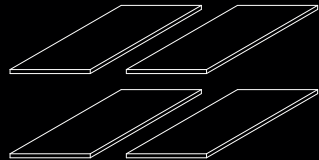
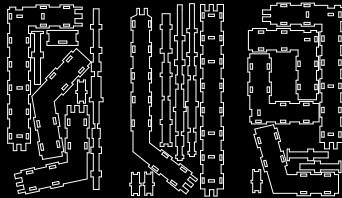
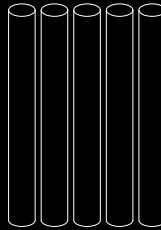
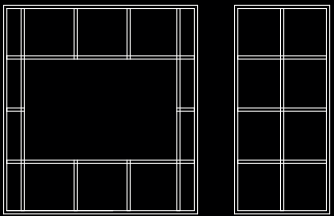
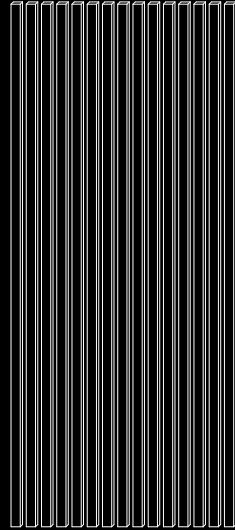
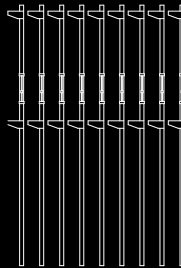
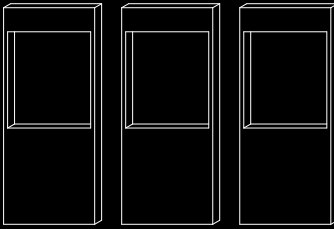
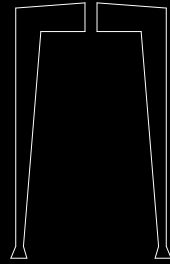


# Le kit en architecture





2020, Isa Carvalho Rocha

Ce document est mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution (CC BY <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

Les contenus provenant de sources externes ne sont pas soumis à la licence CC BY et leur utilisation nécessite l'autorisation de leurs auteurs.

# Le kit en architecture

Énoncé théorique de master en architecture de :

Isa Carvalho Rocha  
Dernière année de master  
à l'École polytechnique fédérale de Lausanne

Travaux encadrés par :

Directeur Pédagogique

Yves Weinand  
Laboratoire de construction en bois

Professeur responsable de l'énoncé théorique

Corentin Fivet  
Laboratoire d'exploration structurale

Maître EPFL

Loïc Fumeaux  
Assistant pour le Laboratoire d'architecture et technologies  
durables



## Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>I – Qu’est que le kit en architecture ?</b>	<b>11</b>
<b>II – La démocratisation du kit en architecture</b>	<b>13</b>
2.1 La Maison Tropicale de Jean Prouvé ou la libération des pesanteurs locales et matérielles	13
2.2 La Lustron House de Carl Strandlund ou la maison comme objet de consommation	25
2.3 Le « General Panel System » de W. Gropius et K. Wachsmann ou l’utopie du kit d’éléments interchangeables	35
2.4 Les enseignements apportés	45
<b>III – Le kit comme réponse aux enjeux environnementaux</b>	<b>49</b>
3.1 La Loblolly House de Kieran Timberlake ou concevoir avec moins de type d’éléments	49
3.2 La Cellophane House de Kieran Timberlake ou la maison préassemblée en usine	61
3.3 La WikiHouse de Architecture 00 ou la dématérialisation de l’architecture	73
3.4 Les enseignements apportés	85
<b>Conclusion</b>	<b>89</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>93</b>
<b>Crédits photographiques</b>	<b>97</b>



## Introduction

Le secteur du bâtiment produit aujourd'hui une grande part des déchets. Il est donc essentiel que les industriels, ingénieurs et l'architecte accordent d'avantage d'intérêts pour le développement durable. En Suisse, le secteur de la construction est responsable d'une grande part des rejets de CO<sup>2</sup> dans l'atmosphère. Elle produit entre 80 et 90 millions de tonnes de déchet par an. La part du secteur de la construction s'élève à 84 %.<sup>1</sup> La consommation de ressources naturels ainsi que les déchets ne font que croître. Avoir la possibilité de réemployer les composants de bâtiments en fin de vie peut donc avoir des conséquences positives sur l'environnement mais également apporter des avantages économiques.

Il est donc primordial de concevoir des bâtiments qui soient démontables et déconstructibles. En rendant les constructions démontables, les projets pourront être plus adaptables et leurs matériaux pourront être récupérer et réemployés dans le futur. Il est donc nécessaire de concevoir des assemblages qui soient réversibles et de réfléchir aux matériaux utilisés.

L'industrialisation du secteur de la construction, et plus précisément la préfabrication, a permis un gain de temps et d'argent. Aujourd'hui, la préfabrication peut également répondre aux enjeux environnementaux. En plus de concevoir des éléments rationnellement, il est possible d'économiser en matériaux et de produire moins de déchets. D'autre part, en concevant les bâtiments en kit d'éléments préfabriqués, les composants des bâtiments peuvent avoir plusieurs vies car ceux-ci seraient démontable et leurs composants peuvent être récupérés. L'automatisation se fait de plus en plus présente. L'architecte a donc une responsabilité de constructeur et doit à la fois représenter les intérêts des maitres d'ouvrages ainsi que ceux du monde du chantier.

---

<sup>1</sup> L'Office fédérale de l'environnement (OFEV), Déchets et matières premières : en bref, consulté le 28.10.2019 sur <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/en-bref.html>

Aux travers de cet énoncé, nous allons donc nous focaliser sur l'évolution de la préfabrication du XX<sup>e</sup> au XXI<sup>e</sup> siècle. Nous allons dans un premier temps définir ce qu'est le kit en architecture. Par la suite, des analyses de cas nous permettrons de comprendre le rôle de l'architecte ainsi que les problématiques qui entourent le kit en architecture au début de l'ère industrielle. Nous aborderons alors les enjeux environnementaux au travers d'analyse de trois autres projets conçus en kit d'éléments préfabriqués au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle.

Bien que dès le début de la révolution industriel la préfabrication ait été associée à la standardisation et à l'uniformité, ne peut-elle pas plutôt devenir un vecteur de diversité tout en répondant aux enjeux environnementaux d'aujourd'hui ?







## I – Qu'est que le kit en architecture ?<sup>2</sup>

L'architecture en kit implique une organisation des diverses parties d'un bâtiment en assemblages de composants qui puissent être facilement produits et dimensionnés afin de faciliter leur prise en main et leur transport. L'architecte définit donc une librairie d'éléments standardisés et qui peuvent être assemblés, additionnés les uns aux autres afin de répondre à divers besoins.

La conception en kit est orientée vers l'automatisation, la manufacture avancée et les outils numériques. Il s'agit donc d'une approche orientée sur « l'objet ». Le processus d'érection d'un bâtiment devient alors une ligne d'assemblage où plusieurs éléments peuvent être produits simultanément dans un environnement contrôlé. L'assemblage final sur le site est alors plus rapide, propre, et sûr.

La construction en kit est une forme de préfabrication. En effet, à la différence de la préfabrication, les éléments d'un kit sont faits pour être assemblés et désassemblés à plusieurs reprises en fonction des besoins. Cette méthode de construction existe depuis plusieurs années. Au Japon, les temples sont composés de systèmes qui sont assemblés grâce à des joints en tenon et mortaise permettant la déconstruction et la reconstruction de leur temple tous les 20 ans.

La conception avec un kit permet une haute précision. Toutes variables indésirables peuvent donc être éliminées et le chantier est plus propre et sûr.

---

2 Isamu Ishii, « Kcjima Technical Research Institute », 1999.



## II – La démocratisation du kit en architecture

### 2.1 La Maison Tropicale de Jean Prouvé

ou la libération des pesanteurs locales et matérielles

Pendant la deuxième Guerre mondiale, Jean Prouvé commence une série de recherches qui lui permettent de développer des petits bâtiments militaires qui devaient pouvoir être montés rapidement et avec peu de moyens. A la suite de la deuxième Guerre Mondiale, la France se retrouve face à une raréfaction des matériaux de construction et une pénurie de logement. Jean Prouvé tente alors de répondre à ces problématiques en appliquant ses recherches sur les baraquements militaire au logement.

La Maison Tropicale a été réalisée par Jean Prouvé à la suite d'une commande de la Compagnie Foncière et Industrielle Africaine. Un prototype sera construit à Niamey au Niger en 1949 et deux autres seront construits à Brazzaville en République démocratique du Congo en 1951. Ces réalisations témoignent s'imprègnent des recherches de Jean Prouvé sur les maisons usinées et les études destinées aux colonies à la fin des années 1930. Ce projet symbolisera la maturation des idées de Jean Prouvé à l'égard de la standardisation et de la préfabrication. Il utilise alors un catalogue de pièces basé sur le principe de modularité. Les deux problèmes majeurs qu'il doit résoudre sont la protection contre le rayonnement du soleil et la diminution de la température dans le bâtiment. Ces maisons sont préfabriquées grâce à des éléments en acier et en aluminium afin de permettre un assemblage rapide. A la différence du bâtiment construit à Niamey, ceux construits à Brazzaville sont posés sur des pilotis en béton.

La Maison Tropicale est surélevée par rapport au sol afin de diminuer l'empreinte au sol. Selon Jean Prouvé, « *L'habitation doit être aujourd'hui dynamique. Un des plus grands freins au progrès est constitué par un habitat définitif qui encombre le*

*sol et interdit tout urbanisme évolutif. La maison doit être un objet de consommation, destructible, déplaçable, amortissable en une ou deux générations* »<sup>3</sup>. La maison doit être l'expression de la grande série et de l'industrialisation. Réaliser les édifices comme des constructions lourdes et encombrantes, c'est rendre le sol irrécupérable. Cette construction est donc à la fois un projet qui peut être décontextualisée et dont la production est délocalisée. Il s'agit donc d'un habitat individuel préfabriqué qui peut être déplacé en pièces détachées de l'endroit où il est produit jusqu'à l'endroit où il est implanté.

La maison Tropicale de Brazzaville (Fig. 3 et 4) associe à la fois un espace de travail à un logement de fonction. Les deux bâtiments sont décalés l'un par rapport à l'autre et reliés par une passerelle. Ils sont tous deux supportés par les pilotis en béton. La partie qui constitue les bureaux mesure 14 mètres sur 10 mètres tandis que la partie habitation mesure 18 mètres sur 10 mètres.<sup>4</sup>

Sur ces pilotis viennent se poser des poutres métalliques sur lesquels viennent se poser une structure de poutre secondaire métalliques qui supportent le plancher fait de panneaux préfabriqués. Sur ce dernier se trouvent deux portiques centraux en forme de « U » inversé. Un pivot soudé au portique permet de fixer la poutre faîtière. Tout d'abord, les ouvriers soulèvent un côté de la poutre et la fixe à un point. La deuxième extrémité de la poutre est ensuite hissée. Sur le pourtour de la maison, des poteaux très fins, sur lesquels viennent se fixer les brise-soleils, supportent la toiture. La toiture débordante formant la véranda est faite d'éléments en tôle d'aluminium qui sont autoportants grâce à leur forme ondulée. Ces éléments s'emboîtent les uns dans les autres afin de garantir une étanchéité. Ils sont préfabriqués en une seule pièce de 75 centimètres de large sur 5 mètres de long et d'environ 15 millimètres d'épaisseur.

---

3 Jean Prouvé et Claire Stoullig, *Jean Prouvé* (Paris : Nancy: Somogy ; Musée des beaux-arts, 2012), 307.

4 Jean Prouvé, *Jean Prouvé: la maison tropicale = Jean Prouvé: the tropical house* (Paris: Centre Pompidou, 2009), 153.

Aucun de leur joint n'est perpendiculaire à la pente afin d'éviter les problèmes d'étanchéité.<sup>5</sup> Ils reposent sur la poutre faitière, à laquelle un élément métallique en U a été soudé, et sur les rives ajourées qui permettent la circulation de l'air. (Fig. 1) Au sol, il y a des rails qui permettent de placer les panneaux coulissants.<sup>6</sup> Les façades ainsi que le sol sont faites de panneaux modulaires qui peuvent être interchangeable. Les panneaux de façade sont constitués d'un revêtement intérieur et extérieur en aluminium entre lesquels on trouve l'isolation en laine de verre. Ils mesurent 3 mètres de haut sur 1 mètre de large. Certains de ses panneaux possèdent des hublots afin de permettre à la lumière de pénétrer dans le pavillon. La connexion entre les panneaux est réalisée par des couvre-joints et entre deux panneaux, des tirants relient la toiture au plancher. Le plafond et le plancher sont composés de panneaux de 1 mètre sur 1 mètre. Les panneaux du plafond sont en tôle d'aluminium alors que ceux du sol sont en acier, puis recouvert de linoléum. Quant aux panneaux du plafond, ils s'accrochent à des cadres métalliques au-dessus des cloisons. La ventilation naturelle se fait grâce à la poutre faitière tandis que la protection contre l'ensoleillement est assurée par la toiture débordante ainsi que les brise-soleils orientables de la véranda.<sup>7</sup>

Le chantier débute avec la construction du sol. Le système de poutres est posé sur les pilotis en béton, puis les panneaux préfabriqués du sol sont installés. Les portiques sont ensuite installés et reliés par la poutre faitière. Les rives ajourées et les poutres-pignons situés aux extrémités sont ensuite mis en place. En simultanément, certains panneaux de façade sont posés, ce qui permet d'éviter d'utiliser des étais. La toiture est ensuite montée, puis vient le tour du reste des panneaux de façades. Jean Prouvé utilise ici le principe de montage à sec afin de mettre en place un assemblage mécanique réversible. Aucune

---

5 Prouvé, 148.

6 Marine Franceschi, « Préfabrication, développement durable et réversibilité : Le recours à la préfabrication permet-il de concevoir une architecture durable et réversible ? » (s. d.), 45.

7 Prouvé, *Jean Prouvé*, 153.

pièce n'est stable si elle n'est pas connectée à la suivante. Le bâtiment ne trouve sa rigidité que lorsque tous les éléments sont mis en tension. (Fig. 2) Jean Prouvé souhaite monter la toiture le plus rapidement possible par souci pour ces employés. En effet, il accordait énormément d'importance au bien-être et à la sûreté sur son chantier. Grâce à cette intervention, Jean Prouvé montre donc son intérêt pour l'économie, la société et la technique.

Le portique en « U » inversé est l'élément emblématiques de ce système. En effet, il exprime l'intérêt de Jean Prouvé pour la construction et la préfabrication. Il permet de libérer de grands espaces, donnant ainsi une liberté dans l'agencement des espaces intérieur du pavillon grâce aux panneaux de cloisonnement. Toutefois, il est caché dans des espaces techniques et n'est donc pas mis en avant. Ce système est assez rigide puisqu'il est réglé pas une géométrie très stricte. En effet, on peut le constater au travers de la régularité de la trame des poutres et du plancher ou encore des panneaux de façade et du sol.

Cependant, ce projet n'a pas eu le succès escompté puisque seulement trois pavillons ont été construits. En plus des détails relativement complexe, l'argument économique ont également eu raison du projet. De plus, la clientèle n'est pas réceptive à ce projet futuriste. En effet, l'aluminium et l'acier n'étaient pas des matériaux utilisés en Afrique. Il s'agit d'une construction dont les matériaux ne sont pas propres à la région africaine. Le système est toutefois conçu pour être extrêmement léger et pouvoir être monté puis démonté rapidement afin que le kit d'élément puisse être transporter de la France jusqu'en Afrique rapidement.

Le procédé constructif est économique car la construction est fragmentée en kit d'éléments. (Fig. 5 et 6) L'assemblage mécanique réversible est ici obtenu grâce au principe du montage à sec. Bien que les éléments soient préfabriqués, ceux-ci sont très spécifiques à ce bâtiment. On se retrouve



donc avec une variété de composants qui doivent fonctionner ensemble et qui acceptent difficilement un produit étranger au système mis en place.

Jean Prouvé est donc intéressé par l'économie de matière ainsi que par les avantages de l'architecture préfabriquées qui permet une mise en œuvre ne nécessitant aucun engin de levage. Toutes les parties du bâtiment sont intimement liées. Chacun de ces éléments ont leur propre rôle tout en rendant services aux autres. Tous les éléments fonctionnent entre eux et on se retrouve donc dans un système fermé. Ce système démontre également la possibilité de se défaire des contraintes géométriques qui sont en général présente dans les projets préfabriqués grâce au système structurel de portiques en « U » inversé. L'industrialisation aide Jean Prouvé à concevoir un kit d'éléments préfabriqués qui lui permettent à la fois de « s'affranchir des pesanteurs locales et [lui donnent] le moyen de construire sans grue ni sans autre outillage couteux ».<sup>8</sup>

---

8 Franz Graf, Yvan Delemontey, et École polytechnique fédérale de Lausanne, éd., *Architecture industrialisée et préfabriquée: connaissance et sauvegarde* ; [Journées d'études internationales - Lausanne, Laboratoire des Techniques et de la Sauvegarde de l'Architecture Moderne (TSAM), Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC), Ecole Polytechnique Fédérale 23 - 24 juin 2011] = *Understanding and conserving industrialised and prefabricated architecture* (Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012), 53.

