
Mémoire de fin d'études : "Comment augmenter la diversité dans la construction préfabriquée en bois en conservant un haut degré d'industrialisation ?"

Auteur : Steffens, Samuel

Promoteur(s) : Schmitz, Dimitri

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2020-2021

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/11821>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FACULTÉ D'ARCHITECTURE

Comment augmenter la diversité dans la construction préfabriquée en bois en conservant un haut degré d'industrialisation ?

Travail de fin d'études présenté par Samuel STEFFENS en vue de l'obtention du grade de
Master en Architecture

Sous la direction de : Dimitri SCHMITZ

Année académique 2020-2021

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement de mon parcours universitaire, je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce cheminement.

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur, Monsieur Dimitri Schmitz, pour sa disponibilité, le temps qu'il m'a consacré, ses précieux conseils et son aide dans les décisions à prendre concernant les hypothèses relatives à l'étude menée dans l'élaboration de ce travail.

Je remercie également les membres du jury, le Professeur Monsieur François Laurent et Monsieur Olivier Louis directeur général de Naturhome d'avoir accepté de juger la qualité de mon travail.

J'aimerais remercier Monsieur Charles Poplavsky, architecte, pour le temps qu'il a accepté de m'accorder pour répondre à mes questions.

Mes parents et mes proches pour leur soutien sans faille tout au long de mes études et pour la relecture de ce travail.

Finalement, je remercie l'ensemble du corps enseignant de l'Université de Liège qui m'a permis d'acquérir et de développer les outils nécessaires à la réalisation de mon travail de fin d'études et à mon épanouissement dans le domaine de la construction.

Table des matières

Introduction	1
1. Etat de l'art	3
1.1. Prémices	3
1.2. Avis des habitants d'une cité-jardin	8
1.3. Etude sociologique sur l'habitation individuelle	9
2. Méthodologie	12
3. Diversité	14
3.1. Prémices	14
3.2. Diversité au sein des logements	15
3.3. Diversité de l'habitat	16
3.4. Diversité urbaine	18
3.5. Intérêts et contraintes de la diversité	19
4. Industrialisation	21
4.1. Notions de l'industrialisation	21
4.1.1. Prémices	21
4.1.2. Typologie et Chronologie	22
4.2. Standardisation	23
4.2.1. Notions de la standardisation	23
4.3. Optimisation du flux de production	24
4.3.1. Notions de l'optimisation du flux de production	24
4.3.2. Variété de production optimisée	27
4.4. Préfabrication	29
4.4.1. Notions de la préfabrication	29
4.4.2. Processus de préfabrication	30
4.4.3. Types de préfabrication	32
4.4.4. Principaux matériaux de construction pouvant servir à la préfabrication	35
4.5. Modularité	43
4.5.1. Notions de la modularité	43
4.5.2. Vers une architecture modulaire	44
4.5.3. Cas de construction modulaire de nos jours	46
4.6. Intérêts et contraintes de l'industrialisation	50
5. Relation entre diversité et industrialisation	52

5.1. Comment peut-on amener les demandes de chacun à rencontrer l'industrialisation ?	52
5.2. Analyses de différents projets du point de vue de la diversité et de l'industrialisation	53
6. Etude de cas avec l'entreprise Naturhome	78
6.1. Prémices	78
6.2. Concepts développés dans le passé	80
6.3. Questions générales posées en avril 2020	82
6.4. Critères principaux de l'étude	84
7. Discussion	92
8. Conclusion	96
9. Table des figures	98
10. Références	101
Annexe	117

Introduction

La préfabrication est issue principalement de deux événements qui ont affecté le 19^{ème} siècle :

La colonisation de nouveaux territoires comme l’Australie et l’Ouest américain et l’industrialisation. Grâce à la pratique rationalisée, l’industrialisation a participé au développement d’une nouvelle façon d’habiter [Cha11].

Selon [Cha11] « *En 1833, le charpentier britannique Herbert Manning imagine une maison prête à assembler pour son fils, en partance pour l’Australie* ». Il crée un système en ossature bois composé de poteaux-poutres réalisés sur mesure et assemblés par vissage. Chaque poteau contient des rainures pour emboîter les panneaux composant les murs, la toiture est faite de toile de tente. Cette maison brute est fortement appréciée par les colons [Cha11].

Au même moment « l’ossature croisée » fait son apparition, elle est inspirée des premiers dirigeables. Selon [Cha11] « *Cette structure met en œuvre des montants de 5 x 10 cm de section, cloués entre une lisse basse et une lisse haute, et dessinant des cadres à faibles écartement* ». Ce système constructif a pour avantage de construire une maison rapidement, avec un coût de revient bas et nécessitant une main-d’œuvre peu qualifiée. Les débuts de la préfabrication sont apparus grâce à cette méthode de l’ossature croisée.

A partir de 1860, le développement du secteur local du bâtiment met en péril celui de la préfabrication, puisqu’il est possible de se faire construire sa maison sur place par un charpentier, avec tous les avantages que cela comporte contrairement à devoir déplacer celle-ci sur un chariot [Cha11].

Au début du 20^{ème} siècle, la préfabrication réémerge grâce à la vente par correspondance, permettant de ne plus avoir de contrainte géographique. Ce modèle architectural marquera le siècle. Selon [Cha11] « *L’idée : des catalogues de maisons vendues en kit-poutres, éléments de façade et de toiture, visserie, voire mobilier étant soigneusement numérotés et livrés par camions ou voie ferrée* ».

De nos jours, la préfabrication consiste en la fabrication d’éléments de construction en atelier avec une haute qualité construite tout en apportant des avantages à la construction traditionnelle. C’est-à-dire que dans ce contexte, le préfabriqué améliore la rapidité et la qualité de la

construction, l'efficacité des matériaux et la sécurité des travailleurs, tout en limitant les impacts environnementaux de la construction, par rapport à la construction traditionnelle sur site [BKK16].

Cette association de la standardisation et de la préfabrication permet d'utiliser de nouvelles techniques afin d'optimiser la productivité et la qualité de fabrication.

Contrairement aux idées préconçues, construire avec des composants préfabriqués n'est pas un obstacle à la créativité. De plus, les coûts finaux peuvent être réduits grâce à des économies de travail à grande échelle, en standardisant des composants préfabriqués et en offrant des possibilités de personnalisation de masse [BKK16].

La diversité de l'habitat permet de trouver dans un même environnement, espaces, des logements de natures différentes, permettant de favoriser l'accès au logement quels que soient les modes de vies, les ressources, les origines sociales et culturelles des ménages [BT] et [CERTU03].

Ce qui nous amène à nous poser la question : Comment augmenter la diversité dans la construction préfabriquée en bois en conservant un haut degré d'industrialisation ?

1. Etat de l'art

Ce chapitre parle essentiellement du ressenti, de la perception de personnes ayant vécu ou vivant dans des bâtiments standardisés tels que les HLM¹, cité-jardin², etc...

Mais avant il est nécessaire de comprendre comment sont nés les logements standardisés tel que les cités-jardins.

1.1. Prémices

A la fin de la première guerre et suite à la perte d'un grand nombre d'habitations, une véritable crise du logement va voir le jour dans une Belgique dévastée.

Afin d'y faire face et de reconstruire le pays, une stratégie d'intervention sera mise sur pied : la Société Nationale d'HBM³ sera créée en 1919. Elle imposera des prescriptions au projet visant à solutionner la problématique du logement social.

Il conviendra de trouver une solution efficace et peu onéreuse qui permettra d'offrir un logement décent, un espace de vie harmonieux et idéal à la classe ouvrière et aux familles défavorisées.

La cité-jardin semble être la solution au problème du logement et symbolise, le retour, après les hostilités qui frappèrent le pays, une nouvelle ère sociale et communautaire en créant un sentiment d'appartenance sociale.

Ce concept architectural veut octroyer, par la construction de nouveaux quartiers érigés sous forme de grappes d'ensembles de logements, mais situés un peu plus loin des centres urbains, plus d'espace et d'intimité aux familles en les sortant de l'entassement des quartiers industriels et insalubres de la ville [VB21].

Les maisons unifamiliales groupées avec jardin et les logements collectifs construits sous forme de cités sont mis en avant. Ceux-ci permettent à leurs occupants de bénéficier de plus de confort

¹ Habitations à loyer modéré.

² Zone résidentielle aménagée pour une vie saine, largement pourvue d'espaces verts [Larou21].

³ Habitations et logements à bon marché.

et d'hygiène, d'un cadre verdoyant, de plus de clarté et d'un air sain. Des aménagements paysagers font aussi partie du concept.

Les architectes et les urbanistes de l'époque, bien que désireux de développer un réel mouvement moderne dans le pays grâce à leurs constructions architecturales, furent néanmoins obligés de s'adapter au contexte national en se conformant aux prescriptions urbanistiques imposées par la Société Nationale des HBM et à la situation économique du pays (augmentation du prix de la construction) [Lam01].

Les cités-jardins leur permettront d'expérimenter et de développer leurs différentes techniques de travail (gabarit des immeubles, matériaux, type de terrain, ...) et de recherches, tout en essayant de limiter les coûts de la construction et de veiller à concevoir un environnement fonctionnel, idéal, beau et harmonieux.

Une commission indépendante, composée de différents architectes belges, sera mise en place afin de prévoir un cahier des charges devant être scrupuleusement respecté dans le cadre de ces constructions.

Des concours d'architecture seront organisés dans le but d'essayer de développer et de trouver de nouveaux projets et concepts urbanistiques respectant le paysage et renouvelant l'ordre des choses.

Le système du « thirifay » ressortira du lot. Il constituera en un assemblage de plaques de béton reliées à une ossature légère en béton armé [FM00].

La Société Nationale d'HBM imposera, par exemple, aux architectes, de planter et border les rues de haies vives et de les doubler par un réseau secondaire de sentiers.

Les habitations devront être implantées en recul par rapport à la voirie et devront être groupées en petits tronçons.

Des exemples de cités-jardins homogènes ayant vu le jour sur le territoire belge sont la « Cité Petite Russie » en Flandre orientale, la « Cité Moderne » dans la banlieue bruxelloise et le « Logis-Floréal » de Watermael-Boitsfort, composé de maisons individuelles, de logements collectifs, de superbes aménagements paysagers, de plaines de jeux, courts de tennis et terrain de football.

La Cité Petite Russie, Louis Van der Swaelmen et Huib Hoste, Zelzaete

Construite de 1921 à 1923, cette cité n'est pas encore une cité-jardin, mais bien une cité expérimentale dans l'aménagement du territoire. La végétation caractérise les espaces et les îlots centraux contiennent les équipements [Coh19].

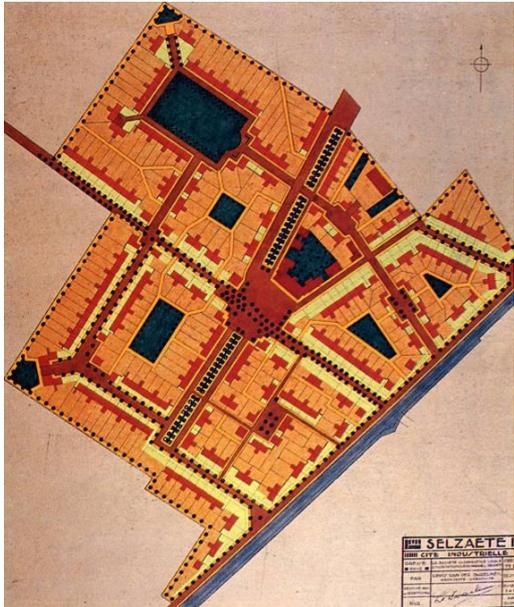


Figure 2: Implantation_Cité industrielle Petite Russie [Coh19].



Figure 1 : Photos_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].

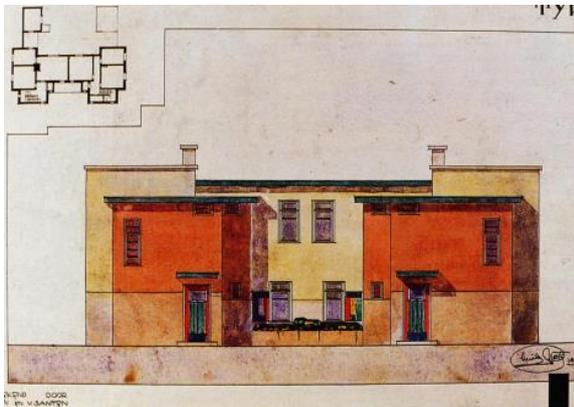


Figure 3 : Elévation_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].



Figure 4: Façade_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].

La Cité Moderne, Louis Van der Swaelmen et Victor Bourgeois, Berchem-Sainte-Agathe

Construite de 1922 à 1925, le principe de conception de cette cité-jardin est basé sur la lumière. Les bâtiments sont placés les uns par rapport aux autres pour que chacun puisse profiter du soleil à toute heure de la journée et toutes saisons confondues. On y retrouve un équilibre et une justesse des formes avec des typologies différentes de regroupement de logements [Coh19].

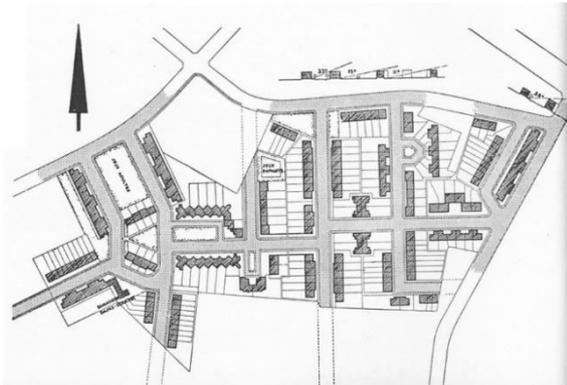


Figure 5 : Implantation_ La Cité Moderne [Coh19].



Figure 6 : Photos_ La Cité Moderne [Coh19].

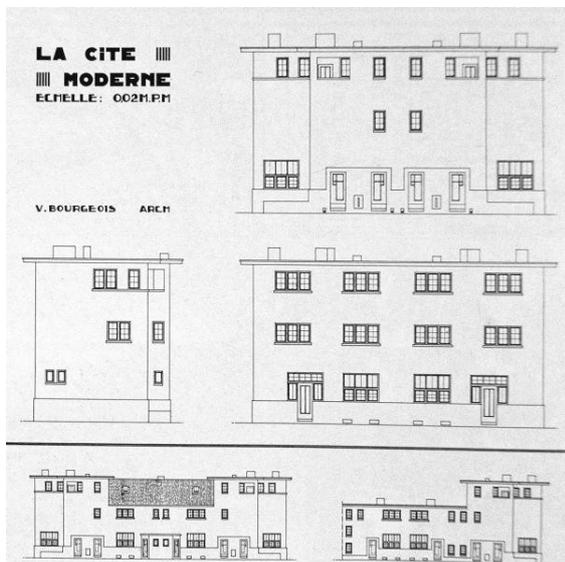


Figure 7 : Elévations_ La Cité Moderne [Coh19].



Figure 8 : Façade_ La Cité Moderne [Coh19].

Le Logis-Floréal, Louis Van der Swaelmen, Lucien François et Raymond Monaert, Watermael -Boitsfort

Il s'agit de deux cités-jardins qui se rejoignent et construites (de 1922 à 1940) sur un terrain en pente. Le point le plus haut de la cité reprend les équipements, cela sert de point de repère. Plus on va vers le point haut, plus les maisons sont grandes et hautes et plus on va vers le point bas, plus les maisons sont basses. L'entièreté de la cité-jardin est hiérarchisée autant pour son urbanisme que sa végétation [Coh19].

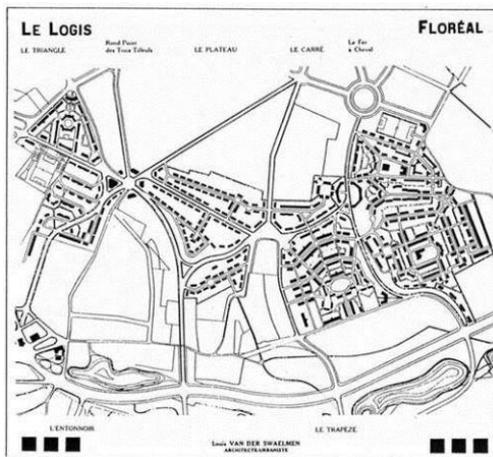


Figure 9 : Implantation_ Le Logis Floréal [Coh19].



Figure 10 : Photos_ Le Logis Floréal [Coh19].

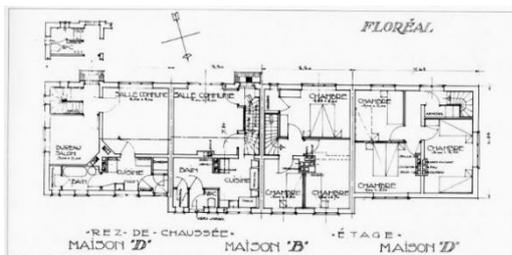


Figure 11 : Plan_ Le Logis Floréal [Coh19].



Figure 12 : Elévation_ Le Logis Floréal [Coh19].

Présentation des problèmes du concept

Les conceptions architecturales et urbanistiques n'ont pas toujours été bien accueillies par l'individualisme de la population, qu'elle soit ouvrière ou bourgeoise, voyant d'un mauvais œil les prescriptions urbanistiques imposées par la Société Nationale d'HBM et l'imposition aux habitants d'une nouvelle manière d'habiter.

D'autre part, les cités-jardins amenèrent une problématique urbanistique. En effet, ces logements sociaux ont été implantés en dehors des centres villes et seraient condamnés à devenir des ghettos. On a fait remarquer que s'ils avaient été construits plus près des centres urbains, la plupart auraient pu devenir des quartiers de charme intégrés dans les agglomérations [Lam01].

1.2. Avis des habitants d'une cité-jardin

Selon [RTL08] « *A la cité-jardin de Stains, pittoresque cité HLM au nord de Paris, les habitants sont particulièrement attachés à leur cadre de vie, un « exemple de bonne urbanité » à méditer, souligne l'urbaniste Roland Castro, avant de construire en masse des logements* ».



Figure 13 : Implantation_ Cité-Jardin de Stains [PSSD21].



Figure 14 : Habitation_ Cité-Jardin de Stains [PSF15].

Voici les avis des habitants selon [RTL08] « *On a tout ici : des écoles, des boulangers, des banques, des bouchers, et le bâti est convivial. Ils avaient le soin du détail à l'époque, constate Lionel Chaignon, président de l'Amicale des locataires.*

Le charme des lieux a gagné les plus jeunes. Ce quartier a quelque chose, on s'y sent bien, témoigne Charlène, 18 ans, qui ne voudrait pas vivre au Clos-Saint-Lazare⁴, le grand ensemble voisin où les logements sont pourtant plus vastes.

L'esthétique est plus jolie ici, quand un lieu est beau, on y est mieux, glisse la lycéenne. Pour Roland Castro, un bâtiment et un logement sont réussis lorsqu'ils renvoient à l'habitant une bonne image de lui-même.

Un agent de l'office HLM observe que les locataires ont ici un comportement de propriétaires et sont tellement attachés à leur cité qu'ils signalent tout de suite les épaves et viennent se plaindre pour des détails. A la cité du Clos-Saint-Lazare, ils attendent d'avoir touché l'intolérable, souligne cet agent.

Les gens ne lâchent pas leurs pavillons. Une fois qu'ils sont dedans, ils y meurent, relève Max, un ouvrier retraité de 78 ans, qui est devenu locataire en 1991 d'un trois pièces en pavillon, après 15 ans d'attente ».

1.3. Etude sociologique sur l'habitation individuelle

Les résultats d'études préalables ont montré une préférence des individus pour les habitations pavillonnaires par rapport aux logements collectifs, néanmoins il faut noter que les habitants des logements collectifs étaient pour la plupart des locataires à l'inverse des habitants de logements individuels [Tug68].

L'un des désagréments le plus soulevé par les habitants de logements collectifs est le bruit.

Selon [Tug68] « *Il serait erroné de réduire ses effets à des désagréments purement physiques. Toute l'étude montre que le logement est d'abord un refuge. La mauvaise insonorisation l'empêche en partie de remplir cette fonction ; elle limite les possibilités d'expression de la famille ; certains déclarent ne plus oser parler haut, recevoir des amis. Un nombre non négligeable signale une perturbation de la vie intime du couple. Le bruit est beaucoup plus souvent imputé aux voisins qu'à la mauvaise qualité de la construction, développant ainsi, comme le mauvais entretien des parties communes une agressivité à leur égard* ».

⁴ Cité classique.

Quel que soit le type d'habitat, l'attitude envers les voisins est très souvent soulevée. Les différentes études tentent à prouver selon [Tug68] « *Qu'il y a un minimum de convenances à respecter, on converse à l'occasion, on se rend quelques services à titre exceptionnel, mais la plupart déclarent qu'il faut rester en deçà de certaines limites* ».

Conclusion

Selon [Dam17] « *L'aspiration des habitants à la maison individuelle serait quasi unanime, avec dans cette représentation positive un imaginaire de qualité et de cadre de vie. Bien entendu, les différents travaux soutiennent que cette préférence très majoritaire présente une certaine hétérogénéité selon l'âge, le revenu, la zone d'habitat (centre-ville, banlieue, espaces périurbains, espaces ruraux)* ».

Le tableau ci-dessous (voir figure 15) met en évidence les préférences des occupants en matière d'habitation, ceci en leur demandant de répondre à 2 questions clés.

Type d'habitat	« Je vais vous montrer différents types d'habitations. Parmi ceux-ci, pouvez-vous me dire lequel ressemble le plus à celui dans lequel vous habitez ? »	« Parmi les différents types d'habitations suivants, si vous pouviez choisir, dans lequel habiteriez-vous ? »	Différence
Maison individuelle isolée	20%	56%	+36%
Maison individuelle dans un ensemble pavillonnaire	29%	20%	-9%
Habitat individuel en ville	19%	11%	-8%
Grands ensembles d'habitat collectif	9%	1%	-8%
Petit / moyen habitat collectif en ville	9%	3%	-6%
Habitat haussmannien	6%	5%	-1%
Grand immeuble	4%	1%	-3%
Sans opinion	4%	3%	-1%

Figure 15 : Situations et préférences déclarées en matière d'habitation [Dam17].

Le logement satisfait ou devrait satisfaire les besoins les plus élémentaires jusqu'au plus étendus. L'étude ci-dessus démontre que l'habitat individuel satisfait davantage que l'habitat collectif. Nous remarquons que si l'habitat répond à des critères de raffinement, de beauté, d'entretien, ... les habitants s'y sentent mieux et sont plus attachés à leur quartier.

Bien entendu le sujet sera approfondi, questionné et retravaillé dans la suite du TFE. Il s'agit ici d'une introduction au questionnement concernant les logements standardisés.

2. Méthodologie

Pour répondre à la question du TFE, il est nécessaire de passer par différentes phases.

Le sujet étant « Comment augmenter la diversité dans la construction préfabriquée en bois en conservant un haut degré d'industrialisation ? », il est donc important de connaître les notions de la diversité et de l'industrialisation.

Les premières parties du TFE sont théoriques, basées sur des faits, des recherches, des idées permettant de mieux comprendre les deux grands points que sont la diversité et l'industrialisation.

Les premières recherches sont orientées sur la diversité. J'établirai une échelle de diversités et ciblerai celle qui est la plus importante par rapport au sujet du travail. La diversité au sein du logement, la diversité de l'habitat (celle qui nous importe le plus) et la diversité urbaine. Ce qui m'amènera à pouvoir lister les avantages et les inconvénients de la diversité.

Il est nécessaire de faire le même exercice pour l'industrialisation. Tout d'abord comprendre les notions de l'industrialisation, ensuite la standardisation et continuer vers l'optimisation des flux de productions. Par la suite, s'orienter vers le sujet qui nous intéresse à savoir la préfabrication. Ce sujet étant vaste, il faut également le structurer en différentes phases : notions de la préfabrication, processus de préfabrication, types de préfabrication, principaux matériaux pouvant servir à la préfabrication (l'acier, le béton armé, le bois). Pour suivre par la construction modulaire. Toutes ces recherches permettront, comme pour la partie diversité, de lister les avantages et les inconvénients de l'industrialisation.

L'orientation que je désire donner au travail étant plus technique. La partie de la diversité sera plus succincte que celle sur l'industrialisation, cette première étant plus basée sur des études sociologiques.

La phase suivante, la deuxième partie, se basera essentiellement sur des études de projets, ceux-ci seront comparés afin de déterminer comment l'industrialisation entrave ou contribue à la diversité des logements.

Dans cette partie seront analysées différents projets existants :

- Projets réfléchis en termes de diversification et difficiles à industrialiser.
- Projets réfléchis en termes de diversification et où l'industrialisation est faisable.
- Projets industrialisés ayant un impact négatif sur la diversité.
- Projets industrialisés ayant un intérêt du point de vue de la diversité.

Ceci permettra de montrer l'évolution des logements au niveau de l'industrialisation et de la diversité afin de trouver un juste milieu pour la création de logements industrialisés à un haut degré tout en maintenant une flexibilité pour la diversité, et en respectant les besoins des habitants.

Dans la troisième partie de ce TFE, on retrouvera des cas d'études pratiques pour essayer d'analyser et comprendre le fonctionnement d'une entreprise spécialisée dans la construction de maisons en ossature bois avec un haut degré de préfabrication telle que Naturhome.

Enfin, j'apporterai un avis personnel afin de tenter de répondre à la question de base de ce travail.

3. Diversité

Cette troisième partie du travail aborde les différentes échelles de la diversité, telles que la diversité au sein d'un logement, d'un bâtiment, d'un quartier ou d'une ville.

L'échelle de la diversité la plus intéressante pour ce travail est la diversité de l'habitat, appelée aussi la « diversité architecturale ».

Les autres échelles sont expliquées brièvement pour comprendre ces différentes notions mais elles ne font pas partie du cœur de la réflexion.

3.1. Prémices

Avant de parler de diversité, il est important de comprendre ce que représente l'habitat pour la société, selon [Ler08] « *L'habitat permet de vivre son intimité, de cacher tout ce qui est dérangeant ou trop secret dans la vie d'une personne, afin de montrer une image relativement maîtrisée de soi ; et enfin, elle permet l'obtention d'un statut social et aide à se situer dans la communauté. Se constituer un chez-soi, c'est réapprendre le « savoir-habiter » en s'organisant un logement à son image, et en sortant de la marginalité. Il s'agit d'une réadaptation, il faut donc proposer par l'architecture des étapes progressives qui mènent à l'appropriation complète d'un espace de vie. La maison permet à chacun de se situer dans sa relation aux autres* ».

Le fait d'habiter pour l'homme est quelque chose d'essentiel, au-delà même de sa survie. L'habitation est un rempart face aux menaces extérieures, un lieu de vie, elle permet une intégration sociale et bien plus encore. Selon [Ler08] « *La maison permet de mettre à distance le monde environnant. C'est donc la relation entre l'homme et sa demeure qui permet d'habiter* ».

L'architecture des lieux joue un rôle prédominant dans l'appropriation des espaces. Il est nécessaire de proposer une architecture de choix, sans imposer des pratiques ou usages dans le logement afin que chacun définisse par lui-même son mode d'occupation.

De nos jours, les gens désirent de plus en plus se différencier, exprimer leur identité, leur personnalité à travers leur logement. Tous ces desideratas ont permis d'observer une diversité de l'habitat [Ler08].

De tout temps, le droit a imaginé des mécanismes permettant d'adapter la propriété à la société et aux besoins des individus qui la composent. Outre sa consécration en tant que droit naturel et imprescriptible dans l'article 2 de la Déclaration des Droits de l'Homme et du Citoyen de 1789, la propriété est définie, à l'article 544 du Code civil, comme le droit de « *jouir et de disposer des choses de la manière la plus absolue, pourvu qu'on n'en fasse pas un usage prohibé par les lois ou par les règlements* ». Cet absolutisme est au cœur de la définition de la propriété, mais on peut se demander s'il s'accorde avec les exigences de la société actuelle.

