Next Normal in Construction » de McKinsey (2020).

Une telle perspective de croissance s'explique par les progrès significatifs que cette technique pourrait permettre de réaliser sur des thématiques importantes pour les investisseurs, comme la qualité du bâti ou les engagements RSE. Cette étude et revue de littérature explore donc les promesses de la construction hors-site en matière de conditions de travail, de productivité, de qualité et d'impact environnemental.

PRINCIPAUX AVANTAGES DU HORS SITE



Executive Summary

Inquiétudes nationales

Malgré ces avantages, la France doute encore de la qualité constructive de ce type de bâtiment, et des risques de standardisation de l'architecture dûs à l'industrialisation. De plus, le territoire manque d'un paysage concurrentiel à la hauteur. Le petit nombre d'acteurs constructeurs donne lieu à une **situation de quasi-monopole**. Surtout, pour se développer, le secteur doit encore **mailler le territoire** français d'usines de production (et donc se financer) pour capter la demande française sinon reportée sur les filières étrangères plus avancées. Des défauts infrastructurels et organisationnels auxquels s'ajoute un contexte politique et réglementaire flou, et ce malgré des atouts **parfaitement alignés avec les préoccupations environnementales et économiques du gouvernement**.

Des opportunités(s) claires

Néanmoins, cette étude fait clairement apparaître les opportunités d'avenir offertes par le développement de la construction hors-site pour les investisseurs immobiliers. Investir dans un immobilier construit hors-site et bas carbone permettrait notamment de remplir un **cahier des charges ESG et/ou d'investissement à impact** strict. À plus long terme, il semble également très pertinent de profiter de la structuration de cette nouvelle filière pour maîtriser une partie de la chaîne de valeur, soit en s'intégrant avec un ou des **constructeurs**, soit en s'intégrant avec un ou des fabricants de **matériaux et/ou matière première**.

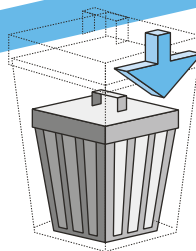
ZOOM SUR LES AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX DE LA CONSTRUCTION HORS-SITE

ENJEUX ENVIRONNEMENT		CRITÈRE DE DURABILITÉ
CHANTIER BAS CARBONE & RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO2 LIÉS AUX TRANSPORTS DES MATÉRIAUX & DES HOMMES ► Contrairement aux idées reçues et selon une étude de Quale J. et al 2019, la construction hors site permet de limiter les allers et venues sur le chantier et de les réduire de 50 %.		ACV du chantier
RÉDUCTION DES DÉCHETS DE CONSTRUCTION ► La rationalisation du système constructif permet de limiter la production de déchets de construction. La construction hors-site permet de réduire les chutes de matériaux grâce à un meilleur assemblage. La meilleure gestion des flux de matériaux permet de réduire les déchets liés au conditionnement des matériaux. La concentration de la chaîne de production du bâtiment à un même endroit permet de faciliter le recyclage des déchets de chantier. Certaines expérimentations prétendent qu'il serait possible de diviser par trois la quantité de déchets générée en ayant recours à la préfabrication.		Quantité de déchets produits
RÉSILIENCE ► La rationalisation requise par le processus d'industrialisation et la précision d'exécution qui en découle permettent d'améliorer les performances du bâtiment en exploitation. L'analyse de cycle de vie des bâtiments construits hors-site est meilleure car ils engagent moins d'efforts à la maintenance. Leur obsolescence est réduite.	RÉVERSIBILITÉ & ÉVOLUTIVITÉ ► La construction hors-site peut plus facilement intégrer dès la conception des options d'évolution ou de démontage du bâtiment. Elle permet ainsi une plus grande adaptabilité de ce dernier à l'évolution des usages et modes de consommation de l'espace. Cela permet d'éviter des scénarios de démolition/reconstruction très consommateur d'énergie, émetteur de gaz à effet de serre et producteur de déchets.	ACV du bâtiment
ENJEUX CHANTIER PROPRE		CRITÈRE DE DURABILITÉ
NUISANCES DE CHANTIER NEUTRALISÉES ► La construction industrialisée permet de limiter les nuisances du chantier pour le quartier. Les durées de chantiers étant plus courtes, et les actions d'assemblages et de montage se substituant aux travaux lourds de la construction « classique ».		Réduction des nuisances. Amélioration des conditions de travail.
ENJEUX INCLUSIVITÉ		CRITÈRE DE DURABILITÉ
VILLE DURABLE & INCLUSIVE ► Les techniques hors site se déploient plus facilement en milieu dense et contraint, comme en coeur de ville, et s'adaptent aux projets de restructuration ou extension de l'existant. Elle ouvre donc l'opportunité de rendre la ville plus inclusive en créant des logements en zones tendues.		Logements produits.

LES 5 PROMESSES BAS CARBONE DU HORS-SITE

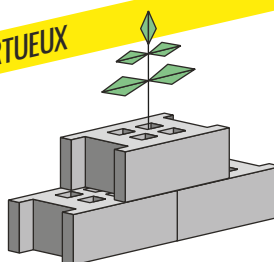
N°1 : MOINS DE DÉCHETS DE CONSTRUCTION

Permet de réduire de 11,35 % des émissions de CO² associés aux matériaux par rapport à la construction traditionnelle.



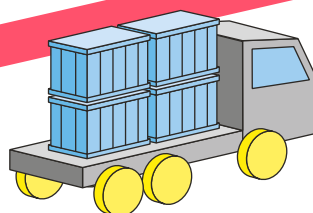
N°2 : POSSIBILITÉ D'UTILISER DES MATÉRIAUX + VERTUEUX

Les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites de 9 % par mètre carré dans le cadre d'une construction industrialisée.



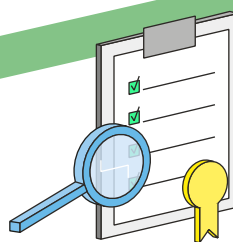
N°3 : MOINS DE BESOINS EN TRANSPORT

La fabrication hors-site minimise les coûts de carbone inhérents au transport. (Il ne faudrait pas dépasser une distance de 112 km entre l'usine hors-site et le chantier de construction pour conserver l'avantage carbone lié au transport).



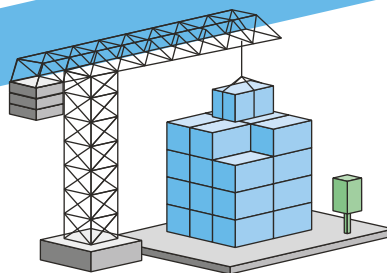
N°4 : L'ASSURANCE D'UNE QUALITÉ DU BÂTI

Sur toute chaîne d'assemblage industrielle, les problèmes de qualité sont détectés lorsque les modules sortent de la dite chaîne, permettant de corriger les défauts avant toute expédition sur site.



N°5 : MEILLEURE RÉVERSIBILITÉ & MEILLEURE ADAPTABILITÉ DES ESPACES

Le potentiel de démontage & donc de recyclage/réutilisation/relocalisation de logements est plus grand, seulement pour les constructions à ossature acier.



Promesses du hors-site (Curiosity is Keys)

Construction hors-site

1. Avantages & inconvénients du hors-site

1.1. Cadrage & définition de la préfabrication

AUTEURS

Curiosity Is Keys

Curiosity Is Keys is Keys AM's research & development arm, dedicated to the exploration of our building's future.

En France, l'article L111-1-1 du code de la construction et de l'habitation, introduit par la loi ELAN en 2018, a défini que la préfabrication consiste à concevoir et réaliser un ouvrage à partir d'éléments préfabriqués assemblés, installés et mis en œuvre sur le chantier. Ces éléments préfabriqués font indissociablement corps avec les ouvrages de viabilité, de fondation, d'ossature, de clos et de couvert de la construction et peuvent intégrer l'isolation et les réserves pour les réseaux divers.

Ils sont produits sur un site qui peut être soit une usine ou un atelier, soit une installation temporaire jouxtant le chantier.

On peut citer les exemples suivants d'éléments de structure préfabriqués :

- ▶ **Métal** : Light gauges steel (profils d'acier),
- ▶ **Bois** : Ossature bois, CLT (Cross Laminated Timber – panneaux en bois lamellés croisés),
- ▶ **Béton** : Poteaux, poutres, voiles et planchers en béton précontraint.

1.1.1. Hors-site

Le concept de hors-site prend la suite de la préfabrication, qui a été promue par la loi ELAN, mais va plus loin. **Il est défini comme de la préfabrication, mais s'y ajoute une dimension d'industrialisation des éléments constructifs de leur production à leur assemblage sur site.** Cependant, la construction hors-site se distingue de la construction modulaire ou préfabriquée, souvent connotées péjorativement : qualité inégale, standardisation du paysage urbain, vieillissement incertain, etc.

Le hors-site dépasse la seule préfabrication dans le processus de production industrielle qu'elle exige de la conception à la réalisation. Or cette industrialisation ne s'envisage qu'à l'aune d'une **triple transformation** amenant à :

- ▶ **une conception et un suivi numériques,**
- ▶ **des sites de production centralisés et automatisés**
- ▶ ainsi qu'une méthode de gestion de la production et de **l'assemblage au plus juste** (« lean manufacturing »).

Sans l'un de ces trois éléments, l'industrialisation serait incomplète, selon le [Rapport sur l'industrialisation de la construction, janvier 2021, Ministère chargé du logement](#).

Il faut retenir aussi que si la construction hors-site utilise largement le numérique, avec le **BIM** notamment, elle s'appuie surtout sur des outils en provenance de l'industrie. On peut citer en exemple le DfMA pour « *Design for Manufacturing & Assembly* », traduit en français par « Concevoir pour la Pré-fabrication et l'Assemblage ».

Les exemples de constructions hors-site sont aujourd'hui nombreux et démontrent le potentiel de cette technique pour l'habitat individuel comme pour les projets collectifs.

Exemples illustrés de constructions hors-site



Une maison passive & abordable, 90 % d'économie d'énergie (Une maison d'architecte économique, 2021).

Pour cette maison passive, la structure a été fabriquée en lamelles de bois collées (lamibois), plus solides que du bois massif, à partir de pins issus de forêts européennes gérées de manière responsable. Avec des outils de DfMA et BIM, un architecte a réalisé le plan de cette maison standardisé, tout en réservant la possibilité au client d'y apporter quelques adaptations. Ce plan, ensuite envoyé directement à l'usine (usine créée par le BE Pop Up House), permet de préparer le kit de construction (visserie, bardage pour les façades, montant, plancher, poteaux) en seulement 5 heures. Il sera vendu 330€/m² au constructeur. Ce dernier n'a plus qu'à suivre la notice ! Le chantier dure une dizaine de jours au plus. Notons que l'isolant, un bloc de polystyrène, est intégré dans la structure de la maison. Ce qui permet d'avoir un mur deux fois plus isolant qu'un bâti classique.



Collège Revaision (750 élèves) - Bouygues Bâtiment Sud-Est et Ossabois (2020), (ossabois).

Cette opération s'inscrit dans un accord-cadre signé en 2018 avec la Métropole de Lyon pour la construction de bâtiments modulaires bois. La collaboration entre Bouygues Construction et Ossabois a conduit à la livraison de 60 bâtiments modulaires bois en près de 10 ans. Le dernier en date est ce collège, livré en moins de 12 mois, période Covid incluse contre un délai moyen de plus de 2 ans traditionnellement.



Résidence étudiante à l'université Berkley (urban Rad, 2017).

Cette résidence étudiante illustre l'intérêt du hors-site pour la construction en étage, réalisée par RAD Urban elle comprend ainsi 77 logements ainsi qu'une ferme urbaine en toiture. 80 % des éléments ont été construits hors site.



Vue 3D d'un projet à Garches (construction modulaire bio-sourcée, 2021).

Ce projet a été élaboré par la start-up française Vestack dont l'ambition est de construire plus vite des bâtiments dotés d'une empreinte carbone réduite: Créée en 2019, l'entreprise s'est ainsi spécialisée dans la conception hors-site en matériaux biosourcés. « L'ossature bois constitue notre matrice fondamentale, explique Sylvain Bogeat, co-fondateur de Vestack. Nous proposons différents parements de façade à la demande du client et en fonction des PLU1. Bois, bac acier, briquettes ou enduit... Nous pouvons mettre en œuvre toute une palette de matériaux sur un même projet. » Les modules planchers et murs réalisés en usine constituent des bâtiments finis à 90 %.