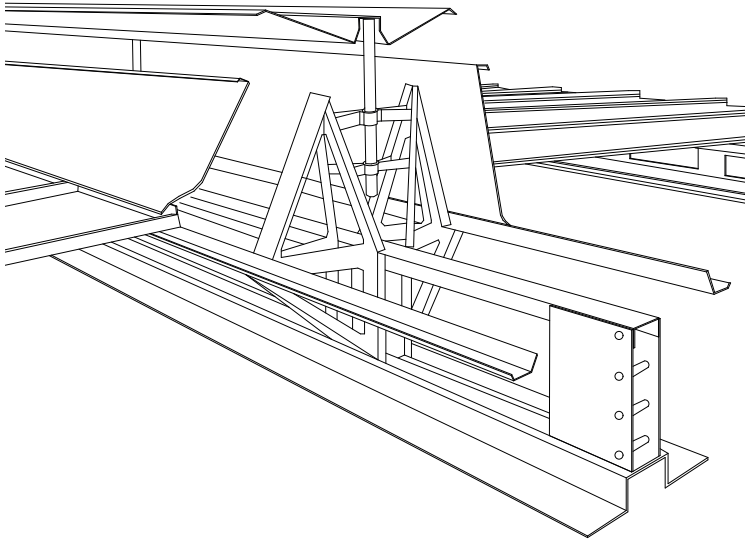


Fig. 1 : Détail constructif de la toiture ventilée

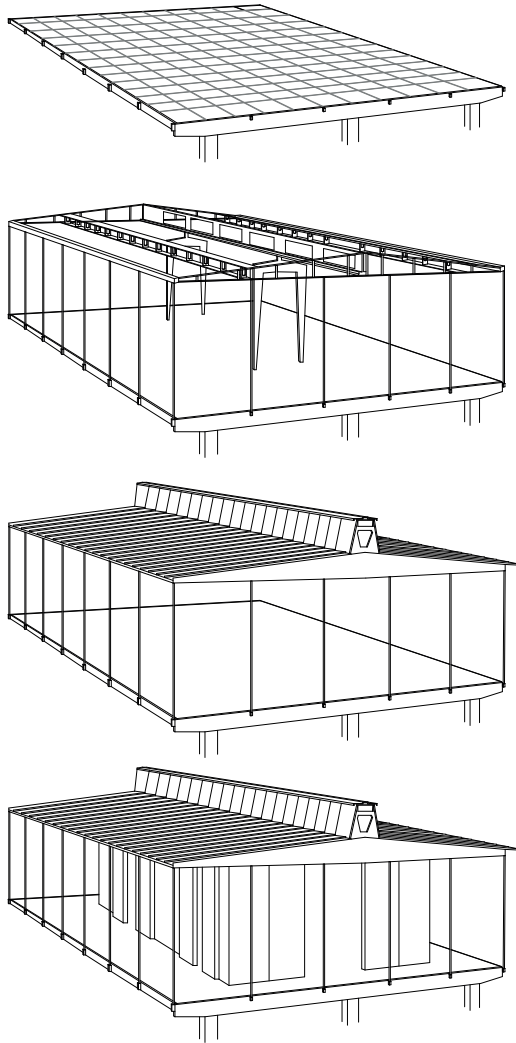
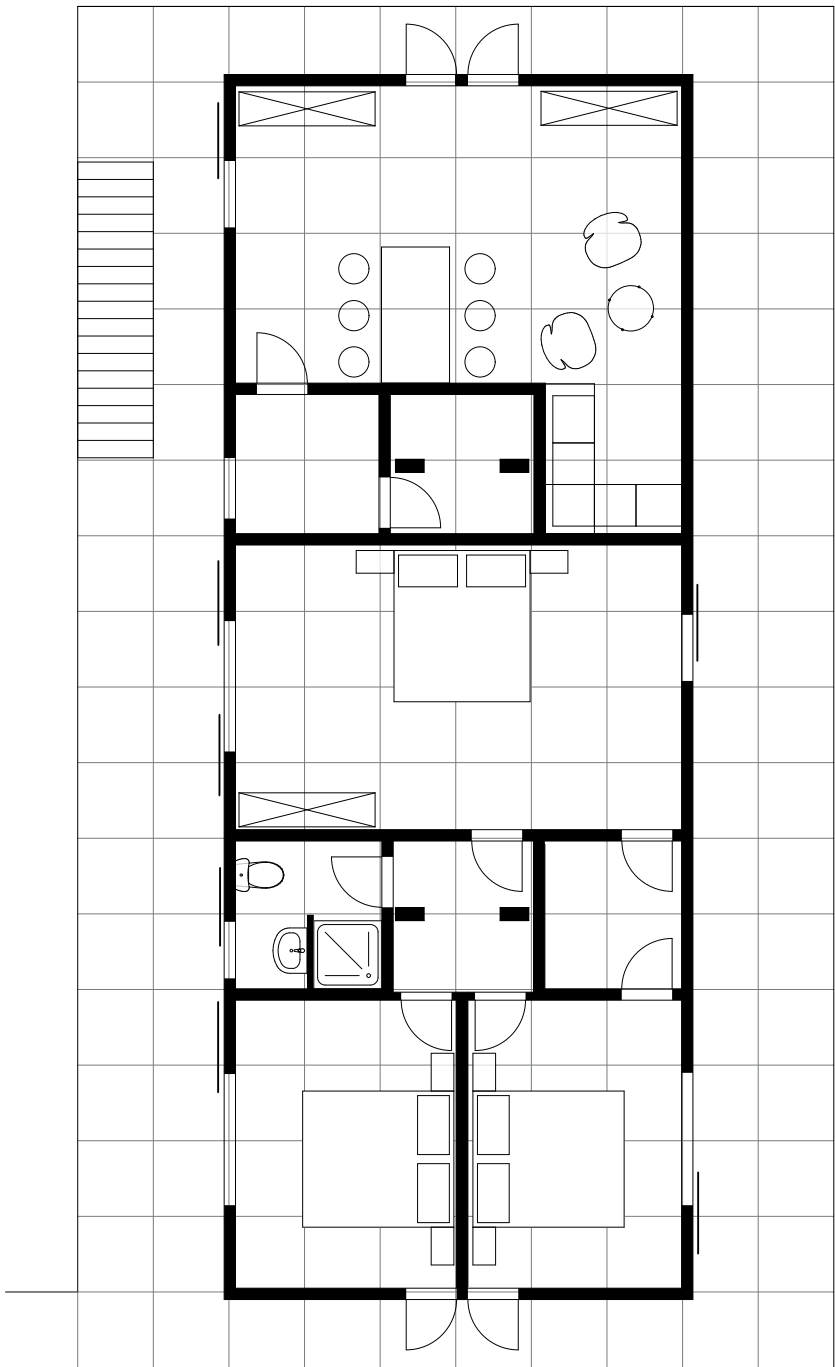
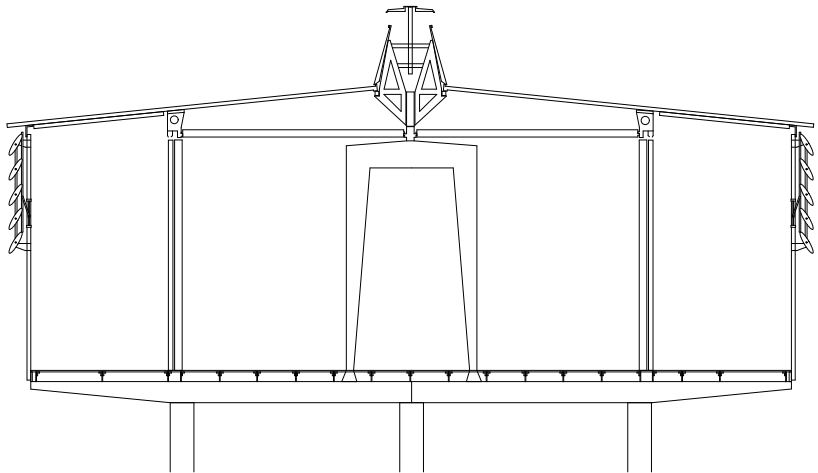


Fig. 2 : Etapes d'assemblage de la Maison Tropicale



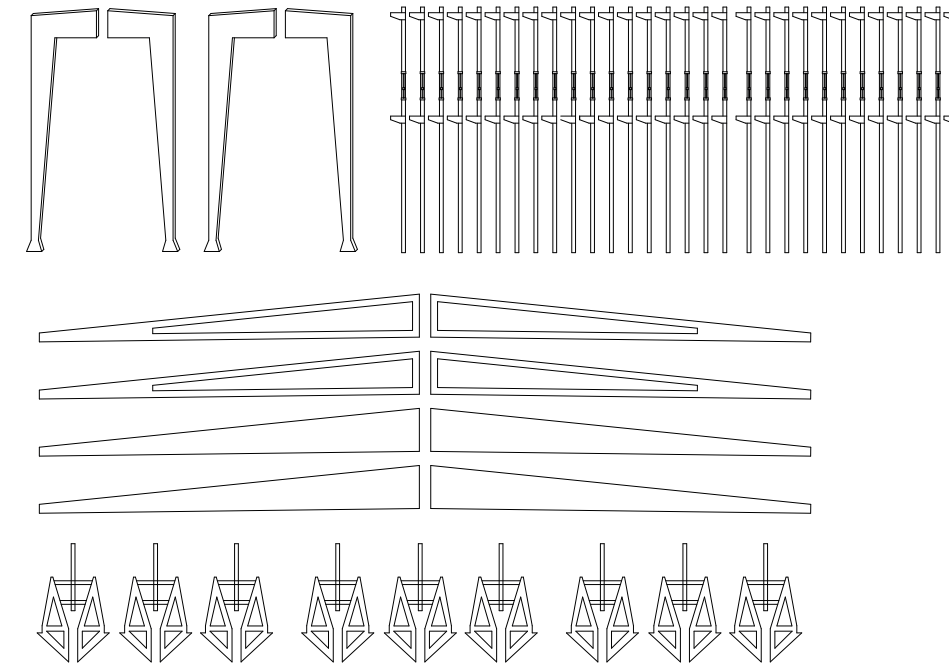
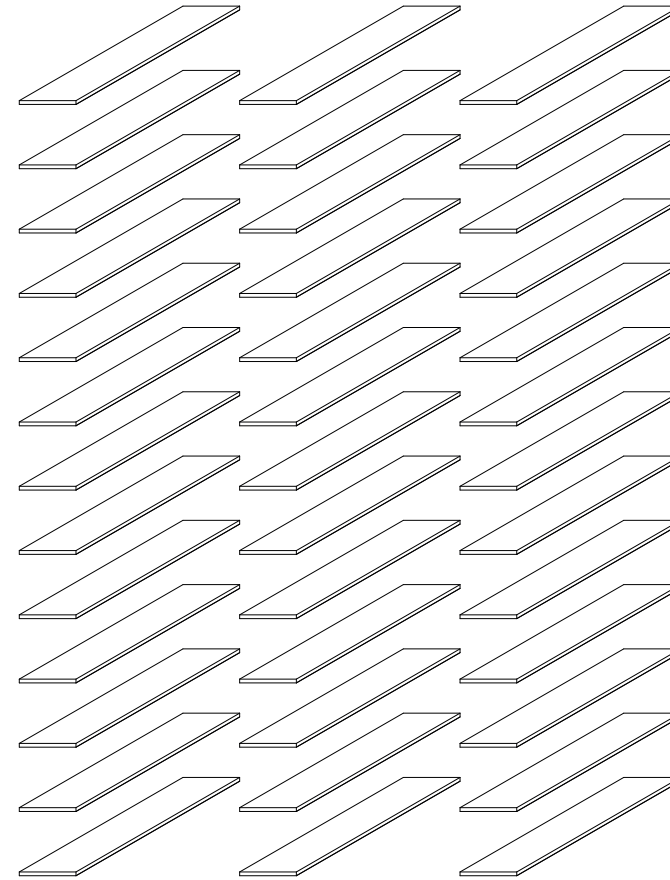
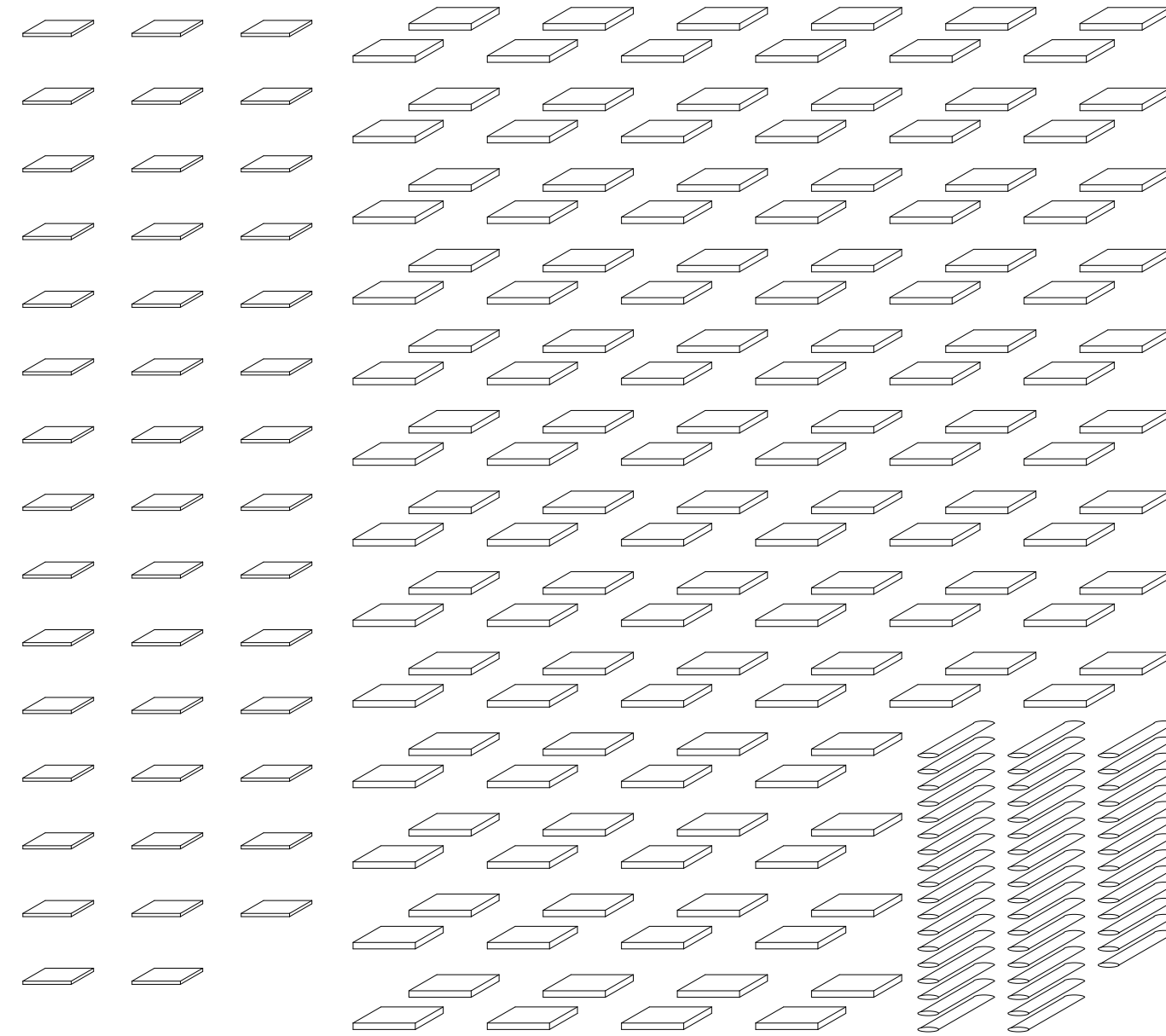