3.2. Diversité au sein des logements

Traditionnellement, la majorité des ménages au cours du siècle dernier (Post-industrialisation) se composaient de deux parents mariés avec un à trois enfants.

Depuis 1960, la composition des ménages a fortement évolué. Le nombre de mariages a drastiquement diminué, le taux de divorce moyen a doublé, 10% des enfants vivent dans des familles recomposées ou monoparentales. Les foyers peuvent aussi être composés de célibataires, de personnes âgées vivant seules, de co-location, etc..., tous ces changements ont un impact profond sur le logement [Per19].

Ces nouveaux modes de vie, font que les besoins et les préférences de ces familles évoluent aussi. Malheureusement l'architecture est lente à s'adapter, ce qui a souvent eu pour conséquence que les utilisateurs ont dû s'adapter au logement et non l'inverse [Per19].

Le mode de vie des gens, à l'intérieur de la maison a également changé. Selon [Ele17] « *On observe aussi une désynchronisation des activités et des comportements à l'intérieur. Les rythmes des membres de la famille ou du groupe domestique sont particuliers, chacun "vit sa vie" et l'idéal d'épanouissement personnel est, en général, accepté, même si les moments de partage et de rencontre restent valorisés. Donc l'usage de la maison, les rites des repas par exemple, ont changé ou sont en train de changer, selon les groupes sociaux* ».

De nos jours, la société n'accepte plus de se conformer et de s'adapter à des logements stéréotypés.

Les architectes ont dû s'adapter à l'évolution du mode de vie occidental, les gens passent plus de temps dans leur habitation que ce soit pour le travail ou les loisirs, on parle d'internalisation⁵. Il est donc logique de se dire que l'habitation doit elle aussi être repensée [Ele17]. L'idéal voudrait que ce soit l'habitation qui évolue, qu'elle s'adapte aux habitants qui l'occupent et non l'inverse.

La crise sanitaire mondiale à laquelle nous sommes confrontés depuis plus d'un an ne fait qu'accentuer cette notion d'internalisation. En effet, la population s'est retrouvée du jour au lendemain à devoir faire 100% de télétravail. Il est donc raisonnable de penser que celle-ci désirera probablement adapter son logement à l'avenir, en ayant une pièce dédiée au travail uniquement.

3.3. Diversité de l'habitat

La diversité de l'habitat permet de trouver dans un même environnement, des habitations de natures différentes, permettant de favoriser l'accès au logement quels que soient les modes de vies, les ressources, les origines sociales et culturelles des ménages [BT] et [CERTU03]. C'est ainsi qu'émergent des habitats de typologie différentes et donc une diversité du point de vue architectural. Dans ces habitats de topologies différentes, on observe essentiellement trois catégories : l'habitat communautaire, l'habitat collectif et l'habitat individuel.

Selon [THP06] l'habitat communautaire est « *un lieu de vie où le collectif est dominant, les espaces privés sont petits face aux espaces collectifs ; une idéologie forte cimente le groupe, souvent philosophique ou religieuse ; le partage peut aller jusqu'au partage des revenus ou des activités professionnelles* ».

Selon [THP06] l'habitat collectif est plutôt « *un lieu de vie où le collectif, de manière spatiale et en termes de projet, est restreint voire quasi inexistant. La base du rassemblement est souvent*

⁵ Le fait de rendre interne, de rester chez soi [Lar21].

d'ordre économique, parfois même non volontaire ». Selon [THP06] c'est « un lieu de vie alternatif à la maison individuelle et à l'habitat communautaire, où habitent plusieurs entités, familles ou personnes, et où l'on retrouve des espaces privatifs et des espaces collectifs ». Selon [Eem09] c'est « un lieu de vie qui se distingue de l'habitat communautaire par sa notion essentielle d'espace privé ».

Selon [CM21] et [BC78] l'habitat individuel ou maison individuelle « *représente plus de la moitié des logements existants, avec des typologies très différentes en fonction de l'ancienneté du bâtiment. Ce type d'habitat a connu un véritable engouement entre la fin des années 70 et le début des années 2000. L'habitat individuel entend bien recouvrir son jardin d'une sorte de toit privé et le ceindre d'une clôture ou d'un mur de pierre ou végétal ».*

La vocation première de la diversification de l'habitat n'est pas d'améliorer les conditions de vies des occupants mais bien de contribuer aux changements sociaux en amenant une mixité sociale (augmenter l'attrait à certains quartiers aux classes moyennes et supérieures et en réduisant la présence des classes les plus pauvre) [Lel11].

Selon [Ele17] « *Les solutions peuvent aller de propositions extrêmes qui mettent en question les limites du logement, jusqu'à des aménagements moins radicaux mais tout aussi efficaces. Par exemple, on a beaucoup évoqué ces dernières années dans notre milieu, l'habitation-village, éclatée, comme par exemple le Didden Village de MVRDV, composé de parties autonomes mais reliées entre elles, dont un atelier et des chambres qui permettent l'autonomie des différents membres de la famille, ou du groupe domestique » (voir figure16 et 17).*



Figure 16 : Plans, coupes et élévations [MVRDV06].



Figure 17 : Toiture_ Didden Village [MVRDV06].

La désormais célèbre Maison Moriyama de Ryue Nishizawa de Tokyo, composée de neuf unités blanches, éclatées sur les 300m² de terrain (voir ci-dessous figure 18 et 19). Selon [Ele17] elle « met en espace le slogan « ensemble mais séparément » en fragmentant le bâti composé d'unités de vie, des plots bâtis sur une terrasse, avec chambres, bureaux, cuisine commune, etc, où six personnes peuvent cohabiter. Seule la pièce centrale, fait office de living-room ».

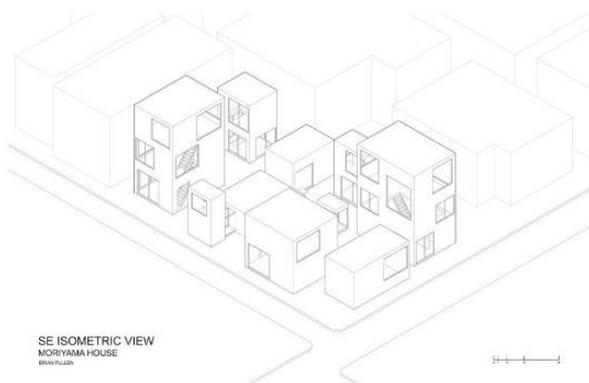


Figure 18 : Axonométrie_ Moriyama House [Pin21].



Figure 19 : Moriyama House [Div18].

3.4. Diversité urbaine

De nos jours, les villes sont composées d'une grande mixité sociale, de populations venant d'horizons, de cultures, de nationalités et de classes sociales différents. Pour faire cohabiter toutes ces diversités sociales mais aussi les diversités de fonctions comme les logements, les commerces, les activités publiques, etc... la ville doit être pensée comme un espace de vie partagé et donc avoir une architecture adaptée. Afin d'offrir une variété de services et d'équipements urbains répondant à l'ensemble des besoins de la population [CERTU03] et [ME18].

La diversification de l'habitat relève d'une politique urbaine et territoriale qui tente de valoriser et de densifier les espaces en amenant une mixité sociale. Les moyens qui peuvent être mis en œuvre pour atteindre ce but sont notamment :

- Ne pas diminuer les logements sociaux mais bien d'en relocaliser une partie hors de ces zones urbaines sensibles [Lel11].
- Favoriser l'accès à la propriété par des primes ou avantages à des familles aux revenus modestes [Lel11].

- Faire coexister dans un quartier les différentes fonctions qui constituent la ville, par le maintien et le développement d'une offre variée de services et d'équipements urbains qui répondent à l'ensemble des besoins de la population [CERTU03].

Selon [ME18] « *Dans un avenir proche, la mixité et la diversité seront caractéristiques non seulement des zones et des quartiers de la ville mais aussi des bâtiments d'habitation eux-mêmes. L'encadrement urbanistique et architectural de la mixité passera par la construction plus intense de grands complexes qui feront coexister et interagir des personnes de différents groupes ethniques, culturels, sociaux et générationnels* ».

3.5. Intérêts et contraintes de la diversité

À mesure que de nouveaux besoins et préférences évoluent, différents logements apparaissent. Voici donc les intérêts et les contraintes de la diversité :

Les intérêts de la diversité sont pour [Ler08], [Per19], [BT], [CERTU03] et [Hey12] :

- *La personnalisation et l'appropriation d'un espace de vie.*
- *La possibilité de se différencier de son voisin.*
- *La création d'une configuration spatiale flexible.*
- *Le fait de trouver dans un même environnement, espace, des logements de natures différentes, permettant de favoriser l'accès au logement quels que soient les modes de vies, les ressources, les origines sociales et culturelles des ménages.*
- *L'opportunité de toucher un plus grand nombre de clients potentiels.*
- *L'augmentation du chiffre d'affaires.*
- *L'apport de nouvelles innovations.*
- *L'apport de plus d'intérêt urbanistique.*
- *La possibilité d'avoir des intérêts sociaux.*
- *L'augmentation des compétences de l'entreprise de préfabrication.*
- *Une plus grande maîtrise de construction.*

Les contraintes de la diversité sont pour [Per19] :

- *Le changement de la composition du ménage.*
- *La demande beaucoup plus élevée de petites unités d'habitation causée par l'augmentation du nombre de ménages composés d'une seule personne, dont beaucoup de personnes âgées.*
- *Les transferts intergénérationnels prennent des formes différentes et ont des conséquences changeantes les services sociaux, la gestion de l'aide sociale et des finances et l'aide à l'inculcation des valeurs familiales dans la société en général.*
- *La diversification de maisons préfabriquées entraîne un frein en étude et en fabrication, du fait que cela prend plus de temps.*
- *Des bâtiments différents coûtent plus cher à construire par rapport à des bâtiments identiques.*
- *La production de maisons différentes les unes des autres implique une augmentation des coups du fait qu'elle demande systématiquement une nouvelle étude en conception et en fabrication, contrairement à la production de maisons identiques.*

Les changements dans les structures familiales ont un impact direct sur l'habitat, il est donc important de suivre ces changements et de les intégrer dans la conception de nouveaux logements.

4. Industrialisation

Cette partie va permettre de mieux comprendre le rôle et l'enjeux de l'industrialisation avec les principes qui en découlent comme la standardisation, l'optimisation du flux de production, la préfabrication et la modularité.

4.1. Notions de l'industrialisation

On peut considérer qu'un objet est industrialisé quand l'ensemble de ses composants est fabriqué en usine par des techniques qui permettent la fabrication en série. Pour avoir une production en série, il est nécessaire de standardiser, normaliser, typifier mais aussi rationaliser⁶ la production en fonction de l'objectif visé. Il faut pouvoir réaliser le travail à la chaîne pour optimiser le temps de production mais aussi être indépendant au niveau des installations (la localisation fixe), ces indépendances se traduisent par la possibilité de créer des stocks et d'avoir des bâtiments industriels délocalisés des chantiers [Pop15].

En résumé, si on veut industrialiser un produit, il faut le standardiser. Sinon on reste dans un artisanat préfabriqué.

4.1.1. Prémices

La première révolution industrielle débute en 1770 en Angleterre avant de gagner l'Europe puis les Etats-Unis et le Japon.

Etant la première puissance économique, initiatrice du libre-échange, l'Angleterre a forgé une nouvelle division internationale du travail qu'elle a imposé à l'ensemble du monde, au moins jusqu'en 1870 [All21].

L'industrialisation a transformé considérablement la société à partir de ce moment, les modes de production, la définition du travail, les moyens de transport, l'organisation de la société et

⁶ Organiser un processus de manière à accroître son efficacité [Larous21].

de l'économie ont radicalement changés. Cela a permis la généralisation de la mécanisation ainsi qu'une forte augmentation du travail en usine [All21] et [Mar12].

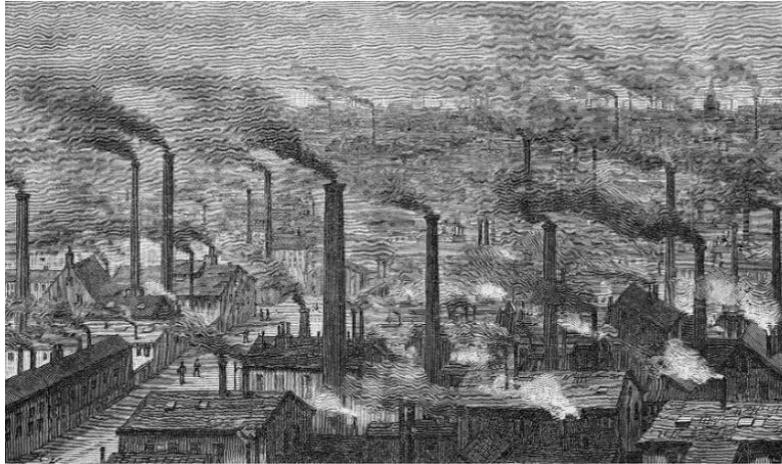


Figure 20 : Quand le ciel des villes était noir de charbon_Angleterre_1880 [IA21].

4.1.2. Typologie et Chronologie

La révolution industrielle comporte 2 phases :

La première (1770) : Le charbon, le fer et l'invention de la machine à vapeur font émerger de nouvelles industries telles que celles du textile ou de l'alimentation. L'industrie métallurgique quant à elle favorise le développement de chemins de fer, ce qui accélère le transport de matériels [All21].

Selon [Mah05] « *Le nom de Cockerill est connu dans le monde entier, qui est celui du plus grand établissement industriel de la Belgique en 1835, il a livré à l'Etat belge « la première locomotive et les premiers rails pour l'un des premiers chemins de fer du continent : celui de Bruxelles à Malines, et d'Ans à Anvers, établi en exécution de de la loi du 1 er mai 1834. Une période d'activité débordante s'ouvrit alors. En mars 1905, il occupait 9560 ouvriers et employés ; il comprenait douze « divisions d'entreprise » différentes et utilisait 13 000 chevaux-vapeur ».*



Figure 21 : Cockerill_Seraing_ Ensemble des usines à vol d'oiseau_1900 [Rtb17].

La seconde (fin du 19^{ème} siècle) : L'extraction du pétrole, du gaz, la découverte de l'électricité, la transformation du fer en de nouveaux matériaux comme l'acier et l'aluminium ont permis à de nouvelles industries de voir le jour. Comme celles du secteur de l'automobile, de l'aéronautique, de la construction navale mais aussi celle de la communication avec l'invention du télégraphe et du téléphone [All21].

4.2. Standardisation

4.2.1. Notions de la standardisation

Une grande partie des concepts de l'industrialisation ont permis la standardisation.

Le verbe standardiser signifie selon [LT21] « *rendre conforme à un standard, à des normes. Dans un secteur d'activité donné, la standardisation est le processus qui permet de mettre une production, un produit ou un service en conformité avec une norme de référence, avec un modèle unique ou avec un petit nombre de modèles ayant des caractéristiques précises* ».

Pour standardiser, il faut se conformer à des normes. Selon [Dep95] la normalisation intervient « *dans les procédures de fabrication ou d'utilisation de produits industriels. On fait des normes, principalement, pour assurer la fiabilité des produits, permettre leur échange et leur commercialisation à travers le monde* ».

Pour un grand nombre d'industries, l'association de la standardisation et de la préfabrication a permis d'utiliser de nouvelles méthodes pour développer de nouveaux équipements afin d'obtenir un haut degré de qualité et de productivité.

Le développement de la standardisation pour la conception apporte les avantages suivant selon [BL04] :

- *La possibilité d'interchanger des pièces.*
- *La simplification d'assemblages.*
- *L'utilisation d'un même système de fabrication permet de diminuer les coûts d'assemblage.*
- *La réduction du gaspillage et une facilitation de la maintenance des matériaux.*
- *La prévisibilité améliorée résultant d'une demande plus ferme en produits finis et composants et d'un plus court délai d'exécution.*
- *L'amélioration de la fiabilité des produits, de la qualité, des systèmes et des processus.*

4.3. Optimisation du flux de production

4.3.1. Notions de l'optimisation du flux de production

La productivité se définit selon [LT21] par « *le rapport entre la quantité ou la valeur ajoutée de la production et le nombre d'heures nécessaires pour la réaliser. Elle dépend de la capacité du personnel à produire une quantité, dite standard, de biens ou de services selon les normes ou les règles prédéfinies* ». On peut donc considérer que la productivité atteint de bonnes performances lorsque on utilise peu de ressource pour obtenir des résultats élevés.

La productivité est donc la balance entre l'association des ressources utilisées et les objectifs à atteindre.

Lorsqu'il est demandé à un ouvrier de réaliser une tâche pour la première fois, cela lui prend plus de temps que les fois suivantes où il aura assimilé ce qu'il doit faire, quand cette tâche deviendra répétitive et qu'il aura des automatismes d'exécution. Il serait donc tentant de se dire qu'il est bon de laisser longtemps un ouvrier à exécuter les mêmes tâches. L'expérience dans le temps a démontré qu'à un certain moment la production de l'ouvrier n'augmente plus autant qu'au début pour de nombreuses raisons, comme la lassitude, les contraintes physiques, etc... (voir figure 22) [Col13].

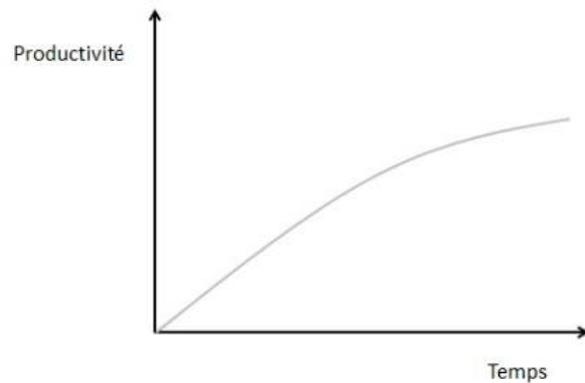


Figure 22 : Courbe d'apprentissage [Col13].

Maintenant que l'on comprend la notion de la productivité, on peut définir le concept qui permet d'optimiser le flux de production. Selon [XLC21] « *Optimiser les flux, c'est réduire au maximum les pertes tout au long du flux. C'est à la fois donc, organiser les différentes activités entre elles mais aussi, éliminer un maximum de gaspillages au niveau de chaque activité* ».

Henry Ford fut l'un des pionniers dans la gestion des flux de production. Il eut une formule mémorable pour résumer son projet, l'année même de la fondation de Ford Motor Company en 1903.



Figure 23 : Usine Ford [Fra19].

La formule de Ford expliquée par [LL18] est la suivante : « *La meilleure manière de fabriquer des automobiles est de les faire toutes semblables, qu'elles sortent de l'usine absolument identiques, comme une épingle ressemble à une autre épingle en sortant de l'usine à épingle* ».

D'autres ont suivi le principe de Ford comme Taiichi Ohno, ingénieur chez Toyota dans les années 50, inventeur du « juste-à-temps ». Alors que, depuis des lustres, la production était gérée en commençant par le début du processus, l'arrivée des pièces sur les chaînes de montage,

le juste-à-temps propose de partir de la fin (la demande du consommateur) afin d'adapter la production en conséquence [LE16].

Il a fait évoluer ce flux poussé, générant énormément de stocks, vers un flux tiré, visant à évincer tous gaspillages et à améliorer la productivité des entreprises. C'est à cette époque que la notion de lean⁷ est apparue [Col13].

Ce flux tiré vient du concept du taylorisme. Le taylorisme doit son nom à l'ingénieur américain F. W. Taylor (1856-1915) qui a mis au point une méthode d'organisation du travail dite scientifique. Il s'agit d'une méthode d'organisation du travail industriel dont les caractéristiques principales sont la division horizontale et verticale du travail ainsi que le salaire au rendement. Horizontale en maximisant les tâches entre les différents postes de travail et verticale avec une séparation stricte entre le travail de conception et le travail d'exécution [Lip90].

Dans une entreprise traditionnelle, on retrouve habituellement une chaîne de production dont le flux de production à travers chaque poste de travail est dit "poussé". Cette méthode consiste à produire le plus possible, peu importe la demande, mais en prévision du marché [FA10].

C'est ce qui est appelé la production de masse. Ce système dépeint une succession de processus de fabrication non synchronisés : la production des processus en amont ne se calque pas sur la production des processus en aval (voir figure 24).

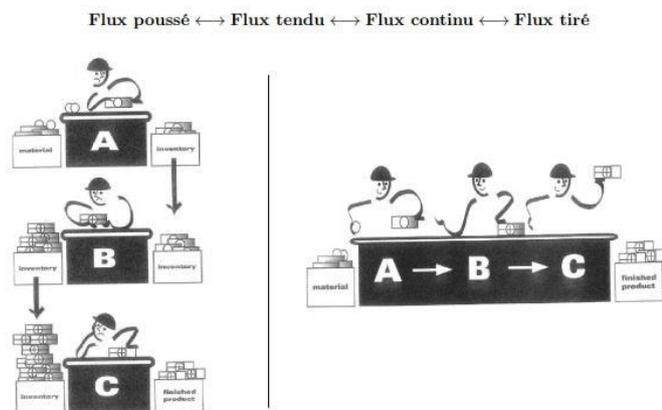


Figure 24 : Flux poussé vs. flux tiré [Col13].

⁷ Sert à qualifier une méthode de gestion de la production qui se concentre sur la « gestion sans gaspillage », ou gestion « au plus juste » [Lar21].

4.3.2. Variété de production optimisée

Depuis toujours, la notion de production de masse est importante pour les industriels, nous avons vu que Ford fut un des précurseurs dans le domaine de l'optimisation. Lorsque l'effet de volume est confronté à une variété de besoins des clients, une des solutions est la personnalisation de masse. L'ingénierie a cherché des solutions de mise en œuvre typiques de conception de produits variés [Fuj02]. Fujita et Ishii ont analysé plusieurs exemples de conception (voir ci-dessous figure 25).

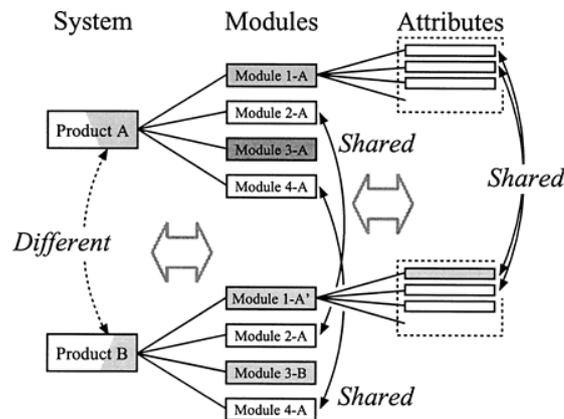


Figure 25 : Abstracted hierarchical representation of product structure [Fuj02].

Le processus de conception des modèles qui permettront l'adaptation d'un seul à plusieurs produits est conceptuellement divisée en trois points [Fuj02] :

- Le point architectural : dans lequel une structure de système primaire et les variations, l'architecture des modules, sont établies.
- Le point de la configuration : dans lequel la ou les configurations standards et leurs variations de produits et de modules sont établies.
- Le point de l'interprétation : dans lequel des modèles pratiques sont développés dans le cadre de l'architecture et de la configuration conçues.

Dans le cadre de la structure des tâches ci-dessus, les deux premiers niveaux explorent les possibilités de mise en œuvre des variétés, tandis que le dernier niveau incarne les modèles réels de fourniture de produits multiples. Ce qui signifie que les 2 premiers niveaux fournissent une région réalisable pour l'optimisation et que le dernier niveau y trouve la meilleure solution [Fuj02].

L'un des principaux avantages de la conception d'un seul produit à plusieurs produits est l'élargissement des quantités. Toutefois, cette attente comporte plusieurs inconvénients selon [Fuj02] :

- *Les problèmes d'optimisation au niveau du compromis entre les différents éléments de l'objectif.*
- *Le compromis entre la performance et le coût direct est typique pour l'optimalité d'un seul produit.*

Selon [IM97] « *Le principe de la personnalisation de masse est basé sur la capacité de produire des quantités croissantes de produits incluant des produits flexibles (c'est-à-dire à installation rapide)* ».

Concernant la production de masse sur mesure, les systèmes de fabrication sont capables de fournir une diversité plus importante à moindre coût. Ceci, grâce à la flexibilité qu'apportent les nouvelles technologies de production et d'information.

Voici 4 innovations de la production de masse sur mesure selon [BL04] :

- *La suppression des erreurs de construction sur chantier.*
- *La réduction du temps de montage.*
- *L'élimination du gaspillage tout en diminuant les coûts.*
- *La diminution des frais par des commandes précises.*

Dans la production de masse sur mesure, la modularité peut être perçue comme étant un point négatif.

Selon [BL04] « *La modularité permet à une partie du produit d'être fabriquée en modules standards avec des techniques de production de masse alors que la distinction du produit est réalisée par la combinaison ou la modification des modules* ».

Selon [BL04] « *La transition entre une fabrication traditionnelle et la PMM (produit de masse sur mesure) passe par deux chemins. Pour un, les fabricants de produits de masse impliquant le client vers la fin du processus de fabrication pour personnaliser le produit, chemin emprunté par le secteur automobile. L'autre chemin est celui des fabricants sur mesure qui maintiennent les clients impliqués dès les premières étapes de la conception et de la production mais qui adoptent des méthodes telles que la modularité pour réduire leurs délais de livraison jusqu'au*

niveau des fabricants de produits de masse. Ce dernier chemin est celui qui s'impose pour l'industrie de la construction préfabriquée ».

Selon [BL04] « *Les entreprises qui souhaitent être compétitives sur les marchés dans lesquels le choix du client est prioritaire doivent penser systématiquement à l'organisation de tout le processus de standardisation afin d'obtenir la modularité ».*

Le processus de standardisation est loin d'être aussi développé dans la construction que dans l'industrie. Ce pour de nombreuses raisons, comme par exemple : Les intervenants qui changent lors des différentes phases de chantier, les responsabilités qui sont différentes, les compétences qui sont diverses et variées, les projets étant rarement similaires, etc... Néanmoins, pour tenter d'améliorer la productivité de la construction, le principe du lean a été envisagé par certains pour fluidifier le processus de construction. Grâce à de nombreuses recherches faite pour réduire le temps d'exécution sur chantier, la préfabrication d'éléments structuraux en usine a vu le jour [Kub12].

4.4. Préfabrication

4.4.1. Notions de la préfabrication

La préfabrication est une étape, une phase de l'industrialisation. Néanmoins, il est possible de préfabriquer quelque chose sans pour autant l'industrialiser en usine, sans en faire une production en série.

Il est important de noter que l'industrialisation nécessite inévitablement de la préfabrication mais que l'industrialisation n'est pas indispensable pour préfabriquer.

La préfabrication et l'industrialisation sont donc interconnectées mais présentent toutefois des différences.

La préfabrication consiste à la fabrication d'éléments de construction en atelier avec une haute qualité construite tout en apportant des avantages à la construction traditionnelle. C'est-à-dire que dans ce contexte, le préfabriqué améliore la rapidité et la qualité de la construction, l'efficacité des matériaux et la sécurité des travailleurs, tout en limitant les impacts

environnementaux de la construction, par rapport à la construction traditionnelle sur site [BKK16].

Quel que soit la méthode de construction choisie, certaines phases du chantier sont identiques, notamment la préparation du site, l'excavation et l'installation des fondations. La différence entre la préfabrication et la construction traditionnelle est que pour la préfabrication, la conception détaillée et la fabrication des éléments de construction, sont réalisés hors site dans des conditions d'usine contrôlées, en utilisant les mêmes codes et normes de construction locales que les installations construites sur place. Les éléments préfabriqués sont ensuite livrés et assemblés sur site. Tout comme dans la construction traditionnelle, les bâtiments préfabriqués doivent être conçus pour s'adapter aux conditions climatiques locales et aux codes de construction afin de garantir un environnement intérieur confortable [BKK16].

4.4.2. Processus de préfabrication

De nos jours la préfabrication augmente drastiquement, puisque le système productif possède le net avantage de maîtriser les conditions de fabrication. En effet sur un chantier il est impossible de maîtriser la météo, l'accessibilité de l'outillage, l'ergonomie, le taux d'humidité etc... à contrario la préfabrication implique un important dispositif de manutention lorsque vient le moment d'amener les éléments sur le chantier [Col13].