Construction hors-site pour le projet Porte Bleue, à Marseille (La Porte Bleue à Marseille).

Actuellement en construction, la Porte Bleue abritera une résidence hôtelière quatre étoiles (comprenant 252 logements, un restaurant et environ 1 000 m² de surfaces de lobby, salles de réunion, salle de sport, bassin intérieur, sauna, hammam etc.), et 64 appartements de standing, allant du studio au T4 dont quatre duplex. La livraison est prévue en juin 2023. Les voûtes entourant les fenêtres viennent de de l'usine de Méditerranée Préfabrication (filiale de Vinci Construction France) située à Aubagne, à 20 km seulement de la Porte Bleue. Constructa a voulu en faire un exemple de chantier durable avec une production 100 % française. Le béton utilisé pour la préfabrication des voûtes a, par exemple, été formulé avec du laitier de haut fourneau des industries de Fos-sur-Mer, fruit de déchets revalorisés. Quant aux aciers, ils sont produits par Pro Armature à Châteauneuf-les-Martigues, transportés en vrac et montés à l'usine.

1.1.2. Modulaire

La construction modulaire est la version la plus avancée de construction hors-site, à ce jour. Elle tend vers **80 % de préfabrication** et permet d'améliorer la productivité.

Exemple illustré de construction modulaire



Construction modulaire et assemblage du bâtiment sur site à partir de modules standards (« containers » du type Procontain).

En Allemagne, où les conditions de construction sont relativement similaires à la France, Vonovia a construit ce bâtiment d'une trentaine de logements avec 65 % du travail réalisé hors-site. Les modules proviennent d'une usine située à 120 km, où les murs étaient carrelés et où une douche, un lavabo et des toilettes ont été installés. Les travaux de construction ont commencé début janvier 2019 et les premiers locataires étaient prêts à emménager en octobre 2019. La durée de construction a ainsi été divisée par deux par rapport à des modalités de chantier classiques.

1.2. Un objectif des pouvoirs publics en France ?

1.2.1. Une action législative limitée

Une seule action concrète législative concernant les maisons individuelles

À ce jour, aucune politique publique en France n'a été définie pour encourager la construction hors-site. Les seules mesures réglementaires prises relèvent d'une norme technique pour la construction de maisons individuelles modulaires en bois.

Une seule initiative en faveur du développement de ces modes de construction

Cependant, le sujet commence à émerger au sein de l'Exécutif. En décembre 2018, le ministre en charge de la Ville et du logement d'alors, Julien Denormandie, a ainsi missionné Robin Rivaton et Bernard Michel pour établir un rapport sur « *la construction à moindre coût grâce aux nouveaux matériaux et technologies* » et « *le renforcement de la production de bâtiments mobilisant la construction écologique bas-carbone, notamment bois et biosourcée* ». Mission qui a abouti à la publication d'un rapport intitulé « *L'industrialisation de la construction* » en janvier 2021 et dans lequel figurent notamment 14 propositions pour le développement de la construction industrialisée en France.

1.2.1. Un soutien politique pourtant clair

Annonces officielles mais soutien financier repoussé

Après la publication de ce rapport officiel, en octobre de la même année, Emmanuelle Wargon - alors ministre du Logement - a annoncé dans le cadre d'annonces plus larges sur la construction et le logement que « *des moyens supplémentaires seront mobilisés dans le cadre du plan France 2030, pour développer l'industrie du bois dédiée à la construction et développer la décarbonation de l'industrie au service de la construction notamment* » (i.e construction hors-site).

Le Premier Ministre d'alors, Jean Castex, a également suggéré en novembre 2021 de saisir l'occasion du chantier du Grand Paris Express pour « *développer la construction hors-site* », qui permettrait de « *bâtir plus vite, de réduire les nuisances des chantiers* » et de « *faire émerger des industries françaises nouvelles* ».

Mais, contrairement à ce qui avait été un temps envisagé, **le plan « France Relance 2030 » publié à la même période ne comporte finalement aucune mesure de soutien à cette industrie**, notamment car - selon les mots d'un Conseiller ministériel rencontré début 2022 par les auteurs de l'étude - « *la filière économique et industrielle n'est pas encore prête* ».

Une opportunité de développement industriel & productif pour le secteur de la construction française

Il ne fait aucun doute que sous la pression de la démographie urbaine et de l'impossibilité écologique de continuer à étaler nos villes, il nous faut pouvoir construire plus vite, dans des espaces de plus en plus contraints. Différents représentants gouvernementaux y ont vu une opportunité pour le développement du hors-site. Et ce d'autant plus que, comparativement à d'autres industries, le secteur de la construction garde une marge de progression importante dans l'automatisation et la numérisation de ses procédés.

Le manque de main d'œuvre et l'impératif de réduction des émissions carbone ajoutent une pression supplémentaire. Dans le rapport de Robin Rivaton et Bernard Michel (page 25), le manque de ressources qualifiées est cité comme première raison d'adoption de technologies de construction industrialisée ces trois dernières années (72 %), devant la pression sur les coûts (67 %), la pression sur les délais (64 %), de meilleurs usages (31 %) et les enjeux de sécurité (28 %).

En France, « *nos calculs nous amènent à penser qu'entre 30 et 40 % de la valeur de la construction d'un immeuble résidentiel collectif est amenée depuis l'extérieur du chantier sous forme de matériaux* », estiment Robin Rivaton et Michel Bernard dans leur rapport... Ils rappellent ainsi que si les fenêtres étaient assemblées sur site il y a 30 ans, aujourd'hui le lot de vitrage est un composant livré prêt à posé. Aussi est-il permis d'ambitionner produire l'immense majorité des éléments d'un immeuble hors du chantier.

Le hors-site est également une opportunité pour développer des innovations industrielles en France, pouvant faire émerger des techniques constructives durables, à un coût carbone maîtrisé, avec l'utilisation du bois, ou encore l'accroissement conséquent du recyclage. Plus généralement, « *la construction industrialisée permet de construire plus durablement en raison de sa capacité à rationaliser les ressources et à évoluer* ».

Selon l'association de promotion de l'innovation dans le secteur immobilier Real Estech, « *des bouleversements très importants, notamment de la localisation géographique de la valeur ajoutée, des emplois et des acteurs, du secteur du BTP, peuvent survenir de la généralisation de ces pratiques. A dix ans, il y aurait un risque de délocalisation inédit de la construction. Si la filière de la construction française a montré sa capacité à se moderniser, le défi à venir est considérable. Il peut aussi permettre de réindustrialiser le territoire par la construction.* »

Regard depuis les USA

Aux Etats-Unis, le soutien des pouvoirs publics est plus concret. Plusieurs startups, bénéficiant de la volonté des pouvoirs publics de promouvoir la construction hors site dans l'habitat, ont réussi à remplir leurs carnets de commandes.

Lors d'un webinar organisé par BTP Consultants sur le sujet, Pascal Chazal, spécialiste de la construction hors site, a pointé une différence fondamentale avec la France : l'implication des grands maîtres d'ouvrage dans la construction hors site. L'exemple de la **ville de New York** est assez emblématique. Dans son plan Logement 2.0 (Housing 2.0) de développement de logements abordables, la métropole américaine soutient la construction industrialisée avec l'objectif d'atteindre un rythme de 25 000 de ces logements construits ou rénovés chaque année. Le maire s'est ainsi engagé à « *capitaliser sur les avancées technologiques et la conception innovante pour développer la construction modulaire et les micro-unités qui peuvent réduire le coût de la construction, permettre de bâtir de nouveaux logements plus rapidement et répondre à l'évolution démographique de la ville.* » (Le Moniteur, 2020)

1.3. Éléments de marché

1.3.1. Attractivité & perspectives de croissance

Que les pouvoirs publics et grands maîtres d'ouvrage soient largement engagés ou non dans le développement de la construction hors-site, nombre d'arguments plaident en faveur de cette technique.

Avec 80 % à 95 % des travaux réalisés en usine, et des modes opératoires permettant d'opérer simultanément différentes étapes d'un chantier qui traditionnellement se succèdent, la construction hors site promet notamment :

- ▶ gains de productivité,
- ▶ réduction des coûts,
- ▶ réduction des délais,
- ▶ et réduction de l'empreinte carbone de la construction.

Résultat, à l'échelle mondiale, la construction hors-site progresse chaque année (cf. [Rapport « L'industrialisation de la construction »](#)).

En France, un engouement plus discret

Cet essor de la construction modulaire a été plus discret en France. Mais, dans son rapport intitulé « [Next Normal post Covid-19](#) », McKinsey estime que le marché français du hors-site pourrait atteindre 2,8 milliards de dollars en 2030.

Pour référence :

Une progression intéressante qu'il faut toutefois comparer aux 293 milliards d'euros de chiffre d'affaires enregistré par le secteur de la construction ([Insee, 2019 pour 2017](#)).

En Amérique du Nord, le hors-site décolle

De l'autre côté de l'Atlantique, le marché est plus mature bien qu'encore à ses balbutiements :

- ▶ En 2017, 11 % des constructeurs américains déclaraient ainsi investir dans des procédés hors-site (selon une étude d'[Autodesk](#)),
- ▶ Mais la même année, **seulement 7 % déclaraient investir dans le BIM**,
- ▶ Et en 2018, les maisons individuelles construites hors-site ne représentaient que 2 % du marché ([BCG](#)),
- ▶ Au Canada, l'élan en faveur du hors-site est plus marqué actuellement, **6 000 maisons sont usinées par an au Québec**, soit 12 % des nouvelles maisons construites par an.

1.3.2. Typologies & géographie

Focus maisons individuelles

Autre réalité du marché du hors-site aujourd'hui : il se concentre très largement sur la construction de maisons individuelles, lesquelles sont le plus souvent conçues à partir d'ossatures bois et de panneaux préfabriqués qu'il suffit d'assembler.

$\frac{3}{4}$ du marché mondial de la construction hors-site concerne le résidentiel, et principalement la maison individuelle.

[Rapport « L'industrialisation de la construction »](#).

En Europe, le Royaume-Uni mène la danse

Géographiquement, c'est le Royaume-Uni qui se détache sur la branche maisons individuelles. En 2017 déjà, 15 000 y auraient été construites selon un procédé modulaire, soit 9 % du marché.

Néanmoins les chiffres diffèrent d'un rapport à l'autre car aucune base de données complète sur le hors-site n'existe à ce jour au Royaume-Uni, [selon un rapport sur les bénéfices et les risques de l'industrialisation de la construction établi conjointement par l'université de Cambridge et Places for People en juillet 2021](#). Ainsi, écrivent-ils, « *par exemple, Pinsent et Mason (2017) ont identifié que 15 000 maisons modulaires sont construites chaque année par l'industrie de la construction de maisons, tandis que Hollander (2018, 2019) a identifié que les 50 plus grands constructeurs ont construit 4 667 maisons en 2017/18 et 5 389 maisons en 2018/19 en utilisant les MMC (modern methods of construction)* ».

Les projets hors-site pourraient prendre encore plus d'ampleur au regard du volontarisme affiché par le gouvernement anglais pour développer l'utilisation des nouvelles technologies et le hors-site en matière de construction. Ainsi, la stratégie industrielle annoncée en 2018 par le gouvernement mentionne clairement l'objectif de « *construire de nouvelles maisons en quelques semaines – voire en quelques jours – plutôt qu'en mois ; de livrer de nouveaux bâtiments au tiers du coût ; de fournir des maisons abordables et économes en énergie* », nous apprend le rapport publié par l'Université de Cambridge et Places for People.

1.3.3. Vers une diversification des typologies

L'industrie de la préfabrication s'est considérablement diversifiée

Au-delà de ce schéma de résidence individuelle, la construction hors-site devient une alternative crédible dans les cœurs des villes. Si les start-ups du hors-site sont souvent spécialisées dans la préconception, parfois la construction de modules faciles à intégrer, elles ne maîtrisent pas toute la partie industrielle. Un modèle intégré est sans doute nécessaire pour s'imposer face aux grands groupes de la construction traditionnelle.

