



HAL
open science

L'industrialisation du bâtiment par les systèmes constructifs hors-site : un procédé pérenne et appropriable en tant que maître d'ouvrage afin de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 ?

Theo Jeantils

► To cite this version:

Theo Jeantils. L'industrialisation du bâtiment par les systèmes constructifs hors-site : un procédé pérenne et appropriable en tant que maître d'ouvrage afin de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 ?. Architecture, aménagement de l'espace. 2022. dumas-03792471

HAL Id: dumas-03792471

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03792471>

Submitted on 30 Sep 2022

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

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

Master 2 MOBAT

**L'industrialisation du bâtiment par les systèmes constructifs hors-site :
un procédé pérenne et appropriable en tant que maître d'ouvrage afin
de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 ?**



Notice bibliographique

Projet de fin d'études Master 2 Maîtrise d'Ouvrage du Bâti

Auteur : Jeantils Theo

Problématique du projet : L'industrialisation du bâtiment par les systèmes constructifs hors-site : un procédé pérenne et appropriable en tant que maître d'ouvrage afin de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 ?

Année universitaire : 2021 – 2022

Date de soutenance : 20 juin 2022

Organisme d'affiliation : Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine

Directeur du projet de fin d'études : Bessiere Guillaume

Cotation : Nombre de pages : 80 / références bibliographiques : 25

Mots-clés analytiques : Construction hors-site, réglementation environnementale, maîtrise d'ouvrage, enjeux, durabilité.

Remerciements

Tout d'abord, je tenais à remercier les différents intervenants qui m'ont aidé durant cette dernière année de formation, qui constitue l'aboutissement de mon cursus.

Je tiens tout d'abord à remercier mon maître d'apprentissage, Monsieur Edouard Laurent, responsable de programme immobilier et assistant à maîtrise d'ouvrage pour toute l'expérience et la connaissance qu'il m'a apporté tout au long de ma formation.

Je tiens à remercier Monsieur Julien Fehr-Koebel et Monsieur Patrick Pelletier, directeur et président du Groupe Pelletier, de m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon alternance au sein du groupe.

Je remercie tout particulièrement mon tuteur pédagogique Monsieur Guillaume Bessiere pour son suivi et l'attention qu'il a su m'apporter pour la réalisation de ce projet de fin d'étude.

Je remercie également toutes les personnes interrogées, Edouard Laurent, Antoine Caputo, Célestin Delahaye, Alexis Pelletier, Dodji Laba pour leur temps consacré à mes recherches.

Je remercie enfin mes relecteurs qui m'ont apporté un soutien et une vision extérieure.

Table des matières

Notice bibliographique.....	2
Remerciements.....	3
Table des matières.....	4
Glossaire des sigles et acronymes.....	6
Introduction.....	7
Etat de l’art.....	11
Partie 1 – Une réglementation et un mode de construction innovant.....	16
1. <u>Une réglementation énergétique qui ouvre la porte aux innovations</u>	17
A. <u>Trois objectifs pour la nouvelle réglementation énergétique 2020</u>	18
B. <u>La méthode de calcul</u>	22
C. <u>Une réglementation qui redessine la vision du bâtiment</u>	23
2. <u>La construction hors-site : un nouveau modèle pluridisciplinaire de la construction</u>	26
A. <u>Les différentes formes de construction hors-site</u>	26
B. <u>Un modèle centré autour du numérique</u>	33
C. <u>... Qui va bouleverser les hommes et la société</u>	34
Partie 2 - La construction hors-site, une réponse durable face aux enjeux de la RE2020 ?.....	38
1. <u>La construction hors-site, un modèle écologique et pérenne ?</u>	40
1.1 <u>Des délais de construction raccourcis</u>	40
1.2 <u>Un impact environnemental plus faible</u>	41
1.3 <u>Une amélioration des conditions de travail</u>	43
1.4 <u>Une qualité de construction supérieure</u>	44
1.5 <u>Des bâtiments réversibles et évolutifs</u>	45
2. <u>Etude de cas d’un projet en construction modulaire et ses bénéfices environnementaux</u>	47

Partie 3 - Le hors-site, une technique de construction appropriable par les maîtres d'ouvrages ?	58
1. <u>Un modèle présentant certains freins qui demande une évolution des compétences</u>	59
1.1 <u>Une approche projet transformée</u>	59
1.2 <u>Le fonctionnement économique</u>	61
1.3 <u>Un modèle nécessitant une certaine polyvalence</u>	62
2. <u>Les leviers à mettre en œuvre pour la démocratisation du hors-site</u>	63
1.1 <u>Levier technique</u>	63
1.2 <u>Levier Financier</u>	66
1.3 <u>Levier Juridique</u>	68
1.4 <u>Levier politique</u>	70
Conclusion	72
Bibliographie	76
Outils mis en œuvre pour la réalisation de l'étude de cas	79
Table des figures	80

Glossaire des sigles et acronymes

BBIO – Besoin bioclimatique

CEPnr – Coefficient d'énergie primaire non renouvelable

ACV – Analyse en cycle de vie

RE2020 – Réglementation énergétique 2020

RT2012 – Réglementation thermique 2012

DFMA – Design for manufacturing and assembly

BIM – Building information management

BTP – Bâtiment travaux public

IC – Indice carbone

DH – Degré heure

PAC – Pompe à chaleur

CSPS – Contrôleur sécurité protection de la santé

CLT – Cross Laminated Timber

REP – Responsabilité Elargie du Producteur

FFB – Fédération Française du Bâtiment

TMA – Travaux modificatif acquéreur

TRI – Taux de rentabilité interne

PLM – Product lifecycle management

ZAN – Zéro Artificialisation Nette

DPGF – Décomposition du Prix Global et Forfaitaire

MOP – Maitrise d'ouvrage public

HLM – Habitation à loyer modéré

Introduction

En 2019, ce n'est pas moins de 43.1 milliards de tonnes de CO₂¹ qui ont été émis par les activités anthropiques sur Terre. Ce chiffre ne cesse d'augmenter d'années en années et contribue en majeure partie au phénomène de changement climatique de notre planète. Sans rentrer de manière exhaustive dans le sujet, les conséquences à venir s'annoncent dramatiques pour l'ensemble des habitants. Lors de la COP21 en décembre 2015, les experts du sujet ont annoncé un ensemble de conséquences à venir si l'humanité ne changeait pas radicalement de cap. Entre autres, la montée des eaux, des phénomènes météorologiques bien plus dévastateurs, des canicules, des incendies, une explosion de la pauvreté, la multiplication de maladies ou bien encore, l'augmentation du nombre de réfugiés climatiques, etc. Sachant les défis qui se profilent à l'horizon et les causes de ceux-ci, l'humanité se doit de réduire drastiquement ses consommations d'énergies fossiles et ses rejets de CO₂ si elle veut pouvoir habiter sur Terre de manière pérenne et confortable dans les décennies et siècles à venir.

Pour y parvenir, tous les secteurs émetteurs de gaz à effet de serre doivent réduire leurs impacts carbonés de manière significative et rapide. Le secteur du bâtiment est un des plus gros émetteurs de CO₂ et consommateurs d'énergie. Il représente à lui seul, d'après le programme des nations unies pour l'environnement (l'UNEP), 38% des émissions totales de CO₂ liées à l'énergie et 35% de la consommation d'énergie finale dans le monde. Le rapport estime que les rejets des matériaux de construction pourraient consommer la moitié du budget carbone restant avant de franchir le seuil des plus 2°C fixé lors de la COP21.

Selon un article de BFM IMMO, « Le secteur a émis en 2019 dix milliards de tonnes de CO₂. »². Cela correspondrait à 23% des émissions totales si corrélé avec le chiffre cité en première ligne. A l'échelle de la France, le chiffre de 23% des émissions totales dans le monde semble cohérent. En effet, d'après l'association pour le développement du bâtiment bas-carbone (BBCA)³, le secteur du bâtiment serait responsable d'un peu moins de 3 tonnes de CO₂/an ce qui représenterait 25% de notre impact total.

¹ HUET Sylvestre, article de « *Le Monde* », 2019

² LACAZE Diane, article de « *BFM IMMO* », 2021

³ www.batimentbascarbonate.org/carbone-batiment/

D'après les chiffres vertigineux de la consommation d'énergie et donc d'émission de carbone par le monde de la construction, on comprend alors toute l'importance que joue le rôle du secteur dans la baisse des émissions de CO2 et dans le ralentissement du réchauffement climatique mondial. Nous pourrions nous poser la question suivante, est-ce que le changement de paradigme de notre manière de construire pourrait ralentir voire arrêter le changement climatique actuel ?

Fixé en août 2019 à la suite de l'accord de Paris de 2015, la neutralité carbone est un objectif que de nombreux pays, dont la France, se sont engagés à tenir d'ici 2050. Le principe est simple, le but est de ne pas émettre plus de carbone que ce que la Terre peut absorber. Cet engagement pris par la France va avoir un impact sur l'ensemble des secteurs, et non pas seulement sur celui du bâtiment.

Toutefois, comme nous l'avons vu, le secteur de la construction est un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre. Afin d'atteindre la neutralité carbone prévu en 2050, le secteur du bâtiment doit se réinventer et sortir de son paradigme actuel. Toujours d'après l'association pour le développement du bâtiment bas-carbone, en 2019, la construction d'un bâtiment neuf est responsable d'environ 60% de l'empreinte carbone du secteur de la construction. On peut citer comme principal fautif le béton, qui représente à lui seul environ la moitié des émissions du secteur, selon les défenseurs de l'environnement, beaucoup moins du côté des industriels. L'enjeu majeur qui se dresse devant les constructeurs et les maîtres d'ouvrage va être dans les années qui viennent de parvenir à construire des bâtiments toujours plus performants et surtout énormément moins émetteurs de carbone.

Afin de se réinventer et d'atteindre les objectifs fixés en 2050, le gouvernement introduit cette année une nouvelle réglementation dans le secteur de la construction, la réglementation environnementale 2020 (RE2020). Le simple changement de nom par rapport à son prédécesseur, la réglementation thermique 2012 (RT2012), évoque un virage et une transition forte dans le secteur. En effet, ce ne sont plus simplement des normes thermiques qui sont demandées, mais des attentes environnementales d'énergies, de confort et d'émissions.

Le but principal de cette nouvelle réglementation est donc de faire baisser l'empreinte carbone du secteur de la construction afin d'atteindre la neutralité carbone et ainsi faire diminuer le changement climatique. Comme nous le verrons dans la première partie, la nouvelle réglementation va imposer des seuils maximaux d'émissions à ne pas dépasser.

Pour ce faire, les maîtres d'ouvrage, qu'ils soient publics ou privés, vont devoir se réinventer en recourant par exemple à des nouvelles techniques de construction, de conception ou bien employer des matériaux frugaux en énergie. Nous sommes en droit de nous demander vers quelles techniques de construction, ou bien quels matériaux utiliser pour pouvoir répondre à un tel enjeu environnemental.

Plusieurs modes constructifs auraient la capacité de répondre à l'enjeu de la RE2020, dont le mode de construction hors-site. Ce dernier paraît être un mode de construction pertinent à étudier pour répondre à la nouvelle réglementation, car son développement et les innovations qu'il apporte, notamment le numérique et le phénomène d'industrialisation qu'il engendre, font émerger de nombreux enjeux pour les maîtres d'ouvrages. Le hors-site remet en question et nous interroge sur la manière de concevoir et de réaliser un ouvrage. On se dirige vers une fabrication-assemblage plutôt qu'une construction.

Le hors-site consiste à préfabriquer la majeure partie d'un ouvrage en dehors du site de construction pour enfin assembler les différentes composantes de l'ouvrage. La préfabrication n'est pas un système jeune, et il est déjà pratiqué sur de très nombreuses opérations de construction. En revanche, les modes hors-site renvoie à une notion d'industrialisation du bâtiment qui est, quant à elle, assez jeune et peu connue du grand public.

Selon les différents éléments que nous venons de voir ci-dessus, il paraît pertinent d'étudier si les modes constructifs hors-site pourraient répondre à la RE2020, et ainsi relever le défi environnemental imposé aux maîtres d'ouvrage.

Ce présent mémoire abordera la question suivante :

L'industrialisation du bâtiment par les systèmes constructifs hors-site : un procédé pérenne et appropriable en tant que maître d'ouvrage afin de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 ?

Définition des termes :

L'industrialisation du bâtiment est au sens large, le changement de paradigme dans l'acte de concevoir et de réaliser un ouvrage. L'industrie transforme des matières premières en produits finis tel que des éléments de construction préfabriqués ou bien hors-site.

Les systèmes constructifs hors-site consistent à préfabriquer la majeure partie d'un ouvrage en dehors du site de construction pour enfin assembler les différentes composantes de l'ouvrage sur chantier. Il existe plusieurs types de modes hors-site comme les panneaux 2D, les modules

3D ou bien les kits d'assemblage. Cela renvoie à un déplacement physique et intellectuel entre le site d'assemblage et le site de construction qui seraient alors distincts.

Un procédé pérenne est dans le cas présent une technique de construction qui va pouvoir perdurer et être en mesure de répondre à un enjeu durable

Les enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 sont la diminution de l'impact carbone des constructions, la transition des constructions vers la neutralité carbone et la prise en compte du confort d'été.

Ce mémoire universitaire tentera d'apporter des éléments de recherches, des interrogations et des pistes pour comprendre de quelle manière les maitres d'ouvrage peuvent se saisir des modes constructifs hors-site pour répondre aux enjeux de la RE2020. De plus, des éléments seront apportés pour montrer les bienfaits environnementaux des techniques de construction hors-site en évoquant également certaines limites qu'ils peuvent rencontrer.

Dans une première partie explicative, nous étudierons les grands enjeux de la RE2020 et donc du monde de la construction afin de démontrer l'intérêt d'utiliser la technique de construction du hors-site pour y répondre. Cette partie se vaudra analytique et s'appuiera sur les connaissances et les recherches bibliographiques.

Après avoir pris connaissance des enjeux, la deuxième partie démontrera notamment par une étude de cas que le hors-site bénéficie d'avantages afin de répondre aux enjeux environnementaux de la RE2020. Cette partie sera construite sur la base de recherches bibliographiques, d'entretiens et d'analyses de documents techniques comme les DPGF.

Enfin, après avoir démontré la force majeure de la construction hors-site et son utilité afin de répondre aux enjeux du monde de la construction, la troisième partie tentera d'analyser et de proposer des outils et des leviers nécessaires à sa démocratisation pour la rendre appropriable par les maitres d'ouvrage. Cette partie s'appuiera sur la littérature mais également sur des entretiens réalisés avec des professionnels de la construction.

Etat de l'art

Etant donné la jeunesse des éléments que nous étudions à travers ce travail universitaire, la littérature qui en ressort n'est que peu abondante. En effet, les systèmes de construction hors-site sont un procédé de construction très faiblement représenté dans la part total des constructions. « La construction industrialisée pèse moins de 1 milliard sur cet ensemble de 289 milliards dont la moitié est dédiée à la construction neuve »⁴. Il en est de même pour la question de la nouvelle réglementation énergétique 2020 qui vient tout juste de rentrer en vigueur le 1^{er} janvier 2022. Que ce soit de la part des professionnels de la construction ou bien des entités gouvernementales, le recul sur le sujet, à l'instar du hors-site, est lui aussi très faible. La cause est, qu'il « s'agit de la première réglementation française, et une des premières mondiales, à introduire la performance environnementale dans la construction neuve via l'analyse en cycle de vie. »⁵. On comprend donc pourquoi la littérature reste assez pauvre sur ces sujets.

Des premiers éléments de réponse à la problématique sont apportés dans le rapport du ministère chargé du logement de janvier 2021 portant sur l'industrialisation de la construction. Ce dernier met avant plusieurs points positifs de la construction industrialisée et notamment le fait de construire plus durablement, « 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. »⁶. La construction hors-site répondrait donc à la double interrogation posée dans la problématique qui est de savoir si elle est pérenne et écologique. Le rapport met en avant la faculté de la construction hors-site à pouvoir évoluer avec les pratiques de la société ou des besoins actuels. Il est possible d'agrandir, de réduire voir même de « déplacer d'un site à un autre après une occupation temporaire du foncier »⁷. Ce mode constructif est aussi une manière de réduire l'empreinte carbone de la construction et permet une meilleure valorisation des déchets. « A matériau équivalent, une étude estime que les émissions de gaz à effet de serre peuvent être réduites de 9% par mètre carré dans le cadre d'une construction industrialisée »⁸. Les auteurs émettent aussi l'hypothèse, sans aucune donnée à l'appui, que la construction

⁴ B., MICHEL et R., RIVATON, *L'industrialisation de la construction*, Rapport du ministère chargé du logement, 2021.

⁵ N., CABASSUD, *Guide re2020*, Ministère de la transition écologique

⁶ B., MICHEL et R., RIVATON, *L'industrialisation de la construction*, Rapport du ministère chargé du logement, 2021.

⁷ Idem

⁸ Idem

modulaire permet une bien meilleure gestion des bâtiments avec la capacité par exemple de changer un module vétuste et donc de prolonger la durée de vie d'un bâtiment et d'en réduire ses coûts. Enfin, le rapport apporte aussi l'idée que le hors-site permet de construire avec une plus grande qualité « Alors que les normes (RE2020) exigent une amélioration considérable de la qualité intrinsèque des bâtiments, la construction industrialisée contient des réponses, [...] A condition que les contrôles soient permanents, rattraper une erreur est beaucoup plus simple dans cet environnement que sur un chantier »⁹.

Du côté des professionnels, on trouve de nombreux articles mettant en avant les bienfaits environnementaux du hors-site. D'après un article professionnel du site construction21 rédigé par Philippe Maras, CEO de Avelis (fabriquant de modules), la construction hors-site à tout pour répondre aux exigences de la RE2020. En effet, le hors-site permet d'optimiser au mieux l'ensemble du processus de fabrication et donc de contrôler les erreurs qui peuvent intervenir dans la phase de conception et de réalisation. « Le hors-site permet également de garder un impact environnemental minime. En effet, l'approche industrialisée améliore les coûts liés au cycle de vie des constructions. [...] Le bilan carbone a également diminué : pas de matières premières nécessitant de nombreux transports sur site, peu d'empreintes mécaniques sur les sols, une moindre nuisance sonore et atmosphérique sur le lieu d'implantation. »¹⁰. Le hors-site, a aussi pour avantage de répondre à la deuxième problématique de la RE2020 qui est la baisse des consommations en énergie des bâtiments. Selon l'auteur, la performance énergétique est de bien meilleure qualité en hors-site car ce procédé permet une plus grande flexibilité dans « le choix des matériaux, leur épaisseur et leur qualité intrinsèque »¹¹.

L'avantage amené par le hors-site est soutenu par Jean-Christophe Pierron, co-fondateur de Vestack, qui conçoit et construit des bâtiments en modules structure ossature bois. D'après lui, « Par sa capacité à réutiliser les matériaux comme les chutes plus facilement que sur un chantier traditionnel, mais aussi à minimiser les rejets, le hors-site peut remplir des objectifs ambitieux de recyclabilité, d'économie circulaire et de limitation des déchets. Cela va dans le sens de la RE2020 quant à la limitation de l'empreinte carbone »¹². Du point de vue des fabricants de modules, le hors-site est un système de construction qui a tout pour répondre aux enjeux de la

⁹ B., MICHEL et R., RIVATON, *L'industrialisation de la construction*, Rapport du ministère chargé du logement, 2021.