Les moyens de production industriels amènent énormément de précisions grâce à la haute technicité des machines, la vitesse de production, la facilité et rapidité de mise en œuvre sur chantier, la diminution des erreurs et des déchets. Malheureusement, un système de production industrialisé demande des coûts d'investissements très élevés, c'est donc souvent un frein pour les entreprises.

Contrairement à la construction traditionnelle qui ne présente que deux étapes (conception et construction), la préfabrication (partiellement industrialisée) peut en présenter cinq, celles-ci sont :

- La conception en bureau d'étude.
- La production des éléments de construction.
- L'assemblage des éléments en atelier.
- Le transport des composants.
- La phase de montage sur chantier.

Pour les constructions totalement industrialisées, on parlera de systèmes constructifs. Un système constructif est un ensemble d'éléments produits en série, disponible rapidement (stock), indépendant d'un projet bien précis et qui doit être assemblable simplement, ce qui nécessite des normes portant sur différents critères (dimensions, assemblages, tolérances, etc...). Les constructions totalement industrialisées ne présentent que 3 étapes car la phase de conception n'est pas nécessaire pour la création de nouveaux projets car les composants sont standardisés. De plus, la production d'éléments de construction devient évitable puisque les composants sont en stock.

Contrairement aux idées reçues, la préfabrication n'est pas un frein à la créativité. En standardisant les composants préfabriqués et en offrant une personnalisation de masse les coûts finaux sont réduits, ce facteur devrait permettre d'élargir la commercialisation du préfabriqué dans le futur [BKK16].



Figure 26 : Conception en bureau d'étude [Boi19].



Figure 27 : Production d'éléments [MW17].



Figure 28 : Combinaison des éléments [Boi19].



Figure 29 : Transport d'éléments préfabriqué [Esp19].



Figure 30 : Phase de montage [Lca20].

4.4.3. Types de préfabrication

Plusieurs types de préfabrication aux finitions minutieuses coexistent aujourd'hui :

- Les composants.
- Les modules 2D.
- Les modules 3D.
- La construction hybride.

Les composants

Les composants préfabriqués sont nombreux, on les distingue souvent en deux catégories : les composants légers et les lourds. Les légers n'excèdent pas une tonne, il s'agit d'éléments tels que des poutrelles, des prédalles de petites dimensions, des cloisons de séparation, des escaliers, des châssis, des hourdis, etc... [BKK16].

Les composants lourds, sont : des planchers complets de pièces d'habitation, des éléments de façade, des éléments de couverture de grande portée etc... Leur poids peut atteindre une quinzaine de tonnes [BKK16].



Figure 31 : Panneaux de bardage [Sch20].

Plus les composants sont nombreux, plus la personnalisation et la flexibilité seront possibles. Par contre cela engendre plus de rigueur et d'attention sur le chantier notamment pour les joints, les connexions, les alignements et les contrôles d'éventuelles infiltrations [BKK16].

Les modules 2D

Il s'agit de constructions planes, le plus souvent utilisés pour la construction des murs, des planchers et des toits. Sont également inclus dans cette catégorie les panneaux isolants structurels et les murs rideaux. Les modules 2D ont un niveau de finition plus important du côté extérieur que du côté intérieur [Sch20].



Figure 32 : Modules 2D [Sch20].

Avec ce type de préfabrication, il est possible d'obtenir un degré de précision de l'ordre de 5 à 10mm. Les panneaux utilisés comme murs peuvent être isolés et finis en usine [BKK16] et [Sch20].

Les modules 3D

Les modules 3D sont réalisés en forme de boîte, ils ont un niveau de finition préfabriqué de 80 à 95% en atelier. Ils sont conçus pour faciliter l'assemblage. Leur taille varie en fonction de leur localisation dans le bâtiment et de contraintes dues au transport. Dans cette catégorie sont aussi incluses les maisons dites mobiles (construction plus légère, souvent composée d'un châssis métallique faisant partie du plancher). Les performances énergétiques des bâtiments modulaires sont bonnes en raison des tolérances plus serrées des joints [Sch20] et [BKK16].

Il faut savoir que si on choisit un système empilable rapidement, déjà bardées en atelier, le module 3D devient vraiment intéressant. Mais il est essentiel qu'il respecte les normes de transport internationales, sinon cela rend le procédé très compliqué voire irréalisable.



Figure 33 : Modules 3D [Sch20].

La construction hybride

Ce type de construction mixte les panneaux 2D avec les 3D permettant plus de liberté de conception [Sch20].



Figure 34 : Hybrid structure–First Light House_completely installed building [BKK16].



Figure 35 : Installation procedure [BKK16].

Conclusion

Ces différents procédés de préfabrication nous montrent les avancées dans ce domaine. Si on les associe, combine entre eux, cela permet une plus grande flexibilité, gain de temps, d'argent, etc... dans la construction de bâtiments préfabriqués. Néanmoins il est aussi envisageable de travailler ces types de préfabrication individuellement suivant la complexité de l'architecture demandée par le client.

Le type de préfabrication le plus utilisé à l'heure actuelle par les fabricants d'habitations préfabriquées, est le module 2D. Ce type de construction permet une certaine liberté de conception, réduit le coût de transport, et est plus maniable lors du levage et de l'installation sur chantier. Par contre, étant nombreux à devoir être assemblés lors du montage, ils allongent le temps de chantier.

4.4.4. Principaux matériaux de construction pouvant servir à la préfabrication

L'acier, le béton et le bois sont les principaux matériaux pouvant servir à la préfabrication. Ces différents matériaux vont être analysés ci-après, les points importants à mettre en évidence seront les méthodes permettant de les standardiser afin de les répéter pour permettre une production industrielle. Les intérêts et contraintes de ces différents matériaux se trouvent en annexe, ils sont intéressants de manière générale mais ils ne sont pas indispensables dans la réflexion du travail.

Acier

Depuis la révolution industrielle, l'acier est utilisé dans de nombreux domaines comme la construction de machines, de voitures, de bateaux, mais aussi dans la construction de bâtiments. Peu de gens le savent, mais actuellement 90% de l'acier utilisé dans le bâtiment provient du recyclage des déchets métalliques (voitures, frigo, etc..). Les excellentes propriétés mécaniques de l'acier ont permis la construction de bâtiments élevés, de type « immeuble-tour » (voir ci-dessous figure 36). Grâce à ses portées importantes, les façades ont pu accueillir des baies plus grandes, comme on le démontra dans la 2^{ème} moitié du 19^{ème} siècle à Chicago [Dep13].

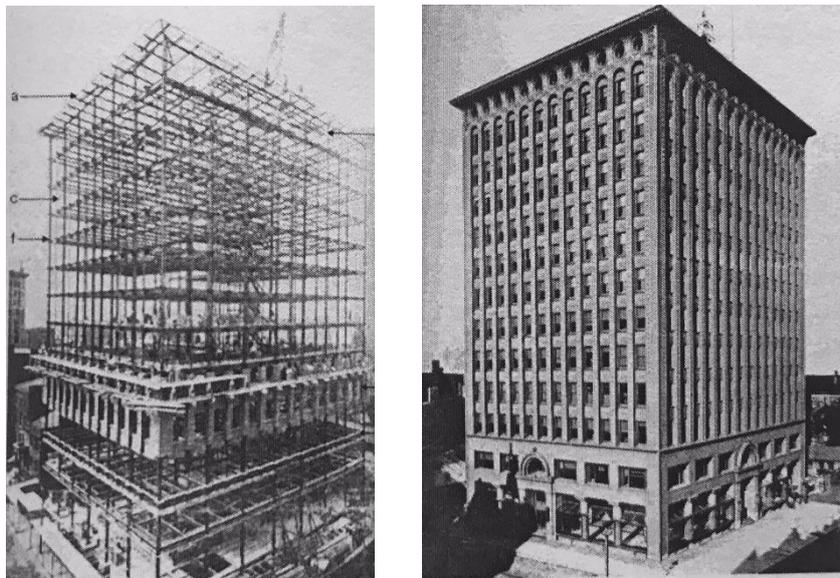


Figure 36 : Union Trust building_Adler et Sullivan_1892 [Dep13].

La construction métallique porte la marque de la préfabrication. Comme les chantiers ne permettent pas d'obtenir des conditions idéales pour le soudage, on préfère dans la mesure du possible un assemblage boulonné. Ce procédé permet également un démontage facile, ce qui explique la raison de son utilisation dans les expositions. La préfabrication ne concerne pas que la structure porteuse, mais aussi l'enveloppe, les tôles minces sont directement liées à la possibilité d'obtenir par pliage et courbage une stabilité que d'autres matériaux ne peuvent atteindre qu'avec des raidisseurs ou des supports ajoutés. La construction en acier est donc exclusivement fabriquée en usine, et est donc par conséquent préfabriquée [Dep13].

Exemple de bâtiment préfabriqué en acier

La Dymaxion « Wichita » House est une unité préfabriquée unifamiliale conçue par Buckminster Fuller.

Cette construction circulaire en aluminium est une version hybride entre deux prototypes de Fuller, l'un conçu et construit en 1945 et un second qui n'a jamais été assemblé. La structure à volume unique contient un salon/salle à manger, une petite cuisine, une buanderie, ainsi que deux chambres à coucher, chacune avec sa propre salle de bain et une unité de rangement autonome. Les sols sont reposés sur des poches pneumatiques, suspendues par des câbles en acier à un mât central fixé à une base, où sont cachés la fosse septique et le réservoir à fioul. Les murs extérieurs sont en plastique transparent et garnis de rideaux en aluminium ; les portes s'ouvrent grâce à des cellules photoélectriques [Lec19].



Figure 37 : Dymaxion "Wichita" House_ Buckminster Fuller_1945 [Lec19].

Béton armé

Le béton armé est devenu le matériau de construction du 20^{ème} siècle, la construction l'utilise quotidiennement, il garantit un rapide avancement des travaux comparé à d'autres méthodes [Dep13]. Le béton se compose de 70 à 80% de granulats et de sable, 10 à 15% de ciment, 15 à 20% d'eau et 2 à 5% d'air. Les granulats sont enrobés par la pâte de ciment.

La préfabrication d'éléments en béton est indispensable dans la construction, elle permet une optimisation des coûts, une réduction du temps d'exécution et propose une multitude de produits, de formes, de finitions, etc...[Cas07].

On distingue essentiellement deux grandes classes de préfabrication en béton : la préfabrication légère et la préfabrication lourde selon [BB20] :

- *La préfabrication légère : Elle fait appel à des éléments d'un poids maximal de l'ordre d'une tonne ; éléments d'ossature tels que poutrelles, panneaux de façade, prédalles de petites dimensions, cloisons de séparation...etc.*
- *La préfabrication lourde : Fait appel à des éléments de construction dont les dimensions sont beaucoup plus importantes : planchers complets de pièces d'habitation, façade de la hauteur d'étage, éléments de couverture de grande portée et dont le poids peut atteindre actuellement une quinzaine de tonnes, le matériau utilisé est généralement le béton armé ou précontraint.*

Les produits préfabriqués en béton se distinguent selon [BB20] par :

- *L'usage d'armatures (ex. : poutrelles, panneaux, escaliers) ou non (ex. : blocs, entrevous, tuiles).*
- *Les produits moulés : Sont plutôt des produits de grandes dimensions. Ils nécessitent un coffrage de type table (ex. : panneaux de façade) ou un moule adapté une géométrie particulière (escaliers). Ils sont fabriqués en démoulage différé.*
- *Les produits filés : Sont fabriqués (ex. : poutrelles) à l'aide d'une machine qui se déplace sur un banc de grande longueur (80 à 120 m) à une vitesse de l'ordre de 2 m/min. Le filage permet de fabriquer plusieurs lignes de produits en parallèle (8 à 22 rangées).*

On retrouve dans ces deux grandes classes, des systèmes d'assemblages de structure de bâtiments préfabriqués en béton armé selon [BB20] :

- *Structures à ossature : Elles sont généralement constituées de poteaux, poutres, poutrelles et éléments de planchers préfabriqués. Les poteaux et les poutres peuvent être associés pour former les portiques.*
- *Structures en panneaux préfabriqués : Elles sont essentiellement constituées de panneaux préfabriqués verticaux de la hauteur de l'étage formant les murs, les panneaux de planchers horizontaux en dalles pleines ou évidées. C'est la solution la plus employée dans la construction de logements.*
- *Structures en cellules : Composées de cellules en béton complètement préfabriquées. L'emploi des éléments volumiques peut être limité à la réalisation des blocs sanitaires ou des blocs gaines autour desquels sont montés des structures en panneaux.*

Exemple de bâtiment préfabriqué en béton

La 4x4 House fut conçue par l'architecte Tadao Ando en 2003, il s'agit d'une maison ou plutôt une tour de quatre étages de chacun 4m sur 4m. Les pièces de vie (cuisine et salon) sont au dernier étage tandis que les chambres sont situées aux étages intermédiaires. Le dernier étage est déplacé d'un mètre par rapport l'axe vertical du bâtiment, ceci donne l'impression d'être en mer et de regarder l'horizon [QW21].

La préfabrication de cette maison se remarque par les joints horizontaux entre chaque étage. Il s'agit d'une préfabrication lourde composée d'une structure en panneaux préfabriqués.



Figure 38 : 4x4 House_Tadao Ando [Wikiar21].

Bois

De nos jours les constructions en bois se développent de plus en plus, notamment parce qu'il s'agit d'un matériau durable, renouvelable et qui peut être mis en œuvre rapidement. Il existe de nombreuses façons d'utiliser le bois dans la construction, néanmoins 4 systèmes constructifs sont privilégiés pour leurs qualités structurelles et architecturales. Il s'agit de l'ossature bois, du poteaux/poutres, du bois empilé et des panneaux massifs [Hec14].

Systèmes constructifs bois

L'ossature bois

L'ossature bois permet la préfabrication de nombreux composants du bâtiment. Aujourd'hui, on fabrique les différentes parois dans des ateliers pour ensuite les acheminer et les monter sur chantier. Cette méthode permet une très grande précision et évite les retards causés par les intempéries et autres problèmes liés au chantier. Les limites de ce système de production sont les règles de transport routier qui définissent la dimension maximum des parois.

Le principe de l'ossature bois est composée selon [Hec14] :

« De montants (éléments verticaux) et de traverses (éléments horizontaux) disposés à intervalles réguliers et assemblés par clouage ou par vissage. Ces éléments ont une section identique, qui reste relativement faible. Une fois liés entre eux, ils forment des cadres sur lesquels sont cloués ou vissés des panneaux (de type OSB). »



Figure 39 : Construction en ossature bois [Egb17].

Au niveau de la paroi, l'isolation thermique est réalisée en plaçant un isolant (laine de verre ou fibre de cellulose, etc...) entre les montants de l'ossature. Pour l'améliorer, on peut encore

disposer une couche d'isolant supplémentaire à l'extérieur, permettant ainsi de protéger les «points faibles» que sont les montants et les traverses ».

Le poteaux/poutres

L'apparition du lamellé-collé et des assemblages mécaniques performants ont permis au système de poteaux/poutres de voir le jour. Ce système est particulièrement adapté aux grands bâtiments comme les halls industriels, les halls omnisports, etc... [Hec14].

Le système poteaux-poutres permet d'une part d'augmenter les surfaces vitrées et d'autre part une plus grande liberté dans l'aménagement de l'espace. On différencie l'enveloppe du système porteur, on parle dans ce cas de squelette structurel et de peau. Ce squelette structurel se divise en deux parties : la partie primaire comprenant les poteaux et les poutres et la secondaire reprenant les solives et chevrons.

Les assemblages sont réalisés à l'aide de pièces en métal ce qui supprime les affaiblissements des sections de bois. Il s'agit de quincaillerie, comprenant crampons, goujons, boulons, broches, tiges, etc ... [Pop15].



Figure 40 : Construction en poteaux-poutres [Sta21].

Le bois empilé

La technique du bois empilés existe depuis bien longtemps, les pièces de bois s'empilent les unes sur les autres, se croisent et s'emboîtent à leurs extrémités. Au début les joints entre les différentes parties étaient faits à l'aide de chanvre ou de laine afin d'augmenter la zone de contact entre les rondins.



Figure 41 : Construction en bois massif empilé [BW15].

Aujourd'hui, les systèmes monocouches co-existent avec un système de bois empilés multicouches (une sorte de panneaux sandwich composé de bois et d'isolant).

Ce système constructif est un gros consommateur de matières premières, de plus le bois étant compressé, il subit un tassement pouvant aller de 2 à 4 cm par étage, il est primordial d'en tenir compte lors de la conception notamment pour les ouvertures [Pop15].

Les panneaux massifs

Il existe de nombreux types de panneaux en bois massif ; on peut citer les panneaux contrecollés à plis croisés, à plis croisés chevillés, les planches juxtaposées collées ou clouées, etc... Ces panneaux jouent un rôle porteur mais aussi d'enveloppe. En général ils sont isolés du côté extérieur et peuvent rester apparents du côté intérieur [Pop15].



Figure 42 : Construction en panneaux massifs [Mai14].

Tableau récapitulatif des systèmes constructifs en bois

Système constructif bois	Principe	Avantages principaux	Inconvénients principaux
Ossature bois	Montants et traverses faiblement espacés formant des cadres (murs) contreventés à l'aide de panneaux OSB.	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptabilité/flexibilité. - Préfabrication ou montage sur place. - Gain d'espace intérieur (murs de faible épaisseur). - Faibles sections (manutention aisée). - Bonne isolation thermique. - Prix raisonnable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mauvaise inertie (isolation acoustique). - Limité dans le nombre d'étages (Rdc + 4 étages).
Poteaux/poutres	Structure formée de poteaux et de poutres disposés à intervalles réguliers, et contreventée à l'aide de croix de Saint-André.	<ul style="list-style-type: none"> - Moyenne à grande portée. - Préfabrication et montage sur chantier. - Structure dissociée de l'enveloppe (réorganisation aisée des espaces). 	<ul style="list-style-type: none"> - Assemblages plus compliqués à réaliser. - Engin de manutention parfois nécessaire. - Peu de flexibilité dans la forme. - Prix élevé.
Bois empilés	Empilement de madriers avec assemblages à mi-bois au niveau des angles et croisements.	<ul style="list-style-type: none"> - Préfabrication et montage sur chantier. - Résistance et stabilité dimensionnelle. 	<ul style="list-style-type: none"> - Isolation thermique moyenne. - Intégration difficile des techniques. - Aspect de « chalet » (urbanisme). - Sensible aux tassements différentiels. - Peu de flexibilité dans la forme.
Panneaux massifs	Panneaux massifs préfabriqués au moyen de lattes assemblées par collage (panneaux contrecollés) ou par clouage (panneaux contrecloués).	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptabilité. - Préfabrication et montage sur chantier. - Rapidité de montage. - Résistance mécanique (multi-étage). - Bonne isolation thermique et acoustique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Engin de manutention nécessaire. - Peu de flexibilité dans la forme. - Prix élevé.

Figure 43 : Récapitulatif des systèmes constructifs en bois [Hec14].

4.5. Modularité

4.5.1. Notions de la modularité

Selon [Fri04] « *La modularité consiste en une décomposition d'un produit complexe en une série de sous-ensembles qui sont assemblés les uns aux autres pour former le produit final* ».

Un module peut être bidimensionnel ou tridimensionnel, jusqu'à constituer parfois de véritables unités spatiales entièrement équipées, il peut s'agir aussi de dalles, de murs, de plafonds ou de façades. Cela présuppose de bâtir en systèmes, et donc de prendre en compte, dès la conception initiale du projet, la manière dont il sera construit [ER19].

La modularité découle de la préfabrication mais on peut concevoir une architecture modulaire qui n'est pas du tout préfabriquée. Une architecture modulaire est basée sur un module. Mais ce n'est pas pour ça qu'elle sera industrialisée et ou standardisée.

Aux Etats-Unis, en Scandinavie, au Japon, en Allemagne, en Belgique, et d'autres pays, d'importantes firmes ont déjà adopté la construction modulaire. Ils créent des constructions modulables aux techniques et études optimales [Hey12].

Selon [Fri04] « *Dans la mesure où chaque sous-ensemble peut lui-même être un assemblage de différents composants physiques, caractériser l'architecture d'un produit revient à spécifier :*

- *Comment sont agencés les différents éléments fonctionnels du produit complexe ? Cet agencement détermine la performance globale du produit.*

- *Comment s'effectue le passage de ces éléments fonctionnels aux composants physiques ? Ce sont ces derniers qui sont concrètement intégrés dans le produit. La question essentielle consiste à savoir si une fonction doit/pour être remplie par un seul ou plusieurs composants.*

- *Comment sont reliés les composants entre eux et avec le système global ? On s'interroge sur les interfaces qui régissent les interactions physiques entre les composants. Ces interfaces peuvent être couplées si une modification d'un composant implique une modification subséquente chez le composant relié. Elles seront découplées si un changement dans un composant n'implique pas de changement dans l'autre ».*

En résumé la conception modulaire, c'est :

- Réduire les interactions entre les composants.
- Diviser un système en modules avec un minimum d'interrelations entre eux.
- Travailler de manière plus séquencée et avoir des idées bien définies au lieu de se disperser dans tous les sens.
- Décider dès la conception comment on va diviser le bâtiment pour simplifier cette complexité.

4.5.2. Vers une architecture modulaire

Selon [ER19] « *L'observation du bâti montre que ce dernier se renouvelle selon des cycles relativement lents. Sa transformation nécessite souvent des interventions complexes, qui monopolisent d'importantes ressources environnementales et financières. À l'inverse, notre société se caractérise par des évolutions de plus en plus rapides et imprévisibles. Ce double constat encourage l'exploration de nouveaux paradigmes⁸ permettant de mieux répondre aux besoins induits par les transitions vers la durabilité. Dans ce contexte, l'architecture modulaire offre une perspective prometteuse, dans la mesure où elle intègre dès les premiers pas du processus de conception les notions d'adaptabilité, de durabilité et de qualité architecturale.* »

La maison Dom-ino érigée par Le Corbusier en 1914 est un exemple des prémices de la construction modulaire.

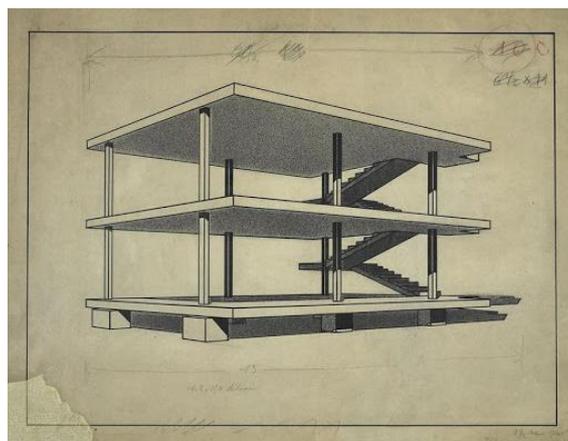


Figure 44 : Maison Dom-ino_Le Corbusier_1914 [Fon21].

⁸ Modèle théorique de pensée qui oriente la recherche et la réflexion scientifiques [Larouss21].

Plus tard en 1956, lors du Congrès sur l'Architecture Moderne, à Dubrovnik en Yougoslavie, l'architecte français Yona Friedman proposa le projet « Vue d'une Ville Spatiale ». Ce projet consistait à l'édification d'une infrastructure aux dimensions d'une ville dans laquelle venaient s'implanter ou se retirer des cellules individuelles, potentiellement réalisées à partir de containers [Sch13].

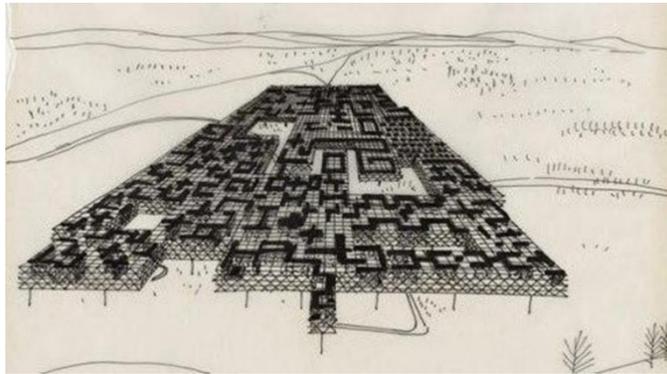


Figure 45 : Vue d'une ville spatiale_ Yona Friedman_ 1958 [Sch13].

En 1960, l'architecte Japonais Arata Isozaki, proposa son concept « Cities in the Air ». Cette idée était destinée à abriter une ville au-dessus même de la ville congestionnée de Tokyo en construisant des infrastructures de circulation sous forme de tours autour desquelles viennent s'étendre des habitations, à l'image d'arbres. Ce projet n'a jamais vu le jour [Sch13].

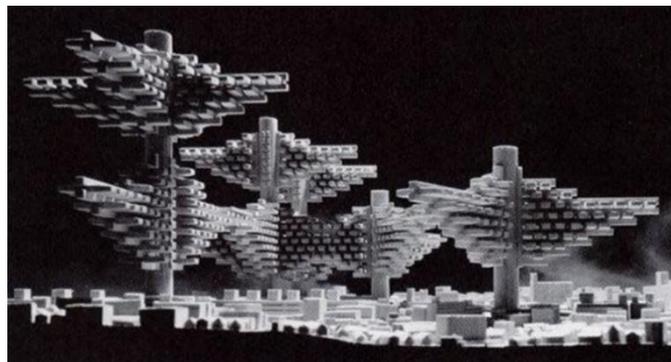


Figure 46 : Cities in the air_ Arata Isozaki_ 1960 [Gau07].

L'architecte japonais Kisho Kurokawa, conçu en 1961 le projet « Floating City ». Ce projet consiste en une croissance des habitations cellule par cellule. Le déploiement se fait sur un lac par la création d'unités identiques en spirales. Ce projet est resté qu'au stade de concept. [Gau07].

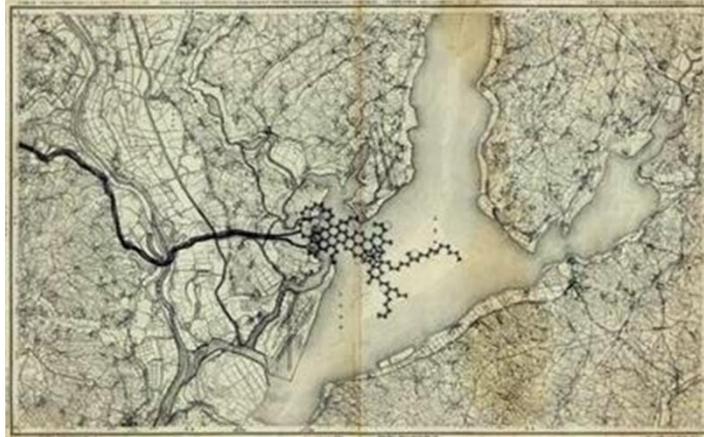


Figure 47 : Plan de la Floating City__ Kisho Kurokawa [Gau07].

Selon [Sch13] « *Le début des années 2000 symbolise donc l'évolution démographique et économique et son impact sur la mentalité de la population par rapport au milieu du XXème siècle où il était utopique d'imaginer habiter au-dessus des villes sur des mégastructures métalliques. Dès le début des années 2000, la mentalité était plus individualisée et pragmatique. Il était véritablement possible de créer des habitations individuelles ou collectives avec des containers et, plus le temps passe, plus les projets sont passés d'utopie à réalité. Les gens ont commencé à appréhender le potentiel de cette architecture, et c'est ainsi que d'un simple moyen de transport, le container est passé d'une fonction simple à un catalyseur d'idées nouvelles dans le domaine de la construction* ».

4.5.3. Cas de construction modulaire de nos jours

Hosomi, Daniel Dethier, Herve

Dans l'article Hosomi de l'architecte Daniel Dethier, celui-ci décrit son projet avec les innovations qu'il apporte. Selon [DN11] « *Hosomi est un concept de construction modulaire, flexible, contemporaine, en phase avec l'homme et son mode de vie* ».