Habitat collectif

► C'est ce qu'a tenté **Katerra**, en intégrant toute la chaîne de valeur (conception, industrialisation, réalisation). **Katerra**, qui a levé 1,2 Mrd\$ depuis sa création en 2015, s'est positionné sur l'habitat collectif de 2 à 5 étages avec une technologie de bois lamellé croisé. Depuis 2018, elle rachète entreprises générales, agences d'architecture et promoteurs. Pour autant, les logements n'ont pas été livrés plus vite, ni à moindre coût. Après avoir annoncé la suppression de 400 emplois (soit 7 % de ses collaborateurs) en 2021, l'entreprise a finalement fermé boutique. En dépit de cette tentative échouée, le marché apparaît à terme porteur pour ces entreprises, qui devraient profiter de l'implication croissante des acteurs publics. Katerra annonçait d'ailleurs avoir un carnet de commandes de 6 000 logements collectifs en construction !



► **Full Stack Modular**, acteur américain du hors-site, au positionnement similaire, a installé sa principale usine à Brooklyn en 2016 et l'opère depuis. En Allemagne, la plus importante foncière résidentielle, **Vonovia**, comptant 33 Mrd€ sous gestion, a livré en 2018 sa première opération en modulaire de **38 logements** en périphérie de Wiesbaden, une ville de 300 000 habitants.



Immeubles de moyenne & grande hauteur

Sur le marché des immeubles de plus grande hauteur, des acteurs hors-site émergent aussi. On peut citer :

► **Juno Residential**, une startup californienne, qui s'attaque aux immeubles de moyenne hauteur.



► **Urban Rad**, un groupe canadien « *d'architectes, d'ingénieurs, de constructeurs, de fabricants et de promoteurs immobiliers travaillant ensemble, sous un même toit* ». Il promeut une technologie acier pour 'amener le modulaire sur les immeubles de grande hauteur.



► **GA Smart Building**, promoteur hors-site et constructeur français, se spécialise dans la construction industrialisée. Pionnier et référent en la matière, GA a réalisé avec sa filiale **Ossabois** l'hôtel Eklo, une **opération d'hôtellerie en modulaire bois** à Marne-La-Vallée. Elle est le reflet de l'expertise **hors-site** du Groupe et de sa volonté de trouver des solutions constructives durables et responsables pour la ville de demain.



De nombreux produits immobiliers connaissent une vague d'industrialisation

Le hors-site attire aujourd'hui les acteurs du segment résidentiel, mais l'habitat n'est pas le seul à pouvoir bénéficier des techniques hors-site. Tous les actifs qui présentent une régularité dans leurs usages peuvent en théorie en bénéficier, et voient leurs modes de construction évoluer.

Quatre typologies sont particulièrement concernées aujourd'hui :

- les résidences de service (étudiants, seniors...),
- les hôtels,
- les cliniques,
- les écoles.

Exemple de l'hôtellerie avec Marriott

Marriott a annoncé en 2015 le lancement d'une **expérimentation pour le développement d'hôtels modulaires**. Dès 2017, un premier établissement de 97 chambres était livré à Sacramento en Californie, sous la marque **Fairfield Inn & Suites**.

Grâce à un partenariat avec le constructeur **Guerdon Modular Buildings**, basé dans l'Idaho et capable de produire **90 000 m² de surface par mois**, Marriott a **réduit la durée de ses chantiers d'environ 4 à 6 mois** sur une durée moyenne de 14 mois. Concrètement :

- ▶ Les modules acheminés vers le site contiennent chacun deux chambres toutes-équipées et un couloir.
- ▶ Elles arrivent sur le site de construction entièrement construites, avec un lit, un bureau et des toilettes, des draps et des oreillers dans le placard et une télévision haute définition prête à être visionnée.
- ▶ Les ouvriers sur le chantier se chargent donc uniquement des travaux liés à la plomberie et à l'électricité.

Alors que plusieurs hôtels modulaires ont été livrés en 2017 et 2018, **Marriott souhaite développer 10 % de ses hôtels via ce procédé**, soit environ une cinquantaine d'établissements par an, permettant de **réduire les délais de développement de 30 à 40 %**.

Des équipements scolaires aussi

Les bâtiments publics, et plus particulièrement l'**extension des bâtiments existants**, sont un terrain de jeu privilégié de la construction modulaire. Devant la surpopulation des écoles et les contraintes budgétaires de son ministère de l'Éducation, **le Royaume-Uni a massivement recouru à la construction industrialisée pour les bâtiments scolaires ces dernières années**. Le Priority School Building Programme, lancé en 2014 et qui consiste en la rénovation de 540 écoles pour un coût de 4,4 milliards de livres, s'appuie massivement sur la standardisation des éléments de structure.

Confronté lui aussi à un besoin urgent de construction, l'État du Victoria en Australie, dont la population va passer de six à dix millions d'habitants d'ici 2050, construit actuellement une centaine de bâtiments scolaires en modulaire, de 300 à 1 000 m². Le raccourcissement des délais de chantier permet une installation de ces bâtiments sur les campus existants pendant les vacances scolaires, ce qui évite de perturber l'enseignement.

1.3.4. Nouveaux entrants

Autre information importante concernant la dynamique du marché du hors-site : les acteurs se multiplient et lèvent des fonds aux montants assez substantiels. En avril 2019, la **startup anglaise TopHat** a par exemple reçu un investissement en capital de **75 M€** de la part de Goldman Sachs. Fondée en 2016, TopHat a commencé la production début de 2018 dans son usine et son premier chantier résidentiel a accueilli des résidents au deuxième trimestre de 2019. Aux États-Unis, et en Californie en particulier, de nombreux acteurs du préfabriqué pour l'habitat individuel ont vu le jour ces cinq dernières années :

- ▶ **Factory OS** dont la première commande a été faite par Google pour 300 logements.
- ▶ **Entekra** financé par Louisiana-Pacific, un des plus gros fabricants américains de matériaux de construction en bois.
- ▶ **Prefab Plant** dans lequel Amazon a investi 6,7 M\$ en 2019.
- ▶ **Blu Homes** qui a levé 200 M\$ pour ses maisons haut-de-gamme écologiques.
- ▶ **Connect Homes** et ses maisons low-cost.
- ▶ **Module Housing** et son UX de commande de tiny house ou d'extension depuis son téléphone.
- ▶ **Mighty Building**, basée à Oakland, qui a levé 40 M\$ en janvier 2021 pour ses maisons préfabriquées utilisant impression 3D, robotique et automatisation. Elle prétend pouvoir imprimer des structures en 3D « *deux fois plus rapidement avec 95 % d'heures de travail en moins et 10 fois moins de déchets* » que la construction conventionnelle.



Ailleurs dans le monde, plusieurs sociétés innovantes de construction industrialisée ont levé des fonds depuis janvier 2021, dont :

- ▶ En Espagne, les fondateurs de **Privalia**, un des plus gros succès entrepreneuriaux du pays, se sont lancés dans la construction industrialisée avec un logiciel connectant les différentes parties prenantes en levant **10 millions d'euros**.
- ▶ En France, il faut mentionner la jeune start-up **Vestack** qui vient de lever 2,6 millions d'euros avec une ambition de maîtriser la production de bout en bout.



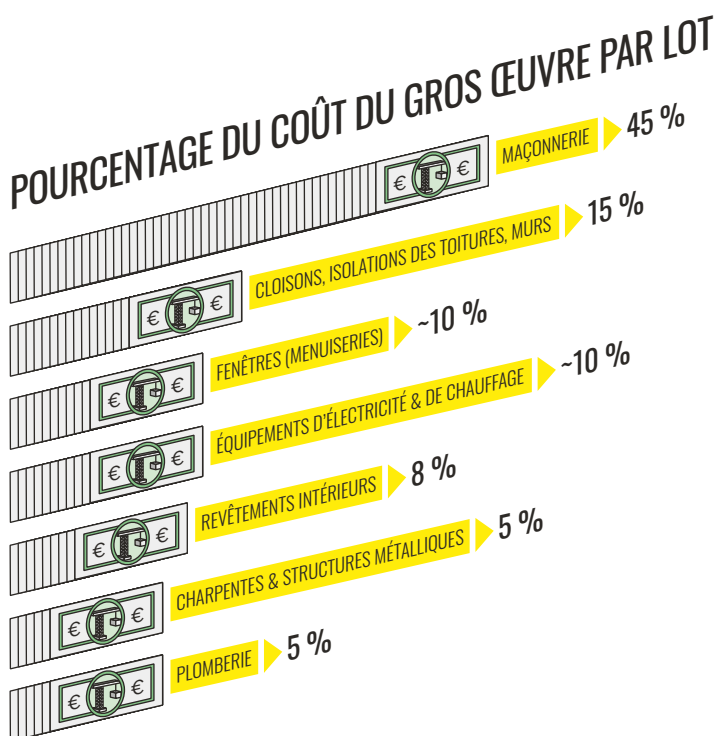
1.3.5. Chaîne & glissement de la valeur vers de nouveaux acteurs clés

Réduction de la valeur marchande du chantier

Avec la construction hors site, **80 % à 85% des travaux de construction pourraient être réalisés en usine**, contre 10 % seulement aujourd'hui (cf. Rapport « L'industrialisation de la construction »). Une plus grande partie de la valeur serait ainsi produite en dehors du chantier dans des lieux de production centralisés.

Il est donc crucial d'étudier l'impact de la construction hors-site sur la chaîne de valeur de la construction.

Aujourd'hui par exemple, le gros œuvre, réalisé sur site, représente plus de 60 % du coût global de la construction, avec le détail suivant :



Pour chacun de ces lots, une partie de la valeur est déjà produite en dehors du chantier.

- ▶ Les menuiseries sont le lot dont la valeur est principalement produite hors chantier,
- ▶ tandis que le lot maçonnerie concentre sa valeur marchande sur site (très lié au choix du béton).

Un autre chiffre intéressant concerne le ratio « coût de la pose/coût total » qui :

- ▶ est de 66 % pour le béton banché en France,
- ▶ tandis qu'il descend à 25 % pour le bois.

Conclusion : la construction hors site transforme l'acte de construire en un acte de produire et ainsi transfère une partie conséquente de valeur du chantier vers l'usine.

Les acteurs traditionnels de la construction vont voir leur rôle évoluer

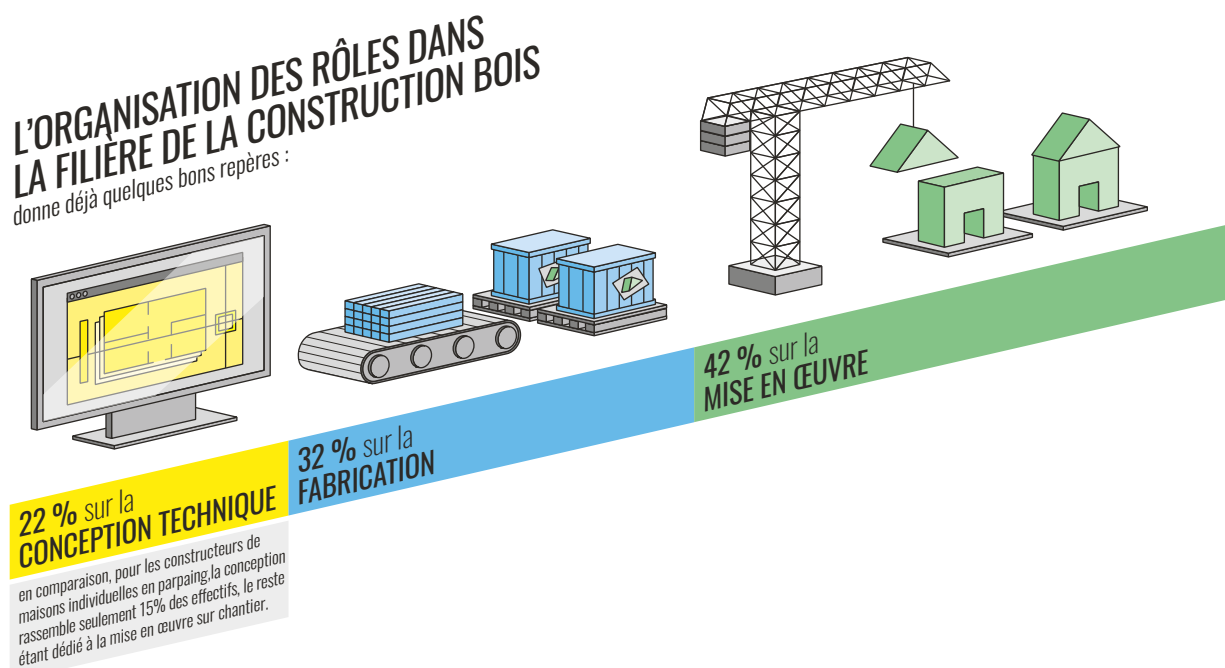
Outre un glissement de la valeur marchande des chantiers, **un déploiement important du hors-site modifierait plus ou moins fortement le rôle des acteurs** très variés qui opèrent dans le secteur de la construction. Ainsi :

- Les fabricants de matériaux qui concentrent 3 à 6 % du CA global d'un projet de construction, vont être de plus en plus centraux dans la chaîne de valeur du hors site.
- Les groupes de construction spécialisés, qui concentrent 5 à 15 % du CA global d'un projet de construction sont peu nombreux donc en situation de quasi monopole aujourd'hui.