¹⁰ P., MARRAS, *RE2020, nouveaux usages, économie : le hors-site et le modulaire, tremplins pour la construction de demain ?* Construction21, 2020.

¹¹ Idem

¹² F., Josse, *RE2020 : le hors-site peut-il répondre aux enjeux ?* Hors site Campus, 2021.

nouvelle RE2020. De nombreux articles sont similaires et il ne semble pas pertinent de tous les évoquer. En effet, le point de vue des fabricants de modules reste assez subjectif.

Un second article du site Construction21 rédigé par l'architecte Guillaume Hannoun, met en avant la qualité de la construction modulaire à s'adapter aux changements, à l'évolution de la société et à être bien plus résiliente qu'une construction traditionnelle. Avec les bâtiments construits en hors-site, « Qu'il s'agisse de les transformer ou de les déplacer, de changer leur destination ou simplement de la faire évoluer, ils s'inscrivent dans cette logique d'évolution et de transformation permanente »¹³. Afin d'affirmer ses dires, il prend l'exemple du bâtiment du centre d'hébergement d'urgence de Bercy dans le 12^e arrondissement de Paris, auquel il a participé. Cette construction modulaire, permet de loger 300 personnes en situation précaire sur un foncier disponible pendant 7 ans. A la fin de la période, le CHU sera déplacé et recomposé en trois bâtiments. Un Hôtel, une résidence étudiante et un nouveau CHU de plus petite taille. A l'horizon des J-O de Paris 2024, le nouveau CHU sera transformé en résidences et espaces événementiels afin d'accueillir l'évènement. Pour finir, une fois les jeux terminés, les modules seront transformés en logements. De manière synthétique, l'auteur par le biais du hors-site, propose de concevoir des bâtiments « à partir de briques élémentaires évolutives et durables, industrialisées autant que possible et assemblées systématiquement dans une architecture contextuelle, capable de s'adapter à l'incertitude généralisée ; un bâtiment de bureaux à transformer en logements, des logements évolutifs permettant de transformer des T1 en T4, un lycée pouvant être implanté dans un nouveau quartier une fois que les enfants auront grandi, ... »¹⁴. A travers cet exemple de cas concret, la littérature expose ici une double réponse à la problématique. En effet, le hors-site permettrait une évolutivité sans pareil et donc une importante pérennité et par la même occasion une diminution considérable de l'impact carbone du fait de la réutilisation des modules.

Après avoir observé la littérature des dynamiques et des relations du hors-site avec la RE2020, on observe d'après cette brève analyse un consensus sur la question des avantages et des bienfaits. Cette affirmation se doit toutefois d'être modérée aux vues du contenu analysé. A présent nous allons nous intéresser à la question de l'appropriation par les maîtres d'ouvrages ainsi qu'à la question de la durabilité du hors-site dans la littérature.

¹³ G., HANNOUN, *Agile, Économique, Réversible : la construction Hors site, une technique en lien avec son époque*, Construction21, 2020

¹⁴ G., HANNOUN, *Agile, Économique, Réversible : la construction Hors site, une technique en lien avec son époque*, Construction21, 2020

Du côté du ministère de la transition écologique et de son guide « RE2020 Eco-construire pour le confort de tous » mise à jour le 18 février 2021, les auteurs mettent en avant la nécessité de recourir à une mixité des matériaux et au bois et matériaux biosourcés. Dans un premier temps, le guide du ministère prévoit que la « trajectoire fixée par la RE2020 dessine une évolution importante dans le secteur de la construction, avec la montée en puissance de conceptions et de techniques relativement minoritaires, voire tout à fait nouvelles ».¹⁵ D'après cette citation, nous sommes en droit d'émettre l'hypothèse que la construction hors-site sera un élément de réponse à la nouvelle réglementation énergétique 2020 de son point de vue minoritaire voire tout à fait nouveau. Dans un second paragraphe, un texte fait aussi émerger l'idée de devoir recourir à de nouveaux procédés de construction innovants incluant le bois et les matériaux biosourcés avec comme paradoxe de pointer immédiatement la pérennité à son recourt. « La proportion d'usage de la structure bois est encore plus faible en logement collectif, a fortiori pour les immeubles de plus grande hauteur où les techniques actuelles présentent encore des surcoûts significatifs et pour lesquels il existe des exigences réglementaires complémentaires (incendie ou acoustique par exemple). À ce titre, il sera donc nécessaire d'assurer le développement d'une production industrielle nationale de bois de construction pour éviter d'accroître les importations¹⁶ ». Ce texte fait écho à de nombreux articles qui visent à montrer la faiblesse de la filière bois française et au recourt à l'importation de masse depuis les pays nord européen. Pour être plus précis, cette corrélation de littérature montre que si la construction bois venait à s'accroître (objectif de la RE2020), part les modules et panneaux hors-site, la durabilité dans le temps de ces derniers pourrait être problématique si l'on vise à ne pas importer de bois.

Le mercredi 29 septembre 2021, Batimat, le Campus Hors-site et TBC Innovations, ont publiés le premier baromètre de la construction hors-site, afin de connaître les évolutions et les comportements des maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvre sur la question de l'intégration du hors-site. « L'enquête révèle que près de la moitié (47 %) des acteurs interrogés ont déjà mis en œuvre le hors-site dans leurs projets. La préfabrication des éléments de structure primaire 2D comme les façades, les planchers ou toitures, est la plus courante (71 %), notamment pour des petits projets de moins de 1 000 m² (35 %) »¹⁷. En analysant les chiffres, on peut se rendre compte que moins de la moitié des acteurs interrogés ont mis en œuvre un procédé hors-site, qui plus est un élément 2D pour deux tiers et pour 35% sur des projets de petites envergures.

¹⁵ Guide du Ministère de la transition écologique, *RE2020 Eco-construire pour le confort de tous*, 2021

¹⁶ Guide du Ministère de la transition écologique, *RE2020 Eco-construire pour le confort de tous*, 2021

¹⁷ C., LEMONNIER, *Construction hors-site : un procédé encore mal maîtrisé*, Vie des sociétés, batiweb, 2021

Cela montre à quel point les procédés innovants type modulaires sont très faiblement utilisés comme système de construction. L'étude va encore plus loin et met en avant les freins que rencontre les acteurs. Les principaux freins mis en avant par les sondés sont « des problèmes de collaboration et de coordination entre les différents acteurs, relevés par 58 % des professionnels ayant travaillé sur un projet hors-site. Même dans les projets les plus réussis, 42 % des acteurs reconnaissent avoir rencontré des difficultés »¹⁸. Le manque de connaissance des entreprises, la réglementation, les compétences et la disponibilité des entreprises sont aussi des facteurs évoqués. Pour les acteurs sondés n'ayant jamais mis en œuvre de procédé hors-site, la majeure partie affirme n'être pas assez renseigné sur le sujet et pointe un manque d'acteurs sur le marché. Enfin, « concernant le décalage entre les attentes envers la construction hors-site et les avantages réellement obtenus, la réduction des nuisances et la réduction des délais sont bien atteintes, selon une majorité d'acteurs. En revanche, la réduction des coûts n'est pas encore constatée dans les faits »¹⁹.

À la suite de l'observation des écrits concernant l'appropriation et la durabilité du hors-site, on se rend compte que la littérature est encore plus limitée que celle de la première partie.

¹⁸ C., LEMONNIER, *Construction hors-site : un procédé encore mal maîtrisé*, Vie des sociétés, batiweb, 2021

¹⁹ Idem

**Partie 1 – Une réglementation et un mode de construction
innovant**

A travers cette première partie, nous allons mettre en avant dans une première sous-partie les grands enjeux de la RE2020 et ses impacts sur le monde de la construction. Dans une seconde sous-partie, nous analyserons la méthode de construction hors-site et son fonctionnement. Cette première partie explicative, servira à comprendre les enjeux de demain, le hors-site, et permettra d'introduire les parties suivantes.

1. Une réglementation énergétique qui ouvre la porte aux innovations

La réglementation énergétique 2020 est une nouvelle réglementation mise en place par le gouvernement, et plus précisément par le ministère de la transition écologique. Elle est entrée en vigueur, et donc applicable à tous les projets de construction neufs dans le secteur du logement depuis le 1 janvier 2022. Cette réglementation qui devient aujourd'hui énergétique et non plus thermique, comme ses prédécesseurs, marque un changement majeur dans la manière de concevoir et de construire les bâtiments sur le territoire français. En effet depuis 1974, de nombreuses réglementations thermiques se sont succédées avec pour objectif prioritaire de réduire les consommations énergétiques. Avec la mise en place de la RE2020, la réduction des consommations énergétiques n'est plus la seule priorité pour le gouvernement.

La France, en signant l'accord de Paris sur le climat en 2015, s'est engagée à réduire drastiquement ses émissions de gaz à effet de serre afin de lutter contre le réchauffement climatique. La première décision, afin d'y répondre, a été de créer la loi « énergie-climat » en 2019, qui a pour objectif de viser la neutralité carbone de la France en 2050. Etant donné que le secteur de la construction représente, d'après le ministère de la transition écologique, environ 25% des émissions carbone nationales, on comprend aisément la nouvelle direction prise par le gouvernement à travers la réglementation énergétique 2020 : réduire la consommation de carbone.

En mettant en place une telle réglementation à l'échelle nationale, la France se positionne comme un pays précurseur dans le domaine de la construction bas carbone. Aucun autre pays ne propose à ce jour une telle réglementation en matière de construction. Aux vues des exigences affichées par la nouvelle réglementation et les ambitions de transformer le monde du bâtiment, le gouvernement a prévu une mise en place progressive en trois paliers : 2025, 2028 et 2031 seront les différentes années qui viendront renforcer progressivement la réglementation afin de tenir les objectifs fixés dans la loi « énergie-climat » et la neutralité carbone en 2050.

A. Trois objectifs pour la nouvelle réglementation énergétique 2020

Pour structurer la nouvelle réglementation, trois objectifs ont été mis en œuvre afin de répondre au défi qu'elle impose.

Le premier objectif vise, tout comme les réglementations antérieures avant elle, à continuer de construire des bâtiments qui consomment moins d'énergies carbonées. C'est pour cela, que la RE2020 vient renforcer d'une part, les acquis de la réglementation thermique 2012 et d'autre part, apporter de nouvelles exigences afin de répondre aux objectifs fixés.

Dans le but de renforcer la sobriété des bâtiments, le besoin bioclimatique sera abaissé à 30%. Le besoin bioclimatique ou Bbio est un coefficient qui mesure les besoins de chauffage, d'électricité et de climatisation d'un bâtiment. Il renseigne sur la quantité d'énergie demandée lors de son utilisation. La réglementation thermique 2012 fixait jusqu'ici une réduction de 20%. Avec le nouveau seuil de la RE2020, les bâtiments deviendront plus performants et contribueront à la sobriété énergétique.

Afin de réduire les énergies carbonées, la RE2020 poussera, via un nouveau seuil maximal de consommation d'énergie primaire non renouvelable (CEPnr) à l'utilisation des réseaux de chaleur. En mettant en place ce nouveau seuil, le gouvernement demande aux constructeurs à recourir au réseau de chaleur mais aussi aux producteurs de ses réseaux à se développer en proposant de la chaleur moins carbonée qu'elle ne l'est actuellement. En effet, les réseaux de chaleur constituent un mode de chauffage essentiel afin de répondre aux objectifs nationaux de transition énergétique.

La RE2020 apporte une nouvelle exigence sur la quantité d'émissions de gaz à effet de serre que les énergies du bâtiment vont utiliser. Un seuil de gaz à effet de serre en fonction de l'énergie utilisé sera imposé lors de la construction, et les énergies les plus carbonées seront donc pénalisées. A terme, un bâtiment ne pourra plus consommer exclusivement du gaz et devra faire appel à des énergies renouvelables, ou du moins, qui rejettent une quantité de CO2 moins important dans l'atmosphère. Afin de faciliter la mise en place de ce nouveau système, la transition sera progressive jusqu'en 2025, ou à partir de cette date, le tout gaz deviendra prohibé.

Grâce à cet objectif, la France se dote d'un outil lui permettant d'utiliser plus largement des énergies renouvelables (solaire, géothermie, réseau de chaleur) dans la construction de bâtiments neufs et ainsi se rapprocher des objectifs de neutralité.

Le deuxième objectif de la nouvelle réglementation 2020 est, quant à lui, totalement novateur dans le monde des réglementations. Son but, est de réduire drastiquement les rejets de carbone lors de la phase de construction en misant sur la pluralité des modes constructifs et la mixité des matériaux, afin de réaliser des constructions dites bas-carbone. Pour ce faire, au même titre que le seuil fixé pour comptabiliser les rejets carbonés des énergies, un seuil maximal comptabilisera la quantité de carbone émis par tous les matériaux et équipements de construction. De plus, les rejets de gaz à effet de serre liés au chantier seront également pris en compte.

Toujours dans une optique de transition progressive par palier, cet objectif permettra en 2031 de diminuer de plus de 30% les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de la construction.

Pour y arriver, la RE2020 s'est dotée d'un puissant outil pour stocker et diminuer les rejets de carbonés, l'analyse de cycle de vie dynamique (ACV). L'analyse de cycle de vie permet de comptabiliser toutes les émissions de CO₂ des matériaux et équipements lors de la construction d'un ouvrage pour établir l'impact environnemental du projet. Jusque-là, rien de nouveau. En revanche l'ACV de la RE2020 est dite dynamique. L'ACV va prendre en compte le stockage temporaire du carbone des matériaux de construction durant leur vie biologique et leur capacité à n'en produire qu'une faible quantité en fin de vie ou non. Cette technique permet de temporaliser les émissions et les effets du stockage en attribuant un poids plus conséquent aux matériaux qui émettent aujourd'hui et non dans 50 ans.

En mettant en place cet outil, le gouvernement veut forcer constructeurs et industriels à produire des matériaux et des bâtiments bas-carbone pour atteindre les objectifs environnementaux. Etant donné la particularité de l'ACV dynamique, les matériaux biosourcés, géosourcés et l'utilisation du bois vont prendre une part bien plus importante dans la construction des bâtiments. En conservant une stratégie de résultat et non de moyens, la RE2020 laisse la possibilité aux constructeurs de choisir librement leurs matériaux de construction. En revanche, les matériaux plus traditionnels comme le béton, l'acier et les différentes formes de plastiques vont devoir évoluer pour continuer d'être mis en œuvre par les constructeurs.

Dans la même optique de recourir à de nouveaux matériaux de construction, la RE2020 encourage plus simplement les maîtres d'ouvrages à une meilleure utilisation et mixité des matériaux. En faisant appel à l'ACV dynamique, les constructions mêlant le bois, le béton,

l'acier et les multitudes de produits décarbonés seront largement récompensées par l'ACV dans les indicateurs d'impacts environnementaux.

En complément de l'indicateur carbone de construction, l'objectif de décarbonation prévoit un indicateur prenant en compte les émissions de la phase chantier lors de la construction. L'indicateur carbone chantier prendra en compte toutes les consommations d'énergie des engins de chantier ainsi que des bases de vie. Il permettra, outre son addition à l'indicateur carbone de construction, d'encourager des pratiques plus vertueuses et respectueuses de l'environnement.

Le troisième objectif de la nouvelle réglementation énergétique 2020 est de rendre les bâtiments plus confortables durant les épisodes de forte chaleur estivale. Depuis la création des réglementations thermiques, la vision a toujours été d'améliorer le confort d'hiver en renforçant l'isolation des bâtiments. Depuis le réchauffement climatique et l'intensification des épisodes caniculaires, de nombreux bâtiments construits sous la RT2012 s'avèrent être inconfortables lors de fortes vagues de chaleur estivale.

Comme pour les objectifs précédents, l'indicateur de confort d'été, appelé degré heure (DH), sera un seuil à ne pas dépasser lors de la conception du bâtiment. Le seuil maximal a été fixé à 1250 DH, ce qui correspond à une période de 25 jours durant laquelle le logement connaît une température continue de 30°C le jour et 28°C la nuit. Au-delà de ce seuil fixé par la RE2020, le logement sera considéré comme inconfortable en cas de forte chaleur et sera impropre à l'utilisation.

De plus, le moteur de calcul de l'indicateur de confort d'été prendra en compte les solutions de climatisation dites passives. La forme du bâtiment, l'orientation, les occultations contre le soleil, l'installation de brasseurs d'air ou bien l'importance accordée au vitrage, seront des points importants qui rentreront dans la comptabilité de l'indicateur de confort d'été.

Pour finir, le dernier objectif aura pour vocation d'améliorer la qualité de l'air intérieur ainsi que la ventilation des logements. Un contrôle qualité pourra être demandé à la réception des travaux afin d'attester des améliorations mise en place.

Concrètement, les trois objectifs de la RE2020 se matérialisent via des exigences réglementaires qui sont évaluées par six indicateurs. Ces six indicateurs sont eux même réunis dans trois catégories appelées Energie, Carbone et Confort d'été. Ces trois grandes catégories, correspondent aux trois objectifs cités ci-dessus.

Pour plus de clarté, voici le tableau établi par le ministère de la transition écologique qui reprend les différents indicateurs présents dans la RE2020.

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

Figure 1 : Tableau des six indicateurs pris en compte dans la RE2020. Extrait du guide RE2020 du ministère de la transition écologique

L'objectif Energie sera comptabilisé via les indicateurs de besoins climatiques (Bbio), par la consommation d'énergie primaire totale (Cep) et la consommation d'énergie primaire non renouvelable (Cep, nr). L'objectif Carbone, sera comptabilisé via les indicateurs indice carbone énergie (Ic énergie) ainsi que l'indice carbone construction (Ic construction). Enfin, le Confort d'été sera quant à lui comptabilisé via le degré-heure (DH).

B. La méthode de calcul

Après avoir présenté les trois objectifs de la RE2020 et les indicateurs qui la composent, il paraît pertinent de s'intéresser plus finement à la mise en œuvre des deux indicateurs carbone (Ic énergie et Ic construction) en présentant leurs compositions et leurs méthodes de calcul. Une attention particulière est portée sur ces indicateurs, car la construction hors-site aura pour principal objectif de réduire la consommation de carbone.

Comme il a été mentionné ci-dessus, l'impact environnemental des nouvelles constructions sera comptabilisé via une analyse en cycle de vie. Requérant de nombreux matériaux, équipements et énergies lors de la construction, les impacts pris en compte lors de l'élaboration de l'ACV ont été divisés en cinq catégories qui constituent chacune une « contribution ». Ces différentes contributions additionnées entre elles, permettront d'établir les indicateurs de la figure 1 vu ci-dessus.