Les modules s'articulent de toutes les manières possibles, afin d'obtenir un résultat répondant à la demande et à l'intention de chaque étude architecturale.

Hosomi fournit une solution modulable au mode de vie actuel qui évolue sans cesse. Il s'agit d'une architecture modulaire acier/bois.

La construction des modules se fait en atelier. Selon [DN11], « *Les modules possèdent une ossature sur laquelle viennent se greffer les différents composants (élément de mur, planchers, toiture, escaliers, portes, fenêtres, pare-soleil ...) et équipements (chauffage, ventilation, pompe à chaleur, capteurs solaires, électricité, mobilier, sanitaires ...).* »

La préfabrication permet quant à elle d'obtenir un haut degré de qualité et de précision puisque les conditions dans lesquelles travaillent les ouvriers sont optimisées. Ce qui permet une livraison et un montage en peu de temps [DN11].



Figure 48 : Hosomi_Dethier Architecture_2011 [DN11].



Figure 49 : Chantier_ Hosomi_Dethier Architecture_2011 [DN11].

Cette étude vise à s'inscrire dans la conception de ville mixte, lieu dans lequel le construit et les espaces verts coexistent (de façon à obtenir un ensemble homogène). Hosomi s'accorde donc avec ce concept [DN11].

One9, Ammon Weber, Melbourne

Le One9 a été conçu par l'atelier d'architecture Ammon Weber et construit par Vaughan Constructions à Melbourne en 2013. Ce projet comprenant 34 chambres et des appartements sur 9 étages a été réalisé en utilisant 36 modules de construction unifiés en 5 jours seulement [BKK16].



Figure 50 : One9 modular building stabilized by a concrete core [BKK16].

Habitat 67, Moshe Safdie, Montréal

Habitat 67 fut réalisé par Moshe Safdie lors de l'exposition de 1967 à Montréal. Pour réaliser ce projet, Safdie s'appuie sur des réflexions de sa thèse « A Three-Dimensional Modular Building System ». Il s'intéresse aux rôles et fonctions de l'architecture en milieu urbain en tenant particulièrement compte de la vie quotidienne des futurs occupants [Hab21].



Figure 51 : Habitat 67 [West21].

Habitat 67 compte 354 modules en béton précontraint, formant 148 appartements flottant. Cet édifice fascinant, extravagant par sa modernité et son minimalisme marque le paysage de Montréal depuis un demi-siècle. En redéfinissant la conception des espaces de vie, il concilie contexte urbain et qualité de vie [Hab21].

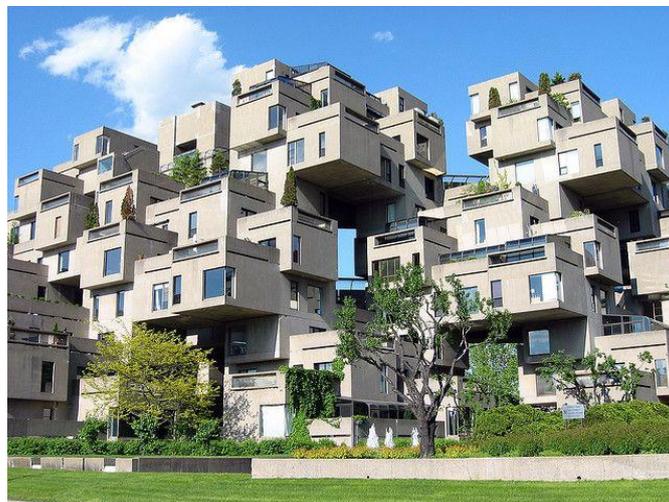


Figure 52 : Habitat 67_Moshe Safdie [Pint21].

4.6. Intérêts et contraintes de l'industrialisation

L'industrialisation permet une économie de temps important sur chantier puisque hormis l'excavation et l'installation des fondations réalisés sur site, les principales étapes sont effectuées en atelier. Il faut notamment savoir qu'un des buts d'industrialiser est d'obtenir une production moins chère que l'artisanat.

Les intérêts liés à l'industrialisation sont pour [Hey12], [BL04] et [Col13] :

- *L'indépendance des conditions météorologiques.*
- *La réduction du temps de montage.*
- *La suppression des erreurs de construction.*
- *La production optimisée.*
- *Le haut degré de finitions pour les parois 2D.*
- *L'optimisation du temps de travail des différents corps de métier sur le chantier.*
- *L'intégration d'équipements tels que le chauffage et la VMC.*
- *L'élimination du gaspillage tout en diminuant les coûts.*
- *La diminution des frais par des commandes précises.*
- *La planification, le contrôle et l'exécution sont simplifiés.*
- *La proposition des prototypes permettant de visualiser l'aspect final.*
- *La réalisation des composants de forme et de finition complexes.*
- *La possibilité d'interchanger des pièces.*
- *La simplification des assemblages.*
- *L'utilisation d'un même système de fabrication permet de diminuer les coûts d'assemblage.*
- *Le développement de la standardisation pour la conception apporte des avantages comme : L'amélioration de la qualité, de la fiabilité des produits, amélioration des systèmes et processus, une réduction du gaspillage des matériaux, facilitation de la maintenance des matériaux.*

Les contraintes liées à l'industrialisation sont selon [Col13] :

- *La préfabrication peut nécessiter un important dispositif de manutention lorsque les éléments structuraux à transporter deviennent assez encombrants (besoin d'engins de chantier plus importants pour le levage des modules et l'équilibrage des charges peut être compliqué). De plus, les tolérances sur les éléments structuraux doivent être assez importantes étant donné le manque de flexibilité possible sur chantier lors de l'assemblage de ces différents éléments.*
- *La préparation en amont du chantier pour définir précisément les éléments architecturaux et choisir les assemblages.*
- *L'étude du transport des éléments sur le chantier.*
- *La livraison impérative des éléments à des dates précises, en fonction du planning d'avancement du chantier, avec la possibilité de remplacer un élément non conforme dans un délai acceptable.*
- *La réalisation rigoureuse des assemblages et des joints, ce qui nécessite un personnel qualifié.*

La préfabrication d'habitations diversifiées est un système de production novateur. Par ce système, tant les architectes que les fabricants tentent de répondre aux attentes diverses et variées des consommateurs en proposant un grand nombre d'habitats adaptés à leurs budgets.

5. Relation entre diversité et industrialisation

Ce chapitre est réalisé essentiellement sur des études de projets. Ceux-ci seront comparés afin de déterminer comment l'industrialisation entrave ou contribue à la diversité des logements. Ces projets seront classés comme suit, à la suite d'un tableau récapitulatif :

- Projets réfléchis en termes de diversification et difficiles à industrialiser.
- Projets réfléchis en termes de diversification et où l'industrialisation est faisable.
- Projets industrialisés ayant un impact négatif sur la diversité.
- Projets industrialisés ayant un intérêt du point de vue de la diversité.

5.1. Comment peut-on amener les demandes de chacun à rencontrer l'industrialisation ?

En 1993, Pine a introduit un paradigme appelé la « personnalisation de masse », ce concept prend le meilleur de la production de masse et la conjugue à la capacité d'offrir une grande variété de produits. Avec cette vision, les entreprises ont adapté les produits proposés à la demande toujours plus individualisée des clients. Mais cela a engendré des problèmes de gestions d'une grande diversité de produits [IM97].

Une des solutions à ce problème pourrait être selon [ME18] « *Si on intègre une architecture modulaire dans les différents projets il sera possible de réduire les coûts de façon drastique tout en gardant une grande diversité. Par exemple, à partir des éléments de construction standardisés en trois grandeurs différentes, il est possible de construire plus de deux millions de types d'habitations de trois pièces, totalement différentes. Ce qui revient à dire que, dans une ville de six millions d'habitants, il n'y aurait pas deux appartements semblables* ».

Il semble difficile d'industrialiser un maximum tout en proposant une grande diversité, néanmoins il pourrait être proposé aux clients de faire leur choix de matériaux dans un catalogue de produits standardisés. Ce qui permettrait à l'entreprise de faire des économies puisqu'elle commanderait/ fabriquerait régulièrement les mêmes produits tout en proposant un choix diversifié aux clients.

5.2. Analyses de différents projets du point de vue de la diversité et de l'industrialisation

Hôtel Tassel, Victor Horta, Bruxelles

L'Hôtel Tassel conçu par Victor Horta de 1893 à 1895 est une architecture Art nouveau, cela signifie qu'il s'agit d'une œuvre d'art totale, avec beaucoup de courbes, issue du monde organique, végétal. On vit dans une atmosphère où tout doit être pensé de la même manière, du gros œuvre jusqu'au plus petit détail [Coh19].

Avant 1939, les architectes travaillaient exclusivement sur la composition des façades, l'intérieur était toujours construit par des sociétés de construction, ce qui n'est absolument pas le cas de ce bâtiment [Coh19].

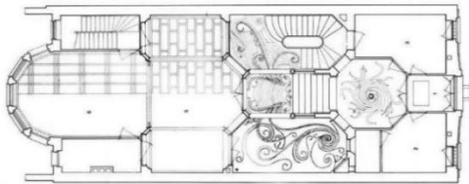


Figure 53 : Plan_ Hôtel Tassel [Coh19].

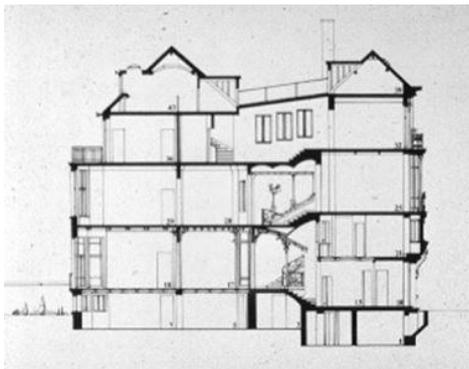


Figure 54 : Coupe_ Hôtel Tassel [Coh19].



Figure 55 : Façade_ Hôtel Tassel [Coh19].

On remarque sur ce bâtiment une rupture dans la façade (voir figure 55), elle est symétrique. On observe beaucoup de métal sur celle-ci, un grand volume sort et l'entrée est axiale [Coh19].

On observe sur le mur de la cage d'escalier, un dégradé de couleur qui joue avec le puits de lumière. On remarque ainsi le travail artisanal des vitraux, jusqu'aux lampes en passant par la cage d'escalier [Coh19].

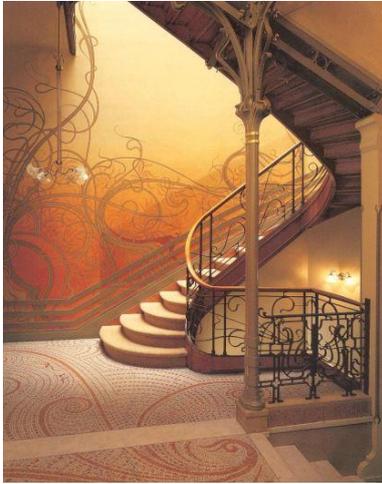


Figure 56 : Escalier_Hotel Tassel [Coh19].

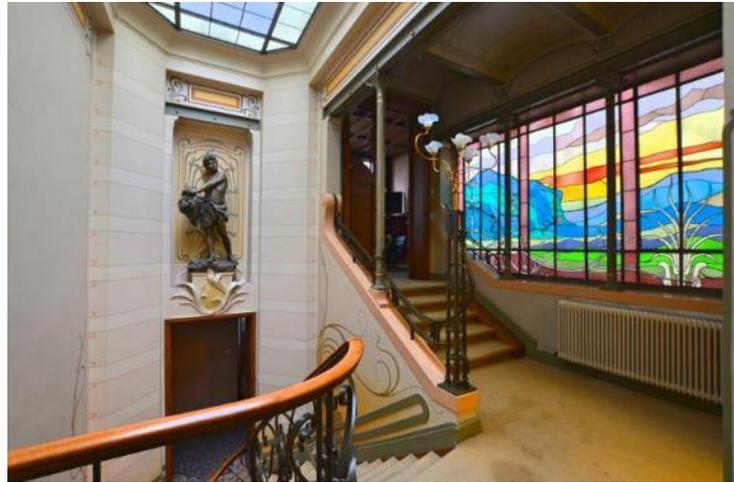


Figure 57 : Vitrage_Hotel Tassel [Coh19].

Ce bâtiment présente les caractéristiques d'une architecture préfabriquée pour les raisons suivantes : Horta dessinait chaque composant de son bâtiment. Tous les fers forgés étaient réalisés en atelier par des ferronniers. De plus, toutes les pierres de tailles autour des baies étaient numérotées et dessinées, Horta donnait les plans à un fabricant pour confier leur fabrication, qui les préparait et les amenait sur place.

Bien qu'elle présente des caractéristiques de préfabrication, il est inconcevable d'industrialiser l'architecture de Victor Horta vu sa réalisation très artisanale.

De nos jours, ce travail artisanal a disparu. Il est donc très compliqué de rénover ce genre de bâtiment [Coh19].

Casa Milà, Antoni Gaudi, Barcelone

Gaudi a construit entre 1906 et 1910 à Barcelone, La Pedrera (carrière en catalan) pour la famille Milà. Le surnom de cette construction vient du fait que sa façade et ses balcons sont en pierre [GD21] et [CB21].

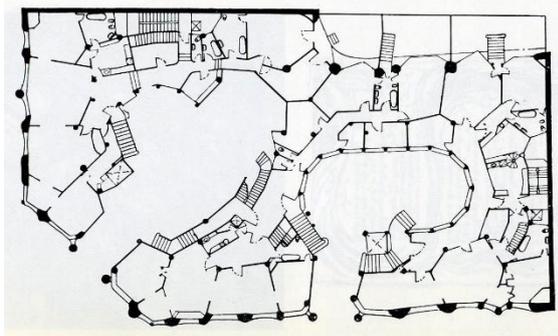


Figure 58 : Plan_ Casa Milà [Ker21].



Figure 59 : Façade_ Casa Milà [Wik18].

Cette construction fut l'avant dernière de Gaudi, il réalisa cet hôtel particulier dans le style moderniste catalan en utilisant ses techniques d'architecture organique⁹, malgré l'opposition répétée du conseil municipal. De nos jours la Casa Milà fait partie des dix sites les plus touristiques de Barcelone [Van21].

Selon [GD21] « *La façade constitue une impressionnante masse ondulante de pierre qui représente la mer. Les ouvertures semblent creusées dans cette masse et sont ornées d'un magnifique travail de ferronnerie avec des formes végétales pour les balcons et des grilles étonnantes pour les entrées de l'immeuble. Sur la terrasse du toit, les sorties d'escalier sont de surprenantes sculptures hélicoïdales revêtues de collage céramique et de marbre. Les cheminées rappellent des guerriers casqués, le tout est un espace fantastique et futuriste.*

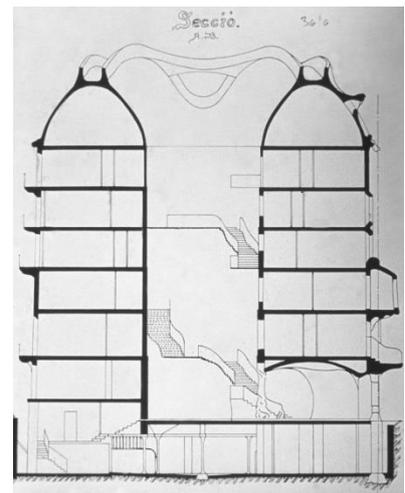


Figure 60 : Coupe_ Casa Milà [Ker21].

⁹ Est une philosophie architecturale qui s'intéresse à l'harmonie entre l'habitat humain et le monde « naturel » [Laro21].

Les appartements spacieux sont disposés le long de la façade et autour de deux patios circulaires. Le seul appartement Mila mesurait 1.323 m² faisant de cette habitation un lieu vraiment immense.

Les éléments marins se retrouvent dans la décoration intérieure : plafonds mouvementés, colonnes en pierre sculptée et un mobilier créé par Gaudí d'une grande modernité » (voir figure 59).

Depuis 1984 la Casa Milà est reprise au patrimoine Mondial par l'UNESCO.



Figure 61 : Escalier intérieur_Casa Milà [BTT21].

Ce qui caractérise ce projet si unique est la façon dont cette architecture organique s'intègre dans un contexte de ville rigoureusement organisée comme Barcelone. Il y a une relation entre le projet et son contexte urbain.

Tout comme l'Hôtel Tassel de Victor Horta, ce bâtiment présente les caractéristiques d'une architecture préfabriquée, Gaudí dessinait l'ensemble de ces pierres, et les faisait tailler par des artisans, une fois sculptée, ces pierres étaient livrées sur chantier. De plus, ce bâtiment est une association de différentes réalisations artisanales. Il est donc inconcevable d'industrialiser cette architecture.

Fallingwater, Frank Lloyd Wright, Pennsylvanie

Fallingwater (chutes d'eau) fut conçue et réalisée par Frank Lloyd Wright entre 1935 et 1939, elle est située dans les montagnes du sud-ouest de la Pennsylvanie. Cette construction est l'une des plus célèbres de Wright, elle exprime sa philosophie de l'architecture organique, l'union harmonieuse de l'art et de la nature. Il réalisa Fallingwater à même le roc pour l'élever au-dessus de la chute d'eau [Fal21].

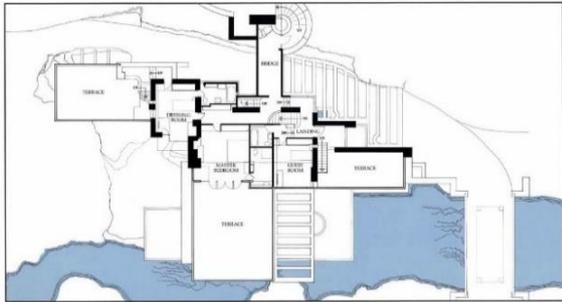


Figure 62 : Plan_Fallingwater [Ka21].



Figure 63 : Façade_Fallingwater [Ka21].

L'auteur [Pha19] explique que « Avec ses impressionnantes dalles en béton horizontales en porte-à-faux sur une cascade rugissante, Fallingwater incarne la rencontre entre la poésie de la nature et le triomphe de l'humain.

Le plan a été emprunté à une création antérieure de Wright de style prairie, comme en témoignent les volumes articulés autour d'un point central.

Au premier regard, son horizontalité évoque le modernisme international de l'époque ; pourtant, ses matériaux naturels et ses détails artisanaux, comme les murs de pierres empilées, dévoilent son influence Arts and Crafts¹⁰.

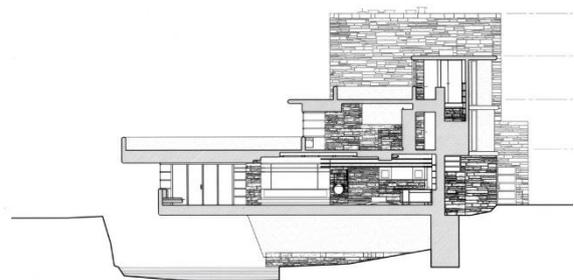


Figure 64 : Coupe_Fallingwater [BP19].

¹⁰ Mouvement anglais créé en 1888, dans le dessein de renouveler l'artisanat. En réaction contre la production industrielle [Laro21].

A l'intérieur, le contraste entre homme et nature reste évident : le sol en dalles paraît poli par le passage de l'eau, mais les plafonds encastrés, qui semblent flotter, sont un chef-d'œuvre du génie humain. Fallingwater est probablement la création architecturale américaine la plus remarquable du 20^{ème} siècle ».

Ce qui rend ce projet si exceptionnel, c'est la relation, l'union entre le bâtiment et son contexte naturel. Le bâtiment et la cascade ne font qu'un. On parle dans ce cas-ci d'un bâtiment réfléchi comme ne pouvant être conçu qu'une seule fois dans cet endroit bien précis. Il est donc inimaginable d'industrialiser ce bâtiment et de le produire en série.

Eames House, Charles Eames, Los Angeles

La Eames House est un monument de l'architecture moderne du milieu du 20^{ème} siècle (entre 1945 et 1966), qui s'inscrit dans le programme des célèbres Case Study Houses¹¹ (réunissant 36 projets à Los Angeles), elle est également connue sous le nom de Case Study House No. 8. Elle faisait office d'habitation et d'atelier pour le couple de designers grâce à ses deux bâtiments adjacents distincts [EF21] et [AD19].

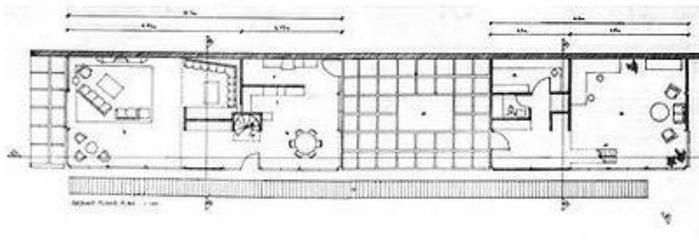


Figure 65 : Plan_Eames House [Min21].



Figure 66 : Façade_Eames house [Pinte21].

Nichées sur le flanc d'une colline, la Eames House se compose de deux boîtes rectangulaires en verre et en acier d'une hauteur de 5,20m, ses structures sont soutenues par un mur de béton de 60m de long sur 2,5m de haut. L'alignement se fait sur un axe central, une cour sépare les deux volumes. Chaque volume est muni d'un balcon donnant sur la cour centrale. La nature joue un rôle essentiel dans cette réalisation [EF21].

¹¹ Est une expérience architecturale visant à construire des maisons modernes et économiques. Il se déroule sur la côte ouest des États-Unis, principalement autour de Los Angeles entre 1945 et 1966 [Larou21].

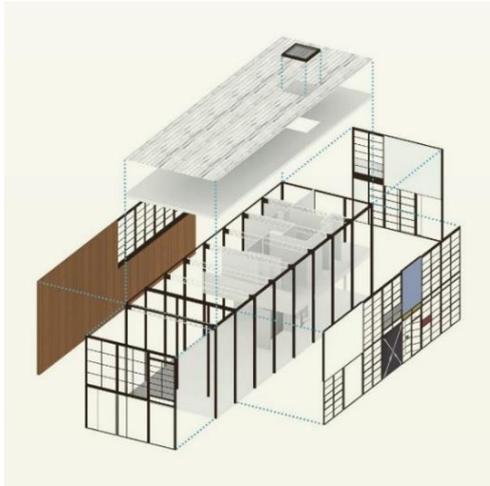


Figure 67 : Axonométrie éclatée_Eames House [Pin21?].

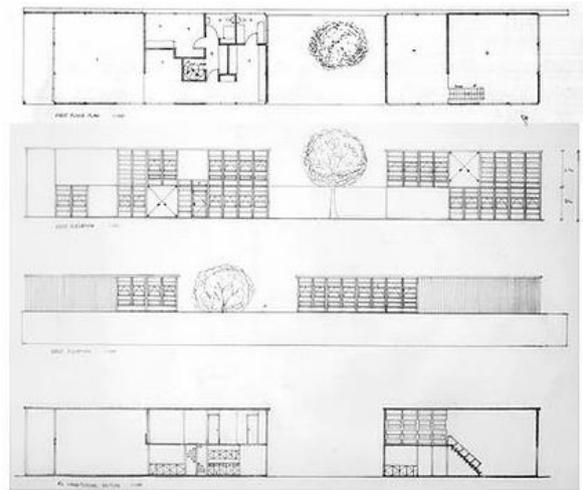


Figure 68 : Plan, coupes et élévations_Eames House [Min21].

En 1945, les concepteurs Charles et Eero Saarinen nommèrent les premiers plans de Eames « Bridge House ». Ils devaient utiliser des matériaux préfabriqués commandés dans des catalogues industriels. Malheureusement la pénurie d'acier due à la guerre reporta leur projet jusqu'en 1948. Les fondations et la charpente métallique ont été achevées en seulement 16 heures, quant au reste de la maison, il fut terminé en quelques mois [EO21].

Ce type de projet est réfléchi pour être unique mais la façon dont il a été conçu permettrait de l'industrialiser. Ceci est dû au fait qu'il s'agit d'une architecture simple, épurée, construite à partir de matériaux préfabriqués commandés dans des catalogues industriels.

Farnsworth House, Ludwig Mies van der Rohe, Chicago

Le Dr Edith Farnsworth, fit construire par l'architecte Mies van der Rohe dans la périphérie de Chicago dans les années 1945 à 1951, la maison Farnsworth pour y passer ses weekends lors de sa retraite. Ce pavillon de 135m² fut construit en verre de façon à tirer pleinement profit de l'environnement boisé concrétisant le concept de relation forte entre la maison et la nature. Pour plus de minimalisme, le bâtiment est entièrement ouvert à l'exception des blocs sanitaires se trouvant au centre [Arc21].

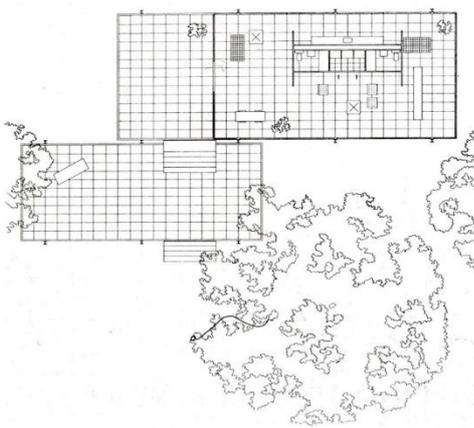


Figure 69 : Plan_Farnsworth house [DAD15].



Figure 70 : Farnsworth house_Mies van der Rohe [Wikiar21].

Le pavillon est composé de 8 colonnes d'aciers à la fois structurelles et expressives, qui permettent de soutenir la charpente du toit mais aussi les planchers qui eux sont des dalles de béton préfabriquées. Le pavillon étant en zone inondable il est surélevé d'1,5m du sol [Arc21]. Toutes ces fenêtres concrétisent l'idée de Mies qui est de lier l'habitation à la nature environnante.

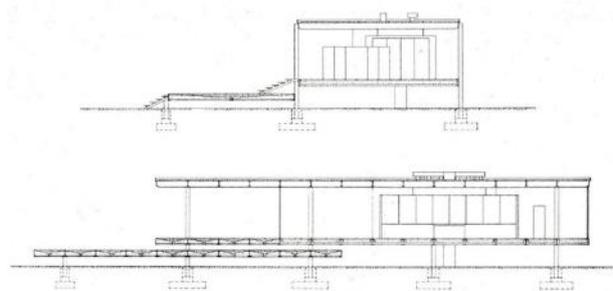


Figure 71 : Coupes_Farnsworth House [DAD15].

Comme pour la Eames House, ce type de projet est réfléchi pour être unique mais la façon dont il a été conçu permettrait de l'industrialiser. Cette architecture minimaliste, composée de colonnes en acier et de dalles en béton préfabriquées ne présente aucune difficulté à être industrialisée et donc peut être produite en série.

Fisher House, Louis I. Kahn, Hatboro, Pennsylvanie

Kahn, entreprit lors des dix dernières années de sa vie, de réconcilier l'homme et la nature à travers l'architecture. Pour ce faire, il réalisa entre 1964 et 1967 la Fisher House. Il attachait beaucoup d'importance à la relation entre les matériaux choisis et le site où le bâtiment fut construit [Cal21].

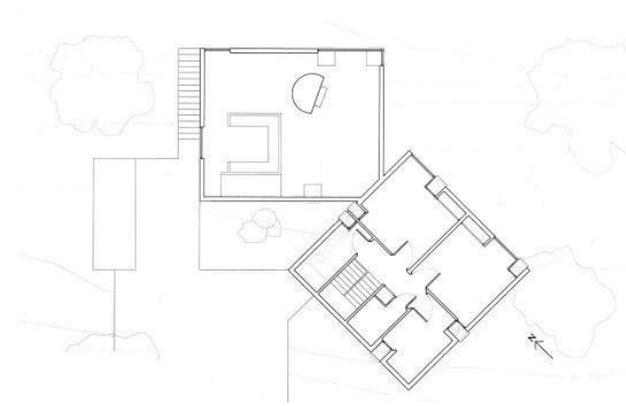


Figure 72 : Plan_Fisher House [Gal21].



Figure 73 : Façade arrière_Fisher House [Cal21].