Les entreprises générales, qui concentrent 2 à 5 % du CA global d'un projet de construction, verront leur périmètre d'action réduire si elles n'intègrent pas la chaîne du hors site.

- Les artisans, qui concentrent 3 à 5 % du CA global d'un projet de construction, ne sont pas équipés aujourd'hui pour répondre aux enjeux de la fabrication industrialisée mais peuvent contribuer à l'installation accélérée sur site.
- Les promoteurs, qui concentrent environ 10 % du CA global d'un projet de construction, vont voir les frontières entre leur métier et celui des fabricants et constructeurs continuer de se brouiller.
- Les architectes et bureaux d'étude technique, qui représentent 5 à 10 % du CA global d'un projet de construction, verront leur créativité menacée s'ils ne participent pas activement à la conception industrialisée.
- Les services annexes comme la logistique, qui représenteraient plus de 9 % du chiffre d'affaires net du secteur, devront se réinventer pour répondre à la nouvelle organisation du hors site car **les coûts logistiques seront déterminants pour définir la localisation des sites de production.**

L'ORGANISATION DES RÔLES DANS LA FILIÈRE DE LA CONSTRUCTION BOIS donne déjà quelques bons repères :



En France, certains acteurs bien positionnés

Si la construction hors-site est encore limitée en France, certains acteurs justifient d'une légitimité importante pour conduire sa montée en puissance. Parmi eux, on peut penser aux entreprises spécialistes du hors-site, du préfabriqué et/ou du modulaire citées ci-dessous :

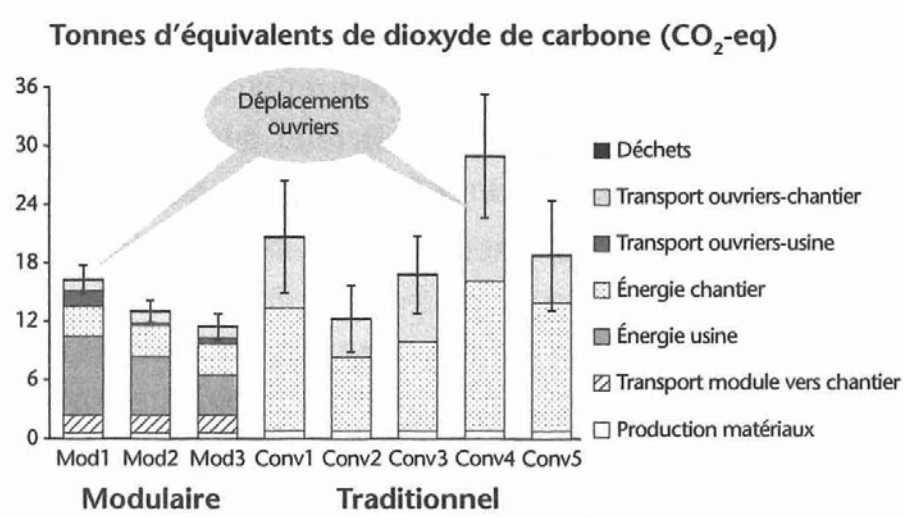
ENTREPRISE	# COLLABORATEURS	CA	DÉTAILS
GA Smart Building	750	308 M€ dont Ossabois 41 M€ (2019)	Le chiffre d'affaires comprend une partie indéterminée de l'activité de promotion et non de construction. L'entreprise a fait l'acquisition en janvier 2018 d'Ossabois, leader de la construction bois avec son système constructif à ossature bois (38 millions d'euros réalisés avec 180 salariés en 2016), démontrant un mouvement de concentration du secteur. Avec les trois sites de production d'Ossabois, le groupe consolidé compte désormais huit usines réparties sur le territoire (Occitanie, Rhône-Alpes, Normandie, Grand Est).
OBM Construction Bois	180	45 M€ (2021)	OBM Construction intervient auprès des maîtres d'ouvrages publics et privés pour concevoir, piloter et assurer l'exécution de projets de construction, en neuf, y compris en site occupé sur l'ensemble du territoire. Des constructions destinées aux ouvrages publics, aux bâtiments tertiaires, ainsi qu'à l'habitat collectif. En grande partie préfabriqués dans l'usine de Chevilly (45), les bâtiments bois de l'entreprise apportent une réponse qualitative, rapide, durable et écologique à tout projet de construction neuve, d'extension ou de surélévation.
GSCM (modulaire)	230	-70 M€ (2022)	Avec plus de 8 300 unités fabriquées chaque année, le Groupe GSCM est le 2 ^e acteur du marché de la construction modulaire en France. Le Groupe est représenté sur l'ensemble du territoire national au sein des filiales Solfab, Decortes et Bodard qui unissent leur savoir-faire pour ce procédé de construction moderne, ingénieux et performant.

Les grandes entreprises de construction française développent elles aussi leurs **capacités d'industrialisation**.

On reconnaît particulièrement les travaux effectués par Eiffage et Vinci pour la filière :

ENTREPRISE	DÉTAILS
Eiffage Construction	<ul style="list-style-type: none"> ► Eiffage Construction a entamé une réflexion autour de la construction modulaire il y a une dizaine d'années en créant en juillet 2008 une filiale dédiée à la fabrication de modules dits à Haute Valeur Ajoutée. Ainsi c'est sous la marque HVA-concept que la filiale Eiffage Construction Industries commercialise des modules sanitaires avec l'objectif de « réduire les délais et le coût de construction, de simplifier la vie du chantier » et de trouver des solutions de construction bas carbone. Le site de production situé à Fresnay sur Sarthe produit 4 000 modules par an dont la majorité ont été conçus sur-mesure. Pour que l'industrialisation soit rentable, la taille minimale d'une série est de 70 à 80 unités.
Vinci Construction France	<ul style="list-style-type: none"> ► Vinci Construction France a regroupé au 1er janvier 2018 toutes ses activités relatives à la construction bois dans sa filiale Arbonis qui se définit comme un concepteur-constructeur bois. Celle-ci réalise 48 millions d'euros de chiffre d'affaires avec 250 collaborateurs. L'entreprise compte quatre sites de production à Verosvres (71), Péguilhan (31), Chemillé (49) et La Charité-sur-Loire (58). ► La réflexion sur l'automatisation est bien avancée avec l'arrivée de compétences venues de l'industrie automobile permettant de mesurer le temps de panne, de disponibilité machine, la productivité. L'enjeu est la centralisation des activités, l'éparpillement occasionnant des coûts importants. Les conséquences sur l'emploi ne sont cependant pas anecdotiques : McKinsey estime qu'une usine de 1 000 unités avec un degré d'automatisation normal se traduit par une baisse de 40 % du nombre d'emplois par unité de logement produite.

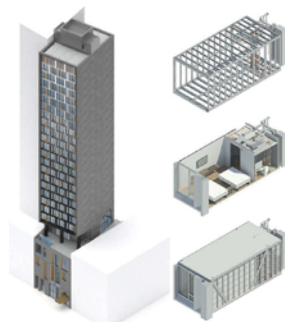
Mais attention : le choix des matériaux est en revanche essentiel sur l'impact carbone de la construction et de l'analyse en cycle de vie du bâtiment. Le bois sera toujours le matériau le plus vertueux d'un point de vue environnemental.



Comparatif des émissions de CO₂ de la phase chantier selon le mode constructif choisi (source : Quale et al., 2012)



Exemple de module hors site avec voiles béton (Groupe Pelletier)



Exemple des modules de l'AC Hotel Nomad de Marriott, qui développe 168 clefs sur 5 étages à New York City. (Christophe Faure, Hors-Site.com)



Les structures métalliques des « mods » sont définies avec la plus grande précision. (Christophe Faure, Hors-Site.com)



Le prototype a permis d'ajuster tous les détails techniques et d'agencement. À noter, le très beau travail façades en « profondeur » qui éliminent tout aspect de module superposé. (Christophe Faure, Hors-Site.com)



Les mods sont entièrement meublés en Pologne. (Christophe Faure, Hors-Site.com)

1.4. Avantages & freins au développement de la filière

Les enjeux que les acteurs de l'immobilier et de la ville en général doivent affronter requièrent de grands changements dans les méthodes. Et c'est que le hors-site peut conduire à faire grâce à des avantages désormais connus et faisant majoritairement consensus. Nous les listons dans un tableau ci-dessous.

Néanmoins, des freins subsistent à ce jour pour déployer cette méthode. Des freins qui pour certains nécessiteront « simplement » plus d'investissement financier, mais qui, pour la plupart, réclament un changement d'état d'esprit et des engagements collectifs, pour être levés. (Voir le 2^e tableau).

1.4.1. Les avantages de la construction « hors site »

PRINCIPAUX AVANTAGES DU HORS SITE

CONDITIONS DE TRAVAIL

-  DE SÉCURITÉ
-  DE NUISANCES
-  DE CHARGES LOURDES



Sur une chaîne de production, les produits sont amenés par des machines ou des instruments de manutention jusqu'au poste de l'opérateur sans que celui-ci ne doive porter lui-même des charges lourdes.

-  DE BRUIT









Le bruit est largement atténué car les tâches les plus bruyantes sont réalisées à l'intérieur de machines phoniquement isolées.

EXEMPLE : L'usine du britannique Balfour-Beatty à Wednesbury, ouverte en 2011, a ainsi réussi à éradiquer les bruits supérieurs à 85 décibels et à supprimer 90 % des déplacements manuels de charge lourde.

MEILLEURE QUALITÉ CONSTRUCTIVE (RÉPONDANT AUX FUTURES EXIGENCES DE LA RE2020)

-  DES MALFAÇONS
grâce à la standardisation des procédés de fabrication et à un contrôle qualité industrialisé.
-  DES ACCIDENTS
et de l'occurrence de sinistralités.

IMPACT ENVIRONNEMENTAL

- ▶ CHANTIER :
 -  DES ÉMISSIONS DE CO² LIÉES AU TRANSPORT
 -  DES DÉCHETS DE CONSTRUCTION
 -  DES NUISANCES
- ▶ BATÎ :
 -  DE L'OBSOLESCENCE DU BÂTI
 -  QUALITÉ DU BÂTI
 -  RÉVERSIBILITÉ & ADAPTABILITÉ DES ESPACES
- ▶ PROJET :
 -  DE L'EMPREINTE CARBONE DU PROJET
 -  UTILISATION DE MATÉRIAUX BAS CARBONE

PRODUCTIVITÉ

- ▶ EFFICACITÉ DE PRODUCTION
- ▶ ASSEMBLAGE EN USINE
- ▶ TEMPS D'INSTALLATION RÉDUIT



DE DÉLAIS ≤ 50%
DE COÛTS ≤ 20%

Une étude au Canada indique que la conception des maisons en usine permet 18 % de réduction de coût de construction. (Profil et possibilités de l'industrie de la maison usinée au Canada, 2006).

IMPACT SOCIÉTAL

-  CONTRIBUTION AU DÉVELOPPEMENT DE LA VILLE INCLUSIVE & DURABLE :
 - ▶ Solution de densification abordable car empreinte chantier minimisée

Le hors site nécessitant une emprise chantier minimiser, il permet un accès facilité aux coeurs de ville dense.

1.4.2. Les freins au développement de la construction « hors site »

FREINS RÉGLEMENTAIRES

Malgré le permis d'innover porté par la loi ESSOC, les projets incluant une construction hors-site doivent répondre à des exigences particulières.