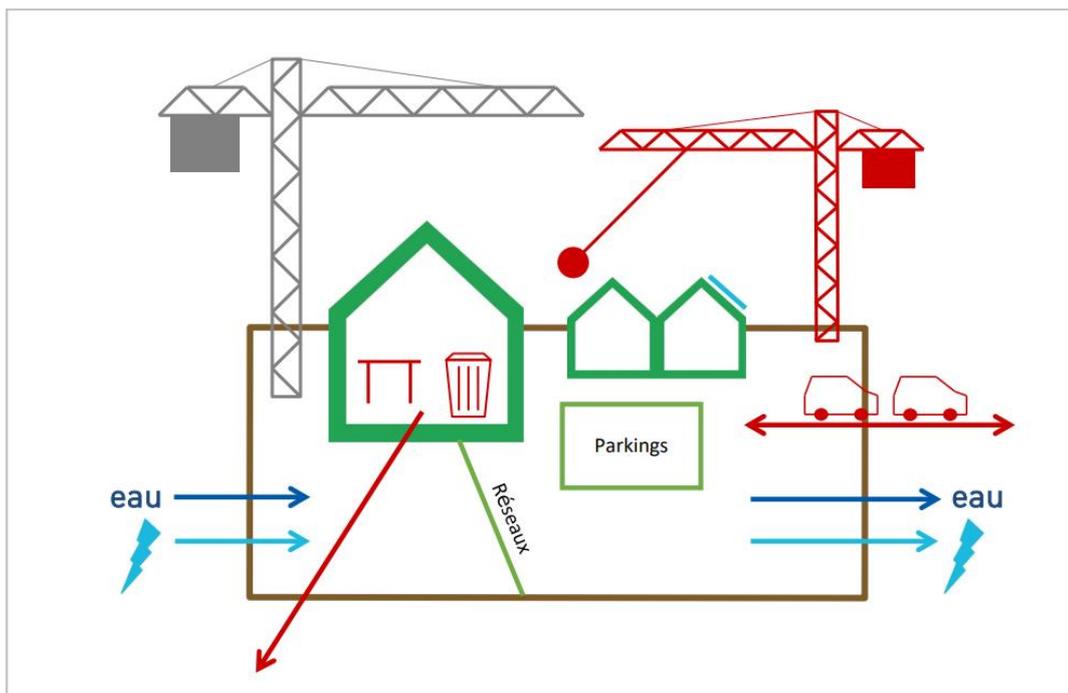


Figure 2 : Schéma des différentes composantes prise en compte par la RE2020 pour le calcul de l'impact environnemental. Extrait du guide RE2020 du ministère de la transition écologique

Le schéma ci-dessus représente les cinq contributions prises en compte dans le calcul de la performance environnementale.

La contribution « Composants » représentée par les bâtiments verts est caractérisée par tous les produits de construction et d'équipements du bâtiment. Elle est composée de tous les matériaux

qu'il a fallu produire, transporter, mettre en œuvre ou démolir. Les éléments tels que les climatisations, chaudières et ensembles de ventilation sont également pris en compte. La contribution « Chantier » représentée par la grue en gris prendra en compte toutes les consommations d'énergie du chantier (électricité, eau), l'évacuation et le traitement des déchets. La contribution « Energie » représentée par les flèches bleu clair est caractérisé par toutes les consommations énergétiques importées et consommées par le bâtiment pendant son fonctionnement. La contribution « Eau » représentée par les flèches bleues foncé comptabilise l'ensemble des consommations et rejets d'eau pendant la phase d'exploitation du bâtiment ainsi que la gestion des eaux pluviales et leur assainissement. La contribution « Parcelle » représentée par le terrain en marron prendra en compte l'ensemble des consommations et des composants nécessaires au bon fonctionnement des espaces extérieurs tels que les espaces végétalisés ou les voiries.

L'indicateur Ic Energie sera constitué par la composante « Energie » et l'indicateur Ic Construction sera constitué par les composantes « Composants » et « Chantier ». Les composantes « Eau » et « Parcelle » n'auront quant à elles pas d'impact sur les indicateurs réglementaires de la figure 1 mais seront obligatoirement renseignées.

Les indicateurs Ic Construction et Ic Energie auront donc pour but de calculer la quantité des émissions de gaz à effet de serre que le projet de construction rejettera dans l'atmosphère pendant une période de 50 ans. Les projets de construction auront des seuils d'émissions de gaz à effet de serre, mesurés en kg équivalent CO₂/m², qu'il sera nécessaire de ne pas dépasser, afin d'être conforme à la réglementation énergétique.

Aux vues des indicateurs carbonés et des seuils réglementaires de la RE2020, les constructeurs traditionnels qui rejettent énormément de carbone dans l'atmosphère vont devoir modifier leurs techniques et matériaux de constructions pour répondre aux défis environnementaux.

C. Une réglementation qui redessine la vision du bâtiment

Après avoir observé les grands enjeux de la RE2020 ainsi que son système de calcul, nous pouvons émettre l'hypothèse que cette dernière va drastiquement changer notre manière de construire du fait de son ambition. En effet, pour répondre aux indicateurs et atteindre les trois objectifs de la réglementation, les constructeurs et maîtres d'ouvrage vont être amenés à innover et transformer leurs visions tant dans la manière de concevoir que de construire.

Le premier enjeu a pour objectif de réduire les consommations d'énergies carbonées telles que le gaz et par la même occasion favoriser les énergies renouvelables. Si le gaz va devenir de plus en plus prohibé dans les constructions neuves, on comprend donc que l'énergie électrique et plus précisément les PAC (Pompes à Chaleur) vont devenir l'équipement de chauffage de prédilection. De plus, aux vues des événements actuels en Europe de l'Est, le gaz devient une énergie de plus en plus onéreuse. Bien entendu, il sera possible d'utiliser des formes d'énergie renouvelables telles que les panneaux photovoltaïques ou solaires ou bien de recourir à d'autre forme de chauffage comme les chaudières collectives à granulés bois ou les pompes à chaleur géothermique. En revanche, toutes les formes d'énergies renouvelables ne sont pas possibles à mettre en œuvre dans le bâtiment collectif, contrairement à la maison individuelle, et ces dernières sont bien plus onéreuses.

Afin d'entrevoir les premières répercussions de l'arrêt du gaz dans les bâtiments collectifs, il semble pertinent d'interroger un expert énergétique du bâtiment. D'après un entretien réalisé auprès d'un ingénieur fluide du bureau d'étude *Be Fluide* basé sur la commune de Lyon, l'installation de PAC dans les logements collectifs va soulever de nombreuses problématiques.

Dans un premier temps, la PAC pourra être couplée avec un appoint de chauffage gaz pour avoir une mixité d'énergies et de ne pas dépendre entièrement de la PAC. De plus, l'appoint gaz permettra de sécuriser les besoins énergétiques plus importants en hiver. Toutefois, avec l'évolution progressive de la RE2020, le gaz deviendra totalement prohibé et la PAC sera (outre les autres systèmes énergétiques) le principal équipement énergétique.

Sachant cela, se pose maintenant la question de son intégration au bâti et de son utilisation. Si une PAC collective peut être installée dans une chaufferie prévue pour cet effet, ces dernières sont aujourd'hui incapables, par leurs manques de puissance, d'alimenter une cinquantaine de lots. Les PAC individuelles quant à elles permettent de couvrir les besoins de chaque logement. En revanche, les contraintes architecturales et techniques qu'elles soulèvent sont nombreuses. Va-t-il falloir les placer en façades et ainsi enlaidir les bâtiments de demain, ou bien sur les terrasses et balcons des logements ce qui pénalisera le bien-être des habitants ? Le toit peut être une solution alternative à condition qu'il soit plat et qu'une charpente ne soit pas exigée dans les règles d'urbanisme. D'un point de vue technique pour les bailleurs sociaux, l'installation d'une PAC collective paraît budgétairement plus pertinente. Comme l'ingénieur fluide l'a expliqué, elle ne pourra peut-être pas subvenir aux besoins de nombreux foyers d'un bâtiment collectifs important, et le recours à l'individuelle engendrera elle aussi des questions sur l'exploitation et la maintenance.

Toujours afin de répondre au premier enjeu, la RE2020 va imposer une réduction des besoins bioclimatiques (Bbio) des constructions neuves. Ce coefficient représente l'efficacité énergétique du bâtiment. D'après le site e-rt2012, pour diminuer le Bbio, « L'optimisation de la compacité du projet, afin de réduire la surface déperditive, est également importante. »²⁰. On comprend que les volumes compacts et géométriquement simples permettent une réduction du coefficient.

Cette réduction va engendrer une plus grande compacité des bâtiments et va se traduire par une architecture minimaliste. Sans rentrer dans les extrêmes, il ne sera pas question de concevoir des cubes, mais les ambitions des architectes de certains projets deviendront de plus en plus compliquées à réaliser. Cette contrainte supplémentaire vient renforcer l'idée que notre vision de la construction va changer dans les années à venir.

Le deuxième enjeu de la RE2020, a pour objectif de réduire les rejets de carbone dans l'atmosphère. Cet objectif sera atteint grâce aux seuils fixés par l'indicateur Ic Construction et Energie. Pour répondre aux seuils réglementaires de l'indicateur Ic Construction, les constructeurs et maîtres d'ouvrages vont devoir modifier leurs manières de concevoir et de construire les bâtiments de demain. Ainsi, les constructions qui étaient aujourd'hui réglementaire sous la RT2012 ne le sauront plus demain sous la RE2020.

Pour atteindre les nouvelles exigences du gouvernement, un changement de paradigme s'avère obligatoire. Le tous béton couplé aux matériaux pétrolifères du second œuvre est aujourd'hui un lointain passé. La mixité des matériaux, le recours au bois et aux matériaux géosourcés, le béton bas carbone et la technique du poteau poutre par exemple sont autant de moyens à mettre en œuvre afin d'y parvenir. Tous cela à un coût, il en va de soi : c'est pour cela que la RE2020 pousse à l'innovation de la part des industriels, des ingénieurs, des bâtisseurs et des maîtres d'ouvrages pour relever le défi.

Sachant le grand défi et le changement de paradigme qui s'impose à nous, une technique de construction singulière paraîtrait pertinente à mettre en œuvre. Après avoir mis en avant les enjeux de la RE2020 et du monde de la construction, nous allons dans cette deuxième sous-partie, analyser les grands principes de la construction hors-site et les caractéristiques qui la composent.

²⁰ Site internet eRT2012 – Le Besoin Bioclimatique (Bbio)

2. La construction hors-site : un nouveau modèle pluridisciplinaire de la construction

Cette deuxième partie a pour but de mettre en avant la diversité des différentes formes de construction hors-site. Elle se veut dans un premier temps technique, afin de comprendre les bases du fonctionnement des modes constructifs hors-site. Dans un second temps, elle mettra en avant les grands changements conceptuels, à travers l'enjeu numérique, et organisationnel, à travers la mutation des métiers, que le hors-site engendre.

La construction hors-site a largement été utilisée dans le passé afin de produire de nombreuses quantités de logements avec du béton préfabriqué en usine. En revanche, grâce au développement des outils numériques, la conception, la fabrication, l'assemblage et la maintenance sont tout à fait novateurs et peuvent être comparés à l'industrialisation automobile.

A. Les différentes formes de construction hors-site

La construction hors-site englobe un champ de produits très large. On trouve non seulement des produits de gros œuvre sous différentes formes, mais aussi des composants de corps d'états secondaires. Afin de différencier la diversité des produits de construction hors-site, il est préférable de les segmenter en trois parties de nature commune.

1. *Éléments 2D et panneaux structuraux*

La construction 2D ou construction en panneaux, consiste à assembler des éléments préfabriqués en deux dimensions sur le site, afin de constituer le squelette ou bien l'armature d'un bâtiment. Les panneaux de construction arrivent sur le chantier numérotés et tel un kit d'assemblage, ils vont constituer les éléments du gros œuvre traditionnel comme les voiles et murs maçonnés.

On trouve différents niveaux de préfabrication au sein des éléments 2D. Certains vont être bruts comme les prémurs en béton ou les panneaux bois, et d'autres vont recevoir directement en usine de l'isolant, des réseaux fluides ou bien des menuiseries.

A l'intérieur de cette famille d'éléments hors-site, on trouve différents types de panneaux qui se déclinent par leurs compositions : bois, béton, métal, et les façades entièrement préfabriquées.

Les panneaux en ossature bois sont des éléments de construction très connus du grand public. Ils peuvent être constitués directement de poutres, de linteaux et de l'habillage, ou simplement

être livrés en kit à assembler. Ils arrivent également sur le site avec les réservations nécessaires à la pose des menuiseries.

Ils constituent une des formes de construction hors-site les plus simple à mettre en œuvre et recèlent de nombreux avantages, comme un impact carbone réduit, des délais de construction raccourcis et avant tout, un faible cout financier. En revanche, ce type de panneaux 2D ne peut excéder plus de trois étages du fait de sa faiblesse structurelle, et reste largement utilisé en maison individuelle. Toutefois, étant donné sa composition et son ossature légère, les acquéreurs de maisons en rejettent fortement l'utilisation.



Figure 3 : Photo de panneaux en ossature bois. Source : Lesage Construction Bois, site internet

Toujours en bois, les panneaux de CLT (Cross Laminated Timber) ou bois lamellé-croisé sont constitués de plusieurs couches de bois massif qui sont croisées et collées entre elles afin d'augmenter la résistance structurelle de la poutre ou du panneau. Cette technique de construction permet, quant à elle, d'édifier des immeubles de très grandes hauteurs comme le montre le projet du groupe japonais Sumitomo Forestry Co, qui aboutira en 2041 à la construction d'une tour de 350 mètres de hauteur composé à 90% de bois soit 70 étages.

Le CLT est largement utilisé en structure poteaux poutres pour les tours de bois, mais dispose également de nombreux panneaux et planchers 2D. Ses éléments sont eux aussi assemblés sur site et préfabriqués en usine ou en atelier.

Les éléments 2D en béton, sont les systèmes de construction hors-site les plus utilisés dans le monde de la construction, et cela depuis la reconstruction d'après-guerre. Facilement utilisables

et peu coûteux, on trouve une multitude d'éléments préfabriqués en béton sur le marché. Des escaliers, des poutres, des murs, des planchers, des poteaux et même des balcons.

Ces différents éléments peuvent être entièrement fabriqués hors-site puis assemblés sur site, ou bien comme les prémurs, être constitués de deux parois en béton contenant le ferrailage prêt à être remplis de béton. On trouve aussi sur le marché, des prédalles contenant armature et rupteur de pont thermique prêt à recevoir la dernière couche de béton.

Tous comme les éléments en bois, il est possible de recevoir un bâtiment à assembler sur site en béton. En revanche, certains coulages restent nécessaires afin d'assurer les liaisons entre les différentes pièces.

Après avoir vu les éléments 2D en bois et en béton, il est également possible d'utiliser le métal comme moyen de construction hors-site. Le LGS (Light Gauge Steel) ou LSF (Light Steel Frame) sont des éléments métalliques en acier, recouverts de zinc afin d'éviter la rouille. Ces éléments 2D en métal très léger, vont constituer le squelette du bâtiment. Ils permettent une grande rapidité de construction et ne nécessitent pas de fondations lourdes.

« L'avantage de l'acier est d'être un matériau recyclé et recyclable indéfiniment, en adéquation avec les principes d'économie circulaire. »²¹. Les éléments métalliques permettent donc d'avoir des seuils de rejet carbone très bas et en font un atout de taille aux vues des défis à venir.

Cette solution est principalement utilisée à l'édification de bâtiments industriels et commerciaux. Tous comme les panneaux en ossature bois, les étages restent limités du fait de leurs faiblesses structurelles. Enfin, la structure peut recevoir des panneaux de façades métalliques accompagnés d'un isolant.



Figure 4 : Élément 2D métallique pour la construction

d'un bâtiment industriel. Source : Innovant Magazine, site internet

²¹ K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment, édition Dunod, 2021

Dernièrement, on trouve au sein de la famille des éléments 2D hors-site, les panneaux de façade préfabriquée. Ces panneaux peuvent être structurels, mais dans la majorité des cas ils ne le sont pas et sont associés à une structure poteaux poutres. Les panneaux de façade sont entièrement préfabriqués hors-site et peuvent contenir à la fois l'isolation, le bardage extérieur, le revêtement intérieur, ainsi que les vitrages.

Certains panneaux préfabriqués, comme celui-ci-dessous de l'industriel Elmere, sont des panneaux mixtes comprenant à la fois du bois, du béton et une menuiserie intégrée triple vitrage. Le panneau Elmere vient se fixer sur une structure poteaux poutres et participe notamment à la réalisation de bâtiments passifs.

Du fait de sa mixité de matériaux, le panneau détient un impact environnemental très faible. De plus, la performance de son vitrage le rend à même de répondre aux critères des bâtiments passifs.



Figure 5 : Panneau de façade préfabriquée de l'industriel Elmere. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.

Selon la performance énergétique ou le style architectural recherché, on trouve une assez grande diversité de produits sur le marché des panneaux préfabriqués. On peut citer le panneau du bureau d'étude VS-A, composée d'une structure bois et d'un bardage en aluminium. On trouve également des panneaux habillés d'un parement en brique directement intégrés en façade.

2. Composants et assemblages non structuraux

La deuxième grande famille des modes constructifs hors-site sont les composants et les éléments d'assemblages techniques. Cette famille d'éléments hors-site, contrairement aux éléments 2D et 3D orientés vers le gros œuvre, rassemble certains corps d'état secondaires comme la plomberie, l'électricité, les systèmes énergétiques ou bien les ascenseurs.

Tout comme les panneaux 2D ou modules 3D, leur fabrication en usine et leur assemblage sur site permette un gain de temps important.

Les « Pods », sont des éléments de préfabrication qui sont destinés à remplir un usage tel que la cuisine ou bien la salle de bains. Ces derniers sont largement utilisés dans les secteurs nécessitant d'importants volumes et qui sont amenés à se répéter : Les hôpitaux, les hôtels, les résidences séniors ou étudiantes et même les paquebots. Si ces secteurs sont plutôt friands de ce genre d'équipements, du fait de l'amélioration des coûts d'exploitation, le marché du logement est quant à lui assez imperméable. Très peu de promoteurs et de bailleurs s'orientent vers ses équipements hors-site, d'une part pour la frugalité du marché et d'autre part à cause des acquéreurs privés.

Il est également possible de trouver des produits intégrant au sein du même module, la cuisine et la salle de bains afin de regrouper les équipements techniques et fluides.



Figure 6 : Exemple d'un Pods de salle de bains fabriqué en usine. Source : Habita Nova, site internet

Les modules techniques et énergétiques sont une seconde forme de composants et d'éléments d'assemblage techniques. A l'instar des Pods, ces éléments préfabriqués regroupent parfois au sein du même module le système de ventilation, de chauffage et même le panneau électrique. En revanche, ce marché de niche reste assez méconnu du public, et même des maîtres d'ouvrages.

Les gaines techniques, gaines d'ascenseur et nappes de réseaux sont aussi des équipements qu'il est possible de fabriquer hors-site et d'assembler sur site. Dans les gaines techniques, on peut trouver les colonnes montantes des différents fluides et même des cages d'ascenseur prêtes à être posées.

3. Eléments 3D structuraux

La construction modulaire ou construction volumétrique est le mode de construction hors-site le plus répandu sur le marché du hors-site. Par abus de langage, la construction modulaire est parfois même employée pour parler de la construction hors-site. La construction volumétrique consiste à assembler entre eux des modules, qui peuvent être conçus en structure poteaux poutres ou bien en voiles porteurs, à la manière des lego pour édifier un ouvrage.

On trouve une assez grande diversité de produits sur le marché : le béton, le bois et l'acier peuvent être tous les trois utilisés. Il est aussi possible de mixer les matériaux afin de trouver la combinaison qui convient au mieux au milieu géographique, à l'architecture ou à la performance énergétique. On peut donc trouver des modules composés d'un plancher béton et de murs porteurs en bois, des modules entièrement en bois ou en béton, en poteaux poutre acier et voiles bois non porteurs, etc.