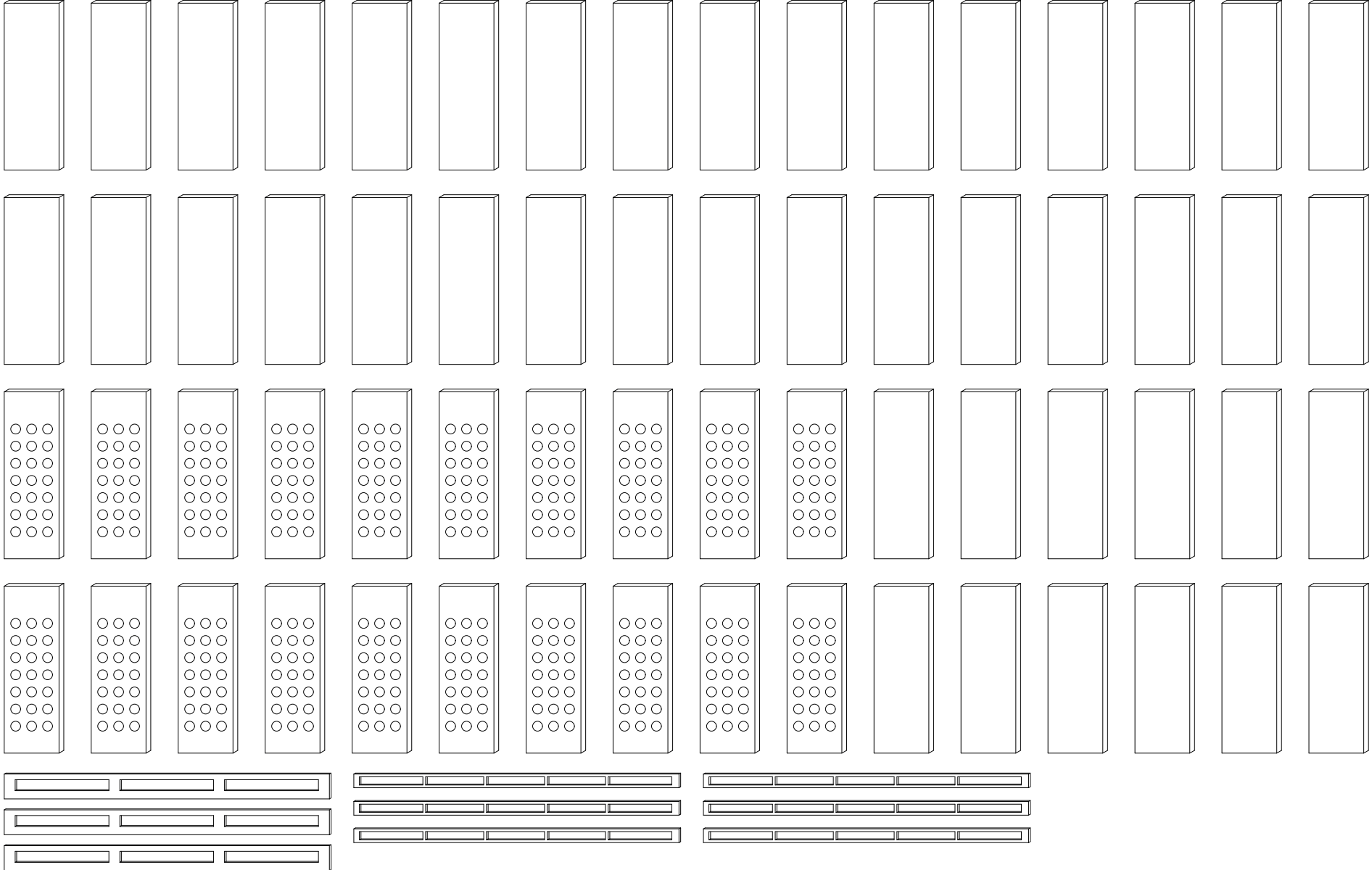
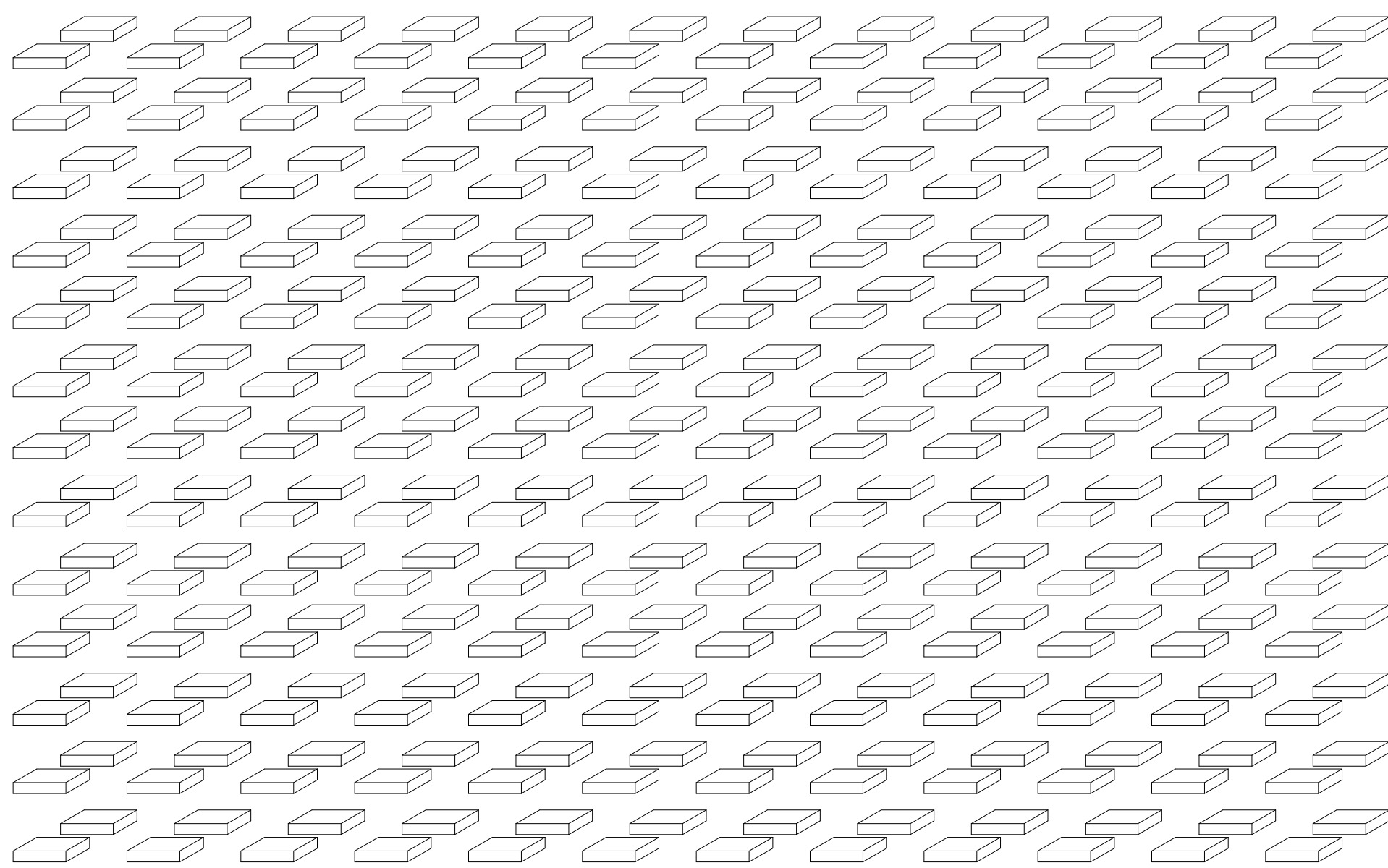
Pages précédentes :

Fig. 3 et 4 : Plan et coupe du pavillon d'habitation à Brazzaville

Pages ci-contre:

Fig. 5 et 6: Kit d'éléments préfabriqués du pavillon d'habitation  
à Brazzaville







## 2.2 La Lustron House de Carl Strandlund ou la maison comme objet de consommation

À la suite de la pénurie de logement aux États-Unis causée par la guerre, la société « Lustron Corporation », située dans l'Ohio, produit des maisons métalliques préfabriquées avec une enveloppe en porcelaine. Entre 1948 et 1950, l'entrepreneur Carl Strandlund fait préfabriquer les maisons Lustron. Son but est de produire cette maison en masse. Pour ce faire, Carl Strandlund s'inspire de l'industrie automobile. Celles-ci devaient révolutionner l'industrialisation de la maison grâce aux techniques de production de masse et ainsi produire des maisons économiques qui soient accessibles aux classes moyennes. Le client peut alors faire un choix sur le nombre de chambre à coucher, la couleur des éléments en porcelaine ainsi que choisir d'ajouter des options supplémentaires.

Les maisons Lustron (Fig. 8 et 9) sont basées sur une maison de type ranche. Elle possède un étage, elle est de forme carré ou rectangulaire en plan et la toiture est à double versant. Elles sont construites sur une dalle de fondation en béton. La structure métallique des murs est recouverte de panneaux en porcelaine de 60 centimètres de côté pour créer la façade extérieure. Des panneaux similaires sont aussi utilisés pour les murs intérieurs de la cuisine et les sanitaires. Les murs intérieurs restants sont recouverts de panneaux verticaux d'environ 60 cm de large allant du sol au plafond. Ce dernier est couvert de panneaux de 1,2 mètres de côté. La maison Lustron a tout d'abord été dessinée par Roy Blass et Morris H. Beckam. Ils ont donc décidé de dessiner la maison en s'imprégnant des maisons de type ranche car elles sont plutôt populaires à cette époque, peuvent facilement être adaptées à diverses implantations et le coût de production n'était pas trop élevé. Le chauffage combine une fournaise et le plenum situé entre les fermes de la toiture et le plafond. Le plenum est chauffé par la fournaise puis la chaleur est transmise par radiation au travers du plenum et les panneaux du plafond aux chambres situées en dessous. Une

bande d'isolation se trouve au-dessus du faux-plafond. En 1949, la société engage l'architecte Carl Koch afin de développer un nouveau modèle de maison Lustron. Celui-ci a remarqué que le nombre de pièce était trop élevé et a donc recommandé de diminuer le nombre de composants afin de rendre la production plus efficace et plus économique en matériaux. Toutefois, ces recommandations n'ont jamais été appliquées.

Trois modèles de maison Lustron sont développés. Le modèle « Wetchester » a deux versions, l'un à deux chambres à coucher et l'autre en a 3 et ne possède pas de porche. La société propose quatre couleurs pour les panneaux en porcelaine extérieurs : bleu, gris, jaune et beige. Les couleurs proposées pour les intérieurs étaient plus neutres. Bien qu'il soit possible d'ajouter un garage à la maison, celui-ci n'était pas fait d'une structure en acier comme les maisons mais d'une structure faite de cadres en bois recouverte des panneaux de porcelaine. Le modèle « Newport » a aussi deux versions différentes comme le modèle précédent. Les équipements tels que la machine à laver ou les armoires n'étaient pas inclus dans ce modèle. De plus, le système de chauffage par radiation présent dans le modèle précédent est ici remplacé par un système de ventilation. Le dernier modèle appelé « Meadowbrook » était similaire au précédent mais mesure 60 centimètres de long en plus. Ce modèle est toutefois très rare et aucun modèle n'a aujourd'hui été retrouvé.<sup>9</sup>

Carl Strandlund souhaite concevoir une maison de la même manière qu'on concevait une automobile. La maison Lustron est une construction faite de kit d'éléments. (Fig.10) La production de ceux-ci se fait en usine. Les éléments se déplacent sur un convoyeur où les barres métalliques sont coupées, soudées puis assemblé. Tous les composants sont ensuite amenés sur le chantier sur des camion spécialement conçus. Les composants sont organisés sur le camion afin que les ouvriers puissent accéder aux éléments dans le bon ordre

---

9 Jill Downs, Jim Morrow, et Christopher Baas, « A new standard for living : Lustron Houses in Indiana », s. d., 11 et 12.

de montage. Les portes et fenêtres étaient déjà en place. Les camions servent également de lieu de stockage sur le chantier pendant la construction. La maison Lustron est constituée de 168 panneaux extérieurs en porcelaine, 48 panneaux intérieurs en porcelaine, 53 panneaux de revêtement de plafond ainsi que 242 panneaux de toiture. L'assemblage est logique mais est très détaillé. Les ouvriers doivent donc suivre scrupuleusement les plans. De plus, la maison est très sophistiquée. Il y a également un nombre de boulons, vises et éléments très élevés qui doivent être montés dans un ordre précis. Il est donc nécessaire de cataloguer chaque élément afin de faciliter la construction.

Les éléments métalliques qui constituaient les sections de murs et les fermes métalliques de la toiture étaient soudés en usine puis assemblés sur le site. Après la pose des fondations en béton, la structure métallique des murs sont donc boulonnées à la dalle en béton. Ces cadres métalliques des murs sont dimensionnés en fonction de la dimension des panneaux en porcelaines. Les montants métalliques des cadres sont donc espacés d'environ 60 centimètres. La structure est faite de cadre métalliques intérieurs et extérieurs joints par des écarteurs métalliques et contreventer par des tirants. L'espace entre les cadres permet d'installer l'isolation thermique des murs. Les murs intérieurs non porteurs sont ensuite installés. Les demi-fermes métalliques sont ensuite déchargées du camion puis boulonnées ensemble en leur centre. Les fermes sont alors montées sur les murs et espacées les unes des autres d'un mètre grâce à une grue. Elles sont reliées par des barres métalliques qui courent d'une ferme à l'autre afin de les contreventer. Une fois que l'isolation thermique est installée, le revêtement en porcelaine extérieur et intérieur est mis en place. Des connecteurs sont installés sur la structure métallique afin de tenir les panneaux en porcelaines qui seront vissés sur la structure. Le revêtement extérieur a également un ordre de montage puisqu'il est installé du haut de la maison vers le bas et de gauche à droite. Cet ordre de montage est lié au dessin du connecteur entre la structure et les panneaux. Les panneaux en porcelaines sont vissés à la

structure et une bande plastique entre chaque panneau permet de rendre le créer un joint étanche. Le reste du revêtement intérieur composé des panneaux allant du sol au plafond sont ensuite installés. La gouttière est finalement installée avant les panneaux qui recouvrent la toiture.<sup>10</sup> (Fig. 7)

La Lustron House n'a eut qu'un succès de courte durée. Selon des historiens, la cause de cet échec est due à la difficulté de créer une maison type dans l'industrie du logement qui est complexe et décentralisé. La construction posait des problèmes aux ouvriers et il était difficile pour les agents immobiliers de vendre ces maisons car elles ne correspondaient pas avec les codes de la construction usuels<sup>11</sup>. Le but de Carl Strandlund était de produire 100 maisons par jour mais la société n'a réussi à en produire que 26 par jour. La « Lustron Corporation » vendait leur maison comme non démontable. Lorsque les habitants souhaitent déménager, il leur est conseillé de racheter une nouvelle maison.<sup>12</sup> On retrouve ici le principe de l'économie linéaire où la maison est vue comme un objet de consommation qui est jeté en fin de vie.

Face à l'absence de l'architecte ont peu donc questionner la qualité architecturale qui est produite. En effet, Carl Strandlund est un entrepreneur dont le but est de faire du profit. Cette envie de créer des quartiers d'habitation homogène induit une répétition d'un type d'architecture ayant toujours la même qualité architecturale. La maison est donc conçue pour une production de ces éléments en série et à faible coût. Du fait de la faible implication des architectes dans ce projet, le montage et démontage est peu efficace. La maison comporte également

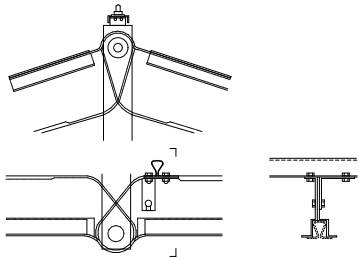
---

10 « Erection Manual Table of Contents », consulté le 31 décembre 2019, <http://ohiohistory.org/visit/exhibits/ohio-history-center-exhibits/1950s-building-the-american-dream/lustron-about/lustron-library/erection-manual-toc>.

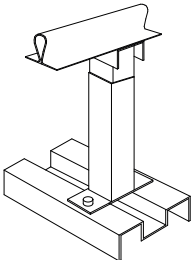
11 Cynthia Luccess-Torres et Kim A. O'Connell, « The illustrious Lustron: A guide for the disassembly and preservation of america's modern metal marvel », 2007, 3.

12 Douglas Knerr, *Suburban steel: the magnificent failure of the Lustron Corporation, 1945-1951*, The urban life and urban landscape series (Columbus: Ohio State University Press, 2004), 112.

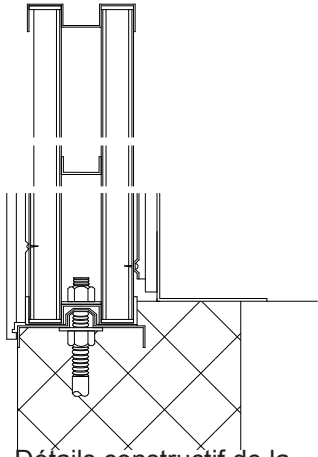
un nombre important de pièces qui devaient être assemblées dans un ordre précis ce qui rend l'édification de l'ensemble complexe. On se retrouve donc avec un système fermé qui accepte difficilement des éléments étrangers au système mis en place.