FREINS ORGANISATIONNELS

POUR LES ACTEURS EXISTANTS

- ▶ Les entreprises qui veulent mettre en place ce mode de construction doivent transformer en profondeur leur modèle économique mais aussi leur organisation interne.
- ▶ Le chantier se déplace à l'usine, toute la logistique doit donc être pensée en fonction de cet élément, à savoir le passage de sites de productions décentralisés (à chaque lot un chantier), à une production centralisée pour l'ensemble des lots.
- ▶ Par ailleurs, la construction hors site suppose une utilisation massive des technologies numériques (dont le BIM et DfMA) dans les entreprises.

FREINS CULTURELS

QUALITÉ ?

- ▶ Des craintes persistent quant à la qualité de ce type de construction, et aux conditions de sa réversibilité.

STANDARDISATION DE L'ARCHITECTURE ?

- ▶ Le caractère ultra normé, offrant peu de flexibilité dans la conception, peut gêner certains acteurs.

Mais les technologies évoluant laissent place à de plus en plus de créativité architecturale.

FREINS STRUCTURELS

PAYSAGE CONCURRENTIEL

- ▶ Le petit nombre d'acteurs constructeurs donne lieu à une situation de quasi monopole

MAILLAGE TERRITORIAL

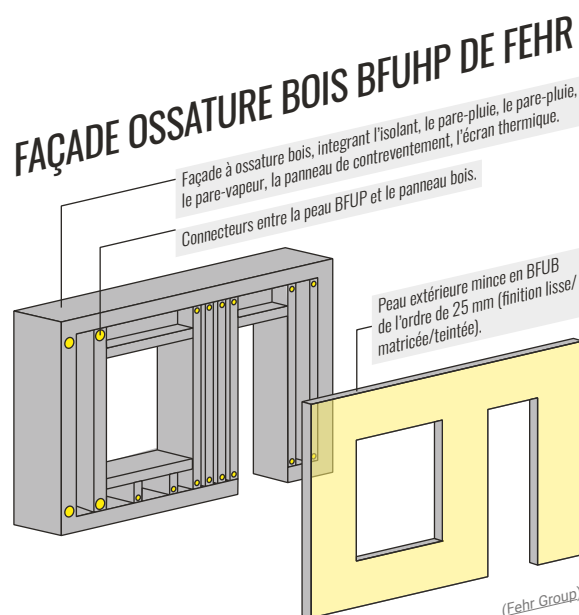
- ▶ Pour se développer, le secteur doit mailler le territoire français d'usines de production.
- ▶ Et donc se structurer ou se faire financer

La réussite nécessitera une bonne collaboration entre les acteurs capables de produire efficacement des composants à forte valeur ajoutée, dans des ateliers ou des usines et des entreprises du bâtiment à même de les assembler sur le chantier.

Cela suppose donc de réorganiser intégralement les processus et modalités de conception, logistique, construction des entreprises du bâtiment.

1.5. Hybrider pour scaler : l'avis d'un acteur du secteur

Promoteur et éditeur urbain, le groupe Constructa intègre depuis quelques années les techniques hors-site aux projets qu'elle développe ou co-développe sur le territoire. C'est le cas par exemple à Marseille pour la Porte Bleue, dans lesquels l'un des fonds gérés par Keys REIM a investi. « Nous avons fait le choix de la préfabrication pour les 575 pièces de béton blanc bas carbone qui signent la façade du bâtiment, rapporte Jean-Baptiste Pietri, architecte et président du groupe Constructa. La Porte Bleue est un bon exemple d'équilibre entre éléments préfabriqués et construction traditionnelle sur site. Nous avons identifié la compétence de Méditerranée Préfabrication sur les brise-soleils de La Marseillaise et nous savions que l'usine se trouvait à une vingtaine de kilomètres du chantier. »



1.5.1. Leçons du passé

Grâce à cette expérience et aux retours d'expérience d'autres acteurs du marché, Constructa plaide avant toute chose pour la diversification des matériaux, techniques et partenaires. La seule approche permettant, selon lui, de réduire le risque de standardisation régulièrement associé au préfabriqué ou à l'industrialisation de la construction.

Le groupe a aussi appris qu'il vaut mieux éviter de tomber dans des niches trop contraignantes pour garder en agilité et en compétitivité. L'exemple de Kattera en est la triste preuve. Lancée en 2015, Kattera voulait en effet bâtir une sorte de « plateforme » de la construction, pouvant produire des logements à la chaîne, et proposer aux promoteurs immobiliers des projets standardisés, leur demandant simplement de choisir la taille ou la décoration des appartements. La startup avait l'ambition de s'occuper de tout - architecture, construction, aménagement intérieur, etc. - pour maîtriser sa chaîne de valeur. Mais malgré des levées de fonds de plus de deux milliards de dollars (1,6 milliard d'euros) cumulés en six ans, Kattera a dû fermer ses portes à l'été 2021.

Autre leçon donc : éviter le dogmatisme et s'adapter aux compétences locales, en s'autorisant par exemple de ne pas tout industrialiser par souci d'efficacité et de rentabilité.

Et, parce que la transformation des modèles de construction est urgente d'un point de vue environnemental, humain et économique, il faut se donner les moyens de développer des actifs de grande échelle.

1.5.2. Constructa & Atelier Masse, partisans de l'hybridation

Selon Constructa et son partenaire Atelier Masse, un bureau d'étude spécialisé en ingénierie structurelle, répondre aux enjeux de demain tout en s'adaptant aux contraintes et réalités de terrain plaide en fait pour l'hybridation ; car elle permet de faire évoluer le produit industriel sans avoir à modifier le savoir-faire. Plutôt que de réinventer des méthodes de fabrication et de mise en œuvre, le binôme préfère réinventer les produits, pour en améliorer la qualité architecturale et en réduire l'impact carbone.

Il s'agit d'hybrider les méthodes constructives, mais aussi le choix des partenaires, des matériaux et des éléments de structure.

Constructa donne ainsi l'exemple de l'invention d'un **pré-mur en bois + BFUP**. Ce mur est préfabriqué à partir de matériaux biosourcés mais il ne modifie pas les méthodes de travail existantes sur les chantiers et n'engage donc pas de modification de compétences sur site. C'est un nouveau produit mais les ouvriers de chantier savent le manipuler. Ce produit est à la fois pratique et très performant. Composé d'un voile en BFUP mince fixé sur une ossature bois et isolé par de la laine de bois biosourcée, il apporte une grande qualité d'étanchéité, limite les problèmes acoustiques et d'inertie thermique et contribue à faire émerger des emplois plus qualifiés.

L'hybridation semble permettre de tirer tous les avantages du hors-site en réalité sans faire table rase des méthodes et métiers traditionnels de la construction :

- ▶ Création d'emploi industriels et ingénieurs en amont
- ▶ Maintien des emplois de mise en œuvre
- ▶ Réduction des accidents pour tous
- ▶ Amélioration de la qualité constructive
- ▶ Réduction des délais et donc des coûts
- ▶ Chantiers moins bruyants

Il conviendra toutefois de rester attentif aux risques sociaux et risques de dépendance aux rares usines spécialisées. Toutefois, le déploiement progressif du hors-site va inévitablement faire basculer la majorité de la valeur en amont, en phase de conception notamment.

2. Potentiel zéro-carbone : que disent les scientifiques ?

Outre ses avantages présumés en matière de réduction de délais de livraison ou de gains de productivité, le hors-site attire pour son potentiel de verdissement du secteur de la construction. Ce serait le cas en amont, avec un choix de matériaux plus durable, en phase de fabrication, avec un moindre gaspillage, mais aussi en aval grâce à une gestion plus circulaire des déchets ou à une efficacité énergétique accrue des bâtis livrés.

La construction hors-site constitue-t-elle un vrai levier pour bâtir des villes bas carbone ? Entre promesses et réalités, nous cherchons ici des arguments d'objectivation de l'impact carbone de la construction hors-site dans la littérature académique et dans les rapports études et avis business et politiques publiés à ce sujet.

Pour comprendre les raisons qui attirent ou questionnent aujourd'hui décideurs, investisseurs et acteurs de la construction vers la construction hors-site, la littérature rappelle que le secteur du bâtiment concentre de grands enjeux en matière d'atténuation du changement climatique.

Car il y contribue largement et de plus en plus même. « Alors que la consommation totale d'énergie finale du secteur mondial des bâtiments est restée au même niveau en 2019 par rapport à l'année précédente, **les émissions de CO² liées à l'exploitation des bâtiments en 2019 ont augmenté pour atteindre leur plus haut niveau à ce jour, à environ 10 GtCO₂, soit 28 % des émissions de CO² liées à l'énergie.** Si on ajoute les émissions de l'industrie de la construction de bâtiments, cette part passe à 38 % des émissions mondiales totales de CO² liées à l'énergie », relèvent, inquiets, les auteurs du [rapport 2020 sur la situation mondiale des bâtiments et de la construction](#) ⁽¹⁾, publié par l'ONU et l'Alliance mondiale pour les bâtiments et la construction (GlobalABC).

« Les émissions de CO² liées à la construction et à l'exploitation des bâtiments représentent 38 % des émissions mondiales totales de CO² liées à l'énergie. »

(Global ABC & ONU, 2020)

En France, la contribution du secteur du bâtiment au dérèglement climatique n'est pas moins problématique. Comme le rappelle le think thank [Carbone 4](#) ⁽²⁾ sur la base des chiffres de 2016, le secteur du bâtiment « représente environ 30 % des émissions annuelles nationales ». Bien sûr ni les décideurs publics ni les acteurs du secteur n'ont attendu le dernier cri d'alarme de l'ONU et de GlobalABC pour légiférer, innover et finalement tendre à une réduction drastique des émissions de CO² du bâtiment.

Mais, en Europe au moins, « les efforts politiques visant à décarboner le parc immobilier se sont jusqu'à présent concentrés sur des mesures d'efficacité énergétique afin de réduire ainsi la demande d'énergie et les émissions de carbone liées au chauffage, au refroidissement et à l'éclairage des bâtiments pendant leur durée de vie opérationnelle. Cette priorité se justifie, mais cette réponse n'est qu'une partie de l'effort global nécessaire pour parvenir à une Europe climatiquement neutre, écrit le think thank BPIE (Buildings Performance Institute Europe). Si les émissions liées à l'énergie utilisée par le bâtiment « habité » devraient progressivement tendre vers le zéro carbone, « les autres sources d'émissions de CO² du Bâtiment deviennent de plus en plus importantes et elles constituent donc une partie essentielle de l'avenir des plans de réduction carbone du secteur ». C'est particulièrement le cas pour « les nouveaux bâtiments construits selon les normes d'efficacité énergétique les plus élevées », souligne le BPIE. Car « les besoins énergétiques opérationnels étant extrêmement faibles, cela signifie que les émissions de carbone liées à la construction, à la maintenance et à la fin de vie des bâtiments deviennent les plus importantes sur le cycle de vie du bâti ».

Les conclusions du rapport conjoint de l'ONU et de GlobalABC ainsi que celles du BPIE vont donc dans le même sens : ce qu'on appelle en anglais les « **embodied carbon emissions** » doivent être ciblées par des mesures fortes et concrètes, en plus de celles prises pour réduire les émissions de CO² rejetées pendant la phase opérationnelle.