Les modules peuvent avoir plusieurs niveaux de finitions selon le produit vers lequel on se tourne. Certains ne disposent que de la structure sans aucune finition, d'autre de façades extérieures, de menuiseries intégrées, et certains de finitions intérieures comme le placo, la peinture ou le revêtement de sol. Certains modules peuvent donc contenir la totalité des corps d'états secondaires. Ajouté à cela les composants et éléments d'assemblages techniques comme les Pods ou les modules techniques et énergétiques, et on trouve des modules entièrement préfabriqués et équipés prêt à remplir la destination finale de l'ouvrage.



Figure 7 : Modules de construction hors-site de l'entreprise Alpha M. 3D. Source : Photo prise par Theo JEANTILS

Si pendant longtemps la construction modulaire a été associée à la mise en œuvre de conteneurs et d'Algeco peu solides et mal isolés à destination de bureaux provisoires ou de logements temporaires, cette époque est révolue. Les industriels sont aujourd'hui capables de concevoir des modules de très haute qualité technique pour répondre aux exigences thermiques, architecturales, sismiques et sociétales.

En plus d'avoir de nombreux avantages, que nous verrons en seconde partie, les logements qu'il est possible de produire aujourd'hui en construction modulaire sont indifférenciables d'une construction traditionnelle. Structurellement, il est possible de réaliser des immeubles de très grandes hauteurs comme le montre le projet Londonien de l'entreprise Tide Construction, qui a édifié deux tours de 44 et 38 étages pour abriter pas moins de 546 logements.

Cette avancée technique en matière de construction modulaire et plus largement en construction hors-site, n'est possible que grâce à la révolution numérique des années 2000 et aux différents outils que le secteur du bâtiment s'est approprié depuis ces dernières années.

Dans une deuxième et une troisième sous-partie, nous allons nous intéresser à la question de la pluridisciplinarité de la construction hors-site : ce mode de construction ne révolutionne pas seulement la manière de construire.

B. Un modèle centré autour du numérique...

La mise en œuvre des systèmes constructifs hors-site modifie non seulement la technicité de la construction, mais fait aussi appel aux outils numériques. Afin de pouvoir fabriquer et assembler des bâtiments hors-site, certains outils numériques comme la maquette 3D deviennent obligatoires pour créer une cohérence d'ensemble tout au long du projet.

La maquette 3D est un outil numérique qui consiste à modéliser le projet pour réaliser la projection future du bâtiment. Elle peut fournir toutes les informations des éléments qui constituent l'ouvrage, comme le produit d'isolation, le matériau des voiles, le diamètre de la gaine de ventilation, etc.

Cet outil permet donc d'assembler le bâtiment pièce par pièce, et notamment avec les éléments hors-site que nous avons analysé en première partie. La maquette 3D permet également de « limiter les erreurs et les collisions, optimiser les coûts, délais... et être une base pour exploiter et maintenir un ouvrage. »²². La maquette 3D ouvre la porte à la démarche BIM (Building Information Management) que nous verrons plus tard.

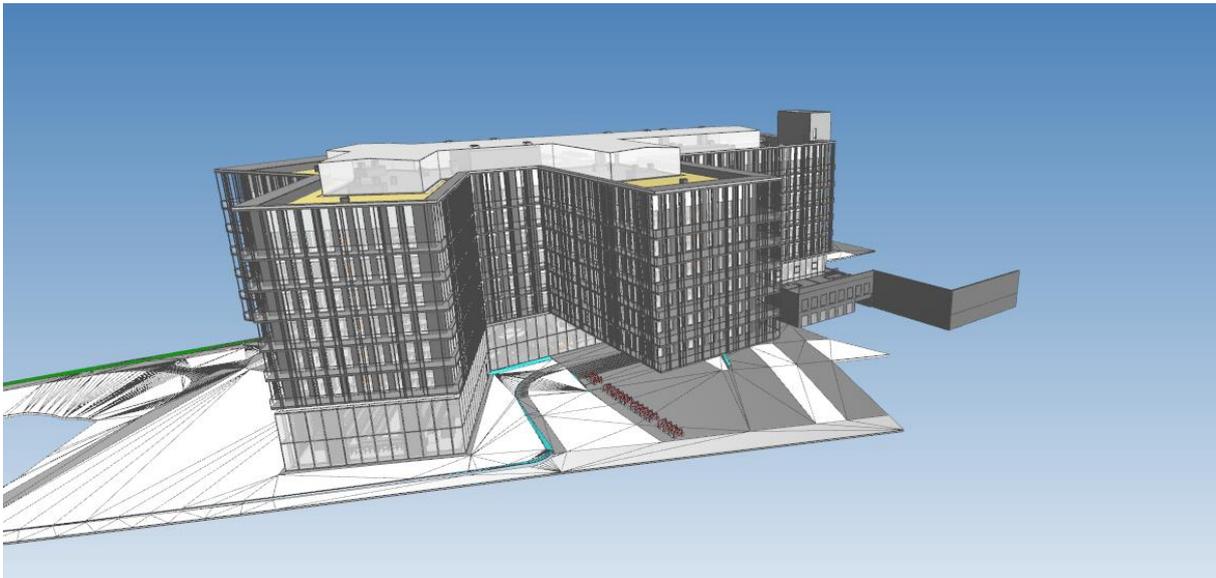


Figure 8 : Modélisation 3D d'un bâtiment de bureau via le logiciel BIMcollab ZOOM. Source : Fichier importé depuis la plateforme BIM data

²² K. BEDDIAR, C. GRELLIER, E. WOODS, *Construction 4.0*, édition DUNOD, 2019.

La maquette 3D et l'utilisation du BIM dans la construction hors-site ouvrent la porte à de nombreuses autres révolutions numériques dans le domaine de la construction. Le jumeau numérique, est une représentation virtuelle d'un produit ou d'un bâtiment qui grâce à l'intelligence artificielle, prend en compte toutes les données des différents composants afin d'établir une analyse du cycle de vie du bâtiment. Chaque élément est dit dynamique, et est rattaché à une base de données qui prend en compte l'usure, les contraintes d'ordre sismique et météorologique ou bien les défauts de fabrication. Grâce à cette maquette dynamique et l'intelligence artificielle, il est possible de prévoir les éventuels incidents et de simuler les dégradations futures.

Bien entendu, il est possible d'utiliser le jumeau numérique en construction traditionnelle. Toutefois, la démarche de fabrication-assemblage liée aux produits de construction hors-site renforce le modèle du jumeau numérique et sa capacité prédictive.

Dernièrement, on peut citer la robotique et l'impression 3D comme nouvelles formes d'outil numérique. Etant donné que la construction hors-site déplace une importante part de la main d'œuvre en usine, il est possible à travers l'impression 3D ou bien la robotique, de produire des éléments de construction hors-site.

Comme nous pouvons le constater, la construction hors-site ouvre la porte à un champ très large d'outils numériques, ce qui entraîne une mise en lien de plusieurs disciplines dans le monde de la construction.

C. ... Qui va bouleverser les hommes et la société

Comme nous le constatons, les modes constructifs hors-site ont un impact important dans la manière de concevoir, de construire et d'exploiter les bâtiments. De par la technique de fabrication-assemblage, une très grande partie du travail effectué sur site est maintenant délocalisé dans une usine ou bien un atelier.

Qui dit usine, dit processus industriel et création de produits. Dans une construction traditionnelle, on utilise plusieurs produits (ciment, ferrailles, parpaings) pour construire un mur. Une fois le mur construit, les différents produits sont fusionnés et il n'est alors plus possible de tirer d'informations sur un produit spécifique. En assemblant un bâtiment à partir d'éléments hors-site, on change complètement le paradigme général de construction. Un panneau 2D ou un module 3D peut être finement analysé de sa fabrication jusqu'à sa

déconstruction, et ainsi permettre de comprendre comment le bâtiment se comporte et évolue dans le temps.

La construction hors-site est un modèle centré autour d'assemblage de produits industriels. Pour en tirer les meilleurs avantages, les constructeurs de bâtiments, se doivent d'opérer « un changement de paradigme dans l'acte de construire avec des méthodologies, des processus et des outils numériques issus de l'industrie. »²³.

Simplement en analysant la technique de construction et la manière de concevoir les bâtiments hors-site, on entrevoit l'impact drastique que les hommes et la société vont connaître. Premièrement, si la construction hors-site s'accélère et quelle se démocratise à l'échelle d'un territoire par exemple, les métiers du bâtiment que l'on connaît aujourd'hui vont être amené à disparaître ou du moins à connaître une forte mutation. Il ne sera plus nécessaire d'avoir autant de corps d'état, les ouvriers du chantier vont devenir des ouvriers d'usine, ou encore les centres de formation aux métiers du bâtiment vont devoir apprendre à enseigner les techniques de construction hors-site.

Deuxièmement, comme nous avons pu le voir, le numérique est indispensable afin de produire des bâtiments hors-site. L'utilisation de logiciels et d'outils digitaux auprès des concepteurs tels que les maîtres d'ouvrages, les maîtres d'œuvres, architectes et bureaux d'études va devenir une obligation pour créer une unité et un langage commun entre les différents acteurs.

Pour aider les constructeurs et maîtres d'ouvrages à cette transition, ces derniers peuvent s'appuyer sur différents outils de management bien connu dans le monde de l'industrie. Ses outils vont profondément transformer le monde de la construction que nous connaissons aujourd'hui.

Comme nous l'avons vu, la construction hors-site est un système constructif basé sur l'assemblage de produits industriels. Le fait de raisonner, non plus en approche construction corps d'état séparés mais en approche produits, demande aux constructeurs une vision globale et à long terme du projet. Le DfMA (Design for Manufacturing and Assembly), est une approche de conception prenant en compte toutes les règles de déploiement et de mise en œuvre d'un produit. Contraintes d'assemblage et de fabrication, transport et retour des problématiques liées aux produits sont pris en compte dans cette démarche.

²³ K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment, édition Dunod, 2021

Le DfMA constitue une des premières formes de management à mettre en œuvre afin d'établir des projets de construction hors-site. En effet, les projets de construction restent majoritairement très segmentés. Les maîtres d'ouvrages font appels à une multitude de prestataires externes qui pour certains interviennent ponctuellement au cours d'un projet. On peut donc trouver plusieurs maîtrises d'œuvre de conception et d'exécution, plusieurs bureaux d'études ingénieries et un très grand nombre d'entreprises en corps d'état séparés.

Pour mettre en place une opération hors-site, les constructeurs de produits hors-site (panneau 2D ou modules 3D) doivent avoir une réflexion globale du projet pour anticiper, prévoir et appliquer les bonnes décisions à la mise en œuvre de leurs produits. L'approche DfMA consiste donc à revoir en profondeur le management de projet en construction.

Le BIM (Building Information Management), est une solution qui a pour but d'améliorer le management de projet en construction. Le BIM se compose de plusieurs outils, principalement numériques, qui permettent de simplifier et d'améliorer la communication, le travail, la gestion de données et plus généralement la conception, construction et exploitation d'un projet de construction.

Plusieurs niveaux de BIM peuvent être mis en œuvre au sein d'un projet. Plus on se rapproche du dernier niveau, plus le niveau de coopération entre acteurs du projet s'intensifie. Au niveau trois, les acteurs du projet sont amenés à travailler sur une plateforme collaborative en ligne où chacun a accès aux fichiers des autres. Cette manière de travailler collectivement et non plus de façon isolée bouleverse complètement les habitudes de travail traditionnel. Cela pose en revanche quelques interrogations sur les droits de chacun, et surtout les contrats passés avec les différents acteurs.

De nombreux autres outils de management peuvent être appliqués dans les cas de construction hors-site pensé en projet fabrication-assemblage basé sur une démarche produit. On peut citer le Lean Management, créé par les industriels japonais et largement repris par de nombreux secteurs d'activités, qui a pour but de mettre en place une démarche d'amélioration continue afin d'en tirer des bénéfices. Le PLM (Product Lifecycle Management), qui analyse le cycle de vie d'un produit de sa création jusqu'à son recyclage ou sa démolition.

Il n'est pas question à travers cette sous-partie d'en dresser une liste exhaustive, mais le monde de la construction, du fait de la mise en œuvre du hors-site, va connaître un important changement de paradigme dans sa manière de manager les hommes.

Conclusion de la première partie

Dans cette première partie, nous avons dans un premier temps observé le fonctionnement de la nouvelle réglementation énergétique 2020. Cette dernière apporte de nouveaux objectifs à atteindre dans le monde de la construction et sera possible d'être mise en œuvre grâce à de nouveaux modes de calcul. Sachant les exigences et les ambitions à atteindre, les constructeurs et maîtres d'ouvrages devront recourir à de nouvelles méthodes de construction et/ou de nouveaux produits. Il semblerait donc, que les innovations telles que la construction hors-site, soit un procédé de construction intéressant à mettre en œuvre. Cette réglementation amène à un changement dans le monde de la construction.

Dans une seconde partie, nous avons analysé les différents modes de construction hors-site ainsi que son implication dans d'autres champs jusqu'ici en marge du monde de la construction. Les modes constructifs hors-site recèlent une importante diversité de produits qui leurs permettent d'être mis en œuvre dans la majorité des opérations de constructions. Par leurs natures hors-site et le changement de paradigme constructif, on comprend qu'une révolution numérique s'impose pour leurs mises en œuvre. De plus, le déplacement de main d'œuvre en usine et la technique de fabrication-assemblage va transformer les hommes et les règles sociétales.

Dans une deuxième partie, nous allons mettre en avant les avantages de la construction hors-site afin de répondre aux enjeux environnementaux de la RE2020.

Partie 2.) La construction hors-site, une réponse durable face aux enjeux de la RE2020 ?

A travers cette deuxième grande partie, nous allons aborder les bénéfices qu'il est possible de dégager en mettant en œuvre la construction hors-site. Nous allons analyser qu'il est non seulement avantageux d'un point de vue environnemental, et donc en capacité de répondre aux enjeux de la RE2020, mais c'est aussi un modèle pérenne qui est totalement compatible avec les enjeux de notre société actuelle.

Dans cette première sous partie, nous allons mettre en lumière les différents avantages du modèle de construction hors-site par le biais de la littérature mais aussi de l'expérience du terrain. Bien loin des chantiers traditionnels, le hors-site déplace, selon les produits employés, une grande majorité de la production et du temps en usine. C'est un modèle faisant consensus sur les avantages qu'il procure. En effet, le hors-site permettrait, entre autres, une réduction de délais de construction, une augmentation de la qualité des ouvrages, une meilleure gestion des déchets, des rejets carbone moins importants et des conditions de travail plus agréables et sécurisées. Ces nombreux bénéfices permettent d'une part, une réponse aux exigences de la RE2020, et d'autre part une forme de pérennité face aux enjeux sociétaux telle que la recherche constante d'une meilleure qualité, la sécurité du travail, le tri des déchets mais aussi la baisse de qualification de l'artisanat.

Dans une seconde sous partie, nous démontrerons à travers une étude de cas, une partie des avantages que nous allons analyser premièrement. Cette étude de cas se veut plutôt technique, car il semble pertinent d'aborder quelques chiffres pour répondre à la problématique avec des données quantitatives. Dans une seconde partie, l'étude de cas mettra toujours en avant les avantages environnementaux en évoquant également la pérennité du modèle par les gains économiques qu'il est possible d'en tirer.

1. La construction hors-site, un modèle écologique et pérenne ?

1.1) Des délais de construction raccourcis

Le premier avantage de la construction hors-site est indéniablement le gain de temps. Selon les produits mis en œuvre, on pourra accélérer de « 10 à 20% pour le niveau de préfabrication le moins élevé et jusqu'à 50% pour le volumétrique »²⁴. Nous verrons dans l'étude de cas en deuxième partie, qu'il est effectivement possible de faire des économies de temps importantes.

Si l'on considère que les éléments hors-site commencent à être fabriqués au moment de la délivrance de l'ordre de service, leurs fabrications peuvent commencer en parallèle des travaux de gros œuvre comme les fondations, les infrastructures et les réseaux sous dallage. En revanche, si l'on considère que le produit hors-site est standardisé et qu'il est capable d'être mis en œuvre sur plus d'une opération, il peut être produit à flux tendu. Si c'est effectivement le cas, alors l'ouvrage peut être édifié en un temps record. En effet, la phase de conception se trouve donc raccourcie et les gains de temps se trouvent non seulement en phase chantier mais également en phase conception.

Si l'on pousse le curseur encore plus loin, il est facile d'imaginer, au même titre que les industriels, qu'une équipe de nuit et qu'une équipe de jour fabriquent les éléments, et qu'une troisième équipe assemble les éléments sur site.

Du côté des maîtres d'ouvrages et des constructeurs, le gain de temps n'est pas négligeable quand on sait que les heures de travail sont une ressource économique. Premièrement, les équipes internes du maître d'ouvrage consacrent un temps plus court à chaque opération de construction. Deuxièmement, la facture de certains contrats comme le Coordonnateur de Sécurité et Protection de la Santé (CSPS), payés au jour passé sur chantier, se trouve diminuée.

Nous pouvons constater que la construction hors-site a des avantages temporels et peut potentiellement procurer des gains économiques. De plus, cette caractéristique fait écho à notre société moderne qui recherche toujours plus de rapidité.

Ce premier avantage pourrait être appréhendé comme une forme de pérennité pour le maître d'ouvrage ?

²⁴ K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment, édition Dunod, 2021

1.2) Un impact environnemental plus faible

Un faible impact environnemental est un des autres atouts de la construction hors-site. C'est d'ailleurs en grande partie grâce à lui que la construction hors-site bénéficiera de seuils relativement bas dans les modes de calculs de la RE2020.

Premièrement, et en étroite corrélation avec les délais raccourcis, le hors-site engendre inévitablement moins de nuisances sur le chantier. En effet, par ses gains de temps en phase construction, les nuisances liées au chantier se trouvent également diminuées. De plus, du fait de l'assemblage d'éléments préfabriqués, « Les réductions des nuisances de chantier en volume, bruit lié aux outils notamment percussifs et aux transports, pollution aérienne notamment sous forme de poussières et sciures ainsi que l'emprise au sol pour les bases vie et les instruments de levage, et en durée, a un effet certain sur l'acceptabilité de la construction neuve par les riverains. De manière plus anecdotique, les coûts liés à la sécurisation des chantiers (caméras, alarmes, gardiennage), qui sont en forte hausse, devraient également baisser. »²⁵.

A travers cette citation tirée du ministère chargé du logement, on comprend que la construction hors-site a l'avantage d'être respectueux de son environnement proche, qu'il est possible de faire des économies pour la sécurisation des chantiers et enfin de faciliter les relations sociales avec les riverains. Des points essentiels à prendre en compte pour le maître d'ouvrage.

Deuxièmement, la construction hors-site a pour avantage la maîtrise et la réduction des déchets. Grâce à la production en usine, il est possible de « limiter les chutes, donc les déchets, dès l'amont de la conception. Les laies de moquettes ou les sols souples, le placo et les rails de support, les câbles et les réseaux...toute cette matière première peut être réduite grâce à un calepinage et des découpes pensées dans leur globalité »²⁶.