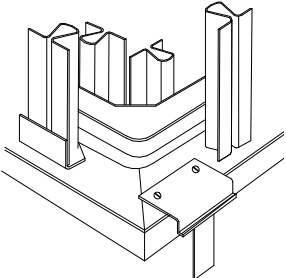
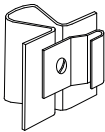
Détails constructif des fermes métalliques



Connecteurs métallique entre les fermes et les murs porteurs périphériques

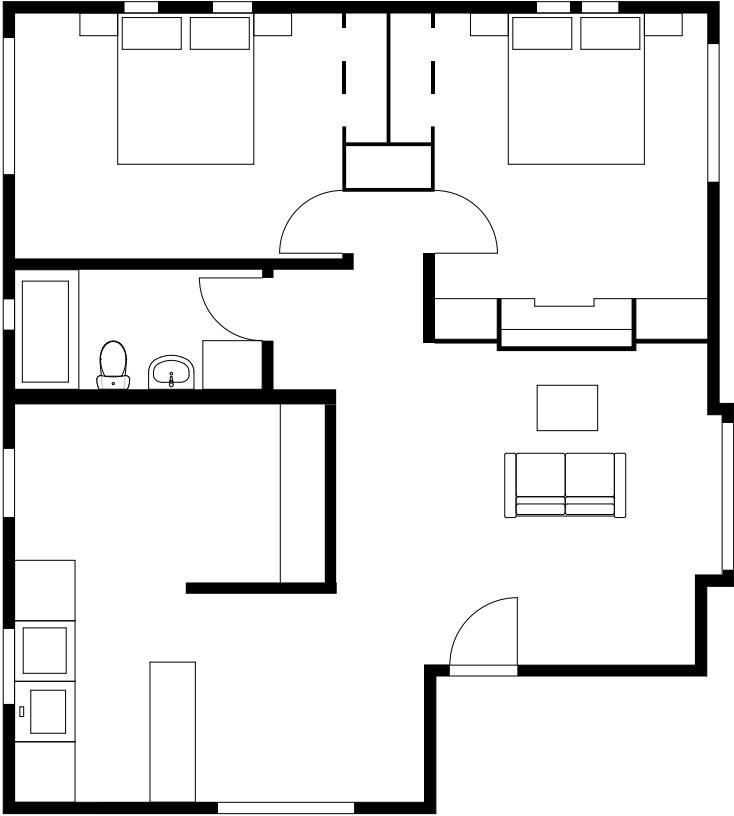


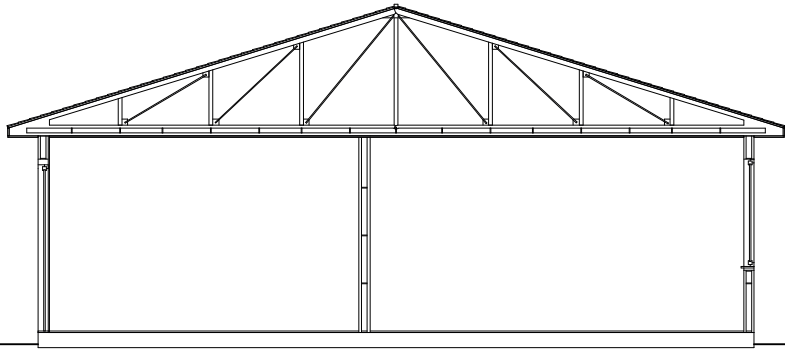
Détails constructif de la structure métallique



Connecteurs métallique pour les panneaux en porcelaines

Fig. 7 : Détails constructifs d'une Lustron House





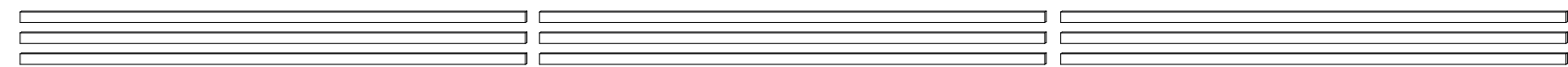
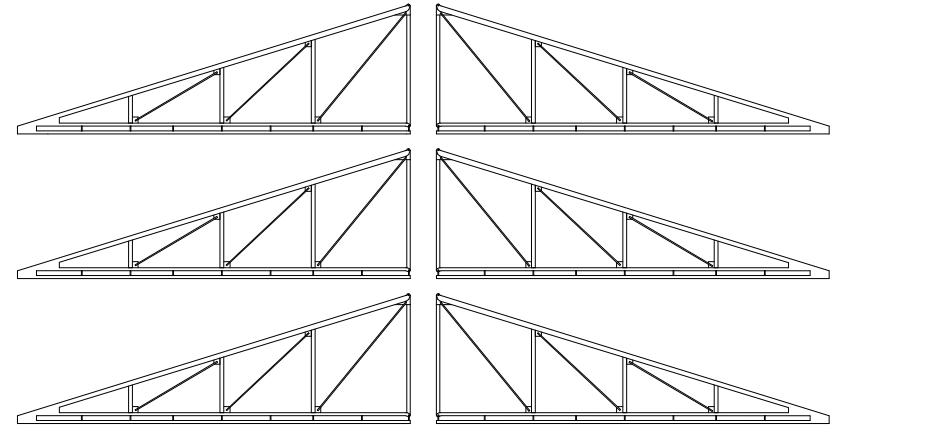
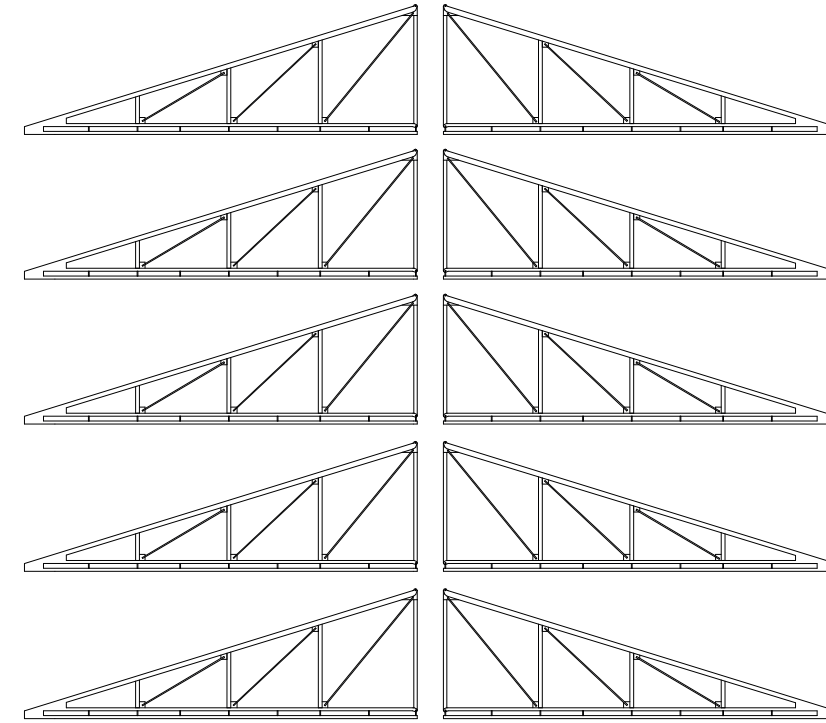
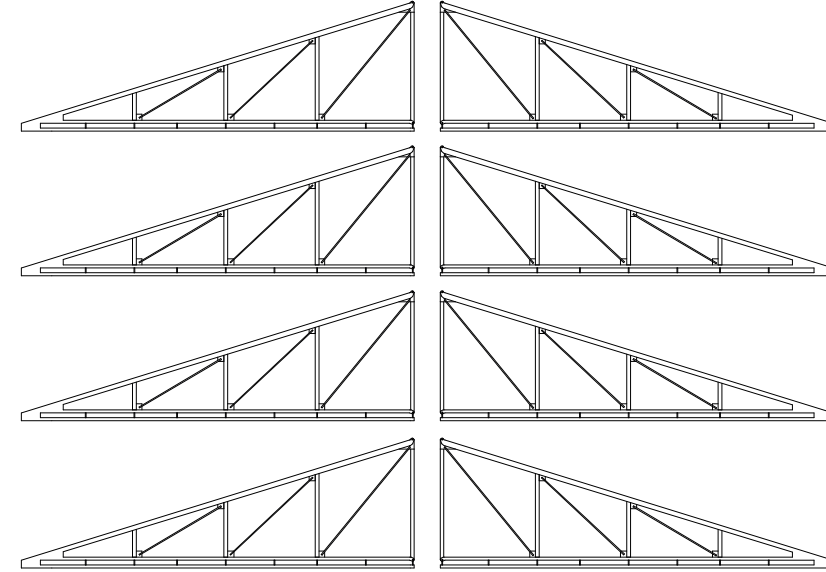
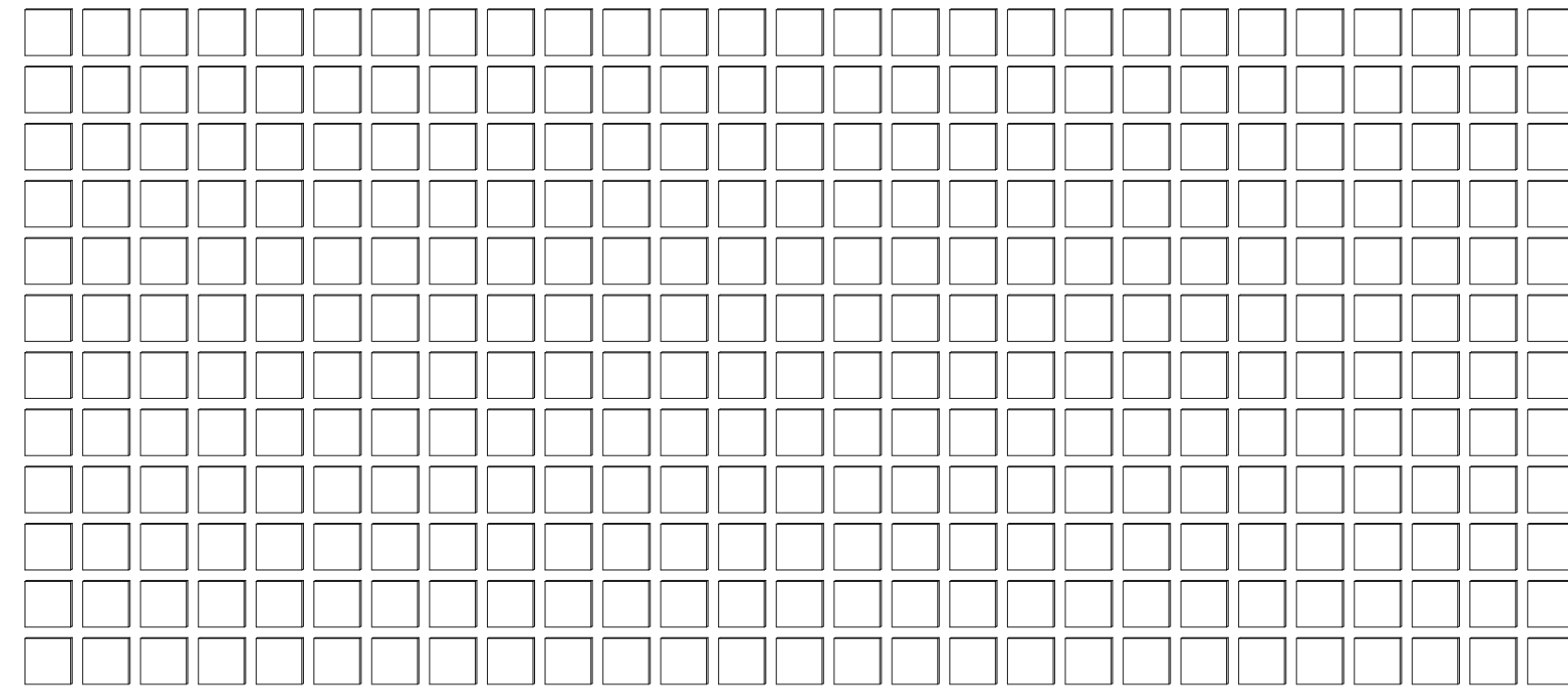
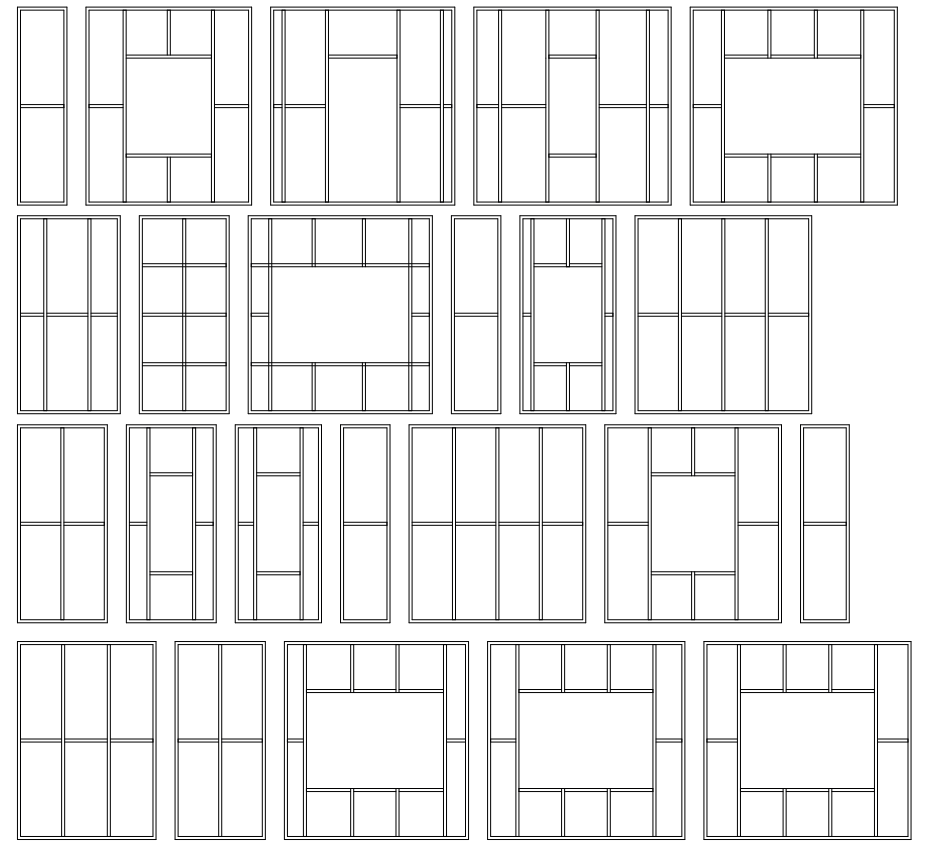
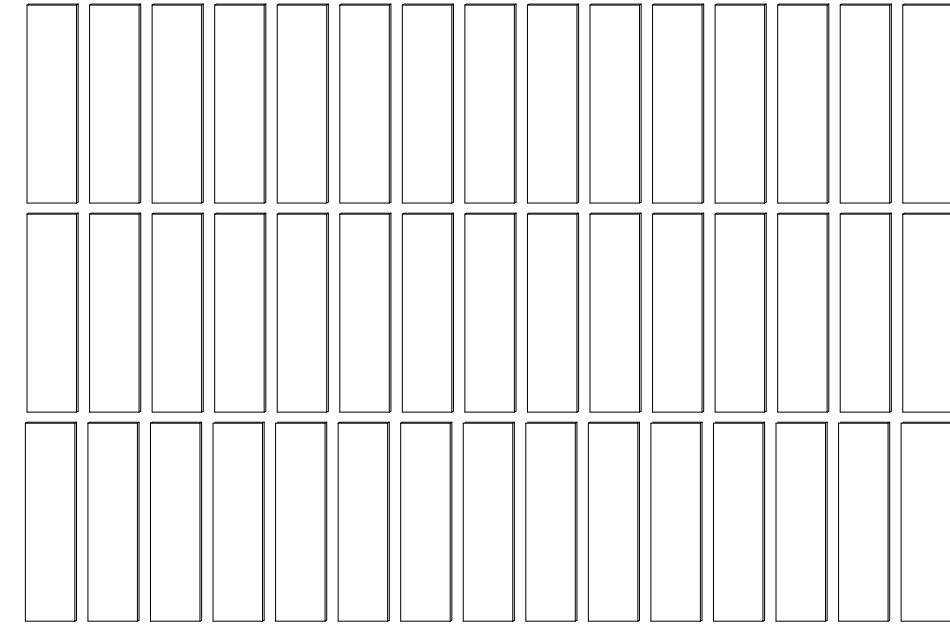
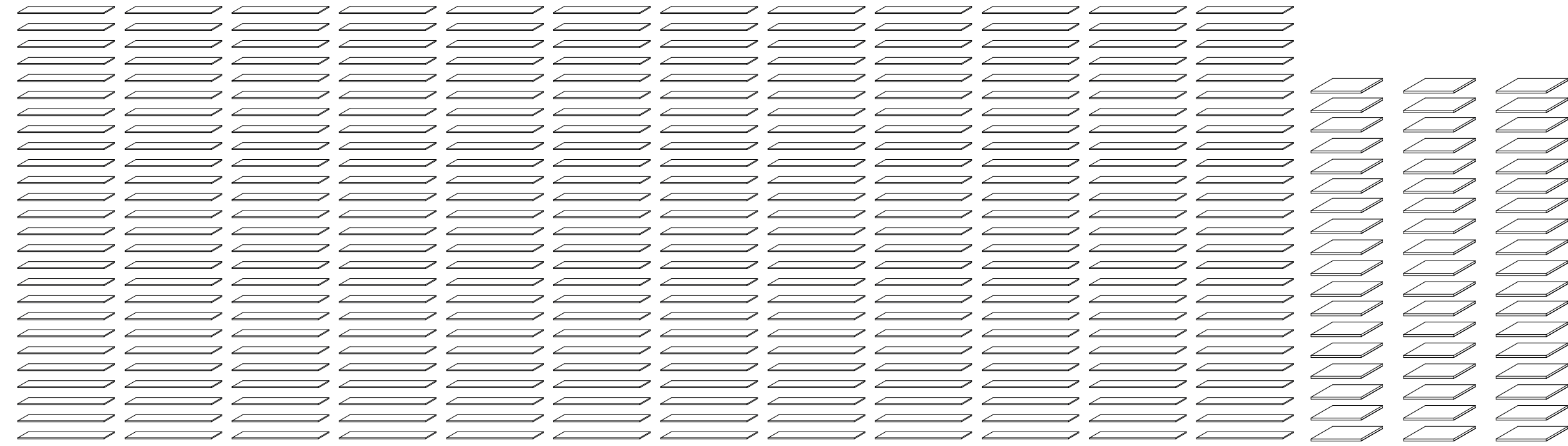
Pages précédentes :