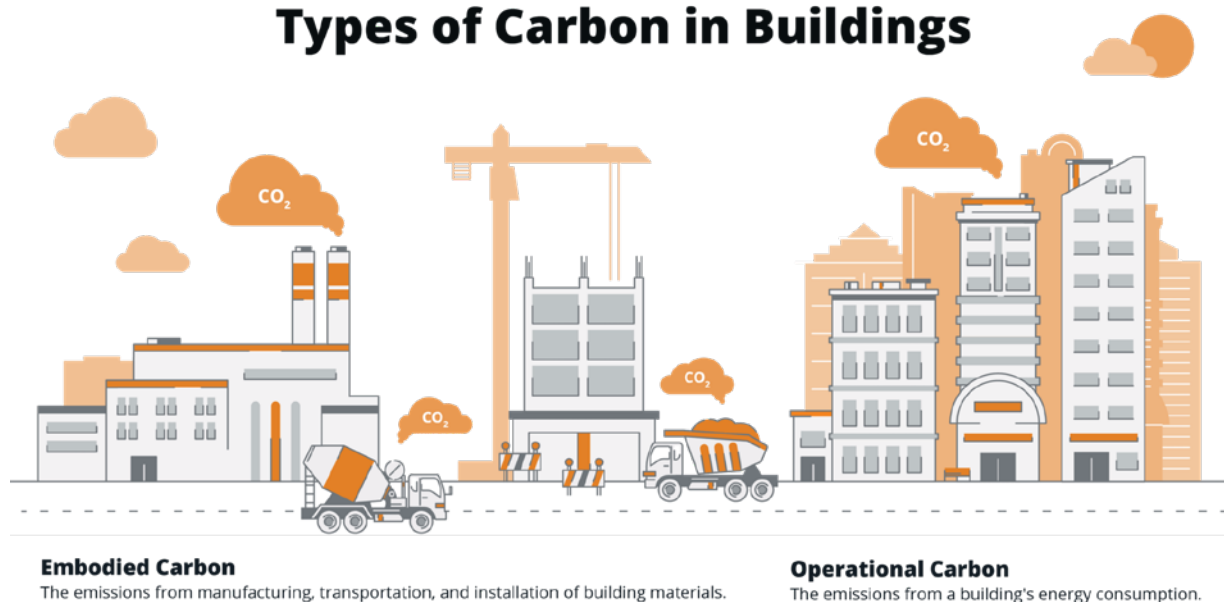
Cela pourrait même être décisif dans l'obtention de certains marchés. Ainsi l'annonce de la Ministre Emmanuelle Wargon de l'Appel à Manifestation d'Intérêt (AMI) « Mixité pour la construction bas carbone » visait la réduction de l'empreinte carbone des bâtiments comme principal facteur de sélection des projets attendus, mais aussi la ré-employabilité et la démontabilité.

Or les bénéfices environnementaux promis par la construction hors-site s'appliqueraient justement à

tout le cycle vie du bâti, aux émissions opérationnelles comme aux émissions en amont pendant la construction, et en aval pendant sa déconstruction prenant ainsi le secteur dans sa globalité.

Pour comprendre, il faut d'abord rappeler que le hors-site est un concept qui « *prend la suite de la préfabrication* », comme l'expliquent Bernard Michel et Robin Rivaton dans leur rapport remis au ministre de la Cohésion des territoires ⁽⁵⁾. S'il s'appuie effectivement sur la préfabrication de cloisons, de façades, de planchers et autres éléments structurant du bâti, s'y ajoute « *une dimension industrialisée de l'assemblage sur site et sur le transport de la production au site* » : ainsi « *80 à 85 % des travaux pourraient être réalisés en usine* » contre moins de 10 % aujourd'hui.

Types of Carbon in Buildings



Embodied Carbon

The emissions from manufacturing, transportation, and installation of building materials.

Operational Carbon

The emissions from a building's energy consumption.

Illustration des émissions de CO² générées sur tout le cycle de vie du bâtiment (4)

2.1. Les promesses bas carbone du hors-site

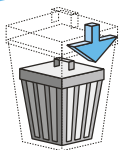
C'est cette dimension industrialisée qui intéresse aujourd'hui décideurs politiques et acteurs de la construction. D'abord parce qu'elle permettrait de **raccourcir considérablement les délais de construction**. Ensuite parce qu'elle contribuerait à **réduire le coût global** d'un projet immobilier. Mais aussi parce qu'elle donnerait au hors-site des atouts pour **accélérer la transition bas-carbone du Bâtiment**.

Dans leur rapport ⁽⁵⁾, Bernard Michel et Robin Rivaton assurent ainsi que « *l'un des bénéfices les plus certains de la construction industrialisée est d'être plus durable. Durable parce qu'évolutive et durable parce que moins gourmande en ressource* ».

La majorité de la littérature produite sur le sujet du hors-site s'accorde sur cette moindre gourmandise en ressources.

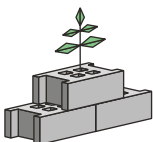
LES 5 PROMESSES BAS CARBONE DU HORS-SITE

N°1 : MOINS DE DÉCHETS DE CONSTRUCTION



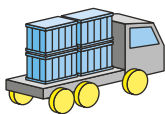
Permet de réduire de 11,35 % des émissions de CO² associés aux matériaux par rapport à la construction traditionnelle.

N°2 : POSSIBILITÉ D'UTILISER DES MATÉRIAUX + VERTUEUX



Les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites de 9 % par mètre carré dans le cadre d'une construction industrialisée.

N°3 : MOINS DE BESOINS EN TRANSPORT



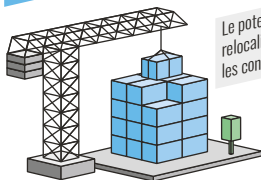
La fabrication hors-site minimise les coûts de carbone inhérents au transport. (Il ne faudrait pas dépasser une distance de 112 km entre l'usine hors-site et le chantier de construction pour conserver l'avantage carbone lié au transport).

N°4 : L'ASSURANCE D'UNE QUALITÉ DU BÂTI



Sur toute chaîne d'assemblage industrielle, les problèmes de qualité sont détectés lorsque les modules sortent de la dite chaîne, permettant de corriger les défauts avant toute expédition sur site.

N°5 : MEILLEURE RÉVERSIBILITÉ & MEILLEURE ADAPTABILITÉ DES ESPACES



Le potentiel de démontage & donc de recyclage/réutilisation/relocalisation de logements est plus grand, seulement pour les constructions à ossature acier.

Promesses du hors-site (Curiosity is Keys)

Promesse n°1 : moins de déchets de construction

Et donc une meilleure efficacité économique & environnementale

« L'efficacité des matériaux et la réduction des déchets sont une composante essentielle des économies environnementales, que permet la construction hors-site, rapportaient déjà WSP et Built Ecology en 2018 ⁽⁶⁾. Dans la construction sur site conventionnelle, des déchets de matériaux sont générés et doivent être transportés hors site pour être triés et traités. Globalement, **la réduction des déchets est réduite de 10 à 15 % dans un projet classique à 5 % avec les logements modulaires et préfabriqués**. Ceci est reproduit dans deux de nos études de cas : Broad Sustainable Building rapporte seulement 1 % de déchets et RAD Urban rapporte 4 % de déchets. Avec la construction préfabriquée et modulaire, quelques différences importantes permettent aux industriels d'alléger leur flux de déchets. Premièrement, elle constitue un environnement plus contrôlé où les matières premières sont conservées dans des états contrôlés. Avec moins de matériaux en transit et en transition sur un site de projet, il y a moins d'accidents, de déversements, de dommages et d'autres déchets de matières premières. Deuxièmement, l'utilisation du Building Information Modeling (BIM) permet la production automatisée de composants préfabriqués. En partageant des modèles 3D détaillés entre les concepteurs et les entrepreneurs, les entrepreneurs disposent d'un plan précis pour réduire les rebuts de matériaux. Troisièmement, en fournissant des assemblages en panneaux ou en modules, les systèmes MEP sont souvent intégrés et ne nécessitent pas de composants supplémentaires pour serpenter autour de la structure ou des cloisons sèches ».

Malindu Sandanayakea, Wenkai Luob et Guomin Zhang avancent que l'efficacité des processus de production hors-site permet de **réduire de 11,35 % des émissions de CO² associées aux matériaux par rapport à la construction traditionnelle** et au béton coulé sur place notamment.

Promesse n°2 : la possibilité d'utiliser des matériaux plus vertueux

Et donc de décarboner

Outre une génération moindre de déchets de chantier et une meilleure efficacité, la construction hors-site s'appuie également sur des matériaux différents, au bilan carbone bien inférieur à celui du béton et plus facilement réutilisables et/ou recyclables. **Le bois par exemple.** « **Un matériau idéal pour la construction hors-site et modulaire, selon le directeur général d'Ossabois, Michel Veillon** ⁽⁷⁾. **Son processus de transformation nécessite peu d'émissions carbone. Le bois n'a pas besoin d'être cuit, ni fondu pour être transformé. Il consomme non pas de l'énergie thermique, mais de l'énergie électrique, et cela change tout** ». De plus, ajoute ce professionnel bien établi sur le segment hors-site, « *il est tout à fait possible de s'approvisionner localement en bois, ce qui limite les émissions liées au transport des matériaux, tout en favorisant l'économie locale* ».

Le rapport de B. Michel et R. Rivaton ⁽⁵⁾ s'appuie sur la recherche académique et souligne que « *à matériau équivalent, les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites de 9 % par mètre carré dans le cadre d'une construction industrialisée* (Mao et al., 2016) ⁽⁸⁾ ». Eux aussi indiquent que la construction hors site permet l'utilisation plus facile du bois et du métal, dont les bilans carbone sont meilleurs que celui du béton (1 800 kg de CO² par tonne d'acier, 300 kg de CO² par tonne de verre, environ 150 kg de CO² par tonne de béton et 50 kg de CO² par tonne de bois).

« **Les émissions liées à la production de béton représentent aujourd'hui 6 à 7 % des émissions mondiales de CO²** ». (B. Michel & R. Rivaton, 2019) ⁽⁵⁾

Néanmoins aujourd'hui, plusieurs acteurs de la construction intégrant des méthodes hors-site utilisent par exemple un béton « bas carbone » composé de granulats recyclés et de laitiers, déchets de la sidérurgie. Reste à savoir si l'on peut considérer bas carbone un béton qui finalement, en utilisant des laitiers, stimule l'industrie très polluante de la sidérurgie...

Reste que la littérature produite sur les impacts environnementaux du hors-site est unanime : durant la phase de construction, les émissions de CO² sont largement générées par la consommation de matériaux.

C'est notamment ce que concluent Malindu Sandanayakea, Wenkai Luob et Guomin Zhang ⁽¹³⁾ pour qui l'analyse de scénarios révèle que l'utilisation de matériaux durables dans **la construction hors site pourrait réduire les émissions de GES de 16 à 20 %**. Avec une approche différente mais une conclusion similaire, Yue Teng et Wei Pan ⁽¹⁴⁾ estiment quant à eux que les émissions de CO² liées à la phase de construction pourraient être réduites de 1,5 % en augmentant « le taux de préfabrication du bâtiment de 35,2 % à 44,8 % ».

Promesse n°3 : moins de besoins en transport

Et donc réduction des émissions liées à l'acheminement des matériaux & des personnes

Aux moindres besoins en ressources et à l'utilisation de matériaux plus durables, la littérature sur le hors-site met également en avant une réduction des émissions amont liée aux transports nécessaires à la construction. « *Étant donné que seul ce qui est nécessaire pour le bâtiment est transporté sur le site, la fabrication hors-site minimise les coûts de carbone inhérents au transport à la fois en acheminant les composants, les sous-ensembles et les pré-assemblages sur le site et en éliminant les déchets du site. Elle limite également les impacts négatifs sur la qualité de l'air et les nuisances sonores pour les mêmes raisons* », avance le Royal Institute of British Architects ⁽⁹⁾.

Cette conclusion, Daniela Krug la faisait déjà en 2013 ⁽¹⁵⁾. Rappelant que sur un chantier de construction conventionnel les travailleurs et matériaux arrivent et repartent tout au long de la journée, elle soulignait qu'un grand nombre de petits et moyens véhicules produisent plus de gaz d'échappement (CO² et autres émissions nuisibles à la qualité de l'air) qu'un petit nombre de véhicules lourds.

Toutefois, sur cette promesse, plusieurs auteurs comme Malindu Sandanayakea, Wenkai Luob et Guomin Zhang ⁽¹³⁾ mettent en garde. Selon eux, et sur la base de leur étude de cas, **il ne faudrait pas dépasser une distance de 112 km entre l'usine hors-site et le chantier de construction pour conserver l'avantage carbone lié au transport** par rapport à une approche conventionnelle.

Promesse n°4 : l'assurance d'une qualité du bâti

Et donc une moindre consommation de ressources

Aujourd'hui, le secteur de la construction est pointé du doigt pour des démarches d'amélioration d'efficacité énergétique jugées trop faibles, rappellent B. Michel et R. Rivaton ⁽⁵⁾. Or, sur ce point encore, le hors-site permettrait de réaliser des ouvrages à la qualité maîtrisée. « **Les processus industrialisés permettent de s'assurer que la qualité est constante** », poursuivent les auteurs du rapport ministériel pour qui, comme sur toute chaîne d'assemblage industrielle, les problèmes de qualité sont détectés lorsque les modules sortent de la dite chaîne, permettant de corriger les défauts avant toute expédition sur site. Pour eux, si les contrôles sont rigoureusement conduits et systématiques, et « *alors que les normes (RE2020) exigent une amélioration considérable de la qualité intrinsèque des bâtiments, la construction industrialisée contient des réponses* ».