À la suite de la visioconférence organisée par le Pôle Habitat de la Fédération Française du Bâtiment (FFB) le 27 janvier 2022, Éric Durand, directeur des affaires techniques de la FFB et Julien Serri, délégué national aux affaires techniques du Pôle habitat ont présenté les enjeux de la Responsabilité Élargie du Producteur (REP).

²⁵ B., MICHEL et R., RIVATON, *L'industrialisation de la construction*, Rapport du ministère chargé du logement, 2021.

²⁶ K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, *Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment*, édition Dunod, 2021

Cette nouvelle réglementation qui entrera en vigueur le 1^{er} janvier 2023, est basée sur le principe du pollueur-payeur et va imposer à toutes les personnes qui « élabore, fabrique, manipule, traite, vend ou importe des produits générateurs de déchets ou des éléments et matériaux entrant dans leur fabrication »²⁷ de contribuer à leurs prises en charge et leurs fins de vie (collecte et traitement).

Les deux intervenants de la FFB mettent en avant le fait qu'il sera non seulement obligatoire pour les fabricants de mieux traiter leurs déchets, mais aussi que les maîtres d'ouvrages devront s'acquitter de contributions financières en contrepartie de leurs constructions polluantes.

La réduction des déchets via le hors-site peut donc d'une part, diminuer l'impact environnemental de la construction, et d'autre part faire diminuer la facture liée au principe du pollueur-payeur.

Troisièmement, grâce aux deux éléments que nous venons de voir et aux matériaux qu'il est possible de mettre en œuvre en construction hors-site, les rejets de carbone dans l'atmosphère s'en trouve également diminués. Comme nous l'avons vu en première partie, l'analyse en cycle de vie se basera sur les contributions « Composants » et « Chantier » afin de déterminer l'indice IC Construction. Grâce à la délocalisation en usine, il sera plus facile de répondre au seuil « Chantier », et grâce aux matériaux mis en œuvre à travers les éléments de construction hors-site, le seuil « Composants » sera lui aussi meilleur. L'étude de cas de la seconde partie nous permettra d'appuyer ces propos.

De manière synthétique, nous avons mis en évidence plusieurs exemples pour démontrer que le modèle de la construction hors-site bénéficie d'avantages écologiques et durables pour les maîtres d'ouvrages.

²⁷ Article L541-10 du Code de l'Environnement

1.3) Une amélioration des conditions de travail

Selon l'Agence Nationale pour l'Amélioration des Conditions de Travail (ANACT), entre 2001 et 2019, « Le secteur le plus accidentogène pour les hommes demeure le BTP avec plus de 86 000 accidents de travail reconnus. »²⁸.

D'après l'article de Chloé Devis, publié le 17 décembre 2020 sur le site prévention BTP, un service de l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP), les décès dans le BTP ont connu une forte hausse entre 2018 et 2019. 176 morts en 2019 contre 107 en 2018. « La répartition des causes d'accidents en 2019 est quasiment inchangée. Les manutentions manuelles arrivent toujours largement en tête, à hauteur de 48%. Viennent ensuite les chutes de hauteur (16%), l'outillage à main (15%) et les chutes de plain-pied (14%). »²⁹

Outre le fait d'améliorer les conditions de travail comme les canicules estivales, le froid et les intempéries, la manutention de charges lourdes, etc., la construction hors-site permet également de diminuer la quantité d'accident de travail et donc de décès. Le travail en usine permet de réduire les situations à risque comme les chutes de hauteurs et le levage de charges lourdes sur site. Le secteur industriel est également touché par de nombreux accidents mortels, mais son taux d'accident reste très inférieur à celui du BTP.

Les accidents de travail et dans le pire des cas de décès est une des problématiques majeures pour les maitres d'ouvrages. Quel que soit la raison, un décès sur le chantier n'est jamais de bon augure pour n'importe quel maitre d'ouvrage. Il en demeure le responsable juridique. Nous pouvons émettre l'hypothèse que la construction hors-site peut permettre une amélioration de la sécurité à travers la délocalisation d'une majeure partie du travail en usine.

²⁸ Sinistralité au travail en France : une évolution différenciée entre les femmes et les hommes entre 2001 et 2019 publié en mars 2022 - www.anact.fr

²⁹ Article de Chloé Devis publié le 17 décembre 2020 - www.preventionbtp.fr

1.4) Une qualité de construction supérieure

Un autre avantage de la construction hors-site, qu'il reste toutefois à démontrer, est l'amélioration de la qualité des bâtiments. N'étant pas une donnée quantitative, l'amélioration de la qualité peut être néanmoins étudiée à travers plusieurs facteurs comme la quantité de réserves lors de la pré-livraison, les coûts des reprises et réparations, la satisfaction client, les pénalités, etc.

La construction hors-site permet, entre autres, « de construire les modules dans un environnement clos, à l'abri des intempéries et des variations importantes de températures. Les matériaux sont stockés à l'abri et sont ainsi moins exposés aux risques de moisissures, de salissure, ainsi qu'à la détérioration liée aux allées et venues des camions ou du personnel. Les meilleures conditions de travail pour le personnel, ainsi que la possibilité d'utiliser des outils et la robotique permettent également d'assurer une qualité de réalisation et de mise en œuvre améliorée. Les tolérances qu'il est possible d'obtenir avec une fabrication usine sont bien supérieures à ce qui est réalisable sur le chantier. »³⁰

Cette possibilité de gagner en qualité grâce au hors-site est à corrélérer avec la baisse de main d'œuvre qualifiée sur les chantiers.

Selon une étude de l'INSEE de décembre 2019, les entreprises font face à une pénurie de main d'œuvre grandissante dans le bâtiment. « En France, la proportion d'entreprises déclarant des pénuries de main-d'œuvre a fortement augmenté au cours des trois dernières années, atteignant un point haut mi-2019 (21 %). [...] Au 4ème trimestre 2019, 46 % des entreprises dans le secteur de la construction signalent être limitées dans leur activité par manque de main-d'œuvre. »³¹

Cette baisse de main d'œuvre est non seulement quantitative, mais aussi qualitative. Les ouvriers qualifiés partent à la retraite et les jeunes ne sont plus attirés par les métiers difficiles du bâtiment.

La construction hors-site, par ses conditions de travail plus avantageuses, pourrait avoir la capacité de mobiliser une plus forte masse de main d'œuvre que le bâtiment dans les années à

³⁰ K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment, édition Dunod, 2021

³¹ Quel lien entre pénuries de main-d'œuvre et chômage en France et en Europe ? – Note de conjoncture - INSEE

venir. D'un côté une baisse de main d'œuvre qualifiée, et d'un autre une amélioration de la qualité grâce à la délocalisation en usine. Le hors-site a tout d'un mode de construction pérenne face aux enjeux à venir ?

En revanche, d'après l'expérience acquise sur le terrain, certains éléments de préfabrication construits hors-site, peuvent se retrouver fortement dégradés par les intervenants sur site. Par exemple, les vitrages des menuiseries incorporés aux modules ou aux panneaux 2D hors-site, peuvent se retrouver rayés, voire fissurés par les intervenants de corps d'états secondaires. Dans ce cas précis, la qualité se trouve dégradée et des coûts de remplacements sont nécessaires.

1.5) Des bâtiments réversibles et évolutifs

Comme présenté dans l'état de l'art à travers l'article de l'architecte Guillaume Hannoun, certains bâtiments modulaires peuvent être assemblés, démontés puis réassemblés sur un nouveau site. Cette capacité d'adaptation rend la construction hors-site non seulement extrêmement écologique du fait du réemploi, mais aussi fortement pérenne du fait de son évolutivité, réversibilité.

On entend souvent le terme de réversibilité comme la capacité d'un bâtiment à transformer des bureaux en logements et inversement. Les éléments de construction hors-site offrent non seulement cette capacité, mais aussi celle d'ajouter ou de supprimer un étage et d'occuper temporairement un site sans avoir à mener d'importants travaux de démolition ou de dépollution.

D'après Aline Maréchaux, présidente de la start-up Agilcare Construction, « Ces bâtiments sont durables justement parce qu'ils sont évolutifs. Le principe, c'est que chaque élément du bâtiment soit réutilisable. Ainsi, on évite la création de déchets issus de la déconstruction ainsi que la surproduction de matériaux. [...] Or, aujourd'hui, nos modes de vie, nos besoins et les normes évoluent très rapidement. Nous avons donc besoin de bâtiments capables de rapidement s'adapter mais également de s'inscrire dans le temps, qui soient frugaux en ressources, sobres en énergie, avec des faibles besoins en maintenance. [...] La construction modulaire via des éléments préfabriqués est un moyen d'y parvenir. »³².

³² A., MARECHAUX, Les bâtiments réversibles et évolutifs, l'avenir du secteur de la construction, Construction21, 2019

La réversibilité et l'évolutivité des bâtiments n'est pas exclusivement applicable aux bâtiments de bureaux et de logements. De l'autre côté de la Manche, le gouvernement britannique a passé plusieurs contrats-cadres avec des industriels, dans l'objectif de réhabiliter et de construire une grande quantité d'écoles. Cette démarche du gouvernement a pour but d'accélérer la démocratisation de la construction hors-site à l'ensemble du pays, mais aussi de produire des écoles facilement déplaçables afin de faire face à l'évolution de la démographie et des flux internes.

En lien avec le contexte de guerre en Europe de l'Est, il est également possible d'imaginer construire très rapidement des bâtiments pour les réfugiés et d'avoir la possibilité de les démonter afin de libérer le foncier.

A travers ces différents exemples, nous constatons la qualité écologique mais aussi durable de la construction hors-site. Qui plus est, ces bénéfices sont, non seulement avantageux pour les maîtres d'ouvrages de logements et de bureaux, mais aussi pour d'autres formes de maîtrises d'ouvrages comme les ouvrages du gouvernement.

Au moyen de la littérature et de quelques expériences de terrain, nous constatons dans cette première sous-partie, que la construction hors-site bénéficie de nombreux avantages sur de nombreux plans. Les enjeux environnementaux, sociétaux et économiques sont des facteurs auxquelles le hors-site permet d'établir de premières réponses.

A présent, nous allons analyser par une étude de cas basée sur le terrain, si la construction hors-site est, comme on le dit dans la littérature, une réponse aux enjeux de la RE2020.

2. Etude de cas d'un projet en construction modulaire et ses bénéfices environnementaux

Nous allons à présent étudier un projet de construction hors-site et plus précisément en modulaire. Comme nous l'avons vu dans la première sous-partie, la construction hors-site est une méthode apportant de grands avantages environnementaux, économiques et même sécuritaires.

Cette étude de cas a pour but de démontrer les bénéfices environnementaux d'un projet hors-site pour répondre à la problématique : Est-ce que la construction hors-site permet de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique ? Nous mettrons également en avant le gain économique qu'il est possible de tirer de la mise en œuvre d'une construction hors-site pour répondre à la seconde question de la problématique : Est-ce que la construction hors-site est un système de construction pérenne pour les maîtres d'ouvrages ?

Bien entendu, les éléments de réponses qui ressortiront de l'étude de cas ne sont pas à généraliser à toutes les opérations de constructions hors-site. Etant donné la multitude de produits présents sur le marché, de leurs méthodes de fabrication en usine, du milieu géographique ou bien encore de l'architecture même du bâtiment, il est impossible d'émettre un panel précis des avantages du hors-site.

Toutes les sources et les éléments présents au sein de cette étude de cas ont été recueillis au sein du centre de documentation du Groupe Pelletier, une entreprise qui réalise des projets de construction hors-site en promotion et contractant général.

Explication méthodologique de l'étude de cas :

Pour démontrer les avantages de la construction hors-site et sa capacité de réponse face aux enjeux à venir, l'étude de cas sera construite sous la forme d'une étude comparative entre deux projets de construction. La comparaison sera faite entre un projet de construction hors-site utilisant la technique des modules 3D et un projet de construction dit traditionnelle, en voiles et planchers béton.

Le but de l'étude, est de montrer la différence d'impact carbone entre les deux projets de construction. Comme nous l'avons vu dans la présentation de la RE2020, l'objectif de diminution carbone se traduit par l'indicateur IC Construction. A travers un seuil composé des

contributions « Composants » et « chantier », cet indicateur mesure la quantité de rejet carbone tout au long du cycle de vie du bâtiment. En comparant le projet hors-site et le projet traditionnel, nous montrerons de manière simple et sans rentrer dans des données techniques, que le projet de construction hors-site permet d'avoir un meilleur rejet carbone que le projet traditionnel.

Cette comparaison se fait sur la base d'un produit bien particulier, un module 3D mixant le béton et le bois. Les chiffres annoncés ne sont donc pas généralisables à l'échelle de tous les modes de construction hors-site et ne reflètent pas une vérité absolue. En revanche, nous pouvons émettre l'hypothèse que les différents produits 3D sur le marché (modules mixtes ou simple matériau), sont en général moins émetteurs qu'une construction traditionnelle en béton. On peut citer par exemple les modules tous bois, acier bois, tous acier ou bois béton.

En revanche, il se peut qu'entre le projet que nous allons étudier et une construction ossature bois, acier ou poteaux poutres béton accompagnés de panneaux bois, les gains carbonés ne soient pas aussi importants comparés à la construction tout béton. C'est pour cela, que l'étude est valable dans le cas où le projet traditionnel analysé est en béton.

Les modules 3D étudiés dans ce cas, sont comme nous l'avons vu dans la partie intitulé « Les différentes formes de construction hors-site », des modules disposant uniquement de la structure, et dénués de finitions. C'est pour cela, que l'impact carbone étudiée sera uniquement liés au composant gros œuvre.

Concrètement, nous allons mettre en lumière les quantités de béton utilisées en construction traditionnelle et en construction hors-site. Afin d'être le plus précis possible, nous comptabiliserons uniquement les travaux de fondations et de superstructure des deux projets.

Pour que l'étude comparative soit cohérente, les deux projets étudiés contiendront le même nombre de logement. Cette première donnée qualitative sera appuyée par une donnée de type quantitative correspondant à la surface habitable moyenne des logements.

Maintenant que le cadre de l'étude de cas est défini, nous allons étudier techniquement les données requises lors de la phase de collecte et de recherche.

Présentation du projet :

Constellia est une opération immobilière qui se compose de trois résidences collectives et de douze maisons groupées. L'opération est produite par le Groupe Pelletier en partenariat avec Savoisienn Habitat. Cette union permet entre autres, de proposer différentes formes d'accession pour tous types de profils et de besoins. L'opération se situe sur la commune de Sales non loin de Rumilly, à quelques kilomètres d'Annecy (plan ci-dessous).

Plan de masse et de situation de l'opération :

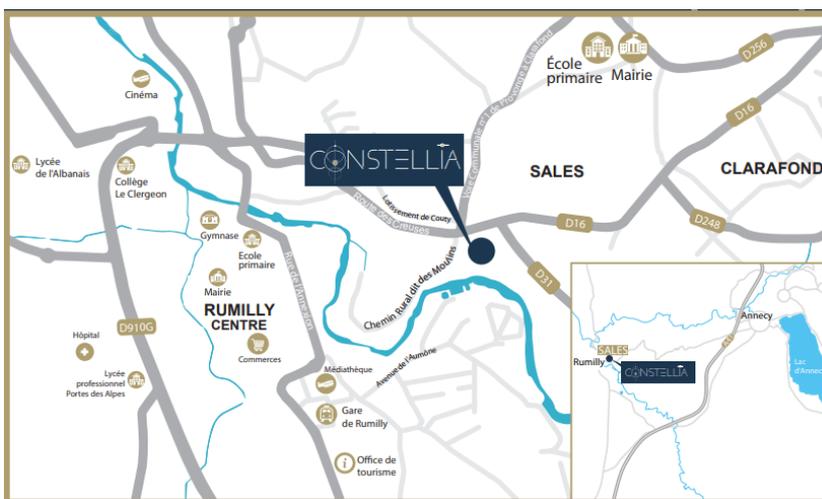


Figure 9 : Plan de masse et de situation de l'opération Constellia. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier

Les trois bâtiments collectifs de l'opération sont en construction hors-site et plus particulièrement en modulaires 3D. Les modules sont entièrement préfabriqués en usine et arrivent sur site prêts à être assemblés entre eux.

Le module 3D utilisé lors pour la construction des bâtiments est un module structurel en béton (voir figure 7 et 10). Il est ensuite composé de rails en aluminium qui serviront de structure à l'isolation sous-dalle. Des panneaux de façade bois intégrant les menuiseries extérieures constituent une large partie des voiles du bâtiment pour réduire l'utilisation du béton. Enfin, le module prévoit des réservations pour le passage des différents fluides. Pour plus de clarté, voici un schéma du produit utilisé.

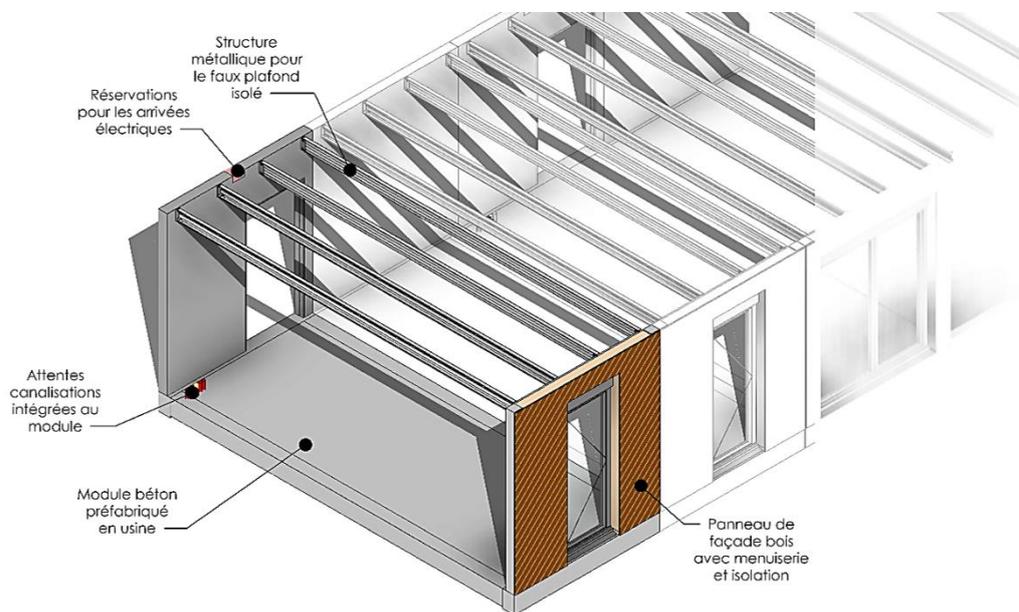


Figure 10 : Schéma d'un module de l'entreprise Alpha M.3D. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.

L'étude de cas comparative porte uniquement sur le bâtiment A de l'opération Constellia. Ce bâtiment est composé de 25 logements répartis sur un rez-de-chaussée et deux étages pour une surface habitable de 1533 m² soit 61,32 m² moyen par logement

Le bâtiment est composé de 154 modules qui composent la majeure partie du lot gros œuvre. La seconde partie du lot est composée des fondations et soubassement, des coursives et de la cage d'escalier. Ces deux parties composent la totalité des ouvrages de gros œuvre en béton.

Voici une coupe de la partie gros œuvre du bâtiment A. On retrouve en premier lieu la partie gros œuvre hors modules, et deuxièmement la totalité des modules qui composent l'opération. Les balcons et systèmes de contreventement ne sont pas pris en compte dans l'analyse.