Fig. 8 et 9 : Plan et coupe d'une Lustron House Wetschester

Page ci-contre:

Fig. 10: Kit d'éléments préfabriqués d'une Lustron House







## 2.3 Le General Panel System de W. Gropius et K. Wachsmann ou l'utopie du kit d'éléments interchangeables

Walter Gropius s'est intéressé très tôt à l'industrialisation et il avait compris que la maison ne devait pas être confondue avec l'automobile. Pour lui, « l'industrialisation doit se limiter à la standardisation des éléments de base, afin de ne pas compromettre la souplesse du planning ».<sup>13</sup> En 1941, les Etats-Unis se trouvent à l'orée de la guerre. L'industrie du pays est en plein développement. De plus, le risque de pénurie de logement, déjà élevé, risque de s'accroître à cause de ce conflit. La préfabrication avait donc pour avantage de permettre une production rapide, délocalisée ainsi que de limiter les coûts et la consommation de matière. Walter Gropius et Konrad Wachsmann se rencontrent aux Etats-Unis et se rendront compte qu'ils partagent les mêmes intérêts pour l'architecture préfabriquée. En 1941, ils fondent la General Panel Corporation et développent un projet de logement appelé « General Panel System ». Ce système sera tester lors de la construction d'une maison dans le Queens à New York en 1946. (Fig. 12 et 13)

Ce système préfabriqué était composé de panneaux assemblés entre eux grâce à des connecteurs métalliques. Les panneaux étaient à la fois l'ossature et la clôture du logement et étaient faits de cadres en bois isolés et d'un revêtement en contreplaqué. Ces éléments mesurent environ 2,4 mètres de haut et 1 mètre de large et forment les murs , tandis que le sol, le plafond et la toiture sont faits de panneaux de 3 mètres sur 1 mètre. Les panneaux se basent donc sur une grille tridimensionnelle modulaire. Les connecteurs métalliques sont répartis le long du cadre, soit une sur les traverses et trois sur les montants.<sup>14</sup> Ce système permet donc de transférer la plus grande partie du travail en usine afin que l'érection du bâtiment ne soit plus qu'une question d'assemblage tous cela à l'aide d'un seul type

<sup>13</sup> Sigfried Giedion, *Walter Gropius : l'homme et l'oeuvre* (Paris: Editions Albert Morancé, 1954), 75.

<sup>14</sup> Maurice Debons, « Fabrication sur mesure: Réflexion autour d'une architecture préfabriquée sur la base de trois exemples choisis » (2014), 13.

de connecteur. Des panneaux composent également la toiture, le plafond et le sol. La toiture est faite de fermes et de solives. Tous ces éléments sont dérivés de la trame de 1 mètre conçue en plan.<sup>15</sup>

Le connecteur métallique aura quatre variantes qui seront toutes développées entre 1941 et 1945. Dans la première version, Wachsmann va décider de couper les arrêtes de ses panneaux en biseau de 45°. Les éléments métalliques prennent des formes de « Y » et sont vissées aux cadres. Ces éléments sont verrouillés entre elles grâce à leurs âmes.

Dans la deuxième variante, Konrad Wachsmann développe une série de panneaux standards. Ce système est alors inscrit dans un système de modules, ce qui aura une grande importance dans le dimensionnement des éléments. Il réduit le nombre de visser nécessaires et celles-ci ne sont plus fixées directement au bois. Elles se boulonnent entre-elles afin de réduire le temps de montage. Le connecteur métallique n'est plus composé que de deux éléments qui sont complémentaires au lieu de trois comme précédemment.

Lors de leur troisième version, leur invention prend le nom de « Packaged House System ». Cette nouvelle connexion est faite de pièces métalliques qui sont encastrées dans la tranche des panneaux. Le nombre d'opérations est fortement diminué et simplifié car la frappe vient remplacer le vissage. La fixation est également plus accessible. Comme il s'agit de pièces bidimensionnelles, contrairement aux pièces en « Y », elles sont plus faciles à fabriquer.

A partir de 1942, la société « General Panel Corporation » est fondée et naît alors le « General Panel System ». Pour la quatrième et dernière version, Konrad Wachsmann dépose le brevet « Building Structure ». La forme de ces connecteurs change à nouveau. La partie qui est encastrée dans le bois devient semi-circulaire. Celle-ci permet à la fois de réduire la quantité de matière et de faciliter la mise en œuvre. La traction est alors reprise par les connecteurs métalliques et la compression par le bois. Les connecteurs sont installés en

<sup>15</sup> Gilbert Herbert, *The dream of the factory-made house: Walter Gropius and Konrad Wachsmann* (Cambridge, Mass: MIT Press, 1984), 292.

usines afin de simplifier l'assemblage sur le chantier.<sup>16</sup> (Fig. 11)

En 1950, la société est dissoute. Seulement 150 à 200 maisons seront construites. La volonté de Konrad Wachsmann et Walter Gropius était de vendre le « General Panel System » comme des pièces et non un bâtiment. La maison était alors composée d'un kit d'éléments préfabriqués interchangeables qui devaient permettre une adaptation aux besoins variables des habitants. Le travail sur les connections est donc très important puisqu'elles devaient être toutes identiques pour importer les éléments à assembler et leurs positions.

Toutefois, ce système n'a pas eu le succès escompté car il était plus cher qu'une construction classique faite d'une structure en bois. De plus, le nœud devenait une invention primordiale dans ce système et était relativement complexe. Konrad Wachsmann souhaite créer un système qui soit flexible et qu'aucun type de construction ne soit déterminée à l'avance. Les espaces doivent pouvoir être adaptés aux besoins. Cette idée de commercialiser un lot de pièces permettant de créer un agencement d'espace illimité ne marchera pas pour plusieurs raisons. Tous d'abord, les banques ne sont pas prêtes à investir dans un produit « indéterminé ». De plus, le produit n'est pas directement vendu de l'entreprise au client. Finalement, le respect des normes de construction devient plus difficile dans ce contexte indéterminé. Le système économique de l'époque n'est donc pas prêt à la mise en place d'un projet de cette nature. De plus, le coût de ce système est plutôt élevé. Des problèmes de mise en œuvre et de production apparaissent également. En effet, les jours de pluie, le montage se complexifie car le bois prend du volume. Les panneaux préfabriqués ne seront pas non plus très économes en matière car Konrad Wachsmann s'est surtout concentré sur le développement du connecteur.<sup>17</sup>

Le but était donc de développer un système de construction

---

16 Debons, « Fabrication sur mesure: Réflexion autour d'une architecture préfabriquée sur la base de trois exemples choisis ».

17 Herbert, *The dream of the factory-made house*, 307-12.

préfabriqué qui soit le plus complet possible et qui puisse être facilement et rapidement assemblé avec des outils simples sur le site par des ouvriers qui n'étaient pas qualifiés et peu nombreux.<sup>18</sup> On avait donc affaire à un kit d'éléments qui peuvent être interchangeables, qui sont fabriqués par des machines, qui permettent un assemblage rapide et qui doivent pouvoir constituer des bâtiments de forme diverse. (Fig. 14) Walter Gropius avait donc compris que l'architecte avait son rôle à jouer dans l'industrialisation du bâtiment. Il devait participer à la standardisation des éléments de constructions en déterminant les formes et les dimensions. Il doit donc à la fois collaborer avec les industriels et les ingénieurs.<sup>19</sup>

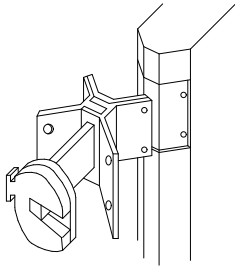
On peut donc constater que Konrad Wachsmann fait un réel effort de rationalisation et de simplification afin d'atteindre les objectifs de production. L'usage des deux matériaux que sont le bois et le métal ont également leur importance puisque ces deux matériaux permettent de travailler avec un degré de précision similaire. L'originalité de ce système se trouve dans la connexion entre les panneaux. Il s'agit d'une solution obtenue à la fois par une vision utopique et radicale ainsi qu'un détail complexe et d'une précision extrême.

Bien que ce système permette plusieurs possibilités d'assemblage, il s'agit d'un système fermé. En effet, bien que les composants soient limités en nombre, ils ne sont utilisables que pour ce type d'assemblage. Ce système ne permet pas d'intégrer d'autres éléments de construction et on ne peut utiliser que des panneaux qui appartiennent à ce système en particulier.

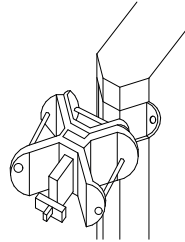
---

18 Gerald Staib, Andreas Dörrhöfer, et Markus Rosenthal, *Components and Systems: Modular Construction – Design, Structure, New Technologies* (Walter de Gruyter, 2013), 28.

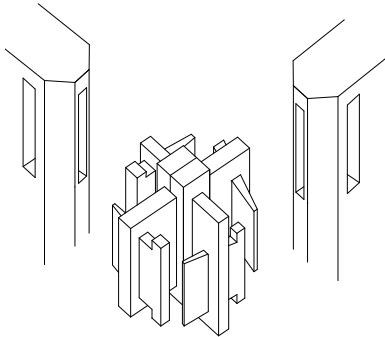
19 Giedion, *Walter Gropius : l'homme et l'oeuvre*, 78.