Promesse n°5 : Une meilleure réversibilité & une meilleure adaptabilité des espaces

Donc une réduction des cycles de démolition & des besoins en construction neuve, par nature émetteurs de CO²

La démontabilité des éléments et modules industrialisés ou leur réutilisation dans un autre lieu ou pour un tout autre usage permettrait une meilleure gestion des matériaux. Néanmoins, WSP et BUILT ECOLOGY pointent dans leur rapport ⁽⁶⁾ que « *contrairement à l'idée communément admise, la plupart des unités modulaires et préfabriquées ne sont pas construites pour être déplacées après leur installation initiale* ». Selon leur expertise, les logements modulaires et préfabriqués en ossature bois auraient une **fin de vie comparable à celle de logements construits sur site**, et donc des impacts similaires. À l'inverse, le rapport estime que **le potentiel de démontage et donc de recyclage/réutilisation/relocalisation de logements à ossature acier est plus grand** car « *les unités en acier sont généralement assemblées avec des boulons et des rivets qui peuvent être démontés* ».

En conclusion

La construction hors site offre un véritable potentiel de réduction des émissions carbone liées à la construction des bâtiments. Même si les 16 à 20 % de réduction potentielle des émissions ne peuvent devenir réalité que dans le cadre d'une utilisation optimale de matériaux bas carbone, un chantier hors-site non optimisé permet de réduire les émissions de la construction. Ainsi, dans leur étude comparative de deux projets en Chine (un bâtiment construit sur site et un autre hors-site à Shengdu), Malindu Sandanayakea, Wenkai Luob et Guomin Zhangc ⁽¹³⁾ évaluent la **réduction des émissions de gaz à effet de serre de 8,40 % par rapport à la construction conventionnelle**.

D'ailleurs, dans le baromètre Batimat/Campus-Hors-Site/TBC Innovations ⁽¹⁰⁾, qui compile les résultats d'une étude menée auprès de 200 acteurs du BTP en juin 2021 :

- ▶ Près de 50 % des répondants déclarent avoir déjà eu recours à ce procédé pour au moins un de leurs chantiers, majoritairement dans le neuf et des projets de logement – petit collectif ou maison individuelle ;
- ▶ 43 % citent l'impact environnemental et les objectifs bas carbone comme un avantage attendu ;
- ▶ Parmi ces 43 %, 48 % déclarent avoir réalisé un impact environnemental positif.

2.2. Des promesses à la réalité : il faut massifier & structurer les données

Ainsi, outre les délais raccourcis et coûts globaux de construction réduits promis par le hors-site, les bénéfices en termes d'impact carbone font partie des raisons qui poussent de plus en plus d'acteurs du bâtiment vers la construction modulaire.

Néanmoins la littérature business comme la littérature académique s'accordent : **pour que les promesses bas carbone entraînent un réel changement d'échelle de la construction hors-site en France, en Europe et dans le monde, les données manquent** ; et les méthodologies d'identification et de collecte de données de qualité doivent être davantage structurées, standardisées même, pour permettre une réelle comparaison entre construction sur site et construction hors-site et ce, selon les différents types de bâtiments érigés, qu'on parle de logements individuels et collectifs, d'écoles, d'hôpitaux, de maisons de retraite, de bureaux, de commerces ou d'hôtellerie.

Certes la construction hors-site a crû partout dans le monde depuis dix ans, mais si cette méthode alternative est vantée pour ses nombreux bénéfices, environnementaux notamment, il y a, selon R. Jin, J. Hong, et J. Zuo, « **un manque d'examen critique de la performance des bâtiments (par exemple, la consommation d'énergie et les émissions de carbone) des installations construites hors site** ».⁽¹¹⁾

Pour mener à bien leurs travaux visant à avoir un regard critique sur la performance environnementale des constructions hors-site, les chercheurs précisent avoir sélectionné 43 articles/études. Et pour eux, elles manquent d'analyser certains aspects. Ils regrettent notamment que « *la plupart des études existantes* » se soient cantonnées à « *la méthode ACV pour analyser systématiquement les émissions de carbone et la consommation d'énergie des bâtiments résidentiels préfabriqués en utilisant le composant de sous-ensemble comme unité fonctionnelle* ». Selon les trois chercheurs, d'autres **impacts environnementaux comme la consommation d'eau ou la contribution du hors-site au réchauffement climatique global** ont en revanche peu été étudiés, ainsi que les étapes d'**exploitation et de fin de vie**.

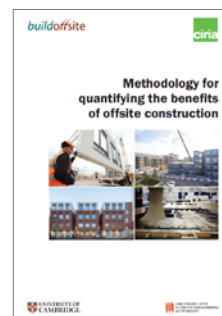
Parmi les données manquantes pour évaluer les bénéfices environnementaux du hors-site, la littérature sur le sujet pointe en effet du doigt le manque d'informations associées à la fin de vie des bâtiments : leur durée de vie est-elle plus longue qu'un bâtiment construit classiquement? Sont-ils entièrement déconstruits ou seulement partiellement?... C'est d'ailleurs peu surprenant étant donnée la relative jeunesse des projets modulaires tels que conçus aujourd'hui.

Si des indicateurs liés à la fin de vie des bâtiments construits hors-site méritent d'être établis et rigoureusement suivis donc, ce ne sont pas les seuls. Car, finalement, **l'impact carbone du hors-site pris sur toute la chaîne de valeur et tout son cycle de vie souffre de l'absence d'une approche structurée et de qualité**, estime la CIRIA (Construction Industry Research and Information Association) dans un guide publié en 2020 ⁽¹²⁾.

Les auteurs expliquent ainsi avoir voulu établir un guide pour faire face « *au manque de recherche sur les résultats réels des projets livrés mesurés de manière systématique et comparable* », lequel « *crée une incertitude à la fois sur les avantages attribuables à la construction hors site et sur l'échelle, ce qui peut réduire la confiance dans la poursuite de projets alternatifs qui utilisent des niveaux plus élevés de construction hors-site* ». Le guide détaille ainsi ce qui doit être mesuré et comment le mesurer pour assurer la cohérence de la comparaison des résultats entre les projets et les organisations.

D'autres études publiées ces dernières années ont utilisé des méthodologies de comparaison rigoureuses. En 2012, J. Quale et quatre autres chercheurs ⁽¹⁶⁾ ont utilisé l'évaluation du cycle de vie pour quantifier les impacts environnementaux de la construction d'une maison résidentielle typique sur la base des données de plusieurs entreprises de construction modulaire et de constructeurs de maisons conventionnelles. En 2019, Malindu Sandanayakea, Wenkai Luob et Guomin Zhangc ⁽¹³⁾ ont choisi de mener l'analyse du cycle de vie (ACV) des processus de construction de deux bâtiments à Chengdu, en Chine.

Mais les méthodologies se sont limitées à l'évaluation d'une seule phase du cycle de vie du bâtiment, sa construction.



Methodology for quantifying the benefits of offsite construction

Et chaque fois, les mesures ont été estimées sur la base de projets immobiliers donnés et similaires : des maisons résidentielles pour la première étude, et deux bâtiments abritant bureaux et commerces pour la seconde.

Yue Teng et Wei Pan ⁽¹⁴⁾ sont allés plus loin. Pour évaluer systématiquement les émissions de carbone intrinsèques (embodied emissions) dans les projets d'immeubles résidentiels de grande hauteur préfabriqués à Hong Kong, les chercheurs se sont en effet appuyés sur 5 niveaux d'analyse : le CO₂ émis par matériau utilisé (par exemple béton, acier), celui émis par chaque composant (par exemple une dalle préfabriquée et un escalier), les émissions d'éléments assemblés (par exemple un panneau de façade préfabriqué complété par une fenêtre), celles d'un appartement (une unité résidentielle) et le CO₂ émis par le bâtiment (l'ensemble de immeuble).

Bien que plus complète, la méthodologie ici utilisée se limite encore aux émissions de carbone produites en aval de la vie opérationnelle de l'immeuble d'habitation. Aucune méthodologie donc n'avait à ce jour proposer de collecter et de mesurer une série d'indicateurs de telle nature qu'ils permettent d'évaluer l'impact environnemental d'un bien sur tout son cycle de vie et ce peu importe l'actif construit.

Dans son guide, le CIRIA propose ainsi une approche complète d'évaluation et ne se limite ni à la mesure de l'impact carbone, ni à la seule phase de construction, ni à une catégorie de bâtiment en particulier. Sont identifiés des paramètres et des méthodes de mesure appropriés « pour chaque ' domaine de performance ' ou ' zone d'impact ' afin de quantifier les impacts et d'évaluer de manière adéquate la construction traditionnelle et hors-site ».

Les mesures d'impact d'un projet hors-site sont ainsi regroupés en trois catégories :

DIRECT PROJECT IMPACTS IMPACT DIRECT DU PROJET

COST	QUALITY	LABOUR REQUIREMENTS	HEALTH & SAFETY
Construction cost	Cost of rework	On-site labour required	Accident frequency rate
Design cost	Air permeability	Off-site labour required	Health & wellbeing
Prelimk: risk: financing cost	Energy efficiency	Trades & interfaces (peak workforce)	
Tendering cost	Emergency defects		
Cost certainty	User satisfaction		
Design charte cost	Planned maintenance requirements		

Tout ce qui a notamment trait au coût, au temps, à la qualité requise ou aux exigences de main d'œuvre et déterminent finalement les décisions sur un projet. Des aspects qui selon le guide peuvent être « mesurés à l'aide de méthodes et de mesures existantes ».

BROADER PROJECT IMPACTS IMPACTS PLUS LARGES DU PROJET

ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS	LIFE-CYCLE CONSIDERATIONS	LOCAL DISRUPTION
Waste generated	Longevity/durability	Noise
Embodied carbon	Future adaptability	Vehicle movements
Construction energy usage	End-of-life recyclability	Air quality
Construction water usage	Re-use potential	
Water pollution		

Tout ce qui a trait aux considérations du projet en matière environnementale, de cycle de vie et/ou de perturbations occasionnées localement. Or, selon le guide, ces aspects « ne sont pas toujours mesurés ou pris en compte lors de la livraison du projet ».

WIDER SOCIETAL IMPACTS IMPACTS SOCIÉTAUX PLUS LARGES

WORKFORCE QUALITY OF LIFE	INDUSTRY BENEFITS	COMMUNITY BENEFITS
Job security	Repeatability & standardisation	Investment in local community
Permanent work location	Scalability	Social licence
Comfortable work environment	Supply chain partnerships	Regional economic uplift
Less manual labour	Risk management	
Stability for family & community		
Opportunity for diversity in workforce		

Il s'agit notamment des aspects liés à la qualité de travail de la main d'œuvre, aux avantages pour la communauté ou aux bénéfices pour l'industrie. Pour les auteurs du guide, « ceux-ci peuvent ne pas être facilement liés à des projets de construction spécifiques, mais sont influencés par des décisions & des actions prises par les principales parties prenantes de l'industrie ».

Puis dans chaque catégorie, le guide invite à suivre une série d'indicateurs très précis et pertinents pour chaque zone d'impact identifiée (cost, quality, environmental considerations, ou encore industry benefits). Pour chacune des métriques à collecter, les informations suivantes sont nécessaires :

- ▶ Que faut-il mesurer ?
- ▶ Comment sera-t-elle calculée ?
- ▶ Qu'est-ce qui est inclus dans l'évaluation ?
- ▶ Quelles sont les informations et les données requises ?