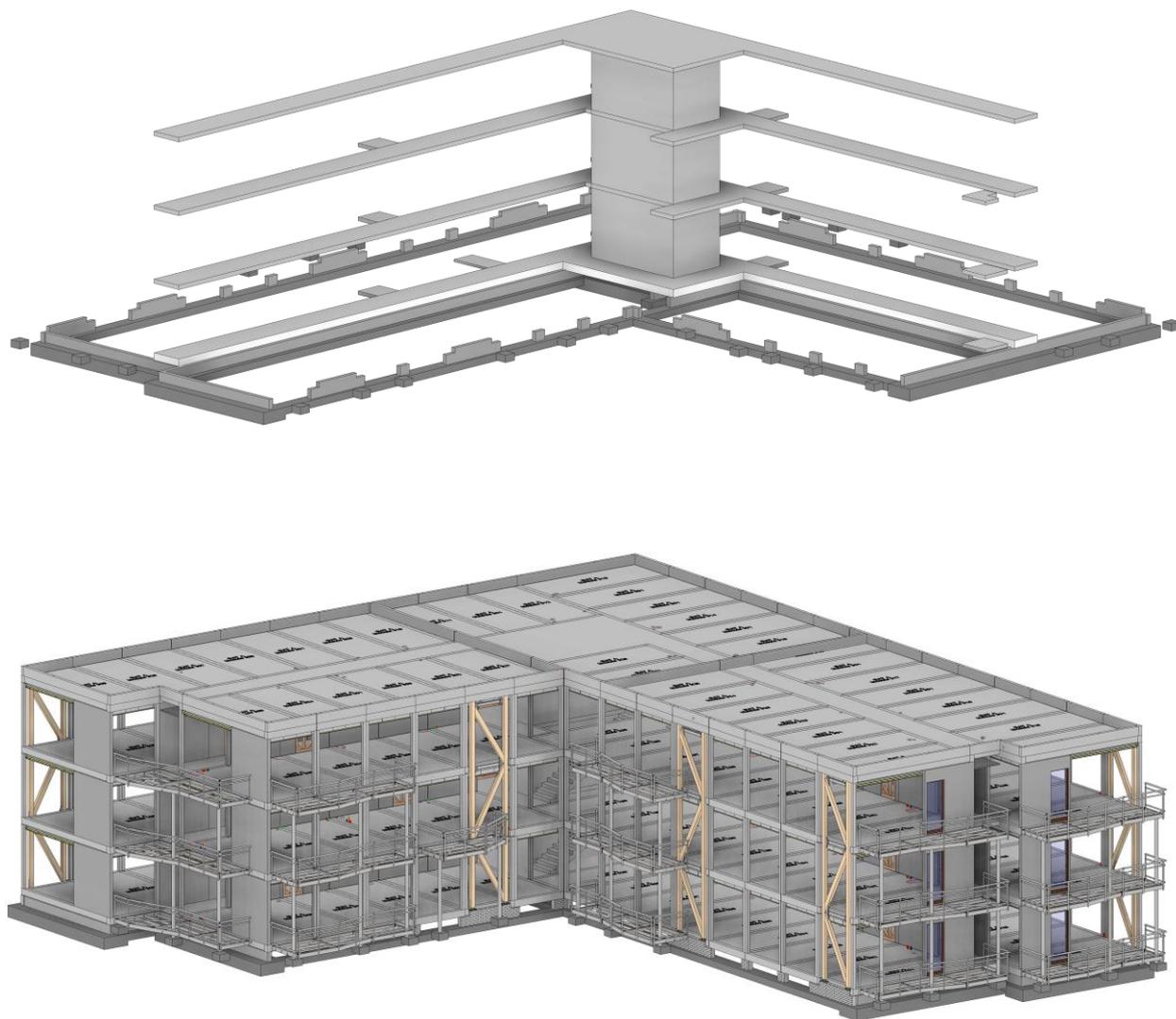


Figure 11 : Plan 3D du découpage du lot gros œuvre du bâtiment A de l'opération Constellia.
Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier

Comme nous pouvons le voir sur le plan de représentation des modules, les panneaux de façade en bois servant de voiles ne sont pas représentés. Pour pouvoir comparer le projet hors-site et traditionnel, il semble pertinent de comparer la même nature de matériau. Nous reviendrons sur les panneaux bois plus loin.

Le projet de construction traditionnelle est un bâtiment de 25 logements conçu par le maître d'ouvrage Savoisienn Habitat. L'opération de logement se situe sur la commune de Bassens à proximité de Chambéry. La partie gros œuvre va être réalisée par l'entreprise de construction Barel et Pelletier. Le projet étant encore en phase de conception chez le maître d'ouvrage Savoisienn Habitat, il est difficile d'obtenir des visuels de l'ouvrage ainsi que des informations quantitatives.

Ne disposant pas de la surface habitable officielle du projet, il semble pertinent de se baser sur les statistiques officielles de l'Insee³³. D'après le document officiel sur les conditions de logement en France de 2017, la surface habitable moyenne dans le logement collectif est de 63 m². Le bâtiment dispose de 25 logements, la surface habitable moyenne s'élève donc à 1575 m² ($60 \times 25 = 1575$). Ce chiffre semble tout à fait cohérent aux vues des données du projet hors-site.

Le gros œuvre de l'opération sera entièrement réalisé en béton de manière dite « classique ». Le terme classique ou traditionnel, désigne les constructions réalisées en plancher et voiles béton coulé sur place, d'une épaisseur variant de 15 cm à 25 cm pour les dalles et de 20 cm en moyenne pour les voiles. On utilise très largement cette technique de construction, connue pour sa qualité structurelle et son coût avantageux. Bien entendu, comme il a été mentionné plus haut, chaque projet n'est pas similaire et la quantité de béton utilisée par opération est différente.

En récoltant des données d'étude auprès d'un économiste de la construction de l'entreprise Barel et Pelletier (gros œuvre) et d'un chargé d'opération de l'entreprise Alpha M. 3D (modules), il a été possible de comparer les quantités de béton mis en œuvre au sein des deux opérations pour réaliser la totalité des ouvrages béton.

Dans un premier temps, calculons la quantité de béton mise en œuvre dans le projet de construction hors-site :

D'après les données recueillies auprès d'un chargé d'opération de l'entreprise Alpha M. 3D, la quantité de béton moyenne pour la fabrication d'un module est de 3,55 m³. Sachant que le bâtiment est composé de 154 modules ($154 \times 3,55$), la quantité de béton nécessaire à la réalisation de l'intégralité des modules s'élève à 574 m³. Comme nous l'avons expliqué plus haut, il est nécessaire d'ajouter à cette quantité celle des fondations, coursives et escaliers.

³³ Les conditions de logement en France, édition 2017 - Insee Références

D'après l'économiste de la construction de l'entreprise Barel et Pelletier en charge du chiffrage gros œuvre, il a fallu utiliser 222 m³ de béton pour la réalisation des ouvrages. Nous comptabilisons donc un total de 796 m³ de béton mis en œuvre afin de réaliser le bâtiment A de l'opération hors-site.

Dans un deuxième temps, calculons la quantité de béton mise en œuvre dans le projet de construction traditionnelle :

Les données récoltées auprès de l'économiste de la construction de l'entreprise Barel et Pelletier permettent d'avoir, tous comme le projet hors-site, les données précises de la quantité de béton mis en œuvre. En additionnant la somme des fondations (189,8 m³) et les travaux de superstructure (1 627,7 m³), qui correspondent aux voiles, poteaux, poutres, dalles en béton et escaliers, nous obtenons un total de 1 817,5 m³ de béton mis en œuvre.

Analyse des données :

De prime abord, nous constatons que l'opération de construction hors-site nécessite 1021,5 m³ de béton en moins que l'opération réalisée traditionnellement. Ce gain béton engendre un avantage indéniable dans l'analyse en cycle de vie du bâtiment. Du fait de l'étude, nous pouvons affirmer que la contribution « Composants » qui composent l'indicateur IC Construction de la RE2020 atteint un seuil de rejet carbone bien meilleur. Comme nous l'avons mentionné en introduction, le béton est le matériau de construction le plus émetteur de la filière.

Nous pouvons expliquer cette baisse drastique de béton par plusieurs facteurs. Premièrement, les éléments structuraux du module demandent une quantité de béton moins importante qu'en construction traditionnelle. Les dalles, les poteaux et les voiles béton possèdent des épaisseurs plus faibles qu'en traditionnel, ce qui allège fortement la quantité de béton mise en œuvre. Deuxièmement, la grande majorité des voiles du projet hors-site est réalisée en panneau bois. Ces derniers allègent encore plus fortement la quantité de béton mis en œuvre. De plus, comme nous l'avons vu en première partie, la RE2020 récompense l'utilisation du bois dans l'analyse du cycle de vie.

Deuxième partie de l'étude :

La deuxième partie de l'étude a volontairement été séparée de la première en raison de la nature des données à traiter. A travers celle-ci, nous allons mettre en avant les bénéfices indirects de la construction hors-site. Indirecte, car ces données seront avant tous qualitatives et hypothétiques, puisque nous ne pouvons les démontrer en nous appuyant sur des données chiffrées.

Cette seconde analyse, contrairement à la première, aura une lecture à deux entrées. Nous aborderons la question des bienfaits environnementaux. Puis ses avantages seront également corrélés avec la question économique.

Toujours dans l'optique de répondre aux exigences de la RE2020, nous savons qu'outre la contribution « Composants », l'analyse en cycle de vie prendra également en compte la contribution « Chantier ». Pour rappel, elle prendra en compte toutes les consommations d'énergie du chantier (électricité, eau), l'évacuation et le traitement des déchets.

Voici un plan représentant le fonctionnement de l'usine Alpha M. 3D ou sont fabriqués les modules que nous avons étudié en première partie :

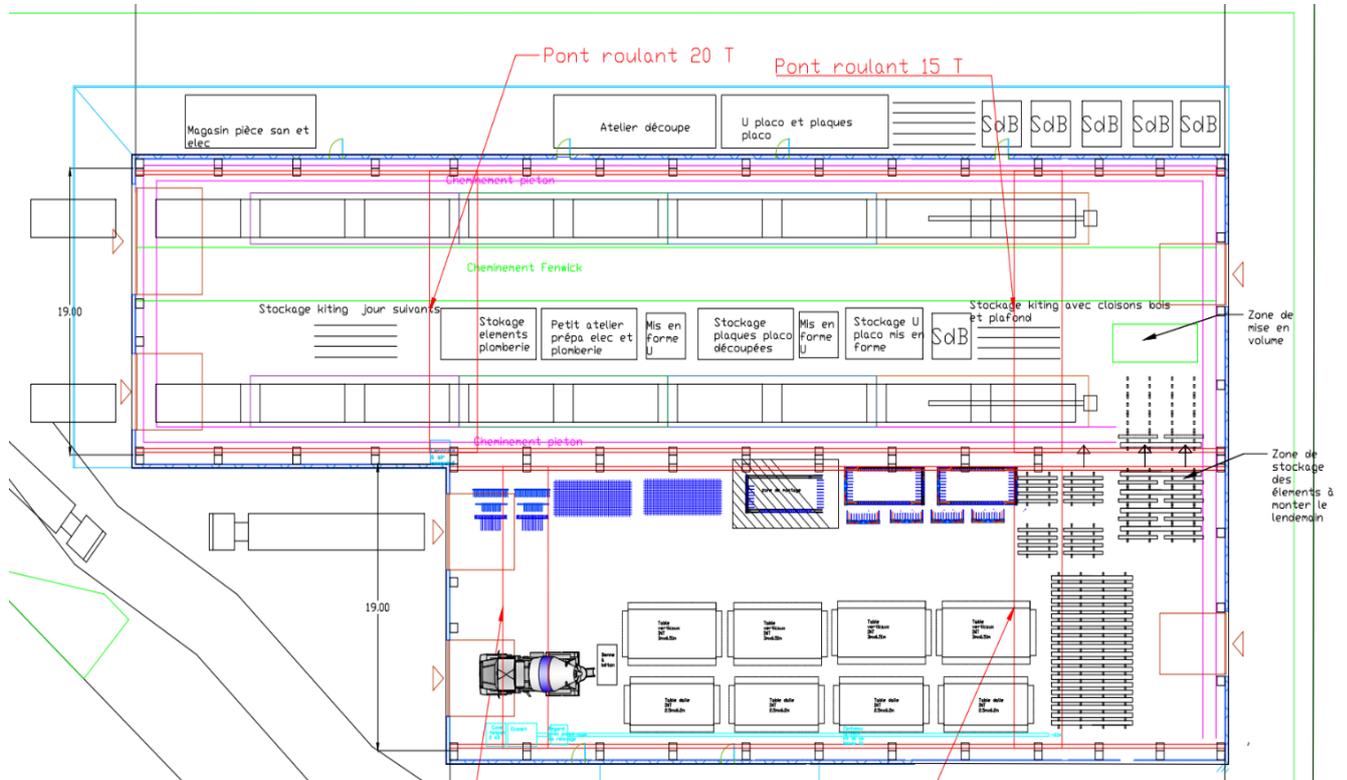


Figure 12 : Plan de la chaîne de fabrication des modules de l'entreprise Alpha M. 3D. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.

Comme nous pouvons le voir, les modules suivent un processus de fabrication à la chaîne. Sur la chaîne de production, correspondant à la partie basse de l'usine, les modules sont dans un premier temps coffrés, ferrailés et coulés via un camion toupie. Par la suite, ils sont déplacés sur la chaîne d'assemblage correspondant à la partie haute de l'usine. Ici, les modules reçoivent les structures métalliques pour le plafond et les panneaux de façades en bois. Prochainement, les murs intérieurs, les revêtements de sol et les éléments de plomberie pourront être assemblés directement hors-site.

Avec un fonctionnement de fabrication à la chaîne, telle une entreprise industrielle, il est possible pour le constructeur hors-site de mieux maîtriser les besoins en énergie comme l'électricité et l'eau. De plus, il est également possible de rationaliser les quantités de matériaux ainsi que le traitement des déchets. Ces caractéristiques écologiques pourront être mises en lumière au moyen des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). Ces fiches « prennent en compte l'ensemble du cycle de vie du produit, de l'extraction des matières premières à sa fin de vie, sans oublier les transports, la mise en œuvre et l'usage même du produit. »³⁴.

Cette caractéristique industrielle, comme nous l'avons expliqué ci-dessus, permet de diminuer l'impact de la contribution « Chantier » de la RE2020. De plus, la démarche de chantier propre est bien meilleure et cela permet également de répondre aux exigences de la future REP bâtiment.

De manière hypothétique, cette rationalisation des matériaux permettrait de diminuer les coûts de construction pour les constructeurs mais aussi pour les maîtres d'ouvrages. En effet, même s'il est aujourd'hui difficile d'affirmer la rente économique, la technique de fabrication-assemblage du hors-site permet des économies indirectes pour les maîtres d'ouvrages et premièrement le gain de temps.

En analysant le planning du projet de construction hors-site et celui construit de manière traditionnelle, nous nous rendons compte du gain de temps pour le maître d'ouvrage lors de la construction d'un bâtiment de 25 logements.

D'après l'étude travaux de l'économiste de la construction de chez Barel et Pelletier ainsi que du planning travaux du maître d'œuvre de l'entreprise Bati.P, le gros œuvre (fondations, coursives, escaliers et modules) du projet hors-site a été réalisé en trois mois et demi. La

³⁴ Site internet INIES.fr – FDES (Produits de construction)

réalisation des fondations, coursives et ascenseur a demandé deux mois de main d'œuvre. Le cycle de production des modules a démarré un mois avant le début des travaux. Pendant trois mois, dont deux en parallèle des travaux de fondations, les 154 modules du bâtiment A ont pu être fabriqués en usine. Enfin la pose des modules s'est effectuée en deux semaines, soit un totale de trois mois et demi pour le lot gros œuvre.

Toujours d'après l'étude travaux de l'économiste de chez Barel et Pelletier, la réalisation du lot gros œuvre (fondations et superstructure) du projet de construction traditionnelle s'élève à cinq mois et 1 semaine.

Nous constatons donc qu'il faut un mois et demi de moins au projet de construction hors-site pour être réalisé. Cela apporte indéniablement des économies sur toute la chaîne de construction. Le temps passé sur le chantier se trouve raccourci, tout comme les risques sécuritaires et les nuisances.

Pour appuyer l'affirmation d'économie via le gain de temps, prenons l'exemple d'un maître d'ouvrage constructeur d'hôtel ou bien d'un bailleur social. D'après le livre « *Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment* », il est possible pour ces maîtres d'ouvrages d'accélérer leurs amortissements via la construction hors-site. Du fait de la réduction de planning, le bâtiment peut être mis en service plus tôt et avoir un impact direct sur les revenus d'exploitation et donc du retour sur investissement du maître d'ouvrage.

« Prenons l'exemple d'un hôtel de 250 chambres qui serait construit en vingt mois en construction traditionnelle. En construction modulaire, on peut espérer réduire les délais de quatre à six mois, en fonction de la complexité [...] et du reste des activités sur site. Six mois de revenus gagnés peuvent faire grimper le taux de rentabilité interne (TRI) de 2% »³⁵.

Bien entendu, le taux de rentabilité pour un bailleur social ne serait être identique à celui d'un constructeur d'hôtel. En revanche, grâce à la réduction de planning, il est également possible pour le bailleur de faire rentrer les premiers mois de locations plus tôt à l'instar de l'hôtelier et donc d'augmenter lui aussi son taux de rentabilité.

³⁵K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, *Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment*, édition Dunod, 2021

Conclusion de la deuxième partie :

A travers cette deuxième grande partie, nous avons pu observer dans un premier temps les avantages de la construction hors-site annoncés de la littérature. Ce mode permet pour les maitres d'ouvrages de bénéficier d'avantages économiques et environnementaux pour répondre aux enjeux à venir et notamment à la RE2020.

Deuxièmement, nous avons analysé au moyen d'une étude de cas, les bénéfices environnementaux et dans une moindre mesure, les bénéfices économiques que la construction hors-site procurent. Nous constatons que la quantité de béton utilisée en hors-site permet une baisse importante des rejets de carbone et donc un meilleur bilan IC construction.

De plus, en analysant le processus de fabrication des modules et les durées de réalisation des lots gros œuvre de chacune des opérations, nous constatons que la contribution « Chantier » du bilan IC construction sera également meilleure. Enfin, sans pouvoir démontrer de manière quantitative, la construction hors-site et son avantage temporel, permet aux maitres d'ouvrages des gains économiques directs et indirects.

Nous allons à présent, au moyen d'une troisième partie, proposer quelques idées et perspectives d'avenir à mettre en œuvre à des échelles différentes, pour rendre la construction hors-site appropriable par les différents maitres d'ouvrages.

**Partie 3.) Le hors-site, une technique de construction
appropriable par les maîtres d'ouvrages ?**

Cette troisième et dernière partie, aura pour but de mettre en lumière les relations du métier de la maîtrise d'ouvrage et de la construction hors-site.

Dans un premier temps, nous analyserons l'impact de la construction hors-site sur le métier de la maîtrise d'ouvrage. Connaissant à présent son fonctionnement et ses différences avec la construction dite traditionnelle, il va de soi que le métier de la maîtrise d'ouvrage connaît des transformations de natures différentes.