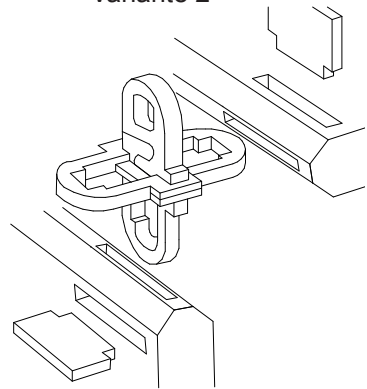
Variante 1



Variante 2

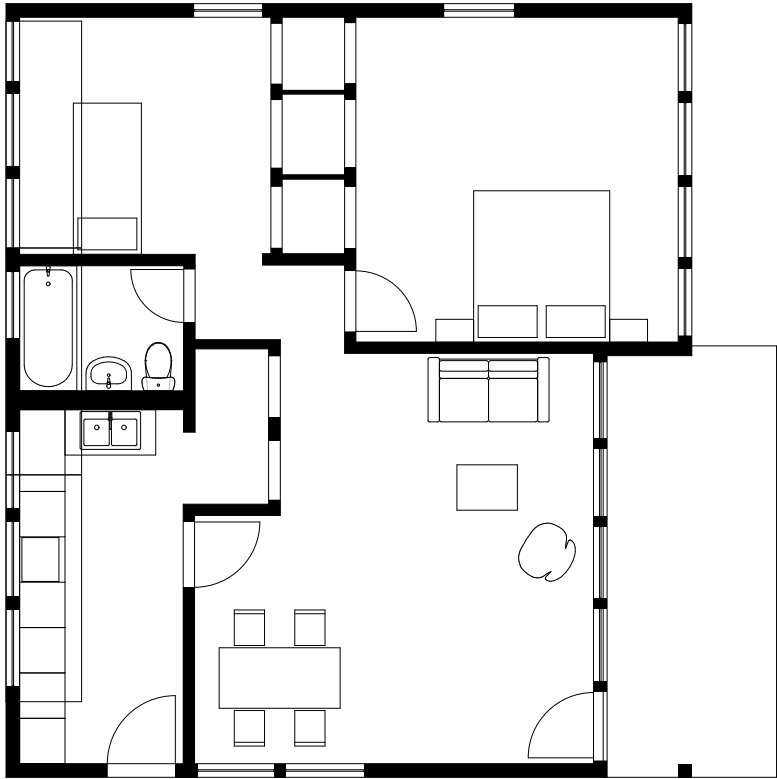


Variante 3

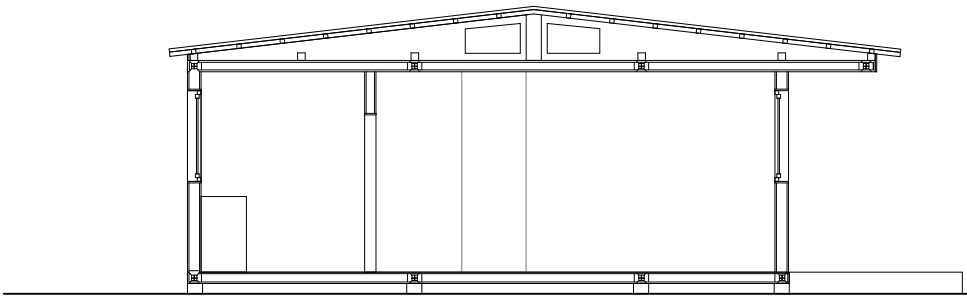


Variante 4

Fig. 11 : Variantes du connecteur conçu par Konrad Wachsmann





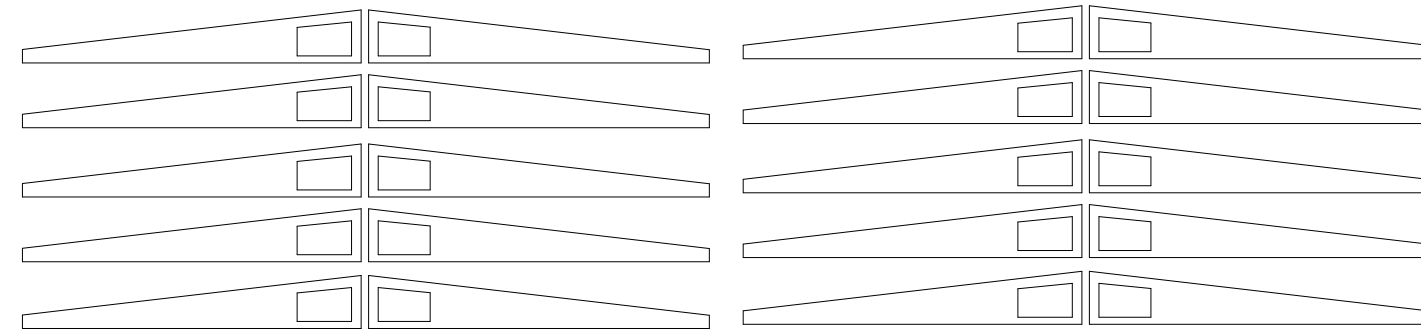
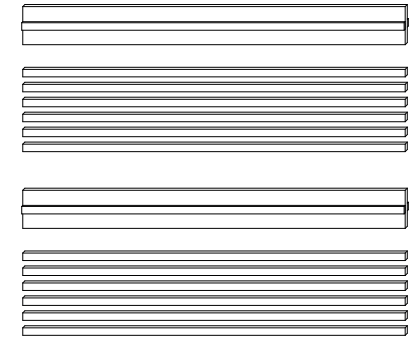
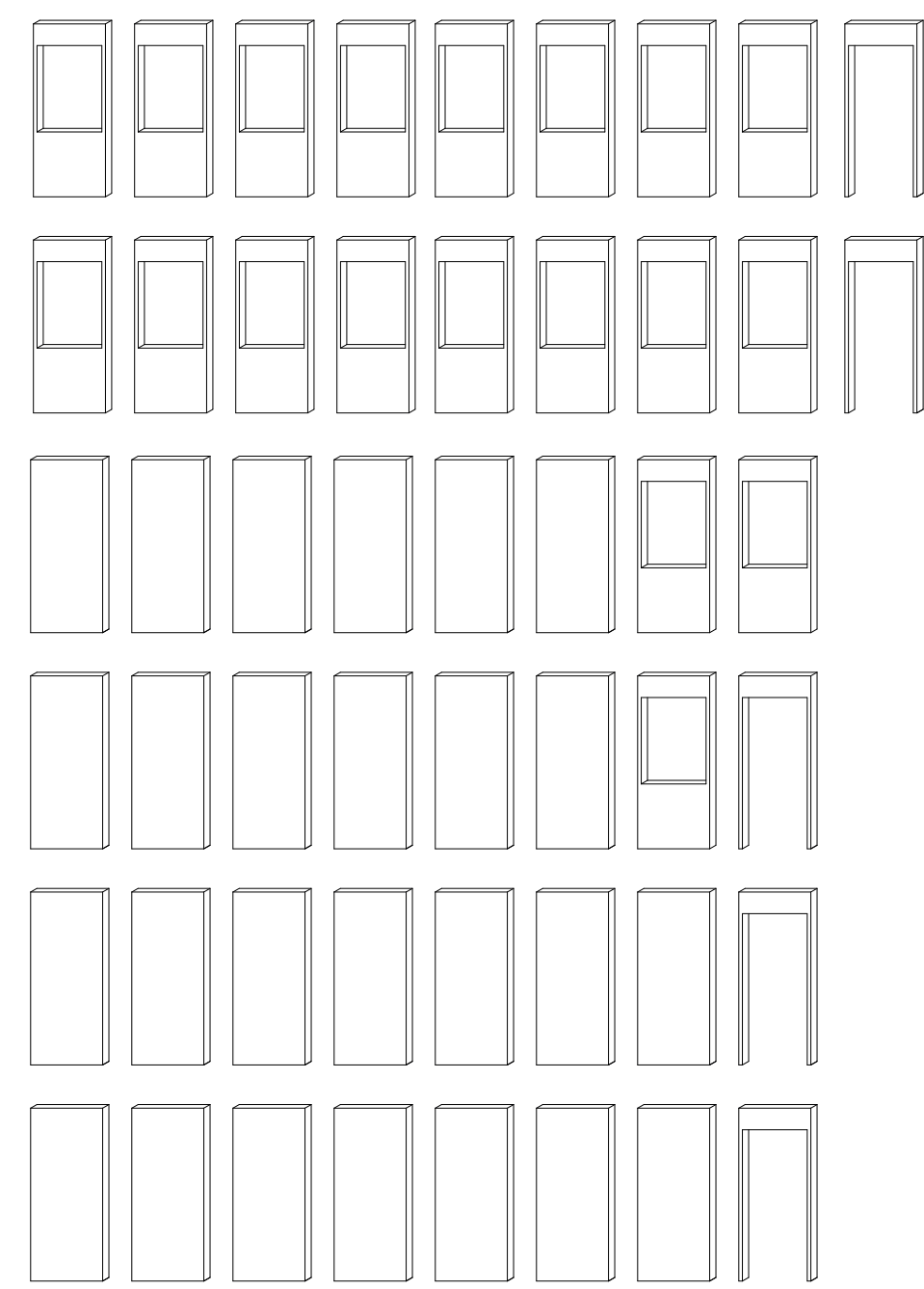
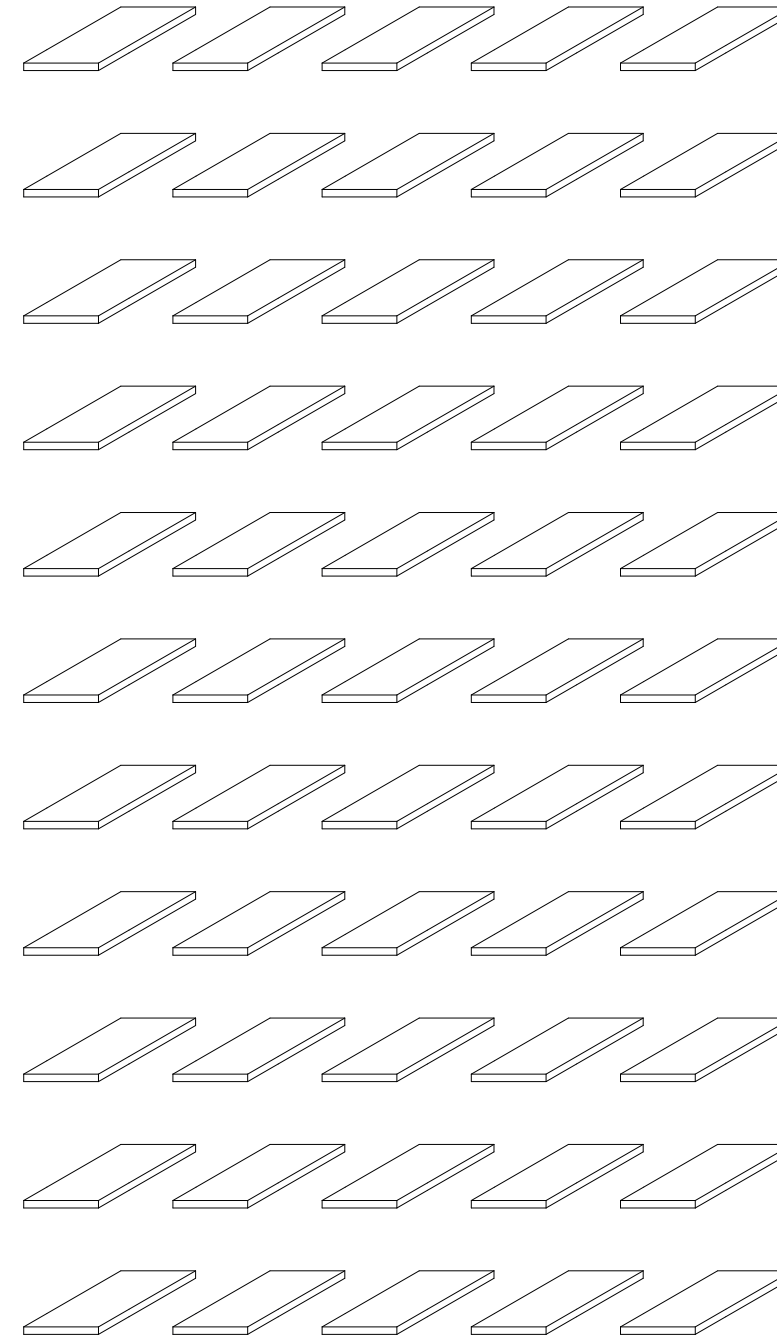
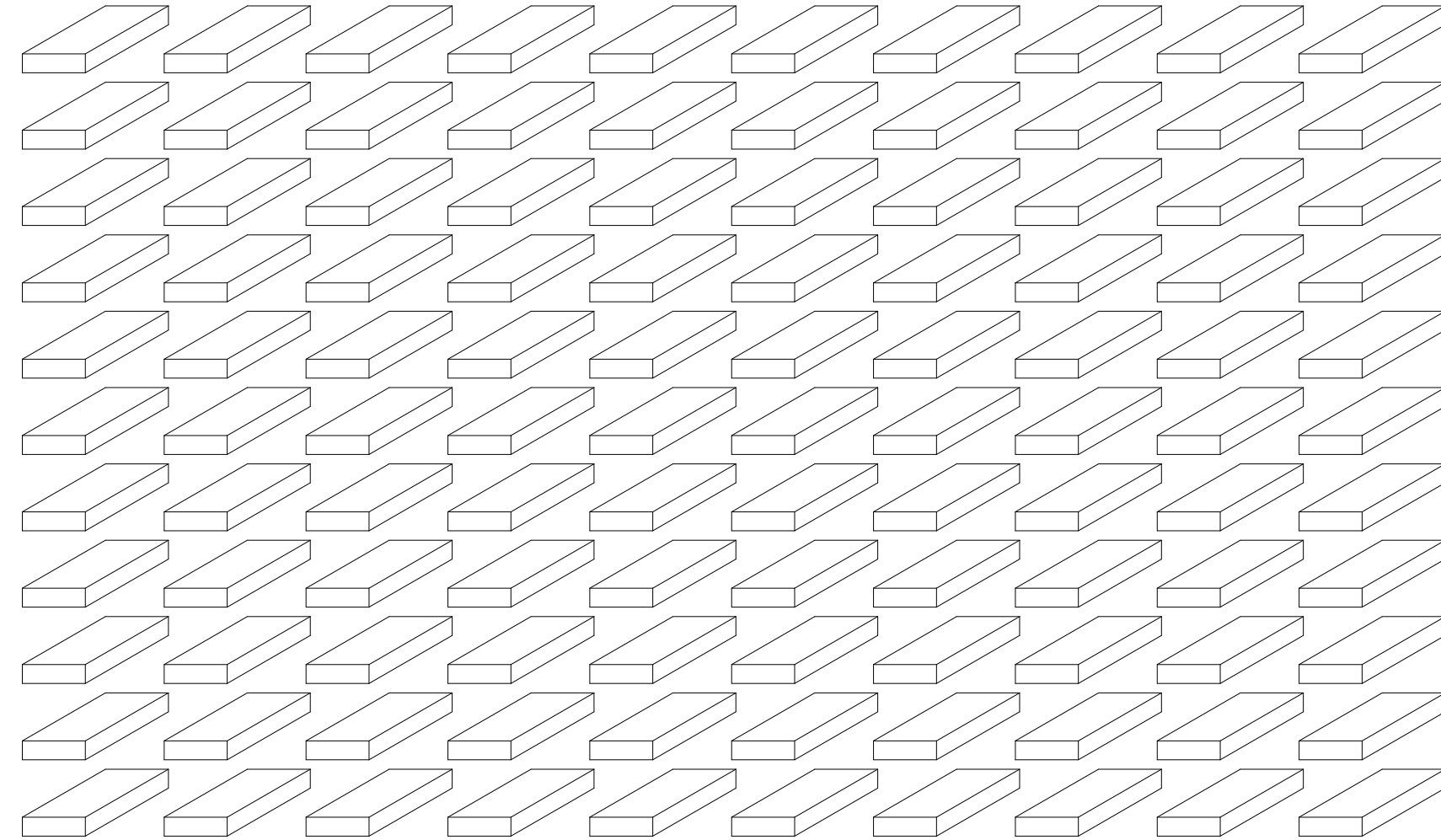


Pages précédentes :

Fig. 12 et 13 : Plan et coupe d'une maison utilisant le  
« General Panel System »

Page ci-contre:

Fig. 14 : Kit d'éléments préfabriqués d'une maison utilisant le  
« General Panel System »





## 2.4 Les enseignements apportés<sup>20</sup>

Le kit d'éléments est donc une forme de préfabrication qui existe depuis le début de l'industrialisation. Il s'agit d'un moyen de démocratiser la construction des maisons en réduisant les coûts en matériaux et en main-d'œuvre ainsi que le temps de montage. Dans chacun des cas précédents, les éléments préfabriqués ne sont compatibles qu'entre eux et il serait difficile d'y intégrer d'autres éléments qui ne sont pas conçus selon le système mis en place.

Durant cette période, le rêve des architectes était de concevoir la maison comme on conçoit une automobile. Il est intéressant de constater que la notion de standardisation des composants et des éléments était présente mais les pièces sont très spécifiques au bâtiment. La maison était conçue comme un objet de consommation qui peut être produite en masse.

Dans la construction en préfabriqué, l'architecture est souvent conçue comme une architecture cohérente et rationnelle ou chaque partie qui la compose doivent refléter la nature de l'architecture et les volontés de l'architecte. La valeur du joint devient donc très importante. Dans les cas précédents, la connexion entre les éléments devient le détail à résoudre et demande une recherche poussée. Les détails sont d'une spécificité tel qu'une remise en question du joint amènerait à un travail très lourd qui pourrait changer le projet.

Si nous revenons sur les cas étudiés précédemment, nous pouvons comprendre la relation que le détail de construction entretient avec les espaces qu'il génère et le mode de construction.

Dans la Maison Tropicale, Jean Prouvé cherche à mettre en place un système constructif qui symbolise une volonté artistique. Le portique peut à la fois être dissimuler, comme cela est le cas dans la Maison Tropicale, mais pourrait également

<sup>20</sup> Debons, « Fabrication sur mesure: Réflexion autour d'une architecture préfabriquée sur la base de trois exemples choisis ».

être rendu visible avec un agencement différent des espaces intérieurs. Tous les éléments sont intimement liés puisque le tout n'est complètement stable que lorsque tous les éléments sont en place.

Dans le cas du « General Panel System », l'architecte recherche une liberté extrême en concevant des panneaux qui soient interchangeables. Cette liberté n'est toutefois pas exprimée dans ces réalisations. En effet, bien que la maison puisse alors s'adapter aux besoins de l'utilisateur, le détail constructif ne détermine que très peu l'architecture puisqu'il est extrêmement discret.

Chez Carl Strandlund, le détail constructif disparaît derrière le revêtement. Chaque élément est intimement lié à son voisin et l'ordre de montage devient primordial. De plus, contrairement au « General Panel System », les détails constructifs sont très nombreux. Cela cause des problèmes lors de la construction. Le nombre important d'éléments à assembler est également très important. Bien que le principe de la chaîne de montage de l'industrie de l'automobile soit appliqué à la maison, le manque d'investissement d'un architecte génère une architecture qui est copiée puis collée.

Le « General Panel System » est un projet rationnel qui met l'accent sur le connecteur entre les panneaux. Il retranscrit difficilement le lien entre la réalisation technique et l'architecture puisque le connecteur est dissimulé dans la construction. Dans le cas de la Lustron House, ce rapport est inversé. En effet, la construction impose des choix à l'architecture. En effet, le module du panneau de revêtement en porcelaine définit la trame du montant métallique et donc les dimensions de la maison. En plus du manque d'implication de l'architecte, on peut constater que le système est très rigide et laisse peu de marge à l'expression architecturale. Il s'agit d'un style d'architecture qui est reproduit en série. Carl Strandlund cherche surtout à produire des maisons en masse pour des raisons économiques. Dans la réalisation de Jean Prouvé, le système constructif permet de générer une architecture mais donne également une liberté à l'architecte dans la division des espaces internes car

les panneaux intérieurs peuvent être interchangeables.

L'architecture préfabriquée, dans laquelle la répétition prend toute son importance, entretient également un lien fort avec la taille des éléments préfabriqués. L'industrie est fortement liée à la production en série car c'est ce qui justifie la dépense d'énergie et d'argent pour la production des éléments de construction. Dans ces projets, cette répétition engendre la mise en place de modules ou d'une trame. Dans le cas du « General Panel System », le module est le panneau rectangulaire préfabriqué dont la largeur d'environ 1 mètre est intimement liée à la trame carrée du plan. Dans le cas de la Lustron House, les dimensions de la maison sont définies par la dimension de la structure métallique qui est quant à elle intimement liée à la dimension de panneaux de revêtement en porcelaine. La maison ne pourrait se développer qu'en longueur mais non en largeur car cette dernière est fixée par les dimensions de la ferme métallique. Dans la Maison Tropicale, le développement se fait linéairement. En effet, le système de portique ainsi que la succession de poutres qui supporte la dalle du sol permettrait d'avantage un développement en longueur plutôt qu'en largeur. Bien que ce projet soit le plus abouti architecturalement, il ne permet pas autant d'adaptabilité que celui de Konrad Wachsmann et Walter Gropius.

Les architectes ont donc un rôle crucial dans la conception des édifices puisqu'il est celui qui dessine les détails de construction. Ils participent donc à l'édification de l'édifice dans sa globalité. Nous pouvons noter que dans chacun de ces projets analysés, la maison est conçue pour pouvoir être des modèles qui pouvaient être reproduite en grande quantité. Face aux déboires de la guerre, aux enjeux économiques et sociaux, les architectes ont tenté de démocratiser la construction des maisons en kit. Toutefois, cela engendre des maisons qui sont conçus comme des cellules pouvant être reproductibles indéfiniment, ce qui peut aller à l'encontre de l'esprit créatif et artistique des architectes.





### III – Le kit comme réponse aux enjeux environnementaux

#### 3.1 La Loblolly House de Kieran Timberlake

ou concevoir avec moins de types d'éléments

La Loblolly House est une maison préfabriquée hors site dans la baie de Chesapeake aux Etats-Unis. Elle a été conçue par les architectes Stephen Kieran et James Timberlake en 2006. Face au réchauffement climatique, les deux associés se sont intéressés à la préfabrication afin de minimiser l'impact de cette construction. Le but est donc de concevoir et construire une maison avec un bon confort pour ses habitants, qui ne soit pas trop cher et qui tienne compte des enjeux environnementaux. Pour ces architectes, l'augmentation des coûts de construction, la diminution de savoir-faire et de qualité de l'architecture ainsi que l'impact environnemental des bâtiments sont des problèmes présents en architecture auquel il faut s'atteler. Leur constat est donc celui d'une stagnation de la productivité dans l'industrie de la construction. Afin de répondre au mandat de la durabilité, il faut alors améliorer la productivité de la construction, concevoir des bâtiments abordables et de meilleure qualité et réduire l'empreinte environnementale des édifices.<sup>21</sup>

Les architectes se sont inspirés de l'industrie de l'automobile. En effet, celle-ci a connu une évolution dans la conception et la production de leurs produits. En restructurant leur ligne d'assemblage, le nombre impressionnant de composantes a pu être réduit. De plus, les composants pouvaient être préassemblés avec des éléments de connections déjà présent afin que tous les éléments puissent être montés en fin de ligne de production. En comparaison, le secteur de la construction a peu évolué.

La Loblolly House est donc fait d'une série de composantes types qui sont préassemblées en usine puis montées sur

<sup>21</sup> Stephen Kieran et James Timberlake, *Loblolly House: elements of a new architecture*, 1st ed (New York: Princeton Architectural Press, 2008), 19.

le chantier permettant de réduire le nombre de connections. L'outil numérique prend alors toute son importance puisqu'il permet la création d'un modèle virtuelle du projet. Pour les deux architectes, « l'architecture est d'abord conçue virtuellement avant de l'être physiquement, faisant du modèle paramétrique le prototype de l'architecture construite »<sup>22</sup>.