Pour mesurer la qualité des réalisations hors-site, il propose par exemple ce tableau récapitulatif :

Metric	Unit	Definition	Notes
Cost of rework	%	Cost of modification and rectification works undertaken up to practical completion, expressed as percentage of construction cost.	Include rework that resulted from design and construction errors, but exclude rework resulting from client changes.
Emergent defects	Number per £100k construction cost	Number of post-completion defects recorded in the defects liability period per £100k construction cost.	Typically 12 months after handover to the client
Energy efficiency	kWh/m ² /annum or	Annual energy use for heating and electricity per unit or Rating from the EPC	EPC provides a rating for the building, as well as an estimate of annual energy us (kWh/m ² /annum).
Air permeability	m ³ /h/m ² at 50 Pa	Air leakage across building envelope as per test certificate.	Result should be obtained from testing conducted in accordance with MHCLG (2018).
User satisfaction		Not assessed.	A variety of methods exist for conducting post occupancy evaluations (POEs) to assess the operational performance of a building upon completion and whether it meets expectations (both client and users). However, it is not possible to define a consistent method for evaluating or quantifying this due to the high variability in the purpose, extent and comprehensiveness of these assessments.
Maintenance requirements		Not assessed.	Evaluate cost of both planned and emergency maintenance requirements during the operation of a building. However, due to difficulties in accessing quantifiable data, no method of measurement has been defined.

Résumé des indicateurs de qualité (Tercia Jansen van Vuuren & Prof Campbell Middleton, CIRIA, Methodology for quantifying the benefits of offsite construction, 2020)

Pour évaluer les impacts environnementaux, le guide propose une suite d'indicateurs différents et précis à suivre :

Metric	Unit	Definition	Notes
Waste generated	Tonnes/100 m ² or m ³ /£100k construction value	Include all waste generated from the construction activities, including from temporary structures. Exclude demolition and excavation waste.	Include both onsite and offsite waste (where possible to obtain details about offsite). Separate into: <ul style="list-style-type: none"> ■ recycled/reused ■ waste sent for incineration with energy recovery ■ landfill.
Embodied carbon	Tonnes CO ₂ e/100 m ²	Use the methodology for calculating global warming potential as per the standards on 'sustainability of construction work' to conduct life cycle assessment.	Record the impacts from the life cycle stages separately to allow for detailed comparison: <ul style="list-style-type: none"> ■ materials extraction and production (A1, A2, A3) ■ transport of materials to site (A4) ■ construction installation process (A5). Boundaries and methodology described in BS EN 15978:2011.
Construction energy use	kWh/100 m ² or kWh/£100k construction value	Energy use during the construction process, including electricity, fuel and gas.	Include both onsite and offsite energy use (where possible to obtain details about offsite). Unit selected is kWh instead of kgCO ₂ e because carbon emission factor for gas and electricity to convert energy consumption into equivalent carbon emissions changes per year, so not comparable across projects at different times.
Construction water use	m ³ /100 m ² or m ³ /£100k construction value	Mains water use during the construction process.	Include both onsite and offsite water use (where possible to obtain details about offsite).

Résumé des indicateurs environnementaux (Tercia Jansen van Vuuren & Prof Campbell Middleton, CIRIA, Methodology for quantifying the benefits of offsite construction, 2020)

En revanche, le CIRIA souligne qu'il est nécessaire d'identifier une unité fonctionnelle (UF) adéquate permettant de comparer des projets de types et de tailles différents. S'il reconnaît que la surface plancher intérieure brute mesurée en mètres carrés permettra souvent de faire une comparaison valide, il note que d'autres unités fonctionnelles peuvent être utilisées pour des projets de bâti spécifiques comme des écoles ou des hôpitaux. Le nombre d'élèves accueillis ou de lits disponibles sera par exemple plus pertinent pour évaluer ce qui a été livré que la surface au sol.

Et pour que la méthodologie de mesure d'impacts soit la plus exhaustive possible, le guide du CIRIA invite à tenir compte de « *facteurs externes susceptibles d'influencer un projet* », comme l'emplacement, la taille du développement ou le degré d'utilisation du BIM.

Mais, de la théorie à la pratique, le CIRIA s'est aperçu qu'avant d'appliquer à la lettre une telle méthodologie, il faudrait aux acteurs impliqués dans les futurs projets de construction se montrer bien plus rigoureux pour collecter les données.

En voulant évaluer et comparer des actifs du secteur de l'éducation existants construits hors-site avec sa méthodologie, le CIRIA n'a ainsi pas pu qualifier leurs impacts en raison du « *manque de disponibilité et de cohérence des données sur les projets* ». Les chercheurs n'ont ainsi pu utiliser qu'un nombre limité de paramètres sur la base des informations fournies par les organisations à l'origine des cas étudiés : des « *métriques liées à la construction sans tenir compte des problèmes pré et post-construction, des performances du cycle de vie plus large ou des métriques sociales* », précisent-ils.

Aussi les preuves démontrant les avantages de la construction hors-site n'ont-elles pas été établies, regrettent les auteurs du guide, qui recommandent donc. « *l'adoption de cette méthodologie de manière cohérente dans l'ensemble de l'industrie* », laquelle permettrait de collecter les preuves nécessaires aux avantages régulièrement associés au hors-site, et, in fine, de soutenir « *les décisions de projet et la politique relative à la construction hors-site* ».

Cette conclusion, Bernard Michel et Robin Rivaton la partagent dans leur rapport ⁽⁵⁾. S'ils n'insistent pas sur le manque de données disponibles pour « évaluer » le hors-site et ses bénéfices environnementaux en particulier, ils proposent à la fin de leur rapport, « *la constitution d'une base de données par les producteurs de la construction industrialisée* ». « *Cette base rassemblerait un ensemble de données pour évaluer la durabilité et la performance des éléments et sous-éléments de construction industrialisée. Sa tenue pourrait être confiée à un acteur tiers* », suggèrent-ils.

Ainsi, si les avantages environnementaux des projets hors-site sont régulièrement mis en avant, tant que des indicateurs et suivis minutieux manqueront, l'engouement réel, même si limité, pour l'industrialisation de la construction pourrait rapidement se tarir.

Conclusion

La littérature scientifique, la croissance du marché hors-site et l'engagement d'acteurs forts ou nouveaux ne laissent planer aucun doute sur le papier : l'industrialisation de la construction porte en elle un réel potentiel de construction maîtrisée, qualitative et organisée.

Dans un monde où les villes se densifient en même temps que la pression grimpe sur les décideurs publics et les bâtisseurs afin d'oeuvrer pour un urbanisme durable et vivable, les méthodes associées au hors-site promettent en effet moins de nuisances et de risques sur chantier et même une meilleure qualité constructive.

Ces partisans avancent également l'argument majeur des avantages que le hors-site offre pour construire bas-carbone. Un point sur lequel la littérature scientifique sur le sujet s'accorde en partie. Mais en partie seulement. Certes les matériaux utilisés aujourd'hui, la baisse des besoins en transport, ou la réduction des déchets permis par l'usinage de nombreuses pièces du bâti, jouent favorablement sur le bilan carbone des projets hors-site. Mais il manque, aux dires des experts, des données et analyses sur la vie des maisons, hôtels, écoles et autres immeubles construits en grande partie selon les principes et techniques du hors-site. Hors le bon comportement énergétique et écologique d'un bâtiment et sa connaissance fine sont clés pour en garantir sa durabilité et son faible impact carbone.

De plus, outre ces données à collecter de manière organisée et concertée, le hors-site ne pourra tenir ses promesses de réduction d'accidents, de délais, des nuisances ou d'impacts écologiques qu'à la condition d'embarquer tous les acteurs (pouvoir publics, entreprises du BTP, promoteurs, investisseurs) dans la même dynamique de changement des modes constructifs. C'est d'ailleurs la conclusion que fait à [BBC](#), [Jochen Teizer](#), professeur associé au département de génie civil et architectural de l'université d'Aarhus au Danemark : « *L'industrie de la construction a beaucoup de parties prenantes impliquées dans les projets. Je pense que c'est l'un des défis que nous avons. Des architectes, sous-traitants aux entrepreneurs, la communication entre eux engendre de nombreuses inefficacités. Les gens conçoivent un projet d'une manière, mais ensuite il est exécuté différemment. Je pense qu'il faudra une génération pour voir le changement. Cela revient à éduquer notre prochaine génération de main-d'œuvre et d'ingénieurs. Nous avons donc besoin des bons outils* ».

Les retours d'expériences et l'accumulation de données seront donc précieux. Il faudra évidemment aussi aux législateurs fixer des règles claires et aux entreprises du secteur de la construction s'organiser sur les territoires et s'emparer des technologies comme le BIM.

« *Cities like Oslo, Helsinki & Copenhagen are working to clean up one of the world's most high-emission industries.*

[...] Modular construction, as well as using greener materials, is helping to reduce the emissions of construction.

[...] Another innovation looking to increase efficiency and reduce waste is modular construction.

[...] When it comes to modular construction, safety, productivity and environmental impact, all of those things tie together »

« *If I do offsite fabrication and then ship it, I improve all of those things; reduce the waste in the assembly process but also increase the safety for the workers. That's another advantage.* »

« *The construction industry has a lot of stakeholders involved in the projects. I think that's one of the challenges we have,* »

« *From architects, subcontractors to contractors, a lot of inefficiencies happen with communication, where people design a project one way, but then it gets executed in a different way. I think it will take a generation to see change. It ties back to educating our next generation of engineering workforce out there. So we need the right tools.* »

Jochen Teizer,
associate professor in the department of
civil & architectural engineering at Aarhus University.

[BBC Future Cities](#)

BIBLIOGRAPHIE « AVANTAGES & INCONVÉNIENTS »

Préfabriqué Et Modulaire: Croissance Importante Prévus En 2020, Eco-habitation, 2021.

Il est temps de préciser ce qu'est la construction Hors-site !, Christophe Faure, Hors Site, 2018.

L'industrialisation de la Construction, Robin Rivaton et Bernard Michel, Ministère chargé du logement, 2021.

Pourquoi la construction hors-site gagne du terrain, Franck Stassi, Usine Nouvelle, 2021.

Les Avantages De La Construction Hors-Site, Actimodul.

Les Principaux Chiffres du BTP, Action BTP, 2022.

Construction hors site : les Etats-Unis, un modèle à imiter ?, Lise Lévêque et Adrien Pouthier, Le Moniteur, 2020.

BIBLIOGRAPHIE « REVUE DE LITTÉRATURE »

1. Global Alliance for Buildings and Construction (GlobalABC) & UN Environnement Programme, *The 2020 Global Status Report for Buildings and Construction*, décembre 2020.
2. Julie Delaunay et César Dugast, Carbone 4, *Le bâtiment, un secteur en première ligne des objectifs de neutralité carbone de la France en 2050*, janvier 2019.
3. BPIE, *Introducing whole-life carbon metrics: recommendations for highly efficient and climate-neutral buildings*, Policy Briefing, mai 2021.
4. CarbonCure, *What is embodied carbon ?*, 22 septembre 2020.
5. Bernard Michel & Robin Rivaton, *L'industrialisation de la construction*, rapport officiel missionné par le ministre de la cohésion des territoires en 2018 et publié en janvier 2021.
6. WSP & Built Ecology, *Modular construction for multifamily housing report*, février 2018.
7. Michel Veillon, dans une interview publiée sur le site construction21.org le 23 octobre 2020.
8. Mao et al., *Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China*, in *Habitat International* 57:215-222, October 2016.
9. Royal Institute of British Architects, *Design for Manufacture and Assembly, Overlay to the RIBA Plan of Work 2020 2nd edition*.
10. Batimat, Hors Site Campus et tbc Conseil et innovation, *La construction Hors-Site en France, quelle maturité ?*, Baromètre Hors-Site, 1ère édition 2021.
11. Jin, R, Hong, J and Zuo, J. , *Environmental performance of off-site constructed facilities: A critical review*. *Energy and Buildings*. 2020, p. 207.
12. Tercia Jansen van Vuuren & Prof Campbell Middleton, CIRIA, *Methodology for quantifying the benefits of offsite construction*, 2020.
13. Malindu Sandanayakea, Wenkai Luob , Guomin Zhangc, *Direct and indirect impact assessment in off-site construction—A case study in China*, 2019, Sustainable cities and society n°48.
14. Yue Teng, Wei Pan, Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China, *Systematic embodied carbon assessment and reduction of prefabricated high-rise public residential buildings in Hong Kong*, Journal of cleaner production, février 2019.
15. Daniela Krug Managing Director, Building Intellect, *Offsite Construction-Sustainable Characteristics*, 2013.
16. John Quale, Matthew J. Eckelman, Kyle W. Williams, Greg Sloditskie, and Julie B. Zimmerman, *Construction Matters Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States – 2012* - Yale Univer