Dans un deuxième temps, nous tenterons de proposer quelques leviers d'optimisation au déploiement de la construction hors-site dans le but de rendre ce mode constructif plus appropriable pour les maîtres d'ouvrages. Le levier technique, économique, juridique et politique seront abordés.

Cette partie est construite sur la base de recherches documentaires, d'entretiens réalisés avec des professionnels et de réflexions personnelles à la suite de l'analyse des parties précédentes.

1. Un modèle présentant certains freins qui demande une évolution des compétences

1.1) Une approche projet transformée

La première évolution notable dans le fonctionnement du métier de maître d'ouvrage se trouve être le fonctionnement organisationnel. En effet, étant donné les caractéristiques et le mode de fonctionnement de la construction hors-site, le maître d'ouvrage se retrouve également impacté dans l'organisation de son projet.

Comme nous le verrons dans la partie suivante, pour réussir un projet de construction hors-site il est nécessaire d'impliquer le fabricant très tôt dans le processus de construction. L'enjeu du maître d'ouvrage, en qualité de gestionnaire de projet, est d'intégrer le processus de construction hors-site très tôt dans son projet de construction. Il a la charge d'établir un lien solide et constructif entre les différents intervenants concepteurs du projet. Architecte, bureau de contrôle, fabricant de produits hors-site, maître d'œuvre d'exécution et bureaux d'études sont impliqués dans le processus. L'entreprise de construction n'est plus seulement un simple intervenant qui réalise l'ouvrage, elle est intégrée dans le processus de conception. Cela demande au maître d'ouvrage de définir un prestataire très en amont du projet.

Si le maître d'ouvrage doit inclure un fabricant de produits hors-site très tôt en phase de conception, il doit donc passer des marchés plus tôt qu'en phase traditionnelle. Nous verrons plus loin, que cet élément peut être aussi bien une contrainte qu'un avantage pour le maître d'ouvrage.

Selon le niveau de préfabrication du produit hors-site, le maître d'ouvrages va devoir procéder à des choix très tôt dans son projet. Imaginons qu'un fabricant de produit hors-site réalise des modules 3D intégrant la totalité des corps d'état secondaire. Cela reviendrait donc à décider très tôt du choix de sols, des menuiseries et des implantations des murs. De plus, le projet étant à ce stade en phase de commercialisation, les clients ne pourraient bénéficier de Travaux Modificatif Acquéreur (TMA), qui permet parfois d'être décisif lors d'une vente.

De manière générale, le maître d'ouvrage doit dans un projet de construction hors-site prendre des décisions plus tôt que dans un projet de construction traditionnelle. Cette contrainte peut être perçue comme un frein.

Étant donné les grands changements opérationnels entre la construction traditionnelle et hors-site, il est nécessaire pour le maître d'ouvrage d'apprendre de nouvelles compétences et manières de manager un projet. Comme nous l'avons vu dans la première partie, la construction hors-site a un impact sur l'organisation du monde de la construction. De nouvelles méthodes comme le Lean Management ou le BIM devront être incorporées dans le métier de maître d'ouvrage.

La construction hors-site nécessite une certaine montée en compétences de la part des maîtres d'ouvrages comme le management et le pilotage de projet. Mais c'est également un modèle qui demande une certaine polyvalence.

1.2) Le fonctionnement économique

Comme il a été expliqué dans la première sous-partie, l'intégration d'un fabricant de produit hors-site en amont du projet nécessite une passation de marché également très tôt. Selon le produit mis en œuvre, panneaux 2D, modules structurels ou entièrement équipés, le nombre de lots va grandement varier. Si un produit de construction hors-site peut faire partie du lot gros œuvre, il peut également l'englober dans sa totalité. De plus, si le maître d'ouvrage a recours à un module entièrement préfabriqué et équipé, la totalité des lots du second œuvre peuvent se retrouver unifier.

Ces caractéristiques techniques peuvent donc avoir un impact conséquent sur la passation des marchés de travaux et donc du montant financier réparti entre les différents prestataires. Prenons le cas d'un maître d'ouvrage qui décide de réaliser un projet de construction hors-site mettant en œuvre un module 3D très avancé contenant une quantité de lots secondaires importante.

Du fait de la centralisation des lots travaux, la somme d'argent versée, qui traditionnellement est répartie entre une vingtaine de prestataire est maintenant regroupée chez un seul et même prestataire, le fabricant d'éléments hors-site. De manière générale, il est convenu avec les prestataires des travaux, un certain pourcentage du montant totale du marché afin que ces derniers puissent commander leurs matériaux de construction. On se rend alors compte, que si le fabricant de modules entièrement préfabriqués demande une avance pour la fourniture des matériaux, la somme d'argent versée par le maître d'ouvrage peut être assez conséquente.

De plus, comme nous l'avons vu dans la deuxième partie, afin d'en tirer le plus de bénéfices, la construction hors-site doit être intégrée très tôt en phase conception et plus la fabrication des éléments se fait en amont, plus les gains de temps seront grand. On comprend donc que le maître d'ouvrage doit non seulement verser une somme d'argent plus importante du fait de la réduction de l'allotissement, mais également déboursier de l'argent plus tôt dans son projet de construction.

Financièrement, cela demande au maître d'ouvrage une gestion économique de son projet différente comparée à un projet de construction classique. Les fonds propres engagés par le maître d'ouvrage ou l'obtention du crédit auprès de la banque sera également modifié.

Cet élément peut être considéré comme un frein au déploiement de la construction hors-site.

En revanche, cette modification du comportement économique des projets de construction peut se révéler être un avantage selon les circonstances du marché.

Aux vues de la situation actuelle du marché de la construction (Covid-19, guerre en Ukraine), nous constatons que les prix des marchés de travaux ont fortement augmenté. La passation d'un marché de travaux en amont du projet auprès d'un prestataire de construction hors-site, permet de sécuriser le projet de construction. En signant un marché global auprès d'un fabricant de modules 3D entièrement préfabriqué par exemple, le maître d'ouvrage est moins sujet aux variations économiques du marché de la construction.

1.3) Un modèle nécessitant une certaine polyvalence

La construction hors-site modifie les habitudes de travail des maîtres d'ouvrages. Comme nous l'avons vu à maintes reprises, la construction hors-site nécessite une approche globale et détermine de nombreux choix très tôt en phase conception. L'intégration d'un fabricant de produit hors-site en amont de projet engendre un impact organisationnel, économique mais aussi technique.

Afin d'appréhender au mieux ces différents impacts, le métier de maître d'ouvrage doit acquérir une certaine polyvalence pour gérer au mieux les projets de construction hors-site. Certaines entreprises de promoteur privé ou public ont tendance à sectoriser leurs activités pour une meilleure gestion de leurs projets. Ainsi, on retrouve parfois un service développement, programmation et technique au sein de la même entreprise pour développer un même projet. Cette sectorisation a comme conséquence de faire baisser la polyvalence du métier de maître d'ouvrage. Or, de par ces caractéristiques, les projets de construction hors-site nécessitent une réflexion et une approche globale.

Etant donné la nature numérique de la construction hors-site, l'utilisation et la compréhension des outils numériques comme la maquette 3D semble être une évolution importante dans le métier de maître d'ouvrage. Une grande quantité d'informations transite via cette plateforme et il semble donc nécessaire pour le maître d'ouvrage d'acquérir ces compétences numériques.

2. Les leviers à mettre en œuvre pour la démocratisation du hors-site

Après avoir analysé l'impact de la construction hors-site sur les métiers de la maîtrise d'ouvrage, nous allons, à travers cette deuxième sous-partie, tenter d'apporter des éléments de réponse pour rendre la technique de construction hors-site appropriable par les maîtres d'ouvrages.

Beaucoup d'éléments de réponse peuvent être apportés afin de rendre le hors-site appropriable, c'est pour cela que nous nous concentrerons sur les leviers techniques, financiers et juridiques. Ces trois leviers semblent les plus pertinents à étudier aux vues de l'impact des compétences sur les métiers de la maîtrise d'ouvrage.

Les éléments de réponse apportés sont basés sur des entretiens auprès de professionnels de la construction hors-site et également via la recherche documentaire pour révéler, au plus juste, les leviers qu'il est possible de mettre en œuvre.

1.1) Levier technique

Le facteur technique est une des problématiques à la mise en œuvre de la construction hors-site. Premièrement, étant donné que ce système de construction est en évolution et fait appel à des produits très récents, le manque d'expérience et de pratique reste important. Selon l'article « Construction hors-site : un procédé encore mal maîtrisé » rédigé par Claire Lemonnier fin 2021, qui sonde des maîtres d'ouvrages ayant mis en œuvre des éléments hors-site, le « Principal frein évoqué par les sondés : des problèmes de collaboration et de coordination entre les différents acteurs, relevés par 58 % des professionnels ayant travaillé sur un projet hors-site. »³⁶.

Ce manque de collaboration et de coordination entre les différents acteurs s'explique en grande partie par la forme atypique que prennent la conception et la réalisation de projet. Tous les intervenants en sont impactés, à commencer par l'architecte.

³⁶ C., LEMONNIER, *Construction hors-site : un procédé encore mal maîtrisé*, Vie des sociétés, batiweb, 2021

D'après les auteurs du livre « Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment », « Les architectes opposent en France de fortes résistances à l'adoption de la construction hors-site, et les raisons invoquées sont multiples : architecture laide, empilement de cubes, démarche trop industrielle manquant d'expression artistiques, etc. »³⁷. Quand on connaît le rôle fondamental de l'architecte dans le processus de fabrication d'un bâtiment, et notamment son pouvoir de déposer les permis de construire, on comprend aisément la difficulté d'intégration du hors-site.

Afin de faciliter la collaboration entre les architectes et les maitres d'ouvrages désireux de mettre en œuvre des projets de construction hors-site, les auteurs préconisent « un changement de comportement et une évolution dans les compétences demandées [...] La formation continue des architectes sur les nouveaux modes constructifs et les technologies émergentes (BIM, DfMA, PLM...) paraît indispensable. Des cursus comme celui du diplôme « architecte-ingénieur » peuvent offrir une solution pertinente. »³⁸.

Pour synthétiser, l'appropriation de la construction hors-site par les architectes et notamment par de nouvelles formations plus adaptées aux enjeux d'aujourd'hui, permettrait également de rendre le hors-site plus appropriable pour les maitres d'ouvrages. Cela leur permettrait de s'engager à côté d'un intervenant de confiance et mieux expérimenter dans un projet de construction hors-site.

Deuxièmement, toujours d'un point de vue technique, le développement du BIM et des outils comme la maquette numérique semble être un facteur important dans l'appropriation du hors-site par les maitres d'ouvrages.

Afin de connaître l'importance de ce facteur, il a semblé pertinent d'interroger un chargé d'étude de l'entreprise Alpha M. 3D spécialisé dans la réalisation de maquettes numériques et diplômé d'une école d'ingénieur en parcours BIM.

D'après lui, plusieurs points sont à prendre en considération pour faciliter l'intégration du hors-site dans les projets de construction :

³⁷ K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, *Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment*, édition Dunod, 2021

³⁸ Idem

Premièrement, la maquette numérique permet une meilleure facilité de gestion et d'entretien des ouvrages. Il est possible de connaître précisément les différents composants du bâtiment comme les réseaux fluides. L'exemple souvent mis en avant est celui de la fuite d'eau qu'il est facilement possible de réparer quand on connaît son emplacement exact grâce à la maquette.

La construction hors-site est le mode constructif où les outils numériques prennent tous leurs sens et permettent d'être exploités à leurs pleins potentiels. En effet, contrairement aux bâtiments traditionnels, la construction en usine permet une plus grande précision et l'implantation des réseaux peut être respectée à la lettre. Grâce à cette précision, les techniciens ont donc la capacité d'intervenir efficacement et de résoudre les différentes problématiques de gestion d'ouvrages. De plus, selon le niveau de préfabrication, les éléments endommagés ou vétuste peuvent facilement être remplacés.

L'association du BIM et du hors-site est selon lui un procédé de fabrication qui permet aux maîtres d'ouvrages une meilleure gestion de l'exploitation et de la maintenance de leurs ouvrages. Cela permettrait, entre autres, aux bailleurs sociaux de gérer plus efficacement leurs ouvrages et ainsi augmenter leurs rentabilités. Cet élément est également pertinent pour les hôteliers par exemple.

Deuxièmement, comme nous l'avons vu dans la première partie, le BIM est un outil de collaboration et de travail qui permet une meilleure gestion de projet. Cet outil est essentiel dans la mise en œuvre de la construction hors-site afin d'anticiper et de prévoir les éventuels problématiques du projet.

Etant donné que le BIM est un outil indispensable à la mise en œuvre du hors-site et qu'il permet une meilleure gestion des ouvrages, il paraîtrait pertinent pour les maîtres d'ouvrages de s'approprier les outils numériques comme les maquettes 3D et le BIM afin de faciliter la compréhension et le maniement de la construction hors-site. Cela leur permettrait de mieux se saisir des méthodes de production hors-site et, par la même occasion, de faciliter l'exploitation et la maintenance des bâtiments. En comprenant le fonctionnement du BIM, sachant qu'il est encore plus efficace couplé au hors-site, cela les inciterait à le mettre en œuvre pour en tirer avantage.

1.2) Levier économique

Le levier économique est un des leviers qui semble primordial pour rendre la construction hors-site appropriable par les maîtres d'ouvrages. En effet, si les maîtres d'ouvrages venaient à se rendre compte des bénéfices qu'il est possible de tirer du hors-site, nul doute que nombreux de ces derniers viendraient à le mettre en œuvre dans leurs opérations de construction.

S'il est pour l'instant impossible de montrer que les coûts de construction diminuent en utilisant la construction hors-site, via les réponses d'appels d'offres et les marchés de travaux signés, il est en revanche possible grâce à la mise en place du calcul en coût global de faire ressortir les bénéfices économiques de la construction hors-site.

« Les coûts de conception sont usuellement rapportés aux seules dépenses d'investissement initial dont ils constituent entre 8 et 15%. Le contrôle technique ne représente que 1% de ce même total. La répartition des coûts entre conception, réalisation et exploitation sur la durée de vie d'un bâtiment démontre en revanche que : l'exploitation représente 75% du total. »³⁹

Comme nous pouvons le constater d'après un guide du ministère de l'économie de l'industrie et de l'emploi rédigé en 2010, l'exploitation représente à elle seule, 75% des coûts totaux sur la vie du bâtiment.

Sachant qu'avec la construction hors-site, il est possible d'obtenir une meilleure qualité de construction grâce à la fabrication en usine, nous pourrions émettre l'hypothèse que la qualité de vie des bâtiments serait meilleure. De plus, comme nous l'avons vu dans le levier technique, le hors-site couplé au BIM permet une meilleure exploitation/maintenance des bâtiments.

Toujours d'après le guide du ministère de l'économie de l'industrie et de l'emploi, le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM) « propose en accès libre un logiciel de calcul en coût global spécialement destiné aux acheteurs publics s'inscrivant dans le cadre du code des marchés publics. »⁴⁰

³⁹ Observatoire économique de l'achat public, *Guide relatif à la prise en compte du coût global dans les marchés publics de maîtrise d'œuvre et de travaux*, 2010

⁴⁰ Idem

Sur la même base, le levier à mettre en place serait de proposer aux maîtres d'ouvrages en charge de l'exploitation de leurs constructions (bailleurs, collectivités territoriales, hôteliers, etc.), un logiciel ou une solution numérique sous la forme d'un moteur de calcul en coût global pour leur révéler les bénéfices économiques en mettant en œuvre le hors-site dans leurs opérations. Cette solution effectuerait des calculs entre les différentes techniques et éléments de construction mis en œuvre afin de faire sortir les coûts cachés des opérations de construction.

On trouverait des informations telles que les économies réalisées, les délais de construction, le taux de diminution des réserves par logements/bâtiments, la maquette 3D de l'ouvrage en vue de sa maintenance mais aussi, l'impact environnementale du projet. Si l'on peut affirmer, à la suite de la deuxième partie, que la construction hors-site bénéficie d'avantages conséquents pour répondre aux enjeux de la RE2020, le logiciel pourrait mettre en avant les gains environnementaux qu'il est possible de tirer en mettant en œuvre des éléments hors-site.

Étant donné les économies et les gains environnementaux, cette solution permettrait aux maîtres d'ouvrages de se tourner plus facilement vers le hors-site et donc de rendre cette technique de construction plus appropriable.

1.3) Levier Juridique

Contrairement à la construction traditionnelle qui dissocie les marchés de maîtrise d'œuvre et les marchés de travaux, la construction hors-site est un processus de fabrication-assemblage qui nécessite d'être établie et conçue de manière globale par les différents acteurs très tôt en amont du projet. Le découpage en phases des différentes procédures de passation de marché par exemple tend à neutraliser les avantages de la construction hors-site comme sa rapidité de construction. Plus le fabricant d'éléments hors-site est intégré tôt dans le projet, plus la chaîne de production sera efficace, et cela lui permettra une meilleure visibilité.

Si cela n'est pas un problème dans le domaine des marchés privés, le monde de la commande publique est quant à lui fortement impacté par cette contrainte. C'est pourquoi, une importante quantité de maîtres d'ouvrages sont contraints de devoir appliquer la loi Maitrise d'Ouvrage Public (MOP) dans leurs opérations de construction. Cette loi établit le principe de dissociation entre la maîtrise d'œuvre et l'entrepreneur en charge de la réalisation d'un ouvrage. Synthétiquement, les maîtres d'ouvrages publics ne peuvent faire appel à un prestataire global pour leurs projets de construction. Or, le constructeur de bâtiments hors-site vend souvent une prestation complète d'ingénierie et de composants, ce qui rend difficilement dissociable la phase conception et réalisation.

Selon l'article L2171-2 du Code de la commande publique, « Le marché de conception-réalisation est un marché de travaux permettant à l'acheteur de confier à un opérateur économique une mission portant à la fois sur l'établissement des études et l'exécution des travaux. »⁴¹. Toutefois, les maîtres d'ouvrages publics « ne peuvent conclure un marché de conception-réalisation, quel qu'en soit le montant, que si des motifs d'ordre technique ou un engagement contractuel portant sur l'amélioration de l'efficacité énergétique ou la construction d'un bâtiment neuf dépassant la réglementation thermique en vigueur rendent nécessaire l'association de l'entrepreneur aux études de l'ouvrage.⁴²

D'après le Code de la commande publique, il est effectivement possible de lier les études et l'exécution en passant par le marché de conception réalisation. En revanche, ce marché ne peut s'appliquer que dans le cas où des motifs d'ordre technique ou d'amélioration énergétique sont

⁴¹ Article L2171-2 du Code de la commande publique

⁴² Idem

demandés. Il semblerait que la jurisprudence qui donne l'accès à l'utilisation du motif technique pour appliquer la construction hors-site est stricte et donc peu avantageux.

Dernièrement, l'article L2171-2 mentionne également que les conditions d'accès au marché de conception réalisation ne sont pas applicables pour « la réalisation de logements locatifs aidés par l'Etat financés avec le concours des aides publiques mentionnées au 1° de l'article L. 301-2 du code de la construction et de l'habitation, lorsqu'ils sont conclus par les organismes d'habitations à loyer modéré mentionnés à l'article L. 411-2 du même code et les sociétés d'économie mixte de construction et de gestion de logements sociaux. »⁴³.