La Loblolly House est une maison individuelle de deux étages, faite d'une structure de profilés en aluminium. (Fig. 17 et 18) Elle est inspirée par les cabanes construites dans les arbres et est donc surélevée par des pilotis afin qu'elle ait un impact limité sur le site. La plupart des projets sont fait de plusieurs parties qui doivent être transportés sur le chantier puis assemblés. Ce processus est à la fois couteux, long et a un fort impact environnemental. Cette maison est donc fait de sous-assemblages d'éléments qui sont fabriqués hors site. La construction est constituée de quatre éléments d'architecture : le bloc, les équipements, la structure faite de profilés en aluminium et les panneaux préfabriqués en bois pour les façades et les dalles. Les connections entre les éléments sont conçus pour que des outils simples soit suffisants sur le chantier.

Tous les éléments ont été modélisé permettant ainsi de concevoir un prototype numérique et aux assemblages d'être fabriqués en usines. Comme les éléments sont conçus virtuellement, ils peuvent tous être cataloguer par taille et quantités grâce aux informations du modèle paramétrique. Dans une construction traditionnelle, l'édifice se construit du bas vers le haut. Pour la Loblolly house, tous les éléments ont pu être préparés simultanément. Tous les systèmes techniques de la maison ont également été intégrés dans les panneaux préfabriqués des dalles et plafonds.<sup>23</sup>

---

22 Kieran et Timberlake, 41.

23 Private residence et al., « Loblolly House | Prefabricated Architecture Integrated with Nature », consulté le 24 novembre 2019, <https://kierantimberlake.com/>.

Ce bâtiment est divisé en différents éléments. Tout d'abord, la construction commence avec la mise en place des pilotis en bois. Une première série de poutres sont encastrés sur les pilotis afin de lier les piliers entre eux. Le second système de poutre est posé sur le premier afin de permettre un alignement précis de la structure des profilés en aluminium avec les pilotis en bois. Parmi ces pilotis, deux d'entre eux servent de gaines techniques.

La structure du bâtiment est faite de profilés en aluminium et de connecteurs. Ceci crée un kit d'éléments préfabriqués. Les connecteurs sont de quatre types. Le premier lie la structure en aluminium au pilotis en bois. Le deuxième type connecte les profilés verticaux aux profilés horizontaux de la structure. Le troisième type de connecteur sert de tirants afin de protéger la structure contre les forces latérales. Le dernier type de connecteur permet de tenir les panneaux préfabriqués en bois contre la structure en aluminium.

Une fois que la structure en aluminium est en place, les panneaux préfabriqués des dalles, contenant la technique, peuvent être installés. Ceux-ci sont fixés contre la structure en aluminium grâce à des connecteur en « Z ». Les connecteurs en forme de « L » sont utilisés pour supporter la dalle vitrée du ponton entre les deux pavillons ainsi que les panneaux vitrés. Les dalles préfabriquées de la toiture sont posées sur la structure en aluminium et connectées grâce à des connecteur en « L ». (Fig. 15)

Lorsque les dalles d'un étage sont installées, les modules de l'étage, soit les blocs techniques ou les sanitaires, sont amenés sur le chantier et placés à leur place grâce à une grue.

Finalement, les panneaux qui constituent les murs et qui comprennent à la fois leur ossature, l'isolation, les fenêtres, et l'étanchéité sont ensuite mis en place et boulonnés à la structure grâce aux connecteur en « L ». Le revêtement extérieur qui est préfabriqué à partir de planches standards présent sur le marché sont ensuite mis en place. Finalement, le revêtement intérieur est appliqué. Les équipements sont placés en dernier. Sur la façade est qui donne sur le lac, il y a un système en polycarbonate fonctionnant comme des portes

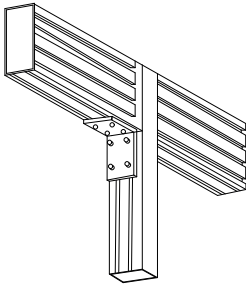
d'hangar qui permet de fermer la façade et protéger l'intérieur des températures extérieures. La construction a ainsi été faite en moins de six semaines.<sup>24</sup> (Fig. 16)

Les architectes aient tenté de mettre en pratique les principes du « design for Disassembly »<sup>25</sup>, soit la conception de bâtiments démontables. Ces principes comprennent celui d'hierarchisation des couches. Ces couches constituant les murs doivent être séparée et hiérarchisée afin que l'on puisse accéder à l'une d'entre elle en causant le moins de dommages possibles. La technique est intégrée dans les éléments préfabriqués. La couche de revêtement intérieur et extérieur sont mise en place sur le chantier en tant que couches séparées.

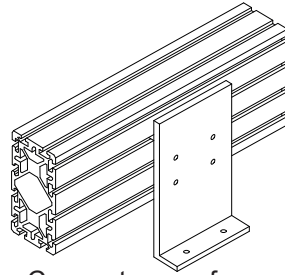
Stephen Kieran et James Timberlake ont malgré tout réussi à réduire le nombre de types d'éléments préfabriqués et à réduire au minimum les types de joints entre les composants faisant de cette maison une construction qui puisse être démontée. Toutefois, les éléments préfabriqués sont de taille conséquente.

Les éléments et les composants peuvent être distingués dans le système constructif et peuvent être réutilisés si le bâtiment vient à être démonté. Les matériaux utilisés dans ce projet représentent un kit d'élément (Fig. 19 et 20) qui sont présents sur le marché sous une forme standard, produit en série et qui sont réinterprétés ou réutiliser dans ce bâtiment.

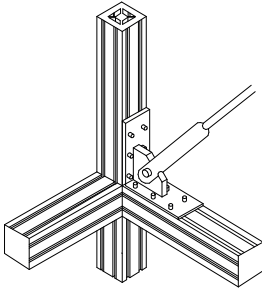




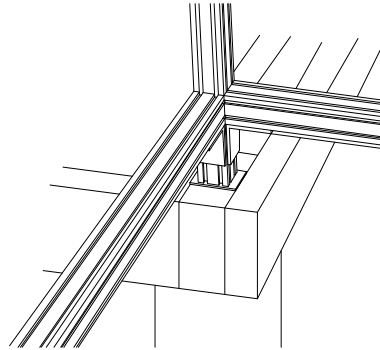
Connecteur en forme de « L »



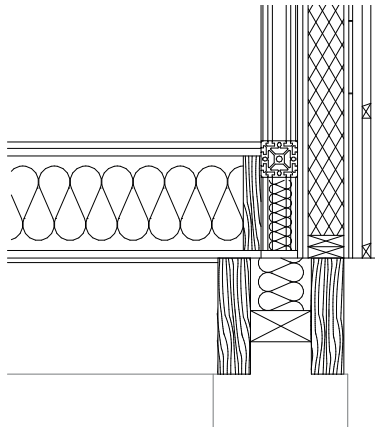
Connecteur en forme de « Z »



Contreventement de la structure



La connection avec les poutres en bois



Détail de connection entre les pilotis, les dalles et les murs  
Fig. 15 : Détails constructifs

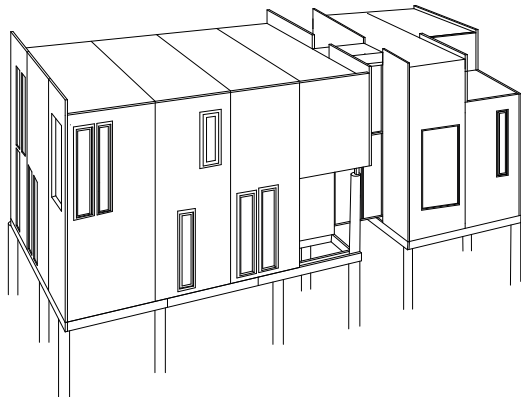
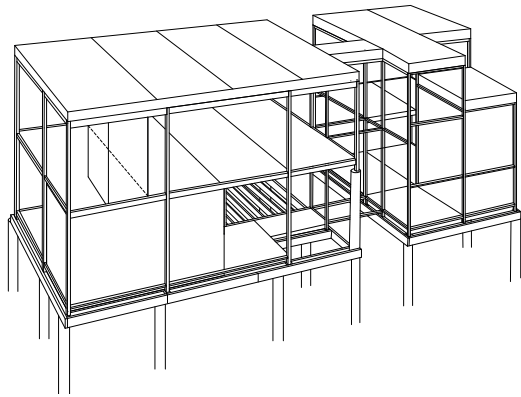
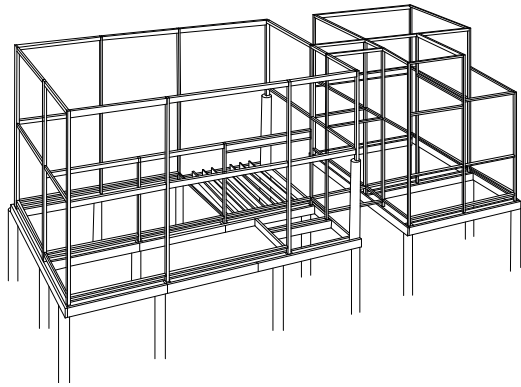
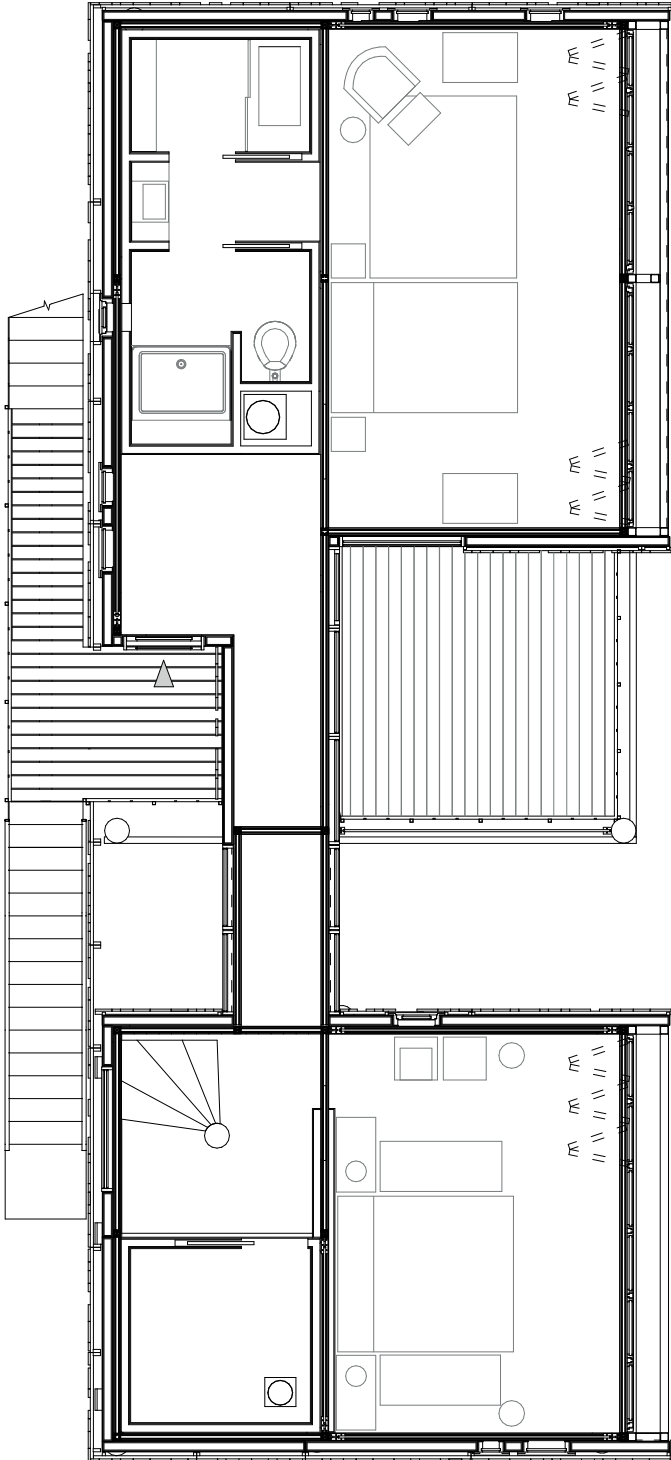
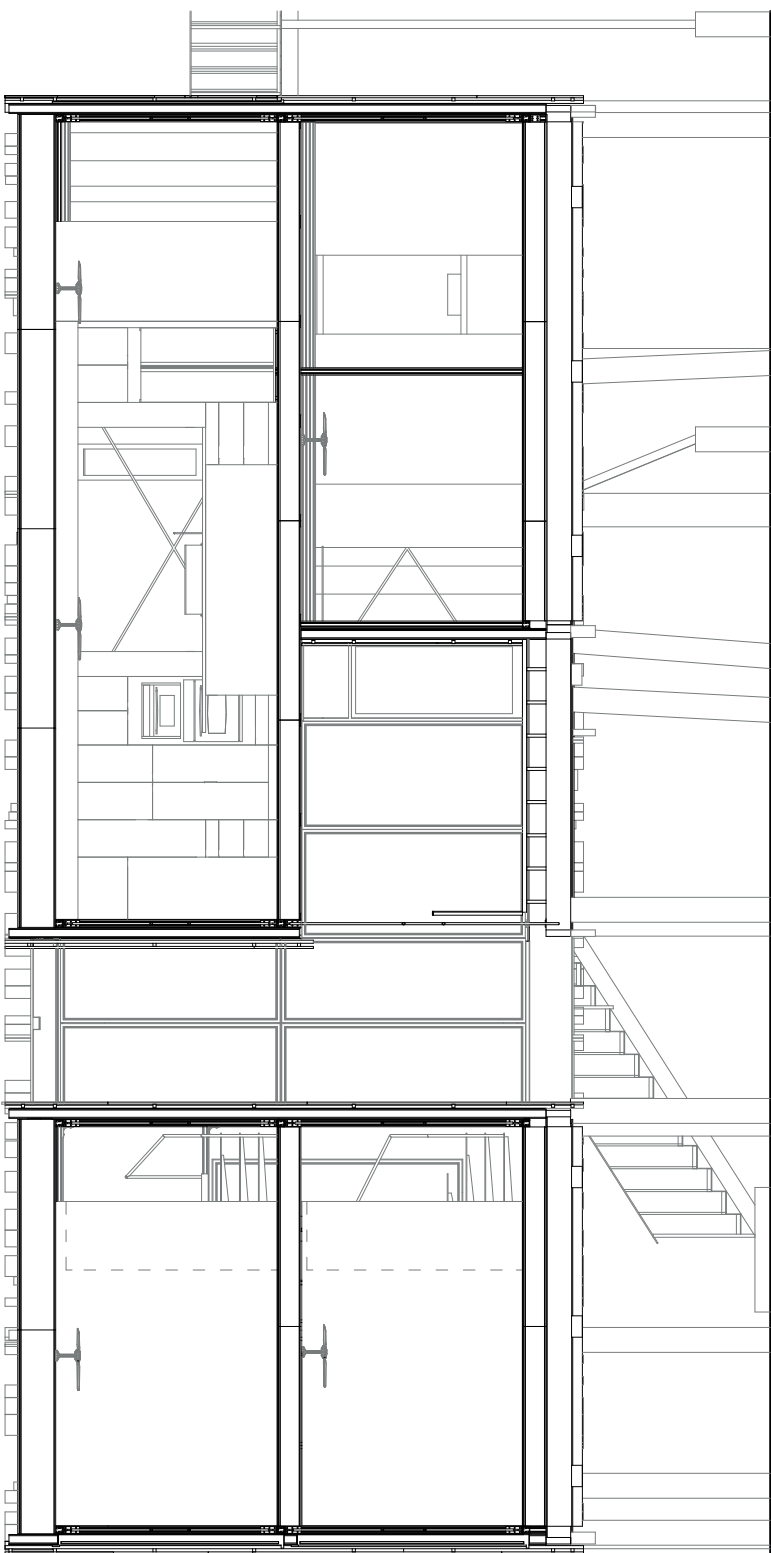