Selon [Mor21] « *La maison Fisher a été tout particulièrement remarquée par sa volumétrie, deux cubes de bois disposés à 45° l'un de l'autre, à cheval sur le sommet de la pente. Le cube le plus proche de la route est celui de la partie privée de la maison, l'espace "de nuit" des chambres qui se développe sur deux niveaux. Un peu plus loin dans la pente est le cube "de jour" du séjour, de la cuisine et de la salle à manger, dont les espaces se développent en double hauteur* ».

On remarque 3 cubes (voir figure 74), les deux premiers formant l'habitation et le troisième plus petit reprenant les équipements techniques [Cal21].

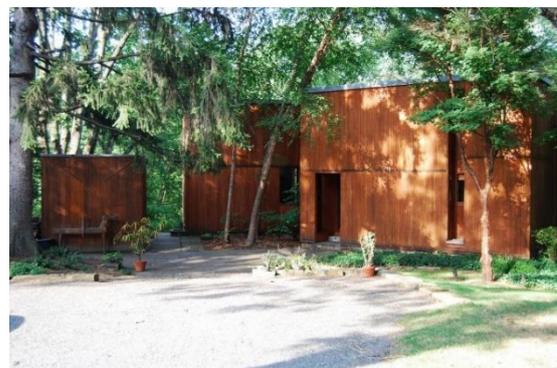


Figure 74 : Façade avant_Fisher House [Wikia21].

La maison s'inscrit dans le mouvement moderne/style international par sa volumétrie pure, mise en valeur par des surfaces extérieures lisses et sans ornementation [Cal21].

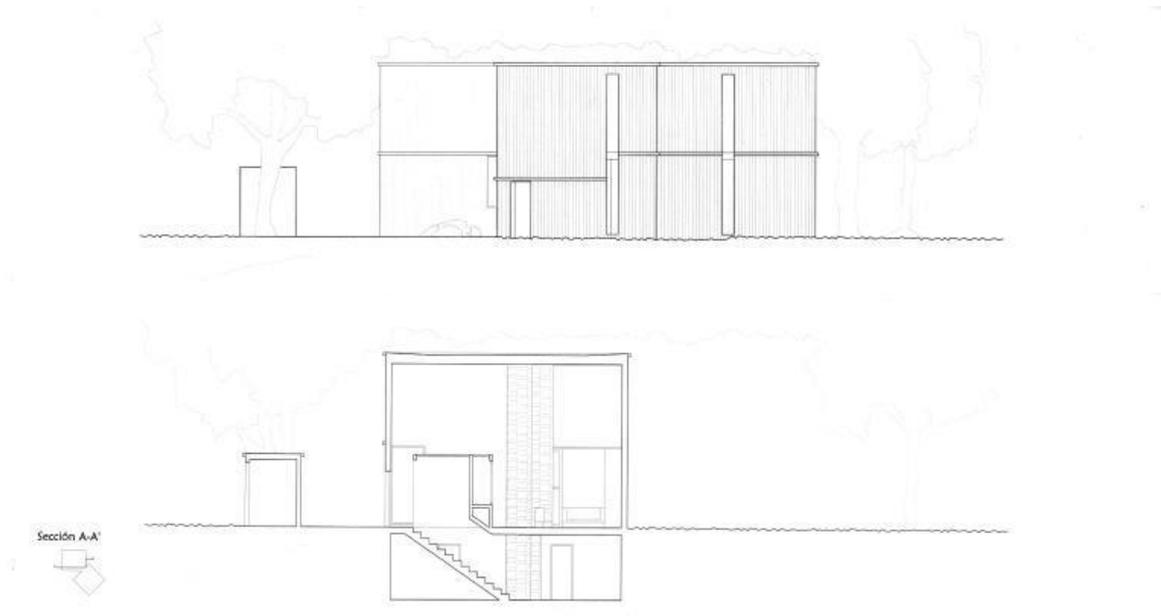


Figure 75 : Coupes et élévations_Fisher House [Gal21].

Cette habitation unique réalisée par Louis Kahn, peut être un potentiel exemple de bâtiment industrialisé. Les joints horizontaux marqués en façade donnent l'impression que le bâtiment a été préfabriqué en ossature bois pour le rez-de-chaussée et l'étage. Composée selon un design épuré, son industrialisation serait tout à fait réalisable.

Cité Törten, Walter Gropius, Dessau

La Cité Törten située dans la banlieue de Dessau a été construite de 1926 à 1928 par Walter Gropius en raison de la pénurie de logements dans cette région [Wik21].



Figure 76 : Implantation_Cité Törten_Dessau [Wik21].



Figure 77 : Vue aérienne_Cité Törten [Wik21].

Les architectes du mouvement Bauhaus vont, après la Première Guerre Mondiale, révolutionner l'architecture des lotissements pour permettre aux habitations bon marché d'offrir des conditions de vie convenables à leurs occupants. Pour ce faire ils vont exploiter les nouvelles possibilités de production industrielle telles que la préfabrication et la standardisation [Lor13].

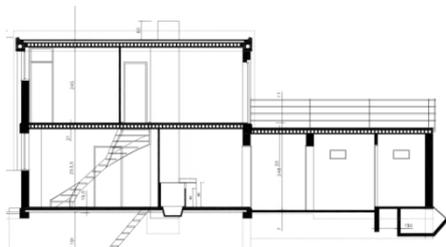


Figure 78 : Plan_Cité Törten [BD20].

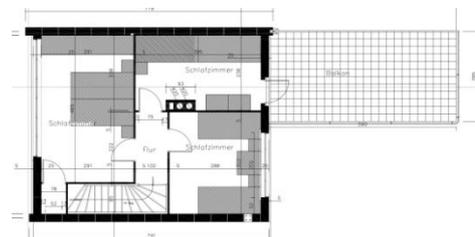


Figure 79 : Coupe_Cité Törten [BD20].

Les travaux de construction se sont inspirés du modèle de production industriels. Ce système de production intervient à un tel point dans les travaux, que ce ne sont plus les besoins des habitants qui sont pris en compte mais bien les exigences techniques des machines, comme par exemple le bras des grues qui ont défini les plans de la cité-jardin. Le fait d'utiliser des éléments standardisés et d'avoir coulé le béton sur place a permis de réduire le temps moyen de construction à trois jours et ainsi diminuer les coûts [Wik21].

Les 312 maisons mitoyennes allant de 57m² à 75m² de surfaces habitables sont réparties de manière régulière et alignées par groupe de 4 à 12 unités. Ce lotissement est très rectiligne par ses toits plats mais aussi par ses fenêtres qui divisent les façades par des lignes horizontales (voir figure 80) [Lor13].



Figure 80 : Photos_ Cité-jardin Törten [Wik21].

Ce projet montre bien que la production industrielle de logements à grande échelle tient peu voire pas du tout compte des besoins des futurs occupants. Il y a certes 6 typologies d'habitations différentes pour 312 maisons, mais ce bref choix d'habitation n'est pas créé pour amener de la diversité, car si tel était le cas, il y aurait une diversité de logements beaucoup plus importante. Ce choix restreint est dû au fait de vouloir construire le plus rapidement possible pour répondre aux besoins en logements de la population sans pour autant rechercher de la diversité.

La Cité Radieuse, Le Corbusier, Marseille

La Cité Radieuse de Marseille construite par le Corbusier de 1947 à 1952 est devenue un symbole pour les résidences d'habitation par sa conception architecturale, sa forme et ses pilotis qui dégagent son occupation au sol [Coh15].



Figure 81 : Implantation_La Cité Radieuse [MM14].



Figure 82 : Photos_ La Cité Radieuse [CFA19].

Avec cette réalisation, Le Corbusier a voulu mettre en pratique ses principes d'architecture selon lesquels il tente de créer un village vertical dans un seul immeuble. Celui-ci est composé de 332 appartements. A mi-hauteur, on trouve aussi des bureaux et des commerces tels qu'une épicerie, une boulangerie, un restaurant, une librairie etc... Le toit terrasse, qui est libre d'accès au public, reprend une école maternelle, un gymnase, une piste d'athlétisme, une petite piscine et un auditorium en plein air [Coh15].

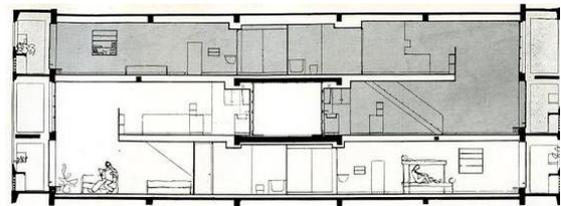


Figure 83 : Coupe_ La Cité Radieuse [Pin21].

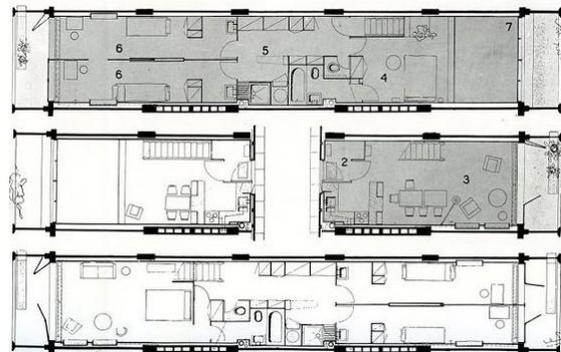


Figure 84 : Plan_La Cité Radieuse [Pin21].

La Cité radieuse est certes un bâtiment intéressant du point de vue de l'ergonomie avec le principe du Modulor développé par Le Corbusier, mais il ne s'agit pas d'un bâtiment conçu en termes de diversité. Comme le dit [Coh15] « *L'ossature en béton armé du bâtiment est à l'image d'un casier qui reçoit des bouteilles* ». Il peut donc être facilement industrialisé. On y observe très peu de diversité en termes d'habitations, comme le montre le plan (voir figure 84), le bâtiment se compose de trois types de logements (deux duplex et un simple appartement) auxquels viennent s'ajouter des fonctions diverses.

La Cité de Droixhe, Groupe E.G.A.U, Liège

De 1950 à 1976, le groupe EGAU (Études en Groupe d'Architecture et d'Urbanisme) composé des architectes Charles Carlier, Hyacinthe Lhoest et Jules Mozin, ont construit la cité de Droixhe [HL14].

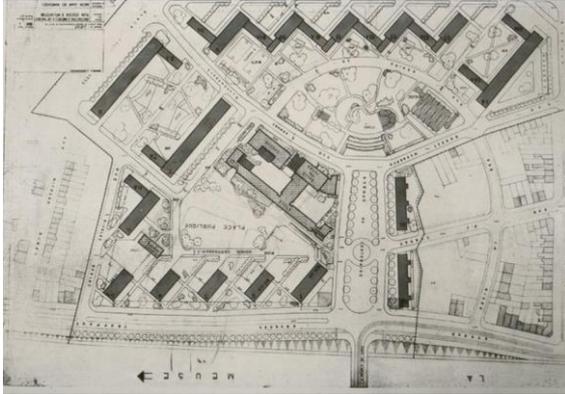


Figure 85 : Implantation_Cité de Droixhe [Coh19].



Figure 86 : Maquette_Cité de Droixhe [Coh19].

Selon [HL14] « À l'origine, Droixhe est considéré comme un quartier modèle. Le cadre est très verdoyant, avec l'attrait supplémentaire de se trouver en bordure de Meuse. Les immeubles, vu leur implantation aérée, profitent d'un ensoleillement maximum. Les logements qu'ils proposent offrent un confort de haut niveau pour l'époque (chauffage central, salle-de-bains, cuisine équipée, terrasse). Le site possède en outre toutes les infrastructures indispensables aux habitants (commerces, crèches, écoles, plaines de jeux, terrains de sport) ... ».

Pour l'époque, Droixhe était une cité moderne avec un parc, des bâtiments sur pilotis comprenant plusieurs typologies de logement au sein du quartier. Les rez-de-chaussée et les toitures étaient notamment exploitables par les habitants [Coh19].

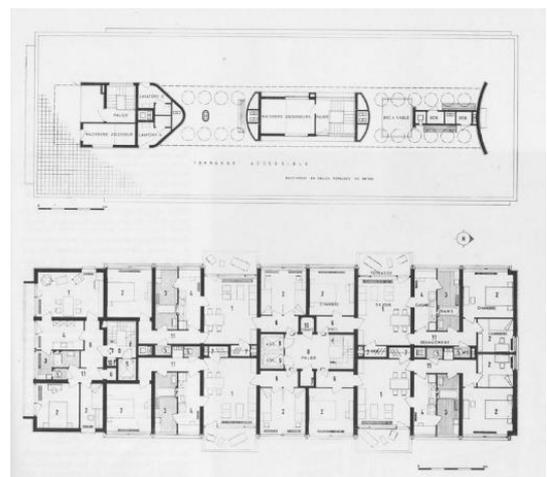


Figure 87 : Plan_Cité de Droixhe_[Coh19].

Dans cette cité, il y a certes plusieurs typologies de logements mais ces différents logements sont organisés dans différents bâtiments. On peut donc supposer en regardant le plan d'implantation (voir ci-dessus figure 85), que ces typologies de logements sont implantées par zone dans la cité. Ainsi, on observe une répétition de mêmes bâtiments dans ce quartier. On peut donc en déduire qu'il y a une typologie de logements par bâtiments différents. Ce genre de projet répond à une demande en logement de la population et est facilement industrialisable. On retrouve un peu partout en Europe ce genre de cités en périphérie des grandes villes fortement peuplées.

Modular Apartments, PPA architectures, Toulouse

Construit depuis 2015 à Toulouse, le Modular Apartments est un bâtiment résidentiel modulaire en bois. Les 50 appartements créent des logements abordables dans la ville et sont destinés à contribuer à l'intégration des groupes socialement défavorisés [PPA17].

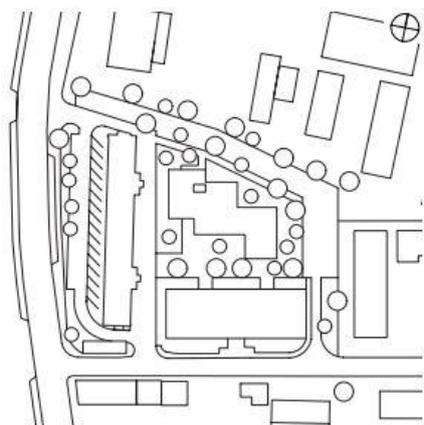


Figure 88 : Implantation_ Modular Apartments [PPA17].



Figure 89 : Façade_ Modular Apartments [PPA17].

Pratiquement tous les éléments de structures sont réalisés en lamellé-collé, seule la tour d'escalier est en béton armé. Les différents cubes ont été préfabriqués et sont fixés entre eux par des plaques d'acier. Deux mois ont été suffisant entre la livraison des premiers modules jusqu'à l'achèvement de l'enveloppe extérieure, ce fut réalisable grâce à un haut niveau d'industrialisation et un système de construction répétitif [PPA17].

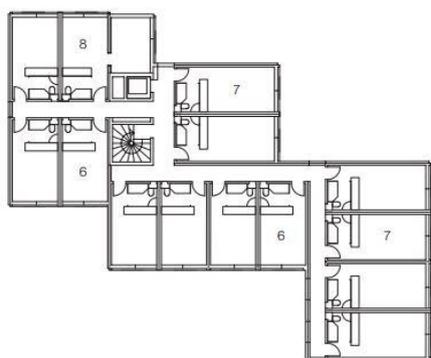


Figure 90 : Coupe_ Modular Apartments [PPA17].



Figure 91 : Plan_ Modular Apartments [PPA17].



Figure 92 : Plan des appartements_ Modular Apartments [PPA17].

Ce bâtiment est constitué de 3 types de logements différents pour 50 appartements (voir figure 92). Leurs compositions sont certes un peu rigides mais intéressante. Ces différentes typologies de logements au sein d'un même bâtiment permettent ainsi de la diversité. Ce projet industrialisé et préfabriqué en atelier, pourrait très bien s'implanter dans d'autres environnements. Les modules pourraient s'articuler entre eux de différentes manières pour s'adapter à leurs différents contextes. Ce concept peut être industrialisé, produit en série et proposer de la diversité.

Townhouses, Ingo Bucher-Beholz et Martin Frey, Munich-Riem

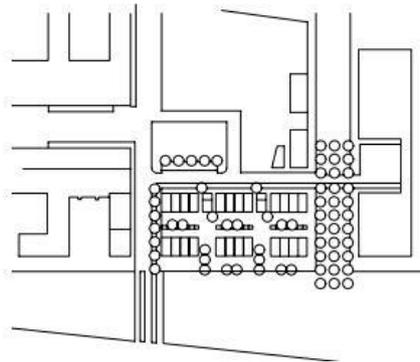


Figure 93 : Implantation_ Townhouses [BBF12].



Figure 94 : Photos_ Townhouses [BBF12].

Les 24 maisons mitoyennes de Munich-Riem ont été réalisées en mixant l'acier pour la structure et le bois pour les cloisons. Ce projet montre comment des maisons de « rangées » peuvent à la fois être strictes et flexibles. En effet, les architectes ont développé six groupes égaux de quatre unités d'habitation organisées verticalement. L'ensemble du rez-de-chaussée de chacune des maisons de 10,5 x 5 m de large s'ouvre sur le jardin et sur une cour abritée. Des terrasses découpées dans le grenier rythment les rangs et dirigent la lumière du jour vers tous les étages par l'escalier central. Les murs mitoyens sont constitués de doubles coques à ossature bois, de 15 cm d'épaisseur chacun, préfabriqués à hauteur d'étage sur toute la longueur du bâtiment. Le choix d'utiliser de l'acier pour l'ossature permet de réduire au minimum la section des profilés, qui ne nuisent pas à l'ouverture et à la flexibilité du concept [BBF12].

Ce projet industrialisé est intéressant du point de vue de la diversité dans le fait que les modules qui constituent les habitations pourraient très bien fusionner entre eux et donc apporter plusieurs typologies de logements.

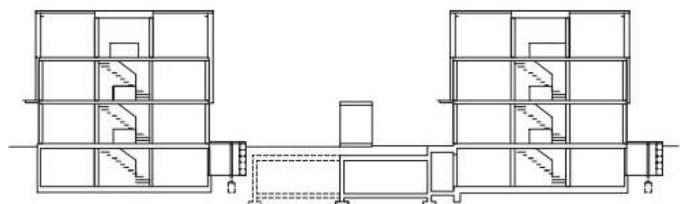


Figure 95 : Coupe_ Townhouses [BBF12].

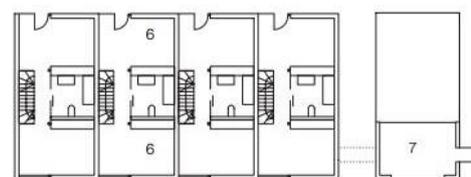


Figure 96 : Plans_ Townhouses [BBF12].

Student Village, WilkinsonEyre, Malmesbury

A Malmesbury, dans l'ouest de l'Angleterre, le campus du Dyson Institute of Engineering and Technology a été réalisé en empilant 78 cubes regroupés en éventail autour du bâtiment communal, toutes les chambres estudiantines ont été entièrement conçues par des modules préfabriqués. La rotonde centrale abrite un café, un restaurant, un auditorium et une salle d'étude. Les unités résidentielles de plain-pied sont situées sur le terrain aménagé au campus [Wil20]. Chaque couleur sur le plan d'implantation ci-dessous (voir figure 97) correspond à une typologie de logements.



Figure 97 : Implantation_ Student Village [Wil20].



Figure 98 : Façade_ Student Village [Wil20].

La plupart des conteneurs de 8×4×3 m sont utilisés par les étudiants comme espace de vie et de travail pendant les quatre années de leurs études. Les ingénieurs et les visiteurs de l'entreprise peuvent également y séjourner temporairement. Six unités d'habitation forment des groupes qui se partagent les espaces communs tels que les modules de cuisine et de rangement ainsi que les espaces de jardin qui leur sont assignés [Wil20].

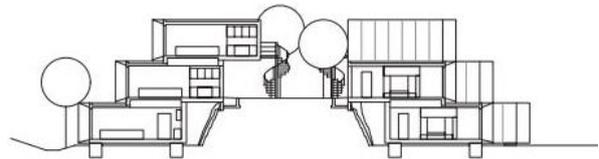


Figure 99 : Coupe_ Student Village [Wil20].

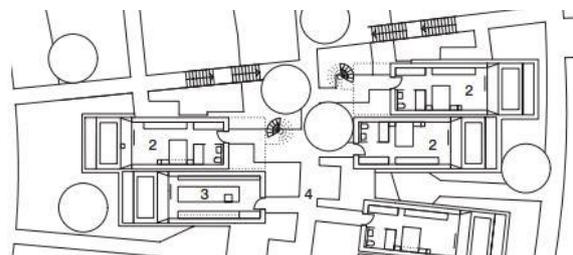


Figure 100 : Plan_ Student Village [Wil20].

Les étages supérieurs sont reliés par un chemin de remblais aménagés, contre lequel s'appuient les cubes décalés. De petits escaliers en colimaçon mènent le long de cet axe de circulation aux unités du deuxième étage [Wil20].

Lors de la phase de construction, un conteneur a d'abord été érigé en Écosse, puis tous ses composants ont été préfabriqués et transportés à une station intermédiaire proche du chantier, où le mobilier et le revêtement de la façade ont été ajoutés. Sur place, une grue a finalement amené les éléments entièrement équipés dans leur position exacte. Les architectes ont choisi des panneaux de bois en lamellé-collé croisés pour la coque porteuse, qui permettent jusqu'à 3 m de porte-à-faux. Les cloisons de séparation et les meubles sont également fabriqués en bois, de sorte que tout le cube intérieur, à l'exception du sol en caoutchouc, soit enveloppé dans du bois massif [Wil20].

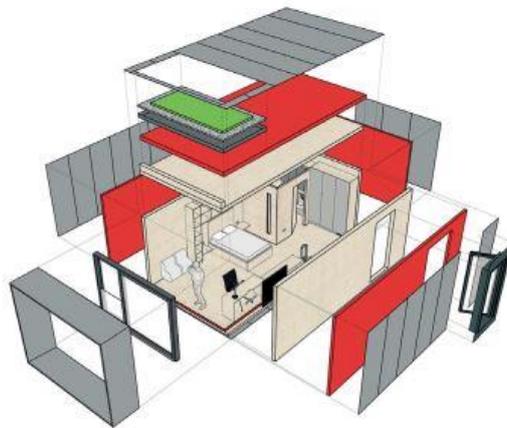


Figure 101 : Axonométrie_ Student Village [Wil20].

Ce projet industrialisé est intéressant du point de vue de la diversité par le fait qu'il présente plusieurs typologies de logements comme on peut le remarquer sur le plan d'implantation (voir figure 97). De plus, les modules ne forment pas un seul bâtiment qui les regroupe tous mais plutôt une série de plusieurs modules qui s'adaptent à leur contexte.

Synthèse

Voici un tableau comparatif (voir figure 102) reprenant l'ensemble des projets vus ci-dessus. Il a pour but de déterminer comment l'industrialisation entrave ou contribue à la diversité des logements.

Projets	Projets diversifiés	Projets industrialisés	Intérêts pour la diversité	Contraignants pour la diversité	Difficiles à industrialiser	Possibles à industrialiser
Hôtel Tassel	X				X	
Casa Milà	X				X	
Fallingwater	X				X	
Eames House	X					X
Farnsworth House	X					X
Fisher House	X					X
Cité Törten		X		X		
Cité Radieuse		X		X		
Cité de Droixhe		X		X		
Modular Apartements		X	X			
Townhouses		X	X			
Student Village		X	X			

Figure 102 : Comparaison entre diversité et industrialisation

Les projets regroupés dans le tableau ci-dessus, sont analysés ci-après et sont classés comme suit :

- Projets réfléchis en termes de diversification et difficiles à industrialiser.
- Projets réfléchis en termes de diversification et où l'industrialisation est faisable.
- Projets industrialisés ayant un impact négatif sur la diversité.
- Projets industrialisés ayant un intérêt du point de vue de la diversité.

Projets réfléchis en termes de diversification et difficiles à industrialiser

(Hôtel Tassel, Casa Milà, Fallingwater).



Il s'agit exclusivement de bâtiments réfléchis en termes de diversification et ne pouvant être conçus qu'une seule fois dans un endroit bien précis. La difficulté à industrialiser réside dans le fait que l'on ne peut reproduire ces projets à la chaîne et donc les standardiser.

Néanmoins, ces projets n'excluent pas d'être préfabriqués en partie, comme par exemple l'Hôtel Tassel et la Casa Milà. Comme dit précédemment, la préfabrication est une étape, une phase de l'industrialisation, mais il est tout à fait possible de préfabriquer quelque chose sans pour autant arriver à un résultat industrialisé.

Ces projets uniques ne peuvent être produits en série car ils s'intègrent parfaitement avec leur contexte, qu'il soit naturel ou urbain. De plus, leurs types d'architecture, qu'il soit Art nouveau, Organique ou Arts and Crafts les rend d'autant plus difficiles à être industrialisés.

Projets réfléchis en termes de diversification et où l'industrialisation est faisable

(Eames House, Farnsworth House, Fisher House)



Ce point traite de bâtiments réfléchis pour être unique mais la façon dont ils ont été conçus permettrait de les industrialiser, d'en faire une série. Le fait qu'ils ont été préfabriqués en partie en usine (les poutres et les colonnes en acier, les dalles en béton préfabriquées, les murs en ossatures bois, etc ...) faciliterait leur industrialisation. Comme dit précédemment, on peut considérer qu'un objet est industrialisé quand l'ensemble de ses composants est fabriqué en usine par des techniques qui permettent la fabrication en série. Il est certain qu'une reproduction à l'identique de ces bâtiments n'atteindrait pas le niveau architectural des originaux, du fait qu'ils n'ont pas été conçus dans ce but, néanmoins ce concept est envisageable.

Projets industrialisés ayant un impact négatif sur la diversité

(Cité Törten, Cité Radieuse, Cité de Droixhe).



Dans ce cas, il s'agit de logements industrialisés/ standardisés produits en série avec pour principal but de répondre aux besoins en logements de la population et où la prise en compte de l'aspect de la diversité est négligeable.

La Cité Radieuse, en est un bon exemple. Ce projet présente 3 typologies de logements pour 332 appartements, soit 110 appartements identiques.

Ces exemples de projet montrent bien que la production industrielle de logements à grande échelle ne tenait pas compte des besoins des futurs occupants en termes de variété de logements.

Projets industrialisés ayant un intérêt du point de vue de la diversité

(Modular Apartments, Townhouses, Student Village)



Cette partie parle de logements industrialisés/ standardisés mais ayant plusieurs typologies ou configurations possibles afin d'avoir une certaine diversité de logements. Avec ces constructions modulaires, il est envisageable de combiner plusieurs modules pour apporter des typologies de logements supplémentaires.

Les différentes combinaisons de modules proposent du choix, sans imposer de pratiques ou d'usages dans les logements, afin que chacun puisse définir son mode d'occupation de l'habitation mais aussi grâce au haut degré de préfabrication qui permet de réduire les délais de construction.

Conclusion

La présentation de ces projets nous montre que de nos jours, il coexiste plusieurs types d'architecture, certaines peuvent être industrialisées et d'autres non. On pourrait donc se dire qu'une architecture hautement industrialisée ne doit donc pas supplanter toutes les autres, mais exister parmi les autres.

6. Etude de cas avec l'entreprise Naturhome

Ce chapitre a pour objet une étude de cas basée sur des projets réalisés par la société Naturhome. Cette société a pour vocation la préfabrication de maisons en ossatures bois et est présentée plus précisément ci-après.

Cette étude de cas a pour but de mieux comprendre les problèmes d'un fabricant de maisons préfabriquées en ossature bois afin d'apporter des informations supplémentaires pour essayer de répondre à la question du TFE.

Ce chapitre sera structuré comme suit : un portrait de la société Naturhome sera dressé, on présentera ensuite des réponses de Naturhome à des questions plus générales pour enfin terminer avec l'étude de cas.