Concrètement, le marché de conception réalisation qui permet le déploiement du hors-site dans le monde de la maîtrise d'ouvrage publique reste très difficile à mettre en œuvre. Si une partie de la maîtrise d'ouvrage peut y accéder sous conditions, il semblerait que les organismes HLM et les sociétés d'économie mixte en soit exclus.

D'après les auteurs du ministère chargé du logement, le levier juridique à mettre en œuvre afin de rendre la construction hors-site appropriable pour les maîtres d'ouvrages publics, serait de « Réviser la loi MOP en étendant les critères de dérogation pour passer un contrat de conception-réalisation au recours à un processus de construction industrialisée dont au moins 90% de la production (en valeur) a été réalisée dans un site de production en France. »⁴⁴. Cette révision juridique du Code de la commande publique de 1985 permettrait une meilleure intégration des nouveaux modes de construction actuels et donc de la construction hors-site.

⁴³ Article L2171-2 du Code de la commande publique

⁴⁴ B., MICHEL et R., RIVATON, L'industrialisation de la construction, Rapport du ministère chargé du logement, 2021

1.4) Levier politique

Le foncier est l'élément central à la création de valeur pour les maitres d'ouvrages. Or, on sait aujourd'hui que l'objectif du gouvernement, par le biais de la loi Zéro Artificialisation Nette (ZAN), est la réduction du foncier constructible. La loi ZAN « demande d'abord aux territoires de baisser de 50%, d'ici à la fin de la décennie, le rythme d'artificialisation et de consommation des espaces naturels, agricoles et forestiers. La zéro artificialisation nette devra être atteinte d'ici 2050. »⁴⁵.

Pour comprendre l'impact de la loi ZAN sur le déploiement de la construction hors-site, il faut interroger un assistant à maitre d'ouvrage, et responsable de programme immobilier de l'entreprise La Cascade basée sur Mery.

D'après lui, les objectifs gouvernementaux en termes d'artificialisation vont profondément transformer nos manières de construire et de concevoir les ouvrages de demain. Etant donné la volonté de re densification et donc de diminution de l'étalement urbain, les maitres d'ouvrages vont devoir reconstruire la ville sur la ville.

Les surélévations, les agrandissements et les démolitions-reconstructions de bâtiments vétustes vont connaître un accroissement important dans le marché de la construction. Sachant cela, les avantages de la construction hors-site tels que la délocalisation du chantier hors-site, la réduction des nuisances, et l'évolutivité, réversibilité, vont devenir encore plus bénéfiques en zone dense pour les maitres d'ouvrages.

Le levier politique à mettre en place pour le déploiement du hors-site, serait l'imposition d'un cahier des charges venant des collectivités territoriales à destination des maitres d'ouvrages, pour qu'ils utilisent une part importante d'éléments préfabriqués dans leurs opérations en zone dense. Ce cahier des charges aurait comme exigences, des seuils de nuisances à ne pas dépasser, des avantages économiques sur les taxes selon le temps passé sur site.

Un tel outil faciliterait la mise en œuvre de la construction hors-site, et permettrait aux différents acteurs extérieurs (collectivités, habitants) de se rendre compte des bénéfices de la construction hors-site à l'échelle sociale et environnementale.

⁴⁵ *Publication : comprendre la notion de « zéro artificialisation nette », Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine, 2021*

Conclusion de la troisième partie :

Au cours de cette troisième partie, nous nous sommes intéressés à l'appropriation de la construction hors-site par les maîtres d'ouvrages.

Nous avons vu dans un premier temps, que ce mode de construction a un impact direct sur le métier du maître d'ouvrage et qu'il demande une modification des habitudes de travail et incite à une plus grande polyvalence de leur part. Cette évolution des compétences peut apparaître comme un frein au déploiement du hors-site.

Dans un deuxième temps, nous avons mis en lumière différents leviers qui ont la possibilité de faciliter le déploiement du hors-site et de rendre la construction hors-site plus appropriable pour les maîtres d'ouvrages. Certains de ces leviers comme le technique ou l'économique semblent être réalisables de la part des acteurs du bâtiment. En revanche, du côté du levier juridique et politique, c'est entre les mains du gouvernement et des collectivités territoriales que le déploiement de la construction hors-site repose.

A travers cette partie, nous réalisons que la construction hors-site fait face à de nombreux freins de nature différente et que de nombreuses évolutions sont à entreprendre pour faciliter son appropriation auprès des maîtres d'ouvrages.

Conclusion

Pour répondre à la problématique travaillée durant ce projet, nous avons vu dans un premier temps que la nouvelle réglementation énergétique du bâtiment est un changement de paradigme sans précédent dans le monde de la construction. De par ses nombreuses exigences, avec notamment l'analyse en cycle de vie pour limiter les émissions carbone, et sa méthode de calcul novatrice, cette réglementation demande aux constructeurs et maîtres d'ouvrage de redéfinir les codes de la construction. Les bâtiments d'hier conformes à la RT2012 ne seront plus réglementaires aujourd'hui. C'est pour cela que les techniques de construction ainsi que les matériaux mis en œuvre se doivent d'évoluer.

Nous avons ensuite présenté le mode de construction hors-site sous ses différentes formes afin de faire le lien avec les exigences de la RE2020. Nous avons pu constater qu'il existe une multitude de produits de construction hors-site, certains déjà abondamment mis en œuvre et d'autres très peu employés. Ce mode de construction nécessite d'être couplé aux outils numériques afin d'en tirer les meilleurs avantages. Enfin, la construction hors-site modifie les habitudes et les méthodes de travail habituelles. La fabrication-assemblage, le raisonnement industriel par produit et le numérique demandent une évolution du monde de la construction.

Mon choix d'étude s'est porté sur la construction hors-site car outre le fait d'avoir des avantages indéniables pour répondre à la RE2020, c'est aussi un mode de construction répondant aux défis sociétaux actuels et futurs.

A travers la littérature des professionnels de la construction hors-site, nous avons mis en lumière les bénéfices économiques, environnementaux, sociétaux et qualitatifs qu'il est possible de tirer de la construction hors-site. De prime abord, ce mode constructif bénéficie de nombreux avantages pour répondre à la RE2020 et aux défis sociétaux de la construction.

Pour affirmer les avantages de la construction hors-site, et plus précisément des avantages environnementaux, nous avons démontré à travers une étude de cas qu'un bâtiment réalisé en modules 3D demandait beaucoup moins de béton qu'un bâtiment traditionnel. Étant donné le caractère « émetteur » de CO₂ du béton, ce matériau est un des premiers à réduire afin d'atteindre les exigences de la RE2020. Dans un deuxième temps, nous avons montré via cette étude que la construction hors-site peut en effet diminuer les délais de construction et qu'en

délocalisant la fabrication en usine, il est hypothétiquement possible de réduire les déchets et les coûts.

Cette étude de cas nous aura permis d'affirmer qu'il est possible grâce à la construction hors-site de répondre aux exigences de la RE2020 et tout particulièrement à l'IC construction grâce à la faible quantité de béton mis en œuvre à travers le produit de construction utilisé.

Pour rappel, cette étude est basée sur un module 3D béton et n'est donc pas généralisable à l'ensemble de la construction hors-site.

Après avoir analysé techniquement la construction hors-site, nous nous sommes ensuite penchés sur l'intégration de la construction hors-site auprès du métier de la maîtrise d'ouvrage. Nous avons relevé que ce mode constructif avait plusieurs impacts sur le maître d'ouvrage notamment sur la gestion de projet et son fonctionnement économique.

Etant donné le caractère novateur de la construction hors-site et sa faible utilisation, nous sommes partis à la recherche de leviers pour rendre ce mode constructif appropriable par les maîtres d'ouvrage. Nous avons relevé quatre points d'amélioration, qu'il semble pertinent de mettre en lumière et de travailler pour faciliter le déploiement de la construction hors-site.

A la suite de cette partie orientée vers le métier de maître d'ouvrage, nous observons que l'intégration de la construction hors-site dans les projets de construction n'est pas chose aisée. Le déploiement de la construction hors-site fait face à de nombreux freins externes comme les réglementations mais aussi internes comme la transformation des méthodes de travail.

Pour rappel, la question soulevée est la suivante : *L'industrialisation du bâtiment par les systèmes constructifs hors-site : un procédé pérenne et appropriable en tant que maître d'ouvrage afin de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020 ?*

Nous pouvons affirmer que la construction hors-site est un procédé de construction pérenne qui permet aux maîtres d'ouvrage de répondre aux enjeux de la nouvelle réglementation énergétique 2020. En revanche, cette affirmation a été démontrée via un unique produit de construction hors-site. Nous pouvons cependant émettre l'hypothèse que la plupart des procédés de construction 3D et 2D suivant un processus industrialisé et faisant appel à la mixité des matériaux sont également propices à répondre à cette réglementation. Les différents éléments de littérature cités lors de ce projet n'étaient pas centrés sur un produit en particulier.

En revanche, sur la question de l'appropriation, nous pouvons observer que la construction hors-site n'est pas un mode de construction facilement appropriable par les maîtres d'ouvrage.

Ces derniers font face à de nombreux freins qui sont pour certains très difficile à faire évoluer, comme la révision de la loi MOP par exemple. L'évolution des compétences et des connaissances peut aussi être perçue comme frein à son déploiement.

Pour répondre à la problématique, la construction hors-site n'est pas un mode de construction facilement appropriable de la part des maîtres d'ouvrage car il nécessite de grands changements dans la manière de concevoir et de réaliser un projet.

Le hors-site est un modèle de construction qui dépasse le simple cadre du bâtiment. A travers ce projet de fin d'étude, nous constatons que certains enjeux sociétaux comme le management et l'environnement sont également concernés. Au-delà du cadre réglementaire, la construction hors-site du vingt-et-unième siècle est un reflet de notre société numérique, évolutive et coïncide avec la société actuelle.

Comme l'explique le sociologue Sygmunt Bauman, « Nos sociétés ne sont plus entourées de coque épaisse, qui correspondaient à la phase solide de la modernité, à la construction de la nation, à « l'enracinement et à la fortification du principe de souveraineté, exclusive et indivisible », à l'imperméabilité des frontières, aux grandes entreprises dans lesquelles on travaillait toute sa vie. Notre époque « à extériorité molle » est celle de la modernité liquide, « changeante et kaléidoscopique », du multiculturalisme et du brassage des populations, de la « dévaluation irrépressible » des distances spatiales, de l'interconnexion, des startups et du free-lance. »⁴⁶.

Notre société dite liquide, est une société caractérisée par le mouvement perpétuel et les flux de population. L'évolution de la société connaît des changements extrêmement rapides et l'incertitude est un nouvel élément à prendre en compte. Le covid, la guerre et les migrations territoriales le montrent.

La force de la construction hors-site est d'être plus résiliente, moins consommatrice et bien plus modulable. Elle permet de s'implanter moins lourdement dans un espace et d'être facilement déplaçable si ses caractéristiques le lui permettent. Eric Aurenche, président de l'Association des Constructions Industrialisées et Modulaires (ACIM), évoque même que dans la stratégie

⁴⁶ G., HANNOUN, *Agile, Économique, Réversible : la construction Hors site, une technique en lien avec son époque*, Construction21, 2020

d'économie circulaire, « De plus en plus d'opérateurs publics ou privés prévoient d'ores et déjà des clauses de rachat et de réemploi au bout de plusieurs années, voir des bâtiments d'occasion. »⁴⁷. Cette citation nous montre qu'il sera éventuellement possible d'acheter des bâtiments d'occasion en réutilisant les produits de construction hors-site. Cette pratique irait donc au-delà de la RE2020 et bénéficierait de rejets carbonés proches de zéro.

La question que je me pose aujourd'hui est dans quelle mesure et à quelle vitesse la construction hors-site va être déployée dans le monde de la construction afin de répondre aux défis sociétaux actuels et à venir.

Une seconde question se pose sur le déploiement de la construction hors-site à l'échelle nationale. En laissant de côté l'échelle du bâtiment, est-ce que la construction hors-site serait un modèle durable face à son accroissement en France ? La démocratisation et l'utilisation massive de ce mode constructif engendre de grand changement dans le monde de la ressource humaine, de l'industrie et du numérique.

Ce déploiement pourrait notamment provoquer une réindustrialisation massive de la France en créant de nombreuses usines de construction de produits hors-site. Ces créations d'usines soulèveraient à leurs tours de nombreuses interrogations en terme environnementale, humain et même politique. Si les futurs usines de produits hors-site se calques sur les mêmes méthodes d'approvisionnements que les industriels actuels, la rationalisation des coûts pourrait pousser les fabricants à s'approvisionner au meilleur prix en important des matériaux de constructions. Cette pratique irait dans le sens inverse de l'économie circulaire et locale qui commence à s'imposer dans la construction.

Pour conclure, la construction hors-site est un mode de construction prometteur afin de répondre aux enjeux actuels et à venir. Toutefois, il faut prendre en compte les nombreux freins et changements que sa mise en œuvre impose.

⁴⁷ O., VILLENEUVE, *Par leur nature même, les constructions industrialisées et modulaires sont durables* - L'édito de Eric Aurenche, Construction 21, 2020

Bibliographie

Ouvrages littéraires :

B., MICHEL et R., RIVATON, *L'industrialisation de la construction*, Rapport du ministère chargé du logement, 2021

N., CABASSUD, *Guide re2020*, Ministère de la transition écologique

Guide du Ministère de la transition écologique, *RE2020 Eco-construire pour le confort de tous*, 2021

K., BEDDIAR et E., WOODS et C., GRELLIER, *Réinventer le bâtiment grâce au numérique : BIM, Dfma, Lean Management...*, édition Dunod, 2021

K., BEDDIAR et A., CLERAUX et P., CHAZAL, *Construction hors-site Dfma, modulaire, BIM : l'industrialisation du bâtiment*, édition Dunod, 2021

Articles scientifiques en ligne :

Programme des Nations unies pour l'environnement – Site internet

P., MARRAS, *RE2020, nouveaux usages, économie : le hors-site et le modulaire, tremplins pour la construction de demain ?* Construction21, 2020

G., HANNOUN, *Agile, Économique, Réversible : la construction Hors site, une technique en lien avec son époque*, Construction21, 2020

C., LEMONNIER, *Construction hors-site : un procédé encore mal maîtrisé*, Vie des sociétés, batiweb, 2021

Observatoire économique de l'achat public, *Guide relatif à la prise en compte du coût global dans les marchés publics de maîtrise d'œuvre et de travaux*, 2010

F., JOSSE, *RE2020 : le hors-site peut-il répondre aux enjeux ?* Hors site Campus, 2021

A., MARECHAUX, *Les bâtiments réversibles et évolutifs, l'avenir du secteur de la construction*, Construction21, 2019

Article L541-10 du Code de l'Environnement - www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000041599099/

Sinistralité au travail en France : une évolution différenciée entre les femmes et les hommes entre 2001 et 2019 publié en mars 2022 - www.anact.fr

Quel lien entre pénuries de main-d'œuvre et chômage en France et en Europe ? – Note de conjoncture – INSEE (téléchargement du PDF via le navigateur)

Les conditions de logement en France, édition 2017 - INSEE Références (téléchargement du PDF via le navigateur)

Site internet INIES.fr – FDES (Produits de construction) - www.inies.fr/inies-et-ses-donnees/fdes-produits-de-construction/

Article L2171-2 du Code de la commande publique - www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000037703689/

Agence d'urbanisme et d'aménagement Toulouse aire métropolitaine, *Publication : comprendre la notion de « zéro artificialisation nette »*, 2021 - www.aua-toulouse.org/publication-comprendre-la-notion-de-zero-artificialisation-nette/

O., VILLENEUVE, *Par leur nature même, les constructions industrialisées et modulaires sont durables - L'édito de Eric Aurenche*, Construction 21, 2020

Articles de presse en ligne :

HUET Sylvestre, article de « *Le Monde* », 2019 - www.lemonde.fr/blog/huet/2019/12/04/368-gigatonnes-de-co2-emis-en-2019/

LACAZE Diane, article de « *BFM IMMO* », 2021 - www.bfmtv.com/immobilier/construction/le-secteur-du-batiment-n-a-jamais-autant-emis-de-co2-dans-le-monde_AN-202101010245.html

Le bâtiment, le secteur à la plus forte empreinte carbone - www.batimentbascarbonate.org/carbone-batiment/

Site internet eRT2012 – Le Besoin Bioclimatique (Bbio) - www.e-rt2012.fr/explications/conception/definition-bbio-rt-2012

Article de Chloé Devis publié le 17 décembre 2020 –

www.preventionbtp.fr/actualites/Accidents/moins-d-accidents-mais-plus-de-deces-dans-le-btp-en-2019_9Coaa6t9uMnzeGboVKHF6Q

Entretiens réalisés :

Entretien avec un ingénieur fluide du bureau d'étude Befluid

Entretien avec un chargé d'étude conception modulaire, BIM de l'entreprise Alpha M.3D

Entretien avec un responsable de programme immobilier et assistant à maîtrise d'ouvrage de l'entreprise La Cascade

Outils mis en œuvre pour la réalisation de l'étude de cas

Décomposition du Prix Global et Forfaitaire (DPGF) du bâtiment de 25 logements réalisé pour le compte du maître d'ouvrage Savoisienn Habitat.

Décomposition du Prix Global et Forfaitaire (DPGF) du bâtiment de 25 logements réalisé pour le compte du maître d'ouvrage Groupe Pelletier.

Planning travaux de l'opération Constellia réalisé par l'entreprise de maîtrise d'œuvre Bati. P.

Entretien réalisé avec l'économiste de la construction en charge de la réalisation des DPGF des deux bâtiments de logements

Entretien réalisé avec le chargé d'opération de l'entreprise Alpha M. 3D en charge de la conception des modules mis en œuvre dans le projet de construction hors-site

Les figures présentées à travers l'étude de cas ont été extraites du centre de documentation du Groupe Pelletier

Table des figures

Figure 1 : Tableau des six indicateurs pris en compte dans la RE2020. Extrait du guide RE2020 du ministère de la transition écologique.....	20
Figure 2 : Schéma des différentes composantes prise en compte par la RE2020 pour le calcul de l'impact environnemental. Extrait du guide RE2020 du ministère de la transition écologique.....	21
Figure 3 : Photo de panneaux en ossature bois. Source : Lesage Construction Bois, site internet.....	26
Figure 4 : Élément 2D métallique pour la construction d'un bâtiment industriel. Source : Innovant Magazine, site internet.....	27
Figure 5 : Panneau de façade préfabriquée de l'industriel Elmère. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.....	28
Figure 6 : Exemple d'un Pods de salle de bains fabriqué en usine. Source : Habita Nova, site internet.....	29
Figure 7 : Modules de construction hors-site de l'entreprise Alpha M. 3D. Source : Photo prise par Theo JEANTILS.....	31
Figure 8 : Modélisation 3D d'un bâtiment de bureau via le logiciel BIMcollab ZOOM. Source : Fichier importé depuis la plateforme BIM data.....	32
Figure 9 : Plan de masse et de situation de l'opération Constellia. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.....	48
Figure 10 : Schéma d'un module de l'entreprise Alpha M.3D. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.....	49
Figure 11 : Plan 3D du découpage du lot gros œuvre du bâtiment A de l'opération Constellia. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.....	50
Figure 12 : Plan de la chaîne de fabrication des modules de l'entreprise Alpha M. 3D. Source : Centre de documentation du Groupe Pelletier.....	53