6.1. Prémices

La société Naturhome se définit comme suit : « *Naturhome est reconnue comme une référence en matière de construction de maisons à ossature en bois, en termes de principe constructif, de qualité d'isolation, d'étanchéité à l'air et de finition. Notre marché actuel est un marché de « niche » réservé à une clientèle aisée.* »



Figure 103 : Maison unifamiliale_Chastre [Nat21].



Figure 104 : Maison unifamiliale_Namur [Nat21].

Naturhome c'est :

- *40 ans d'expérience dans la construction de maisons en bois.*
- *Plus de 500 réalisations au Luxembourg, en Belgique, en France mais également en Allemagne, en Angleterre, en Italie, en Suisse et en Espagne.*
- *Une entreprise belgo-luxembourgeoise ».*

Au cours des années, le concept de Naturhome a évolué.

« Le chalet traditionnel en rondin, produit initialement proposé par Naturhome, fera rapidement place à la technique des madriers empilés. Avec l'arrivée de standards plus stricts en termes d'isolation et d'étanchéité à l'air, cette technique sera progressivement remplacée au milieu des années nonante par les techniques poteaux poutres et ossature bois, aujourd'hui très majoritaires. Depuis le milieu des années 2000, Naturhome s'est spécialisé dans la réalisation de maisons passives ou très basse énergie. Le bureau d'étude a étendu son domaine de compétence de manière à pouvoir gérer la totalité des projets et apporter de la valeur ajoutée à ses clients pour toutes les techniques spéciales ».

Afin d'être le plus autonome possible et pouvoir préfabriquer les pièces nécessaires, l'entreprise a investi dans ses propres machines-outils. Pour que ces investissements importants soient rentables, l'entreprise tente de les utiliser un maximum.

L'entreprise a pris le parti de ne jamais participer aux marchés publics ni de construire des logements collectifs, leur cible étant les constructions résidentielles unifamiliales, pour la plupart 4 façades. De temps à autre, ils réalisent également des annexes mais uniquement si leurs tailles (min 50m²) permettent d'utiliser les principes de la préfabrication développés par la société.

Le but de l'entreprise est de pleinement satisfaire une clientèle privée, en leur livrant des bâtiments qui répondent à leurs besoins, attentes et exigences. Ce résultat n'est possible que grâce à une réflexion en amont étudiée de A à Z, suivi d'une préfabrication en atelier, pour terminer par un assemblage sur chantier.

Ils utilisent les mêmes principes que la production en série mais ne fabriquent pas de série, j'entends par là qu'ils ne standardisent pas leurs pièces. Car pour standardiser, il faut produire en nombre. Hors Naturhome veut permettre à sa clientèle de faire tous les choix qu'elle

souhaite. Par exemple, si un client émet le souhait d'avoir une habitation avec des hauteurs sous plafonds de 2,7m ou 2,9m, ils répondront à cette demande.

Certaines entreprises proposent à leurs clients une sorte de catalogue composé de projets standardisés avec des détails techniques types. Ceci simplifie la réalisation puisque l'architecte dessine le projet en se basant sur une grille de référence définie par le catalogue. Naturhome ne travaille pas de la sorte puisqu'ils veulent avant tout permettre à leurs clients de réaliser tous leurs souhaits.

Cette orientation vers les demandes de leurs clients a bien entendu ses limites : Ces demandes doivent pouvoir rencontrer les impératifs techniques dû aux principes de la construction bois, les systèmes constructifs propres à l'entreprise ainsi que ses méthodes de travail.

6.2. Concepts développés dans le passé

Afin de réduire ses coûts et de pouvoir étendre son marché à une clientèle moins favorisée, Naturhome a mis au point il y a quelques années un produit qu'elle a appelé Ncube, qui consistait en l'utilisation de modules 3D standardisés à l'intérieur d'une enveloppe personnalisée. Quatre types de modules étaient employés : des modules salles de bains, des modules escalier, des modules WC et des modules locaux techniques. Pour profiter des réductions de coûts, le client et son architecte devaient simplement intégrer les dimensions de ces 4 modules dans les plans du projet. Il ne restait plus qu'à raccorder les tuyaux sur le chantier. Ce concept permettait ainsi une certaine standardisation.

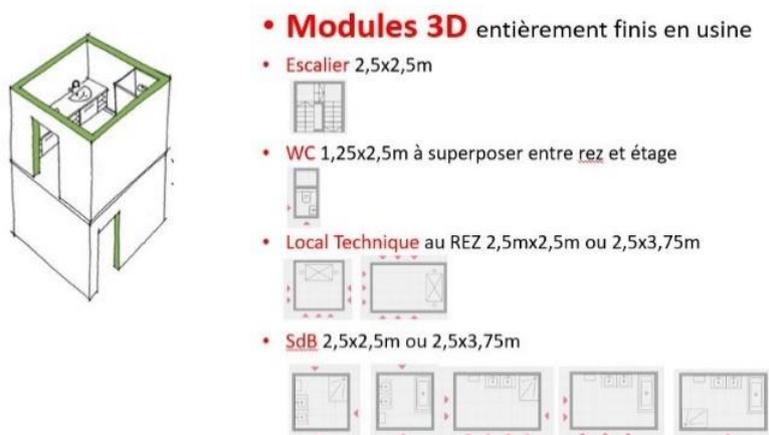


Figure 105 : Schéma_Ncube_Naturhome.

Le principe de ces modules préfabriqués était de réaliser en atelier l'enveloppe extérieure de la maison sans le toit, puis de venir poser les modules sur chantier. Ceci devait permettre de simplifier les choses, en fabriquant en atelier tout ce qui demande beaucoup de mains d'œuvre à l'intérieur de la maison. Le principe était bon à condition qu'il y ait du volume, des grandes quantités de modules à produire. L'offre de choix restreinte en matériaux, éléments et mobiliers a limité le volume de commandes et par conséquent l'intérêt économique de l'utilisation de modules.



Figure 106 : Construction en atelier_Ncube_Naturhome.

Les problèmes rencontrés étaient notamment des problèmes de stabilité lors du levage, le poids n'étant pas uniformément réparti, du fait du positionnement des équipements (baignoires pour la salle de bain, le coin ballon d'eau chaude et chaufferie dans les locaux technique qui était beaucoup plus lourd que le coin opposé). Cela impliquait une difficulté de stabiliser les modules pour les insérer dans le bâtiment.



Figure 107 : Pose des modules 3D_Ncube_Naturhome.

Pour éviter des transports exceptionnels, les dimensions à transporter ont été limitées aux maximums suivants : largeur 2,5m, longueur 13m, hauteur 3,2m.

Malheureusement, Naturhome n'a pas bénéficié d'une demande élevée de ce type de produit. Le prix de revient de ce concept est donc resté trop élevé que pour pouvoir le développer.

En résumé, selon [Hey12] « la question à se poser pour évaluer le succès du concept est la suivante : Est-ce qu'une partie des ménages est prête à faire un compromis quant à la liberté architecturale pour acquérir une maison de meilleure qualité ? Pour un prix similaire, le ménage aura le choix entre une habitation sur mesure mais moins bien finie, ou une habitation

avec quelques contraintes architecturales mais de grande qualité des finitions, d'isolation thermique, d'étanchéité à l'air, d'acoustique, de confort ».

6.3. Questions générales posées en avril 2020

Les questions ci-après ont été posées à Monsieur Olivier Louis, directeur général du groupe Naturhome.

Quels sont les problèmes rencontrés au quotidien dans la préfabrication ?

« Grâce à notre grande expérience dans le domaine, l'entreprise peut se permettre « d'imposer » ses méthodes de construction en ossature bois aussi bien aux architectes qu'aux clients. Par conséquent les problèmes sont plutôt des problèmes structurels liés aux plans de l'architecte. L'entreprise ne rencontre pas de difficulté ou de problème au niveau de la production en atelier ».

Quelles sont les étapes de la préfabrication dans votre entreprise ? (Hors Ncube)

Les étapes de la préfabrication dans l'entreprise sont :

- « 1. La réception des plans de l'architecte.*
- 2. Le dessin en 3D du bâtiment (Programme : Sema + Autocad pour les raccords).*
- 3. L'envoi des fichiers aux machines de production.*
- 4. L'assemblage des composants (étape qui demande peu de personnel en atelier).*
- 5. Le transport des modules 2D sur le chantier ».*

Quelles sont les caractéristiques qui facilitent l'industrialisation ?

« Il est nécessaire d'avoir une méthode de travail organisée. Il faut bien décomposer les tâches difficiles à réaliser en plusieurs petites séries afin de les simplifier.

Pour donner un exemple, on ne demandera pas à un ouvrier de réaliser une maison à lui tout seul. Les éléments qui constituent la maison seront décomposés, pour organiser plus d'équipes qui pourront travailler sur les éléments différents pour ensuite les assembler et ainsi réaliser une maison. C'est dans ce contexte que vient s'insérer la production à la chaîne ».

On industrialise donc plus facilement grâce à :

- La production à la chaîne (décomposition des tâches à accomplir).
- La répétition d'une même méthode de construction, des mêmes outils, des mêmes matériaux.
- L'insertion de machines dans les chaînes de production permettant un gain de temps.

Quelles sont les caractéristiques qui compliquent l'industrialisation ?

« Un des problèmes qui rend l'industrialisation plus difficile, est l'intégration des fenêtres dans les parois, le fait qu'elles soient plus ou moins grandes que la dimension des baies, que ce soient des châssis coulissants, etc ... les rend moins faciles à industrialiser ».

Naturhome est donc limité en termes d'industrialisation puisque qu'ils sont tournés vers le sur mesure. Il est difficile d'industrialiser un produit qui n'est pas standardisé. Ce qui entraîne des coûts de construction plus élevés.

Quels sont les problèmes engendrés par la diversification dans l'entreprise ?

Comme dit plus haut, grâce à sa grande expérience dans le domaine, l'entreprise peut se permettre d'imposer ses méthodes constructives en ossature bois, par conséquent elle ne rencontre quasiment pas de problème dû à la diversification. *« Le seul problème qui pourrait être souligné est qu'un bâtiment réalisé sur mesure coûte automatiquement plus cher ».*

Pour chaque réalisation une étude de stabilité est réalisée. Etant toujours confrontés à des architectes différents, ils doivent par conséquent échanger à chaque fois avec le concepteur (l'architecte), résoudre les problèmes structurels, implanter les gaines de ventilation etc ...

De plus, selon Monsieur Louis *« Les architectes ne connaissent pas nécessairement notre façon de construire, ce qui entraîne des coûts supplémentaires qui auraient pu être évités aux clients ».* Par exemple : si l'architecte avait échangé avec l'entreprise avant de déposer un

permis d'urbanisme, il aurait pu redimensionner certains éléments en prenant compte leurs limites structurelles et donc éviter des frais aux clients.

La production de maisons différentes les unes des autres implique donc une augmentation des coûts du fait qu'elles demandent systématiquement une nouvelle étude en conception et en fabrication, contrairement à la production de maisons totalement industrialisées.

6.4. Critères principaux de l'étude

Les projets ci-après sont analysés sur base de 3 critères :

- Le délai (délais dépassés à cause des choix architecturaux).
- Le budget (budget estimé au départ dépassé à cause des choix architecturaux).
- La qualité (éléments qui ont dû être recommencés, rectifiés en usine, rectifiés sur chantier).

Les délais

Les délais de fabrication dépendent de la complexité du projet. Pour une même surface, certaines maisons nécessiteront 150 jours ouvrables pour être entièrement réalisées tandis que d'autres nécessiteront 220 jours ouvrables.

Les délais de construction (comprenant la préfabrication en atelier et la mise en place sur chantier) étant adaptés en fonction de la complexité du projet, il est rare que l'entreprise les dépassent.

- Pour une maison de difficulté simple (moins de 220m² habitable), les délais sont de 150 jours ouvrables.
- Pour une maison de difficulté moyenne (220m² habitable) les délais sont de 180 jours ouvrables.
- Pour de plus grands projets où l'architecture est complexe (plus de 220m² habitable) les délais varient entre 200 et 250 jours ouvrables.

La préfabrication en atelier ne dépasse jamais une semaine. En théorie, une nouvelle maison débute tous les lundis :

- Quand il s'agit d'une maison simple, la préfabrication est finie le mercredi fin de journée. Par conséquent les ouvriers d'ateliers se rendent sur chantier le reste de la semaine.
- Si les délais sont très serrés, une nouvelle maison débutera le jeudi si la précédente est terminée le mercredi.
- Quand il s'agit d'une maison complexe, la préfabrication est finie le vendredi fin de journée.
- Si la maison est très complexe, les ouvriers font des heures supplémentaires, ils font des journées de 10 ou 11h au lieu de faire des journées de 8h. Tout est mis en œuvre pour garder ce délai d'une semaine pour la préfabrication.

Le respect des délais dépend essentiellement de la gestion des finitions sur le chantier suivant les demandes et envies des clients, car la partie de la préfabrication en atelier ne consomme que plus ou moins 5 jours dans le planning total du chantier. Pour illustrer le propos voici un exemple : Pour des maisons similaires, un client choisira un seul type de bardage tandis qu'un autre demandera 2 voire 3 types de matériaux différents en parement (voir figure 108). Donc, en fonction des finitions demandées par les clients, l'entreprise devra faire appel à plus ou moins de sous-traitants et leur coordination allongera automatiquement le temps d'exécution du chantier.



Figure 108 : Maison unifamiliale à Bousval_2 types de parement [Nat21].

L'entreprise fait appel à des sous-traitants pour les postes suivants : Les fondations, les parements (sauf le bois), l'électricité et les sanitaires.

Pour des questions de facilité de construction, Naturhome intègre directement les systèmes de ventilations dans ses parois.

Les délais communiqués contractuellement sont respectés dans 90 à 95% des chantiers. Les seuls cas où les délais ne sont pas respectés s'expliquent par des demandes d'ajouts, ce n'est donc pas source de conflit vu qu'il s'agit de demandes du client.

Le budget

L'entreprise remet des offres de prix que lorsqu'ils sont en possession des plans définitifs. Cette façon de faire leur permet de ne jamais être surpris par des choix architecturaux.

Un des problèmes auxquels la société peut être confrontée est de devoir collaborer avec un architecte qui n'est pas familier avec leurs systèmes de fabrication. Sur la figure 109, nous pouvons voir un exemple dans lequel l'architecte avaient fait le choix d'une architecture organique avec des murs courbes.



Figure 109 : Maison courbe_Naturhome.

Les difficultés architecturales avaient été intégrées dans le budget, mais les complexités amenées par les murs courbes avaient été sous estimées. De plus, les deviseurs n'avaient pas anticipé que pour le transport, des murs courbes seraient plus encombrants et nécessiteraient plus de place sur les remorques et donc impliqueraient un coût plus élevé de ce poste. Naturhome a donc subi une perte de rentabilité sur ce projet puisqu'ils remettent une offre de prix à forfait unique par projet.

La rentabilité nette de la société est de 10% sur l'année. Mais elle varie entre -5% et + 25% par projet. Ceci est lié à certaines difficultés techniques comme évoqué ci-dessus, mais également à des efforts commerciaux au niveau de la vente. Ci-dessous un exemple des rentabilités de quelques chantiers de Naturhome (voir figure 110).

RENTABILITE DES CHANTIERS	Projet n°1	Projet n°2	Projet n°3
Date de réception provisoire	8/5/17 (5%)	21/6/17 (4%)	7/6/17 (1%)
Facturation au client	662.413,23 €	117.371,23 €	429.329,66 €
Escompte	- 4.899,99 €	- 1.173,72 €	- 4.228,33 €
Facturation nette	657.513,24 €	116.197,51 €	425.101,33 €
Marchandises facturées en direct	- 96.252,82 €	- 11.134,72 €	- 44.406,50 €
Marchandises du stock	- 54.132,68 €	- 14.051,33 €	- 35.125,10 €
Marge de sécurités/marchandises (chutes)	- 5.413,27 €	- 1.405,13 €	- 3.512,51 €
Petit matériel			
Total marchandises	- 155.798,77 €	- 26.591,18 €	- 83.044,11 €
Sous-traitance	- 198.384,50 €	- 30.825,52 €	- 138.846,45 €
Locations	- 530,20 €	- 127,61 €	- 1.920,61 €
Transport & déplacements			
Honoraires divers			
Main d'oeuvre atelier	- 54.432,95 €	- 5.112,90 €	- 31.260,45 €
Main d'oeuvre montage & finitions	- 182.266,53 €	- 33.617,75 €	- 113.476,93 €
Assurance décennale			
Frais divers			
Commissions vendeurs	- 17.047,55 €	- 4.154,29 €	- 18.283,00 €
Résultat du chantier	49.052,75 €	15.768,26 €	38.269,78 €
Rentabilité	7,41%	13,43%	8,91%

Figure 110 : Tableau de rentabilité de différents projets_Naturhome.

Les problèmes de non-respect des budgets peuvent amener à des pertes financières pour l'entreprise. Celles-ci sont liées à :

- Des erreurs de conception, de devis.
- Le fait de réaliser des offres à forfait unique, qui ne permettent pas d'appliquer une révision.
- La météo (Naturhome travaille toute l'année).
- Il est fréquent que lors de la remise de prix, le client ne soit pas encore en possession de son permis de bâtir (mais bien de ses plans définitifs). L'entreprise ne sait donc pas à quel moment de l'année le chantier pourra débuter et ne peut donc pas appréhender les conditions météo.

- Des cas de non-respect des quantités prises en compte initialement (contrairement à des devis en quantités présumées).

On remarque que deux causes plus ou moins systématiques amènent à des écarts budgétaires :

- Le terrassement : Naturhome réalise un devis sur une base d'un terrain théorique ou si elles sont disponibles sur bases des indications données par l'architecte. Il arrive cependant que lorsque le terrassier entame le travail, ces données fournies ne correspondent pas à la réalité. Ceci s'explique par un manque de connaissance du terrain et des difficultés techniques qu'il cache (nappe phréatique, rocher, reprise en sous-œuvre plus compliquée que prévue, pour une maison 2 ou 3 façades on ne sait pas à quelle profondeur descendent les fondations des voisins).
- Le client : Changement dans les choix d'équipements et finitions ou des suppléments à ce qui était prévu initialement. Naturhome fait un devis très précis sur l'ensemble du bâtiment à l'exception des postes de finitions intérieures car lors de la rédaction de l'offre il n'est pas possible de demander au client de décider précisément les finitions de chaque pièce. Ces postes sont donc revus en cours de réalisation. 75% du temps, on remarque un dépassement du budget de l'ordre de 15% du montant total des travaux initialement prévus et qui est généralement dû au fait que le client choisit de meilleurs équipements en cours de chantier.

La qualité

Les problèmes de qualité les plus fréquents sont dû à des erreurs humaines, comme des erreurs de dessins (incohérences entre les détails 2D et 3D ou erreurs au niveau des dimensions des châssis).

- Si la baie est trop grande, ce n'est pas trop problématique, on ajoute alors un caisson dans la baie pour diminuer un peu sa taille.
- Si c'est trop petit, le problème est plus difficile à résoudre, car il peut y avoir des éléments structuraux de part et d'autre de la baie.

Ce type de problème peut également découler d'une demande de modification du client. Sur les figures 111 et 112, on peut observer des différences extrêmement importantes dans les plans au niveau des ouvertures des fenêtres. Ce genre de cas est rare. Pour réaliser ces changements, le client a dû demander un nouveau permis de bâtir. Les délais pour recevoir ce nouveau permis étant long, la commune a permis au client de réaliser les travaux et de régulariser par la suite le permis.

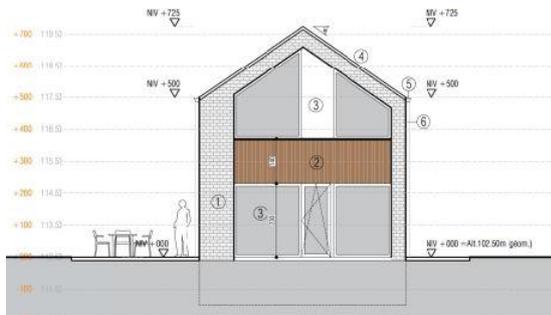


Figure 27 : Projet avant modifications du permis d'urbanisme_Naturhome.

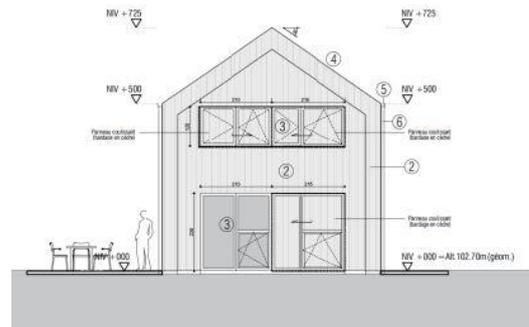


Figure 112 : Projet après modification du permis d'urbanisme_Naturhome.

Projets qui ont bien fonctionnés

Le bon déroulement d'un projet est directement lié à la simplicité d'un bâtiment.

On remarque aussi qu'au niveau budgétaire, plus les bâtiments sont grands, mieux c'est. Ceci s'explique par le fait que les coûts fixes comme l'installation de chantier sont les mêmes pour un petit ou un grand chantier. Sur un grand chantier, on bénéficie aussi de l'avantage de pouvoir réaffecter les ouvriers sur d'autres postes en cas de problèmes afin de ne pas perdre de temps.

Conclusion

Le fait que Naturhome rencontre rarement des problèmes au niveau du délai, du budget et de la production, vient de plusieurs facteurs :

- Ils établissent des devis sur base des plans définitifs, il y a donc très peu de marge d'erreur.
- Ils analysent le projet en fonction de sa difficulté architecturale ainsi que par rapport à ses m² habitables pour déterminer le nombre de jours ouvrables afin de réaliser et d'assembler le projet sur chantier.
- Ils imposent leurs méthodes de construction aussi bien aux architectes qu'aux clients.

- Ils ont investi dans leurs propres machines-outils, afin d'être le plus autonome possible et pouvoir préfabriquer les pièces nécessaires. Ils travaillent donc toujours avec la même méthode de production et du coup ils la maîtrisent.

Les problèmes pouvant être rencontrés sont principalement :

- Des problèmes de voisinage (ils commencent à construire et il se passe quelque chose avec le voisin, souvent dans le cas de mitoyenneté) liés au fait qu'il n'appartient pas à Naturhome de vérifier à l'administration communale que les plans qu'on leur a transmis respectent bien les règles d'urbanisme, les règles de lotissements ou les règles de mitoyenneté en rigueur dans la commune. Ils présupposent que l'architecte a fait correctement son travail. Du coup, il arrive que la commune suspende l'exécution du chantier, le temps d'éclaircir la situation.
- La météo (intempéries).
- Le terrassement (nappe phréatique, rocher, reprise en sous-œuvre plus compliqué que prévu).
- Des erreurs humaines (erreurs de dessins qui imposent de refaire une partie de la structure).

Les problèmes rencontrés sont pour la plupart du temps extérieurs à la société, et ne sont pas engendrés par le type de bâtiments que l'entreprise construit (constructions résidentielles unifamiliales pour la plupart 4 façades) puisqu'on leur demande rarement des constructions pour lesquelles ils ne sont pas équipés.

Le succès de la société Naturhome réside dans le fait qu'ils ne font pas des constructions purement industrialisées. La flexibilité dont ils font preuve dans leur méthode de production leur permet une grande diversité et donc de pouvoir répondre aux exigences des clients.

Naturhome pourrait aller plus loin dans le processus de préfabrication, comme par exemple en standardisant certains composants ou modules 2D mais à ce moment-là ils perdraient un peu de diversité.

Le tableau ci-dessous permet de situer l'entreprise Naturhome par rapport à une entreprise qui préfabrique de manière totalement industrielle. Cette comparaison concerne uniquement la phase de préfabrication en atelier et non la phase de montage sur chantier.

	Principe	Avantages	Inconvénients
Naturhome	Naturhome est une entreprise qui n'industrialise rien, ils préfabriquent, ils sont tournés vers la diversité, sur mesure à 100%.	<ul style="list-style-type: none"> - Indépendant de la météo. - Précision supplémentaire. - Réduction des risques d'erreurs grâce à la conception en amont. - Gestion du délai et du budget. - Privilégie la qualité plutôt que la quantité. - Offre plus de diversité de l'habitat. 	<ul style="list-style-type: none"> - Processus de préfabrication non industrialisé, non standardisé. - Repart à zéro pour chaque projet. - Prix de l'habitat plus élevée. - Durée totale de préfabrication plus longue.
Entreprise totalement industrielle	Une entreprise qui industrialise une grande partie de ses composants, peut difficilement être tournée vers la diversité puisqu'une production en série nécessite de gros investissements pour acquérir un nombre suffisant de machine outils.	<ul style="list-style-type: none"> - Indépendant de la météo. - Précision supplémentaire. - Réduction des risques d'erreurs grâce à la conception en amont. - Gestion du délai et du budget - Privilégie la quantité plutôt que la qualité. - Processus de préfabrication industrialisé, standardisé. - Ne repart pas à zéro pour chaque projet. - Prix de l'habitat moins élevé. - Durée totale de préfabrication plus courte. 	<ul style="list-style-type: none"> - Offre moins de diversité d'habitat. - Tendance à diminuer les standards de qualité des produits finis pour augmenter ses profits.

Figure 113 : Relation en Naturhome et un fabricant industriel.

De ce tableau, nous pouvons déduire que, aussi bien la préfabrication non industrialisée que l'industrialisation ont de nombreux avantages communs.

La différence majeure entre les 2 systèmes de production réside dans le niveau de diversité offert aux clients. De plus, le système standardisé aura tendance à diminuer les normes de qualité des produits finis pour augmenter ses profits.

7. Discussion

Pour réaliser ce travail, j'ai analysé le sujet du TFE selon plusieurs points de vue : la littérature, l'analyse de cas et la rencontre avec un fabricant. Ce qui m'amène à pouvoir donner mon ressenti, mon avis sur le sujet.

La question à laquelle ce travail tente de répondre est la suivante : Comment augmenter la diversité dans la construction préfabriquée en bois en conservant un haut degré d'industrialisation ?

Une autre façon de voir la question est de se dire : Comment peut-on amener les demandes de chacun à rencontrer un système de production en série ?

A mon sens, ce qui va permettre de répondre à cette question est qu'avec le temps et l'expérience, on maîtrisera de plus en plus l'équilibre entre la diversité et l'industrialisation. Cette évolution permettra d'amener de nouveaux composants industrialisés, de nouvelles innovations, technologie etc... le tout nourrira ce système de production. Au fur et à mesure, cette façon de produire s'étoffera de plus en plus et permettra de rencontrer d'avantages les besoins et envies des clients.

Est-il nécessaire de produire des bâtiments à un haut degré d'industrialisation ?

Dans la construction actuelle, on assemble une succession de petites pièces (briques, blocs de béton, hourdis, etc...) qui ont été fabriqués en usine. L'idéal serait, que ces petites pièces deviennent des composants de plus gros ensembles, réfléchis de manière plus éthique, consommant moins, etc... La préfabrication en atelier de plus gros ensembles permettrait aux ouvriers de gagner du temps lors de l'assemblage sur chantier.

En ce qui concerne la réalisation de construction non industrialisée, non standardisée, il est nécessaire à chaque nouveau projet de repartir de zéro, toutes les étapes sans exception sont à refaire. Par contre les projets pouvant être totalement industrialisés, bénéficieront d'une base, base qui pourrait être répliquée autant de fois que souhaité.

Sur base de l'étude de cas faite avec l'entreprise Naturhome, il me semble que leur concept se situe entre celui d'une entreprise traditionnelle et celui d'une entreprise totalement industrialisée. Leur méthode de préfabrication d'habitations, leur permet une meilleure gestion

des délais et du budget que celle de la construction traditionnelle. Cependant, Naturhome préfabrique, ils n'industrialisent pas, ils ne standardisent pas leurs pièces. Comme dit précédemment, la différence majeure entre Naturhome et une entreprise totalement industrialisée, est le niveau de diversité offert aux clients. De plus, le système standardisé aurait tendance à diminuer les normes de qualité des produits finis pour augmenter ses profits.

Selon moi, il n'y a pas « UNE » réponse à la question ci-dessus. Il s'agit plutôt de trouver des solutions pour améliorer le domaine de la construction. Le préfabriqué améliore la rapidité et la qualité de la construction, l'efficacité des matériaux et la sécurité des travailleurs. La construction préfabriquée permettrait également de supprimer les discussions permanentes sur les dépassements budgétaires tout en permettant une grande diversité et en bénéficiant des avantages de l'industrialisation.

Interrogations sur la nécessité de l'industrialisation de l'habitat

On pourrait avoir peur d'être freiné en termes de diversité de l'habitat par un système industrialisé.

De nos jours, une grande partie de la population désirent devenir propriétaire choisit son habitation dans un catalogue restreint comme par exemple les maisons clés sur porte. Si ces catalogues étaient plus étoffés, ils permettraient une plus grande variété de choix, ce qui serait alors intéressant d'un point de vue architectural.

Si on obtient un marché suffisant, avec le temps, ces catalogues pourraient être une solution permettant de répondre à la question du travail.

Création de catalogue

Nous avons vu avec le concept Ncube de Naturhome qu'il est nécessaire d'avoir un grand nombre de commandes pour amortir le développement d'un produit. Or, la diversification de ces produits implique de nouveaux développements devant eux aussi être amortis par un plus grand nombre de commandes. Une trop grande diversification n'est donc pas soutenable économiquement par une entreprise. Il y a donc un choix restreint à proposer.

Pour industrialiser, il faut standardiser, il faut donc passer par des catalogues. Pour rencontrer les demandes diverses des gens il faut démultiplier les catalogues. Un catalogue se développe avec le temps, on fait évoluer le système petit à petit.

Dans l'industrie automobile, le consommateur choisit d'abord un modèle de base, modèle qui est standardisé, puis il choisit dans un catalogue les options qu'il veut apporter à son véhicule de façon à obtenir une personnalisation qui lui correspond le mieux.

Ce système de production pourrait être envisagé dans le domaine de l'architecture et de la préfabrication d'habitations.

Marché à conquérir

Le premier marché à essayer de conquérir n'est probablement pas le logement résidentiel unifamilial mais plutôt les bâtiments collectifs, afin de d'abord convaincre la collectivité avant l'individu en lui-même. Les personnes vivant dans des bâtiments collectifs sont en effet plus ouvertes et favorables au changement du fait qu'elles sont dans des bâtiments qui offrent moins de diversité de logement et qui répondent moins à leurs besoins.

Paramètres à prendre en compte

De mon point de vue, j'apprécie la manière de travailler de Naturhome. Cette société a une méthode de production qui permet la préfabrication et qui prend également en compte les envies du client. Ce concept laisse de la place à la créativité, à l'art, à l'architecture et au travail de l'architecte.

Au moment où je m'appête à terminer mes études en architecture, je me pose la question sur le rôle et la nécessité de l'architecte dans un système préfabriqué hautement industrialisé. A cette interrogation viennent s'ajouter trois réflexions :

- Ce système préfabriqué ne pourrait-il pas se développer en créant une série de composants standardisés ? Ceux-ci devraient être réfléchis sur une grille, une trame de référence afin que l'architecte puisse composer avec ces composants standardisés. Cette trame laisserait donc de la place à la créativité et par conséquent à la diversité.
- Ne s'agirait-il pas d'une architecture plus adaptée à des bâtiments industriels, à immeubles de bureaux ou à des logements collectifs ? Nous avons pu constater avec la

société Naturhome, que la préfabrication ne laisse pas place à toutes les architectures, comme notamment l'architecture organique, puisqu'elle est trop spécifique, trop chère, trop contraignante à préfabriquer.

- Est-ce que l'augmentation du degré d'industrialisation pourrait être un moyen pour faire face aux difficultés croissantes des entreprises à trouver une main d'œuvre qualifiée et motivée pour monter « les petites pièces » sur chantier ?

Selon moi, un système préfabriqué hautement industrialisé, doit laisser de la place à la diversité et ne doit pas supplanter d'autres types d'architecture. Par conséquent, il faut trouver un juste équilibre entre la diversité et l'industrialisation.

Choix du bois comme matériaux de préfabrication

A la lecture de ce travail, on pourrait se demander pourquoi ai-je choisi le bois comme matériau de préfabrication ? Il est vrai que les informations trouvées s'appliquent également aux autres matériaux.

Néanmoins, le bois, est un matériau qui m'a toujours intéressé. C'est un matériau « vivant », chaleureux et non inerte comme l'acier et le béton.

De nos jours, on construit plus en béton et en acier mais l'utilisation du bois revient de plus en plus dans la construction. Il s'agit d'un matériau écologique, durable, renouvelable et utilisé depuis toujours dans la construction.

8. Conclusion

Pour permettre de développer le sujet principal de ce travail, il m'a d'abord été nécessaire d'expliquer les notions de la diversité et de l'industrialisation. Il ressort de ces deux notions que :

- Pour la diversité : Il est important et nécessaire de pouvoir fournir une diversité d'habitat, une diversité architecturale afin de rencontrer les envies, besoins, les desideratas de la société. Celle-ci participe également à la mixité sociale.
- Pour l'industrialisation : Cette notion met principalement en évidence des principes de production, comme la standardisation, le fordisme, le taylorisme, la production de masse et le flux tendu. Ces différents systèmes de production industrielle ont permis de participer à l'évolution des pratiques constructives, notamment avec la préfabrication et le modulaire.

J'ai ensuite réalisé une étude de cas comparative entre différents projets architecturaux. Ainsi j'ai pu comprendre comment l'industrialisation entrave ou contribue à la diversité des logements. Il est ressorti de cette étude que :

- Certains projets, sont des bâtiments réfléchis pour être uniques. Ils sont réalisés à un endroit précis, ils participent à la diversité architecturale et ne pourront donc jamais être industrialisés.
- D'autres sont des projets réfléchis pour permettre une diversité architecturale, mais leur conception pourrait permettre une certaine industrialisation.
- On rencontre aussi des projets très industrialisés, mais l'analyse met en évidence que ceux-ci n'offrent pas ou très peu de diversité de logements.
- Certaines constructions industrialisées (comme les Modulaires Appartements, Townhouses, Student Village) peuvent en revanche permettre une diversité des logements.

Les différents cas permettent de se rendre compte qu'il n'existe pas un seul type d'architecture, mais bien plusieurs. Ils doivent pouvoir coexister, ils ont tous un rôle à jouer pour permettre une diversité de logements.

S'en est suivi l'analyse d'une société spécialisée dans la construction d'habitations préfabriquées en ossature bois. Pour ce faire, mon choix s'est porté sur l'entreprise Naturhome,

cette entreprise utilise les mêmes principes que les systèmes de production en série mais dans leur cas, ils ne standardisent pas leur production. Car l'ADN de la société est de permettre à sa clientèle de faire le plus grand nombre de choix. Ils privilégient la diversité à un haut degré de qualité.

Toutes les étapes de ce travail m'ont permis d'émettre l'avis suivant :

- Pour industrialiser, il faut standardiser, il faut donc passer par des catalogues. Pour rencontrer les demandes diverses de la population, il faut démultiplier les catalogues. Un catalogue se développe avec le temps, on fait évoluer le système petit à petit.
- Un système préfabriqué hautement industrialisé doit donc permettre malgré tout d'avoir de la diversité. Ce système constructif ne doit pas supplanter les autres types d'architecture. Il doit s'intégrer, faire partie de l'ensemble. Par conséquent il faut trouver un juste équilibre entre la diversité et l'industrialisation.

Les pistes éventuelles qui pourraient être à l'avenir explorées sont par exemple :

- L'architecture hautement industrialisée doit-elle supplanter les autres de par ses avantages et l'évolution de la société ? (Économie, écologie, pression sur les terrains constructibles moins forte, démographie, moins de place pour l'art et la culture, etc...).
- Quel est la place de l'art et de l'architecte dans ce type d'architecture poussée à l'extrême ?

9. Table des figures

Figure 1 : Photos_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].	5
Figure 2: Implantation_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].	5
Figure 3 : Elévation_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].	5
Figure 4: Façade_ Cité industrielle Petite Russie [Coh19].	5
Figure 5 : Implantation_ La Cité Moderne [Coh19].	6
Figure 6 : Photos_ La Cité Moderne [Coh19].	6
Figure 7 : Elévations_ La Cité Moderne [Coh19].	6
Figure 8 : Façade_ La Cité Moderne [Coh19].	6
Figure 9 : Implantation_ Le Logis Floréal [Coh19].	7
Figure 10 : Photos_ Le Logis Floréal [Coh19].	7
Figure 11 : Plan_ Le Logis Floréal [Coh19].	7
Figure 12 : Elévation_ Le Logis Floréal [Coh19].	7
Figure 13 : Implantation_ Cité-Jardin de Stains [PSSD21].	8
Figure 14 : Habitation_ Cité-Jardin de Stains [PSF15].	8
Figure 15 : Situations et préférences déclarées en matière d'habitation [Dam17].	10
Figure 16 : Plans, coupes et élévations [MVRDV06].	17
Figure 17 : Toiture_ Didden Village [MVRDV06].	17
Figure 18 : Axonométrie_ Moriyama House [Pin21].	18
Figure 19 : Moriyama House [Div18].	18
Figure 20 : Quand le ciel des villes était noir de charbon_ Angleterre_ 1880 [IA21].	22
Figure 21 : Cockerill_ Seraing_ Ensemble des usines à vol d'oiseau_ 1900 [Rtb17].	23
Figure 22 : Courbe d'apprentissage [Col13].	25
Figure 23 : Usine Ford [Fra19].	25
Figure 24 : Flux poussé vs. flux tiré [Col13].	26
Figure 25 : Abstracted hierarchical representation of product structure [Fuj02].	27
Figure 26 : Conception en bureau d'étude [Boi19].	31
Figure 27 : Production d'éléments [MW17].	31
Figure 28 : Combinaison des éléments [Boi19].	31
Figure 29 : Transport d'éléments préfabriqué [Esp19].	31
Figure 30 : Phase de montage [Lca20].	31
Figure 31 : Panneaux de bardage [Sch20].	32
Figure 32 : Modules 2D [Sch20].	33
Figure 33 : Modules 3D [Sch20].	33
Figure 34 : Hybrid structure–First Light House_ completely installed building [BKK16].	34
Figure 35 : Installation procedure [BKK16].	34
Figure 36 : Union Trust building_ Adler et Sullivan_ 1892 [Dep13].	35
Figure 37 : Dymaxion "Wichita" House_ Buckminster Fuller_ 1945 [Lec19].	36
Figure 38 : 4x4 House_ Tadao Ando [Wikiar21].	38
Figure 39 : Construction en ossature bois [Egb17].	39
Figure 40 : Construction en poteaux-poutres [Sta21].	40

Figure 41 : Construction en bois massif empilé [BW15].	40
Figure 42 : Construction en panneaux massifs [Mai14].	41
Figure 43 : Récapitulatif des systèmes constructifs en bois [Hec14].	42
Figure 44 : Maison Dom-ino_Le Corbusier_1914 [Fon21].	44
Figure 45 : Vue d'une ville spatiale_ Yona Friedman_ 1958 [Sch13].	45
Figure 46 : Cities in the air_ Arata Isozaki_ 1960 [Gau07].	45
Figure 47 : Plan de la Floating City__ Kisho Kurokawa [Gau07].	46
Figure 48 : Hosomi_Dethier Architecture_2011 [DN11].	47
Figure 49 : Chantier_ Hosomi_Dethier Architecture_2011 [DN11].	47
Figure 50 : One9 modular building stabilized by a concrete core [BKK16].	48
Figure 51 : Habitat 67 [West21].	49
Figure 52 : Habitat 67_Moshe Safdie [Pint21].	49
Figure 53 : Plan_ Hôtel Tassel [Coh19].	53
Figure 54 : Coupe_ Hôtel Tassel [Coh19].	53
Figure 55 : Façade_ Hôtel Tassel [Coh19].	53
Figure 56 : Escalier_ Hotel Tassel [Coh19].	54
Figure 57 : Vitrage_ Hotel Tassel [Coh19].	54
Figure 58 : Plan_ Casa Milà [Ker21].	55
Figure 59 : Façade_ Casa Milà [Wik18].	55
Figure 60 : Coupe_ Casa Milà [Ker21].	55
Figure 61 : Escalier intérieur_ Casa Milà [BTT21].	56
Figure 62 : Plan_ Fallingwater [Ka21].	57
Figure 63 : Façade_ Fallingwater [Ka21].	57
Figure 64 : Coupe_ Fallingwater [BP19].	57
Figure 65 : Plan_ Eames House [Min21].	59
Figure 66 : Façade_ Eames house [Pinte21].	59
Figure 67 : Axonométrie éclatée_ Eames House [Pin21 ²].	60
Figure 68 : Plan, coupes et élévations_ Eames House [Min21].	60
Figure 69 : Plan_ Farnsworth house [DAD15].	61
Figure 70 : Farnsworth house_ Mies van der Rohe [Wikiar21].	61
Figure 71 : Coupes_ Farnsworth House [DAD15].	61
Figure 72 : Plan_ Fisher House [Gal21].	62
Figure 73 : Façade arrière_ Fisher House [Cal21].	62
Figure 74 : Façade avant_ Fisher House [Wikia21].	62
Figure 75 : Coupes et élévations_ Fisher House [Gal21].	63
Figure 76 : Implantation_ Cité Törten_ Dessau [Wik21].	64
Figure 77 : Vue aérienne_ Cité Törten [Wik21].	64
Figure 78 : Plan_ Cité Törten [BD20].	64
Figure 79 : Coupe_ Cité Törten [BD20].	64
Figure 80 : Photos_ Cité-jardin Törten [Wik21].	65
Figure 81 : Implantation_ La Cité Radieuse [MM14].	66
Figure 82 : Photos_ La Cité Radieuse [CFA19].	66
Figure 83 : Coupe_ La Cité Radieuse [Pin21].	66
Figure 84 : Plan_ La Cité Radieuse [Pin21].	66

Figure 85 : Implantation_ Cité de Droixhe [Coh19].	67
Figure 86 : Maquette_ Cité de Droixhe [Coh19].	67
Figure 87 : Plan_ Cité de Droixhe_[Coh19].	67
Figure 88 : Implantation_ Modular Apartments [PPA17].	69
Figure 89 : Façade_ Modular Apartments [PPA17].	69
Figure 90 : Coupe_ Modular Apartments [PPA17].	69
Figure 91 : Plan_ Modular Apartments [PPA17].	69
Figure 92 : Plan des appartements_ Modular Apartments [PPA17].	70
Figure 93 : Implantation_ Townhouses [BBF12].	71
Figure 94 : Photos_ Townhouses [BBF12].	71
Figure 95 : Coupe_ Townhouses [BBF12].	71
Figure 96 : Plans_ Townhouses [BBF12].	71
Figure 97 : Implantation_ Student Village [Wil20].	72
Figure 98 : Façade_ Student Village [Wil20].	72
Figure 99 : Coupe_ Student Village [Wil20].	72
Figure 100 : Plan_ Student Village [Wil20].	72
Figure 101 : Axonométrie_ Student Village [Wil20].	73
Figure 102 : Comparaison entre diversité et industrialisation.	74
Figure 103 : Maison unifamiliale_ Chastre [Nat21].	78
Figure 104 : Maison unifamiliale_ Namur [Nat21].	78
Figure 105 : Schéma_ Ncube_ Naturhome.	80
Figure 106 : Construction en atelier_ Ncube_ Naturhome.	81
Figure 107 : Pose des modules 3D_ Ncube_ Naturhome.	81
Figure 108 : Maison unifamiliale à Bousval_ 2 types de parement [Nat21].	85
Figure 109 : Maison courbe_ Naturhome.	86
Figure 110 : Tableau de rentabilité de différents projets_ Naturhome.	87
Figure 111 : Projet après modification du permis d'urbanisme_ Naturhome.	89
Figure 112 : Projet avant modifications du permis d'urbanisme_ Naturhome.	89
Figure 113 : Relation en Naturhome et un fabricant industriel.	91

10. Références

Ouvrages

- [Coh15] COHEN Jean-Louis, *Le Corbusier*, Taschen, 2015.
- [Dep13] DEPLAZES Andrea, *Construire l'architecture du matériau brut à l'édifice*, Birkhauser, Deuxième édition, Septembre 2013.
- [FA10] FORBES Lincoln H. et AHMED Syed M., *Modern construction : lean project delivery and integrated practices*, CRC Press, 2010.
- [Foh71] FOHLEN Claude, *Qu'est-ce que la révolution industrielle ?*, Collection « Science nouvelle », Éditions Robert Laffont, Paris, 1971.
- [Mah05] MAHAIM Ernest, *Les débuts de l'établissement John Cockerill à Seraing ; Contribution à l'histoire des origines de la grande industrie au Pays de Liège*, 1905.
- [Mar12] MARNOT Bruno, *La mondialisation au XIX ème siècle*, Collection U, Armand Colin, Juillet 2012.

Articles

- [BBF12] BUCHER-BEHOLZ Ingo, FREY Martin, *Townhouses in Munich-Riem*, Détail, 2012.
- [BC78] BONNIER J., COSTE M., *Consommation d'espace et habitat individual*, Revue de géographie de Lyon, vol. 53, n°4, 1978.
- [BKK16] BOAFO Fred Edmond, KIM Jin-Hee, KIM Jun-Tae, *Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways, Sustainability*, Kongju National University, Juin 2016.

- [BL04] BEAUREGARD Robert, LAPOINTE Marc, *Système standardisé pour la production de maisons usinées*, Phase 1, Université de Laval, Mars 2004.
- [BT] BECUE Vincent, TELLER Jacques, *Comment concevoir un quartier « multifonction » pour promouvoir un développement urbain durable ?*, Laboratoire d'automatique, de mécanique et d'informatique industrielle et humaine (LAMIH), Equipe système de production (SP), Université de Valenciennes, Laboratoire d'études méthodologique architecturales (LEMA), Université de Liège.
- [Cha11] Chalets et maisons bois, *Préfabrication : les maisons venues de l'ouest*, n°49, Février-Mars 2011.
- [Dep95] DEPECKER Loïc, *Terminologie et standardisation*, Université Pompeu Fabra, Barcelone 1995.
- [DN11] DETHIER– News, *Hosomi*, Octobre 2011.
- [Eem09] EEMAN Camille, *L'habitat groupé par ses limites*, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, Mai 2009.
- [Ele17] ELEB Monique, *L'habitat d'aujourd'hui et de demain : Flexible, adaptable, réversible ?*, Université de Séville, Poyecto, Progreso, Arquitectura, n°16, Mai 2017, pp.18-33.
- [ER19] ECOPARC, REY Emmanuel, *Vers une architecture modulaire ?*, Tracés, Zurich, Novembre 2019.
- [FM00] FRANKIGNOULLE Pierre, MALHERBE Alain, *Le logement social*, les cahiers de l'urbanisme n°28-29, Février 2000.
- [Fri04] FRIGANT Vincent, *La modularité : un fondement pour des firmes architectes ?*, Université Montesquieu-Bordeaux, Janvier 2004.

- [Fuj02] FUJITA Kikuo, *Product variety optimization under modular architecture*, Graduate School of Engineering, Osaka University, 2002.
- [Hey12] HEYNEN André, *Projet « Maison Modulaire »*, Naturhome, Newconcept.lu, Crahay et Jamaigne société d'architectes scrl, Avril 2012.
- [IM97] ISHII Kosuke, MARTIN Mark V., *Design for variety: Development of complexity indices ans design charts*, Department of Mechanical Engineering, Stanford University, Septembre 1997.
- [Lam01] LAMBRICHTS Anne, *Les Cités-Jardins en Belgique*, Ciudades, 2001.
- [Lel11] LELEVRIER Christine, *Diversification de l'habitat et mixité sociale dans les opérations de rénovation urbaine*, Université Paris-Est, Août 2011.
- [Ler08] LEROUX Nadège, *Qu'est-ce qu'habiter ? : Les enjeux de l'habiter pour la réinsertion*, Vie sociale et traitements, Revue des CEMA, n°97, Janvier 2008.
- [Lip90] LIPIETZ Alain, *Après-fordisme et démocratie*, Les Temps Modernes, n°524, Mars 1990.
- [PPA17] PPA architectures, *Modular Apartments in Toulouse*, Détail, 2017.
- [PV15] POULEUR Jean-Alexandre et VANZANDE Ornella, *Identification de la diversification des typologies de logement au service de la complexité des besoins et attente des habitants*, Université de Mons, Faculté d'Architecture et d'Urbanisme, 2015.
- [Tec45] Techniques et architecture, *Construction d'une maison « ballon »*, Collection CCA, Novembre 1945.

- [Tug68] TUGAULT Y., *Deux études sociologiques sur l'habitation individuel*, Population, n°1, 1968, pp.9-28.
- [THP06] THYS Pascale, Habitat et Participation, Habitat collectif et habitat intergénérationnel, Etopia, Octobre 2006.
- [Wi120] WILKINSON Eyre, *Student Village in Malmesbury*, Détail, 2020.

Mémoires, thèses et rapports

- [BB20] BELLAHOUEL Abou Tahar, BENACHOUR Alaa Eddine, *Etude d'une construction préfabriquée en béton armé*, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Faculté de technologie, Algérie, Septembre 2020.
- [Cas07] CASSAGNABERE Franck, *Produits préfabriqués en béton file : Vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procédé de production*, Université Paul Sabatier Toulouse III, Septembre 2007.
- [CERTU03] Centre d'étude sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU), *Diversité de l'habitat ; mixité urbaine et planification urbaine*, CETE de Lyon, Août 2003.
- [Col13] COLLARD Bruno, *Optimisation du flux de production en usine et sur chantier d'un système constructif industrialisé de bâtiment*, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2013.
- [Hec14] HECK Thomas, *Concept de maison en bois favorisant l'autoconstruction*, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2014.
- [Lel11] LELEVRIER Christine, *Diversification de l'habitat et mixité sociale dans les opérations de rénovation urbaine*, Université Paris-Est, Août 2011.

[Per19] PERRET Jonathan, *Adaptable dwellings*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2019.

[Pop15] POPLAVSKY Charles, *Un futur pour le système Patze-Englebert*, Université de Liège, Faculté d'architecture, 2015.

Cours et conférences

[Coh19] COHEN Maurizio, *Histoire de l'architecture belge du 20^{ème} siècle*, Université de Liège, Faculté d'architecture, 2019.

[Dot] DOTREPPE J-C., *Caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux*, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées.

[Kub12] KUBICKI Sylvain, *Gestion de projets II (Cours à l'intention des Ingénieurs Civils Architectes et des Ingénieurs Civils des Constructions)*, Université de Liège, 2012.

[Lec19] LE COGUIEC, *Théorie de l'architecture ; l'angle mort de l'historiographie de l'architecture moderne*, Université de Liège, Faculté d'Architecture, 2019.

[Ler97] LEROY Jacques, *Constructions Métalliques*, Isil, Haute école de la province de Liège, 1997.

[LS12] LARSSON Johan, SIMONSSON Peter, *Decreasing complexity of the on-site construction process using prefabrication: a case study*, In Proceedings IGLC-20: Conference of the International Group for Lean Construction, volume 20, pages 841–850, Lean Construction Institute, Juillet 2012.

[Sch20] SCHMITZ Dimitri, *Architecture Modulaire*, Université de Liège, Faculté d'Architecture, Septembre 2020.

Sites Internet

- [AD19] AD, *Pour ses 70 ans, l'iconique maison Eames s'offre un lifting*, Mai 2019, <https://www.admagazine.fr/architecture/actualite-architecture/diaporama/pour-ses-70-ans-la-maison-eames-se-paye-un-lifting/54989>, consulté le 29 Mars 2021.
- [All21] Alloprof, *L'industrialisation et ses conséquences*, 2021, <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/monde-contemporain/l-industrialisation-et-ses-consequences-h1078>, consulté le 11 Janvier 2021.
- [Arc21] Archdaily, *AD Classics: The Farnsworth House / Mies van der Rohe*, 2021, <https://www.archdaily.com/59719/ad-classics-the-farnsworth-house-mies-van-der-rohe>, consulté le 29 Mars 2021.
- [Cal21] Calameo, *Norman Fisher House*, 2021, <https://fr.calameo.com/read/002479553e2e3b9c0a97b>, consulté le 29 Mars 2021.
- [CB21] Casa Batlo, *Casa Mila (« La Pedrera »)*, 2021, <https://www.casabatllo.es/fr/antoni-gaudi/casa-mila-la-pedrera/>, consulté le 24 Février 2021.
- [CM21] Construction maison, *l'habitat individuel*, 2021, <https://construction-maison.ooreka.fr/astuce/voir/462205/habitat-individuel>, consulté le 6 Avril 2021.
- [Dam17] DAMON Julien, *Les Français et l'habitat individuel : préférences révélées et déclarées*, Sociologies, 2017, <https://journals.openedition.org/sociologies/5886>, consulté le 14 Janvier 2021.
- [EF21] Eames Foundation, *Eames House*, 2021, <https://eamesfoundation.org/house/eames-house/>, consulté le 29 Mars 2021.

- [EO21] Eames Office, *Case Study House 8 : The Eames House*, 2021, <https://www.eamesoffice.com/the-work/eames-house-case-study-house-8/>, consulté le 29 Mars 2021.
- [Fal21] Fallingwater, *What is Fallingwater?*, 2021, <https://fallingwater.org/what-is-fallingwater/#:~:text=Fallingwater%20is%20a%20house%20designed,department%20store%20owner%2C%20Edgar%20J.&text=Wright%20designed%20Fallingwater%20to%20rise,over%20which%20it%20is%20built>, consulté le 24 Février 2021.
- [Fre14] FREARSON, *Le Corbusier's Maison Dom-ino realised at Venice architecture biennale*, 2014, <https://www.dezeen.com/2014/06/09/le-corbusiers-maisondom-ino-realised-at-venice-architecture-biennale/>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [Gau07] GAUTRON Frédéric, *Les Métabolistes*, 2007, <https://placesjournal.org/article/the-emergence-of-container-urbanism/>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [GD21] Gaudi Designer, *Casa Mila*, 2021, <https://www.gaudidesigner.com/fr/casa-mila.html>, consulté le 24 Février 2021.
- [Hab21] Habitat 67, *Hommage*, 2021, <http://www.habitat67.com/hommage/>, consulté le 12 Avril 2021.
- [HL14] Histoire de Liège, *Le quartier de Droixhe à ses débuts*, Février 2014, <https://histoiresdeliege.wordpress.com/2014/02/17/le-quartier-de-droixhe-a-ses-debuts/>, consulté le 27 Février 2021.
- [Lar21] Larousse, *Industrialisation*, 2021, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/industrialisation/42736>, consulté le 18 Janvier 2021.
- [Laro21] Larousse, *Arts and Crafts*, 2021, <https://www.larousse.fr/encyclopedie/groupe->

- [personnage/Arts_and_Crafts/178362](#), consulté le 24 Février 2021.
- [Larou21] Larousse, *Cité-jardin*, 2021, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/cit%C3%A9-jardin/16231>, consulté le 9 Avril 2021.
- [Larous21] Larousse, *Rationaliser*, 2021, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/rationaliser/66646>, consulté le 11 Avril 2021.
- [Larouss21] Larousse, *Paradigme*, 2021, <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/paradigme/57869>, consulté le 12 Avril 2021.
- [LE16] LesEchos, Taiichi Ohno, *La révolution du « juste à-temps »*, Juillet 2016, <https://www.lesechos.fr/2016/07/taiichi-ohno-la-revolution-du-juste-a-temps-1112071>, consulté le 7 Février 2021.
- [LL18] La Libre, *Le fordisme, une révolution industrielle*, Novembre 2018, <https://www.lalibre.be/archive/le-fordisme-une-revolution-industrielle-51b8d693e4b0de6db9c23dac>, consulté le 7 Février 2021.
- [Lor13] LORCERY Sarah, *Bauhaus-Paysage urbain : La cité Törten*, Avril 2013, <http://histart.over-blog.com/bauhaus-paysage-urbain-la-cit%C3%A9-t%C3%B6rten>, consulté le 2 Avril 2021.
- [LT21] La Toupie, *Standardiser, standardisation*, <http://www.toupie.org/Dictionnaire/Standardisation.htm>, consulté le 7 Février 2021.
- [ME18] MONDE ECONOMIQUE, *Vers un urbanisme et une architecture qui consacrent la diversité*, Février 2018. <https://www.monde-economique.ch/vers-un-urbanisme-et-une-architecture-qui-consacrent-la-diversite/>, consulté le 20 Janvier 2021.

- [Mor21] Morin Frédéric, *La culture en partage*, 2021, <http://www.chambres-hotes-morin-salome.fr/Mod-Kahn-1967.html>, consulté le 27 Mars 2021.
- [PO18] Pen Online, *L'éclat architectural de la Moriyana House*, Juillet 2018, <https://pen-online.com/fr/design/la-purete-des-moriyama-house-est-indemodable/>, consulté le 20 janvier 2021.
- [QW21] Qaz Wiki, *4x4 House*, 2021, https://fr.qaz.wiki/wiki/4x4_house, consulté le 3 Avril 2021.
- [Rac21] Rachat du crédit, *définition de l'habitat individuel*, 2021, <https://www.rachatducredit.com/definition-habitat-individuel-57857.html>, consulté le 6 Avril 2021.
- [RTL08] RTL Info, *A Stains, les habitants de la cité-jardin accrocs à leur HLM*, Juillet 2008, <https://www.rtl.be/info/monde/international/a-stains-les-habitants-de-la-cite-jardin-accrocs-a-leur-hlm-57258.aspx>, consulté le 25 Février 2021.
- [Sch13] SCHWARZER Mitchell, *The emergence of container urbanism ; The repurposed shipping container, now a fixture of urban architecture, is part of a movement that began with Archigram and the Metabolists in the 1960s*, Places Journal, 2013. <https://placesjournal.org/article/the-emergence-of-container-urbanism>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [Van21] Vanupied, *Casa Mila (ou Perdrera) de Gaudi, construction insolite à Barcelone*, Janvier 2021, <https://www.vanupied.com/barcelone/activites-faire-barcelone/perdrera-barcelone-gaudi.html>, consulté le 24 Février 2021.
- [VB21] Vivre en Belgique, *Architecture au 20e siècle*, 2021, <https://www.vivreenbelgique.be/12-a-la-decouverte-de-la-belgique/architecture-au-20eme-siecle>, consulté le 4 Mars 2021.

- [Wik21] Wikiarquitectura, *Colonie Törten*, 2021, <https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/colonie-toerten/>, consulté le 22 Février.
- [Wikia21] Wikiarquitectura, *Fisher House*, 2021, <https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/maison-fisher/>, consulté le 29 Mars 2021.
- [Wikiar21] Wikiarquitectura, *Maison Farnsworth*, 2021, <https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/maison-farnsworth/>, consulté le 29 Mars 2021.
- [XLC21] XL Consultants, *Approches métiers – Optimiser les flux de production et de services*, 2021, <https://www.xl-consultants.com/conseil/optimiser-les-flux-de-production-et-de-services>, consulté le 5 Mars 2021.

Illustrations

- [BBF12] BUCHER-BEHOLZ Ingo, FREY Martin, *Townhouses in Munich-Riem*, Détail, 2012, [image].
- [BD20] Bauhaus Dessau, *Torten Estate*, 2020, [image], https://dessaubauhaus.wordpress.com/project-sites/torten-estate/sieto-i_grundriss-og_rechts-m50_a3-2/, consulté le 22 Février 2021.
- [BKK16] BOAFO Fred Edmond, KIM Jin-Hee, KIM Jun-Tae, *Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways, Sustainability*, Kongju National University, Juin 2016.
- [Boi19] Bois.com, *Conception en bureau d'étude*, Novembre 2019, [image], <https://www.bois.com/construction-renovation/maison/prefabrication>, consulté le 15 Février 2021.

- [BP19] Brick Pirate, *Fallingwater*, Novembre 2019, [image], <https://forum.brickpirate.net/viewtopic.php?f=33&t=23895>, consulté le 6 Mars 2021.
- [BTT21] Barcelona Tours & Tickets, *La Pedrera : The Origins !*, 2021, [image], <https://www.barcelonatourstickets.com/tours/la-pedrera-the-origins/>, consulté le 6 Mars 2021.
- [BW15] Battle Wood, *Construction en bois massif empilé*, 2015, [image], <https://www.battlewood.com/fr/accueil/242-madrier-empile-parpaing-massif-bois-lamelle-colle-double-emboitement-isolant.html>, consulté le 15 Février 2021.
- [Cal21] Calameo, *Norman Fisher House*, 2021, [image], <https://fr.calameo.com/read/002479553e2e3b9c0a97b>, consulté le 29 Mars 2021.
- [CFA19] Coupe-File-Art, *La cité Radieuse de Marseille*, Février 2019, [image], <https://www.coupefileart.com/post/la-cit%C3%A9-radieuse-de-marseille>, consulté le 22 Février 2021.
- [Coh19] COHEN Maurizio, *Histoire de l'architecture belge au 20 ème siècle*, Université de Liège, Faculté d'architecture, 2019, [image].
- [Col13] COLLARD Bruno, *Optimisation du flux de production en usine et sur chantier d'un système constructif industrialisé de bâtiment*, [image], Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2013.
- [DAD15] Dibujo Arquitectonico Digital, *Estudio de caso casa Farnsworth (Semana 11)*, Novembre 2015, [image], <https://juanpablrodriguez15.wordpress.com/2015/11/14/estudio-de-caso-casa-farnsworth-semana-11/>, consulté le 27 Mars 2021.
- [Dam17] DAMON Julien, *Les Français et l'habitat individuel : préférences révélées et déclarées*, Sociologies, 2017, [image],

- <https://journals.openedition.org/sociologies/5886>, consulté le 14 Janvier 2021.
- [Dep13] DEPLAZES Andrea, *Construire l'architecture du matériau brut à l'édifice*, [image], Birkhauser, Deuxième édition, Septembre 2013.
- [Div18] Divisare, *Moriyama House*, Mai 2018, [image], <https://divisare.com/projects/386147-sanaa-kazuyo-sejima-ryue-nishizawa-august-fischer-moriyama-house>, consulté le 7 Février 2021.
- [DN11] DETHIER– News, *Hosomi*, Octobre 201, [image].
- [Egb17] EGBC 86 Construction Bâtiment, *Construction en ossature bois*, Décembre 2017, [image], <http://www.construction-batiment-egbc-86.com/construire-facilement-sa-maison-ossature-bois/>, consulté le 15 Février 2021.
- [Esp19] Esprit Bois 21, *Transport des composants*, 2019, [image] <https://www.espritbois21.com/constructions/>, consulté 15 Février 2021.
- [Fra19] Franceinfo, *Usine Ford*, Septembre 2019, [image], https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/ca-nous-marque/ca-nous-marque-louis-carl-vignon-president-de-ford-france-ford-a-encore-un-avenir-en-europe_3606365.html, consulté le 15 Février 2021.
- [Fon21] Fondation Le Corbusier, *Maison Dom-ino*, 2021, http://www.fondationlecorbusier.fr/corbuweb/morpheus.aspx?sysId=13&IrisObjectId=5972&sysLanguage=fr-fr&itemPos=103&itemSort=fr-fr_sort_string1%20&itemCount=216&sysParentName=&sysParentId=65, consulté le 15 Janvier 2021.

- [Fuj02] FUJITA Kikuo, *Product variety optimization under modular architecture*, [image], Graduate School of Engineering, Osaka University, 2002.
- [Gal21] Galeria de imagenes, *Casa Fisher, Louis Kahn*, 2021, [image], http://galeria.eps.uspceu.es/main.php/v/Portfolio/af/DIBUJO/Narracion/album/Casa+Fisher/Clemente+Antonio02_s.jpg.html?g2_imageViewsIndex=1, consulté le 27 Mars 2021.
- [Gau07] GAUTRON Frédéric, *Les Métabolistes*, 2007, [image], <https://placesjournal.org/article/the-emergence-of-container-urbanism/>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [Hec14] HECK Thomas, *Concept de maison en bois favorisant l'autoconstruction*, [image], Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, 2014.
- [IA21] INTERFOTO, Alamy Stock, *Quand le ciel des villes était noir de charbon*, 2021, [image], <https://www.pavillon-arsenal.com/fr/actualite/11936-histoire-naturelle-de-larchitecture.html>, consulté le 15 Février 2021.
- [Ka21] Khan Academy, *Frank Lloyd Wright, Fallingwater*, 2021, [image], <https://www.khanacademy.org/humanities/ap-art-history/late-europe-and-americas/modernity-ap/a/frank-lloyd-wright-fallingwater>, consulté le 6 Mars 2021.
- [Ker21] Keralapool, *Casa Mila Architectural Drawing Photos*, 2021, [image], <https://www.keralapool.com/photos/casa-mila-architectural-drawing.html>, consulté le 6 Mars 2021.
- [Lca20] LCA Construction Bois, *Phase de montage*, 2020, [image], <https://www.lca-construction.fr/expertises/execution-pose/>, consulté le 15 Février 2021.
- [Lec19] LE COGUIEC, *Théorie de l'architecture ; l'angle mort de l'historiographie de l'architecture moderne*, [image], Université de Liège, Faculté d'Architecture, 2019.

- [Mai14] Maison en bois, *Construction en panneaux massifs*, Novembre 2014, [image], <https://une-maison-en-bois.fr/le-panneau-bois-massif-en-video/maison-en-panneau-bois-massif/>, consulté le 15 Février 2021.
- [Min21] Ming Long, *Orthographic Projections*, 2021, [image], <https://minglongtan14.wixsite.com/ming-s-creations/drawing>, consulté le 27 Mars 2021.
- [MM14] Made in Marseille, *Visiter la Cité Radieuse de Le Corbusier*, Décembre 2014, [image], <https://madeinmarseille.net/616-cite-radieuse-le-corbusier-marseille-visite/>, consulté le 22 Février 2021.
- [MVRDV21] MVRDV, *Didden Village*, 2021, [image], <https://www.mvrdv.nl/projects/132/didden-village>, consulté le 7 Février 2021.
- [MW17] Metsa Wood, *Des éléments préfabriqués en Kerto LVL dans le cadre d'un partenariat avec Dupac*, Juillet 2017, [image], <https://news.cision.com/fr/metsa-wood/r/metsa-wood---des-elements-prefabriques-en-kerto-lvl-dans-le-cadre-d-un-partenariat-avec-dupac,c2336312>, consulté le 4 Avril 2021.
- [Nat21] Naturhome, 2021, <https://www.naturhome.be/fr/10/realisations>, consulté le 12 Avril 2021.
- [Per19] PERRET Jonathan, *Adaptable dwellings*, [image], Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2019.
- [Pin21] Pinterest, *Moriyama House – SANNA*, 2021, [image], <https://www.pinterest.co.uk/pin/538954280383178825/>, consulté le 7 Février 2021.
- [Pint21] Pinterest, *Habitat 67*, 2021, <https://www.pinterest.com/pin/83949980523649881/>, consulté le 12 Avril 2021.

- [Pinte21] Pinterest, *Eames House*, 2021, [image],
<https://www.pinterest.com/pin/549439223289905307/>, consulté le 27 Mars 2021.
- [Pinter21] Pinterest, *La Cité Radieuse*, 2021, [image],
<https://www.pinterest.fr/pin/33636328446512622/>, consulté le 22 Février 2021.
- [PPA17] PPA architectures, *Modular Apartments in Toulouse*, Détail, 2017, [image].
- [PSSD21] Patrimoine Seine Saint Denis, *Atlas de l'architecture et du patrimoine*, 2021, [image],
<https://patrimoine.seinesaintdenis.fr/Stains-cite-jardin-plan-du-bati>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [PSF15] Paris sur un fil, *La Cité-Jardin de Stains*, Mai 2015, [image],
<https://www.parissurunfil.com/cite-jardin-stains/>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [Rtb17] RTBF, *Cockeril Seraing ; Ensemble des usines à vol d'oiseau*, Février 2017, [image],
https://www.rtb.be/info/regions/liege/detail_il-y-a-200-ans-john-cockerill-s-installait-a-seraing?id=9518371, consulté le 15 Février 2021.
- [Sch13] SCHWARZER Mitchell, *The emergence of container urbanism ; The repurposed shipping container, now a fixture of urban architecture, is part of a movement that began with Archigram and the Metabolists in the 1960s*, [image], Places Journal, 2013. <https://placesjournal.org/article/the-emergence-of-container-urbanism>, consulté le 15 Janvier 2021.
- [Sch20] SCHMITZ Dimitri, *Architecture Modulaire*, [image], Université de Liège, Faculté d'Architecture, Septembre 2020.

- [Sta21] Stabilame, *Construction en poteaux-poutres*, 2021, [image],
<https://www.stabilame.be/category/systemes-constructifs/poteaux-poutres/>, consulté le 15 Février 2021.
- [West21] Westmountmag.ca, *Habitat 67 vers l'avenir*, 2021,
<https://www.westmountmag.ca/habitat-67/?lang=fr>, consulté le 12 Avril 2021.
- [Wik18] Wikipédia, *Casa Milà*, 2018, [image],
https://fr.wikipedia.org/wiki/Casa_Mil%C3%A0, consulté le 6 Mars 2021.
- [Wik21] Wikiarquitectura, *Colonie Törten*, 2021, [image],
<https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/colonie-toerten/>, consulté le 22 Février 2021.
- [Wiki21] Wikiarquitectura, *Fisher House*, 2021, [image],
<https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/maison-fisher/>, consulté le 29 Mars 2021.
- [Wikiar21] Wikiarquitectura, *4x4 House*, 2021, [image],
<https://en.wikiarquitectura.com/building/4x4-house/>, consulté le 3 Avril 2021.
- [Wikip21] Wikipédia, *Farnsworth House*, 2021, [image],
https://fr.wikipedia.org/wiki/Farnsworth_House, consulté le 27 Mars 2021.
- [Wil20] WILKINSONEyre, *Student Village in Malmesbury*, Détail, 2020, [image].

Annexe

1. Intérêts et contraintes de l'acier comme matériau de construction selon [Ler97] :

Les principaux intérêts sont :

- Résistance élevée tant en traction qu'en compression et en flexion.
- Isotropie des caractéristiques dans les différentes directions (à l'inverse du bois) et selon les différentes sollicitations (traction = compression à l'inverse du béton).
- Conception : la technique des assemblages permet de déterminer le degré d'encastrement des nœuds.
- Exécution : l'acier permet une construction aisée en atelier. Ceci conduit à une excellente précision, à des possibilités de contrôle et à un temps total d'exécution réduit.
- Déformabilité : alliée au poids réduit et à l'égale résistance en traction et en compression, cette caractéristique induit un bon comportement aux séismes et aux tassements différentiels.

Les principaux inconvénients sont :

- La corrosion : On s'en protège par l'application de peintures ou d'enduits, en assurant leur entretien, ou par l'enrobage au plâtre ou de béton, ou encore par des traitements spéciaux tels que la galvanisation ou la plastification. On recourt dans certains cas à des aciers alliés (corten, indadur, inox, ...) dont le coût très élevé influe sur le coût global de l'ouvrage.
- Une mauvaise résistance au feu. Cette faiblesse a une très grande influence sur la sécurité de la structure car la résistance mécanique chute considérablement avec l'élévation de température.
- L'économie de volume de matière est source de risque d'instabilité transversale, c.à.d. de risque de flambement, de déversement et voilement de certains éléments organiques ou structurels.

2. Caractéristiques de la résistance du béton selon [Dot] :

- Résistance à la compression : La résistance à la compression est celle qui caractérise le plus la qualité du béton. Elle est généralement déduite d'essais de compression effectués à 28 jours d'âge. Celle-ci varie en fonction des irrégularités inévitables dans la composition des mélanges et dans le compactage.
- Influence de la température : Si, dans une période de 3 jours après la confection, un béton est soumis à des températures inférieures à 0°C, le processus de durcissement est affecté, et la structure de la pâte de ciment est altérée par la formation de cristaux de glace.
- Influence de l'humidité relative : C'est essentiellement dans les premiers jours après la mise en œuvre du béton qu'il est important de compter sur une humidité relative élevée, non seulement pour des caractéristiques de résistance, mais aussi pour le fluage et le retrait. C'est pourquoi la surface du béton frais doit être protégée pendant les trois premiers jours au moins, afin d'éviter une perte d'humidité relative trop importante.
- Résistance à la traction : La résistance à la traction est principalement influencée par les caractéristiques de surface à la liaison entre pâte de ciment et les granulats. La résistance à la traction est considérée comme négligeable dans les calculs de béton armé.
- Retrait : Le retrait du béton est caractérisé par une diminution de volume du matériau non soumis à des contraintes extérieures. Ce phénomène est associé à une diminution de la quantité d'eau libre. Le retrait du béton durci est souvent appelé retrait hydraulique. Il existe d'autres types de retrait.
- Fluage : Lorsqu'il est soumis à l'action d'une charge de longue durée, le béton subit une déformation instantanée au moment de l'application de la charge, suivie d'une déformation lente ou différée qui tend à se stabiliser après quelques années. C'est ce qu'on appelle le fluage.
- Durabilité : Le béton étant un matériau pierreux artificiel présente en principe de bonnes qualités de durabilité. Il a une durée de vie assez longue dans des circonstances normales.
- Armatures : Les armatures classiques de béton armé se caractérisent par :
 - Leur type (barres, fils, treillis soudés)
 - Leur mode de fabrication (laminé à chaud, écroui, laminé à chaud avec traitement thermique particulier)
 - Leur état de surfaces (barres ou fils lisses, ou à adhérence améliorée)

- Leurs caractéristiques de résistance (limite d'élasticité et contrainte de rupture)
- D'autres caractéristiques mécaniques, physiques et technologique (ductilité, résistance à la fatigue, masse volumique, dimensions, ...) ».

3. Propriété et humidité du bois

- Propriétés du matériau : Le bois est un bon isolant grâce à sa structure à pores fins. Le coefficient de conductivité thermique des résineux est $\pm 0,13$ W/mK, et pour les feuillus, il est de $\pm 0,20$ W/mK. Contrairement à l'acier et au béton, le bois a un coefficient de dilatation thermique tellement faible qu'il est négligeable dans la construction [Dep13].

Du fait de sa composition à $\pm 50\%$ de cellulose et de $\pm 30\%$ hémicellulose, le bois possède une excellente résistance à la traction et à la compression dans le sens des fibres [Dep13].

- Humidité du bois : Le bois étant hygroscopique, sa teneur en eau varie en fonction de l'humidité ambiante. En fonction qu'il absorbe ou non de l'humidité, le bois gonfle ou se rétracte, c'est pourquoi on dit qu'il travaille [Dep13].

Le taux d'humidité d'un arbre qui vient d'être abattu est de 60% et en dessous du taux de 30% le bois se rétracte. C'est pourquoi il est nécessaire avant de le mettre en œuvre, qu'il soit sec, car une trop forte humidité amoindrit sa résistance mécanique et influe sur les dimensions et la résistance à la déformation mais aussi augmente le risque d'attaques biologiques (parasites, champignons) [Dep13].

4. Principe du système plateforme en ossature bois selon [Hec14] :

« Dans le système « plateforme », les éléments de murs sont indépendants du système de plancher. Ainsi, le plancher du niveau x constitue la surface de travail (la « plateforme ») sur laquelle les murs du niveau $x + 1$ sont montés.

En fait, les montants s'étendent sur la hauteur d'un étage, et sont fixés respectivement aux lisses basse et haute à leurs extrémités. Les solives de l'étage supérieur sont alors posées sur la lisse haute (en plus d'une poutre « ceinture »), et une fois le plancher terminé, les murs de cet étage peuvent être montés. La charpente est ensuite posée sur la lisse haute du dernier niveau. Remarquons qu'il faut que les fermes de toiture soient placées au droit de montants, de même qu'il faut que les montants soient alignés entre eux sur tous les niveaux jusqu'à la base du bâtiment afin d'assurer une continuité dans la retransmission des charges verticales ».

Avantages selon [Hec14] :

- Permet une grande flexibilité architecturale, intégrant la possibilité de libérer de grands volumes et de grandes ouvertures. Ce système est assez adaptable, notamment si une construction devait un jour être sujette à transformations, les murs pourraient être démontés et éventuellement réutilisés.
- Comparativement aux systèmes « massifs » (maçonnerie, madriers empilés, panneaux contrecollés ou contre cloués), l'ossature bois est plus facilement isolable thermiquement (insertion directe de l'isolant dans l'ossature), et moins onéreux.
- Les sections des éléments étant assez faible, leur manipulation est très facile et peut être facilement préfabriqué.

Inconvénients selon [Hec14] :

- Le manque d'inertie des murs entraîne une meilleure diffusion du bruit et des chocs au travers des parois, ce qui peut constituer de l'inconfort pour les occupants.
- Le seuil de résistance limite la hauteur des constructions, en générale on n'excède pas 5 ou 6 étages maximum.

5. Principe de construction en poteaux/poutres selon [Hec14] :

« De manière générale, ce type de structure en bois est comparable à l'ossature des bâtiments en béton. Il est composé de poteaux (éléments verticaux) et de poutres (éléments horizontaux) disposés à intervalles réguliers (tous les 3 à 6 m, plus ou moins) qui forment de grands espaces ouverts. Les éléments porteurs étant relativement peu nombreux dans le bâtiment, leur section est plus importante. D'ailleurs, la composition et le dimensionnement de ceux-ci sont optimisés de manière à ce qu'ils puissent reprendre efficacement les charges qui leur sont transmises.

La reprise des efforts horizontaux peut être assurée au travers de croix de Saint-André disposées selon un schéma précis dans la structure, et/ou bien au travers de la rigidité des assemblages entre éléments porteurs. On peut aussi compter sur le remplissage de certaines parois non porteuses pour participer au contreventement de la structure. Les poteaux et les poutres peuvent être continus ou non, et leur section peut être simple ou dédoublée.

La structure primaire (porteuse) composée des poteaux et des poutres peut être « fermée » au moyen de parois de remplissage ou de baies vitrées placées entre, devant (du côté extérieur), ou derrière (du côté intérieur) les poteaux. Celles-ci forment l'enveloppe du bâtiment.

Auparavant, les poteaux et les poutres étaient toujours en bois massif. À l'heure actuelle, avec le développement des techniques de collage, on emploie de plus en plus d'éléments contrecollés. Par ailleurs, ces derniers ont des portées potentiellement plus importantes que celles des éléments massifs ».

Avantage :

- Ce système a sensiblement les mêmes avantages que le système « plateforme », à savoir flexibilité, adaptabilité, rapidité de mise en œuvre [Hec14].

Inconvénients selon [Hec14] :

- Comme pour le système « plateforme » mauvaise isolation acoustique.
- Les assemblages entre les éléments de structures sont souvent compliqués.
- Le poids et la dimension élevés des poteaux et des poutres demandent l'utilisation d'engins comme une grue, ce qui augmente considérablement le coût.

6. Principe de construction du bois empilé selon [Hec14] :

« Le principe du système constructif consiste à empiler horizontalement des éléments de bois usinés en atelier (madriers ou rondins, massifs ou contrecollés) de section plus ou moins importante. Ceux-ci s'emboîtent alors longitudinalement les uns dans les autres grâce à un profil et un contre-profil, de manière à former des pans de murs en bois massif. Ils sont fixés à leurs extrémités (aux intersections) au moyen d'assemblages à mi-bois.

Selon l'épaisseur des éléments empilables, on pourra disposer une couche d'isolant du côté intérieur ou du côté extérieur (préférable) du bâtiment. Devant l'isolant, on pourra finaliser la façade à l'aide d'une brique de parement, d'un crépi, d'un bardage (en bois ou autre), etc. Notons qu'il existe également aujourd'hui des madriers « sandwichs » isolants (préfabriqués), qui intègrent un matériau isolant au sein de leur âme.

Remarquons que ce type de construction est particulièrement sensible au retrait transversal du bois et aux tassements induits par le positionnement des éléments (qui sont chargés perpendiculairement au sens du fil). Ceux-ci se produisent d'ailleurs une fois l'ouvrage terminé (lorsque le bois sèche et qu'il reprend les charges qui lui sont appliquées), et peuvent engendrer des mouvements (éventuellement différentiels) de plusieurs millimètres. Un soin particulier doit donc être apporté au niveau de la réalisation des détails constructifs (choix de joints ajustables, fixation temporaire des éléments, etc.) ».

Avantage :

- Contrairement au poteaux/poutres, les rondins ou madriers sont relativement légers. Il jouit notamment d'une bonne résistance et stabilité [Hec14].

Inconvénients selon [Hec14] :

- Isolation thermique moyenne.
- Toute transformation est quasi irréalisable.
- L'intégration des techniques spéciales n'est jamais simple.
- Particulièrement sensible au retrait transversal du bois et aux tassements induits par l'orientation des éléments empilés. Ce qui peut entraîner des mouvements de structure de plusieurs millimètres.

7. Le principe de construction des panneaux massifs est selon [Hec14] :

« La technique des panneaux massifs CLT (Cross Laminated Timber en anglais) consiste à assembler par collage ou par clouage des lames de bois (la plupart du temps en épicéa) par couches croisées à 90° dans le sens du fil.

La colle utilisée pour constituer les panneaux contrecollés est généralement une colle polyuréthane sans solvant, et les clous utilisés pour former les panneaux contrecloués sont en aluminium.

On sait que les propriétés mécaniques du bois sont meilleures dans le sens du fil. Ainsi, en empilant les lames par couches croisées à 90°, on obtient une plus grande résistance et une plus grande rigidité que le bois massif, puisque les charges sont reprises dans deux directions. En outre, le gauchissement et le retrait dans le plan du panneau sont minimisés.

Les panneaux massifs en bois peuvent former les murs, les planchers, et même la toiture d'un bâtiment. Selon leur utilisation, ils sont constitués de 3, 5, ou 7 couches, et sont produits en dimensions plus ou moins importantes en usine (jusqu'à 18 m de longueur, jusqu'à 3 m de hauteur, et entre 45 et 500 mm d'épaisseur. Les découpes à pratiquer dans les panneaux (portes, fenêtres, connexions, etc.) sont réalisées à l'aide de machines à commandes numériques.

Les murs et les planchers peuvent être assemblés au moyen d'équerres métalliques. La jonction mur-mur ou plancher-plancher dans un même plan peut être réalisée via des rainures ou des assemblages à mi-bois.

Au droit des murs, on pourra disposer une couche d'isolant du côté intérieur ou du côté extérieur (préférable). Devant l'isolant, on pourra finaliser la façade à l'aide d'une brique de parement, d'un crépi, d'un bardage (en bois ou autre), etc.

Idéalement, durant la construction d'un bâtiment en bois, il faudrait s'arranger pour que les éléments de structure soient protégés de la pluie et du soleil afin d'éviter qu'ils ne gonflent ou qu'ils ne subissent du retrait. Ainsi, sur les chantiers de grands bâtiments, on pourra justifier l'utilisation d'une structure de protection ».

Avantages selon [Hec14] :

- Le système est relativement adaptable, l'extension ou la surélévation d'une construction en panneaux massifs est assez facile à réaliser (modularité).
- Flexibilité d'utilisation, les panneaux peuvent aussi bien être utilisés comme murs que comme planchers, ou en toiture.
- Parfaitement adapté à la préfabrication et au montage rapide sur chantier.
- Très bonne résistance mécanique (principe d'action bidirectionnelle) associée à une excellente stabilité dimensionnelle (minimisation des effets du retrait).
- Une bonne isolation acoustique, tandis que la couche d'isolant placée devant ou derrière ceux-ci assure une bonne isolation thermique de la construction.

Inconvénients selon [Hec14] :

- Les panneaux massifs étant de grandes dimensions et lourds, ils nécessitent l'utilisation d'engins de manutention.
- Le système présente également peu de flexibilité architecturale.
- Quantité assez importante de bois nécessaire pour la construction d'un bâtiment.
- Le prix des panneaux massifs est relativement élevé en comparaison des autres systèmes constructifs en bois.