Fig. 16 : Etapes d'assemblage







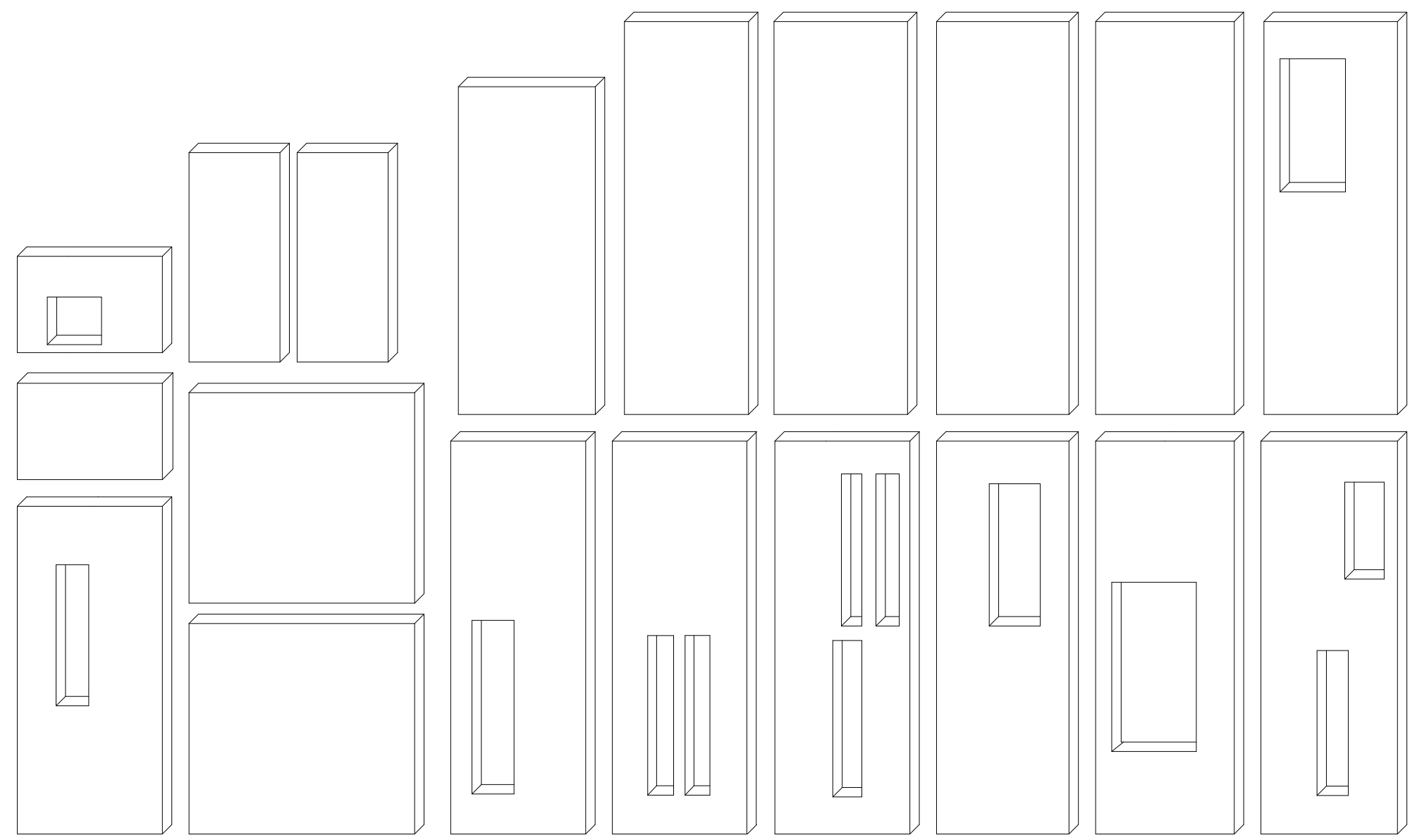
5m  
0 1 2

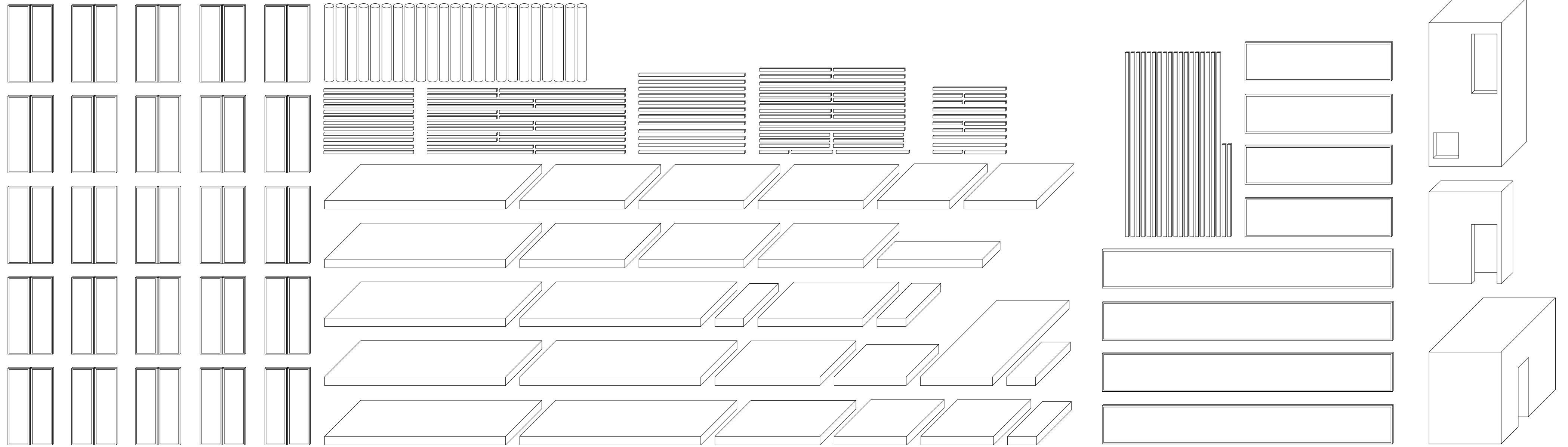
Page de droite :

Fig. 17 et 18 : Plan et coupe de la Loblolly House

Pages ci-contre:

Fig. 19 et 20 : Kit d'éléments préfabriqués de la Loblolly Hous





### 3.2 La Cellophane House de Kieran Timberlake ou la maison préassemblée en usine

La Cellophane House a été conçue et installée par Stephen Kieran et James Timberlake au « Museum of Modern Art » en 2008. Elle faisait partie de l'exposition « Home delivery : Fabricating the Modern Dwelling ». A travers ce prototype, qui se situe dans la continuité de leur recherche pour la Loblolly House, les deux associés veulent mettre en avant le potentiel de l'architecture préfabriquée. Ils explorent donc la rapidité d'assemblage, la construction démontable, le cycle de vie des matériaux ainsi que la capacité d'adapter une maison préfabriquée à différents contextes<sup>26</sup>. Les architectes ont également intégré une enveloppe recyclable, appelée « SmartWrap » permettant de produire de l'énergie grâce à l'intégration de cellules photovoltaïques. Ce projet, faisant partie des projets sélectionnés pour la construction sur un site adjacent au musée, consistait en une maison de cinq étages avec deux chambres à coucher, deux salles de bain, un salon et une salle à manger, un toit-terrasse et un abri pour une voiture. Le nom de la maison évoque son enveloppe transparente et légère qui est fabriquée à base de cellulose. (Fig. 23 et 24)

La Cellophane House est assemblée comme une voiture et les architectes ont donc conçus cette maison prototype avec les principes du « Design for disassembly » en tête. La maison doit donc pouvoir être démontée et ses éléments réutilisés en fin de vie. L'ensemble de la construction est divisé en assemblages, d'abord conçus numériquement, puis qui ont été fabriqués hors site. Les modules préassemblés sont ensuite livrés sur le site grâce à des remorques et empilés les uns sur les autres grâce à une grue permettant ainsi de construire 80 % de l'édifice en six jours. Les matériaux sont sélectionnés pour être léger, minimiser l'énergie grise et être réemployables en fin de cycle de vie du bâtiment.

La structure en profilé d'aluminium, aussi utilisée pour la

Loblolly House, est ici utilisée sur 5 étages. L'enveloppe est ensuite attachée à cette structure. Celle-ci a été conçue comme un filtre qui empêche les rayons UV ainsi que l'air chaud ou froid de rentrer. Dans la recherche de la permanence, les bâtiments conventionnels sont faits de matériaux qui sont fixé les uns aux autres en les transformant en matériaux composites ne pouvant pas être séparés. Pour la Cellophane House, Stephen Kieran et James Timberlake ont utilisé un système de cadres en aluminium. Cette structure est faite de connecteurs réversibles. Comme ce projet était un prototype pour une exposition, les deux associés ont fixé les partitions des parois intérieures et les panneaux des sols grâce à de l'adhésif. La structure doit permettre des personnalisations en fonctions des besoins et des goûts. La maison doit également pouvoir s'adapter à différents sites et climats et les espaces intérieurs doivent pouvoir être réarrangés facilement.<sup>27</sup>

Le choix d'une structure faite en profilé d'aluminium est dû au fait qu'il s'agit d'un système préexistant, disponibles et bien établie sur le marché. De plus, pour les deux architectes, ce matériau est produit industriellement permettant de concevoir à moindre coût et avec une bonne flexibilité. Bien que l'énergie grise d'un tel matériau soit élevée, l'aluminium ne rouille pas, ne nécessite pas de finition, peut être recyclé ou réemployé et est léger, ce qui réduit le coût de fondations. La maison doit non seulement pouvoir s'adapter à d'autre implantations, climat, orientation mais également permettre divers arrangements des espaces intérieurs. Hypothétiquement, elle doit pouvoir utiliser d'autre matériaux qui peuvent être opaque plutôt que transparents.

La Cellophane House est donc conçue comme une voiture. Elle est décomposée en assemblages qui doivent simplifier la construction sur le site. La première étape lors de la construction de ce bâtiment c'est les fondations en béton qui

---

27 Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling exhibit The Museum of Modern Art et al., « Cellophane House | Prefabricated Architecture & Design for Disassembly », consulté le 24 novembre 2019, <https://kierantimberlake.com/>

seront le seul élément qui ne pourra pas être récupérer lors de la déconstruction du bâtiment. Les modules sont préassemblés en usine et mesurent environ 2,4 mètres de large sur 6 mètres de long. Chaque module est composé de la structure en aluminium, des sols et des murs extérieurs. Ils sont ensuite transportés sur le site afin d'être superposés les uns sur les autres à l'aide d'une grue. Il y a neuf modules, un à l'avant et un à l'arrière du bâtiment à chaque étage. Les modules avant et arrière sont montés en premier puis connectés grâce aux éléments préassemblés qui composeront la dalle de l'étage supérieur. (Fig. 22) De plus, ces modules peuvent être décomposé en sous-assemblages. Tous les panneaux ainsi que les modules techniques, c'est-à-dire les sanitaires, sont considérés comme des sous-assemblages. Une grande part du travail a donc été transférer en usine permettant ainsi une grande précision dans la conception.

Les connecteurs sont préfabriqués en usine et leur précision est possible grâce à leur modélisation par les outils numériques. Il y a un nombre de connecteur plus important pour la Cellophane house que pour la Loblolly House. Il y a des connecteurs qui permettent d'assembler la structure ainsi que d'autres qui permettent d'assembler l'enveloppe à la structure. Le contreventement du bâtiment est assuré par des barres qui servent de tirants contre l'enveloppe du côté intérieur ainsi que sous les dalles. Ces barres nécessitent aussi différents types de connecteurs pour les reliés à la structure. Les connecteurs sont donc préfabriqués de manière très précise grâce aux outils numériques et sont plutôt variés. (Fig. 21)

On constate que lors de l'assemblage de ce kit (Fig. 25), des erreurs d'assemblages ont été faites. En effet, un décalage est survenu pendant le montage. Comme les assemblages requièrent une grande précision, il a fallu résoudre cette erreur afin de poursuivre l'assemblage du reste du bâtiment. Les marges d'erreur ne sont donc pas permises sous peine de bloquer l'avancement du chantier.

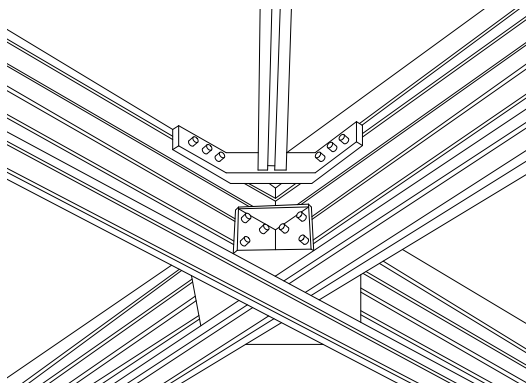
Le démontage du bâtiment est l'expérience principale au MoMA.

Il a été possible grâce à des outils basiques. Les éléments ont été organisés sur des palettes et ont pu être retirées du site en deux jours. Presque aucun déchet n'a été produit et l'énergie grise des matériaux a pu être récupéré.<sup>28</sup> Bien que la Cellophane House nécessite une variété de connecteurs et un grand nombre de petits éléments pour la structure, Stephen Kieran et James Timberlake ont développé un bâtiment qui était à la fois complètement démontable, qui répondait à des enjeux environnementaux et qui pouvait être adaptés aux goûts de ses habitants en rationalisant les composants du bâtiment grâce à la hiérarchisation des couches. Selon Stephen Kieran et James Timberlake, le numérique et l'automatisation sont donc entrain d'influencé le concept de l'industrialisation des bâtiments.

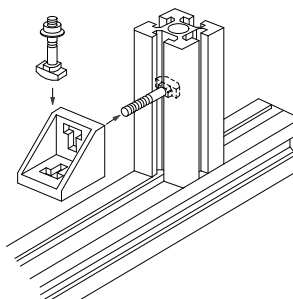
Les profilés en aluminium sont disponibles en différentes sections. En s'obstinant à travailler avec ce matériau standardisé et disponible en série sur le marché, les deux associés doivent le réinterpréter et concevoir des détails sur mesure pour adapter son usage à la construction de cet édifice.



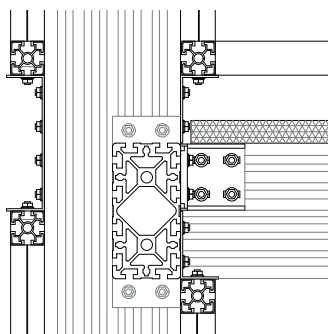




Connecteur qui fixe les barres de contreventement



Connecteur qui fixe les profilés en aluminium



Détail constructif de la connexion entre la dalle et la façade

Fig. 21 : Détails constructifs

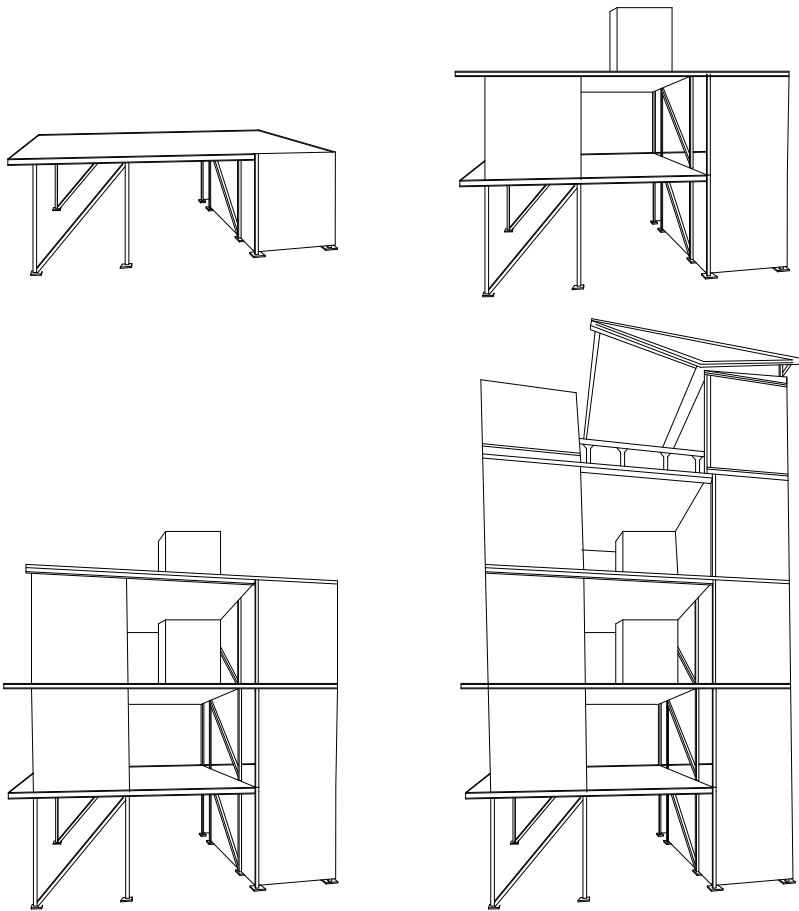
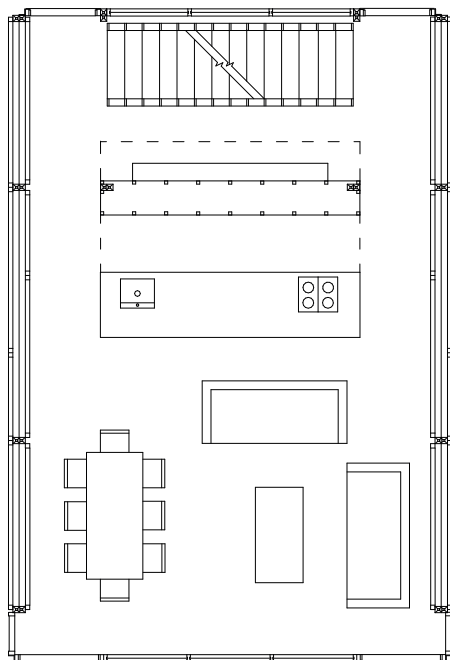
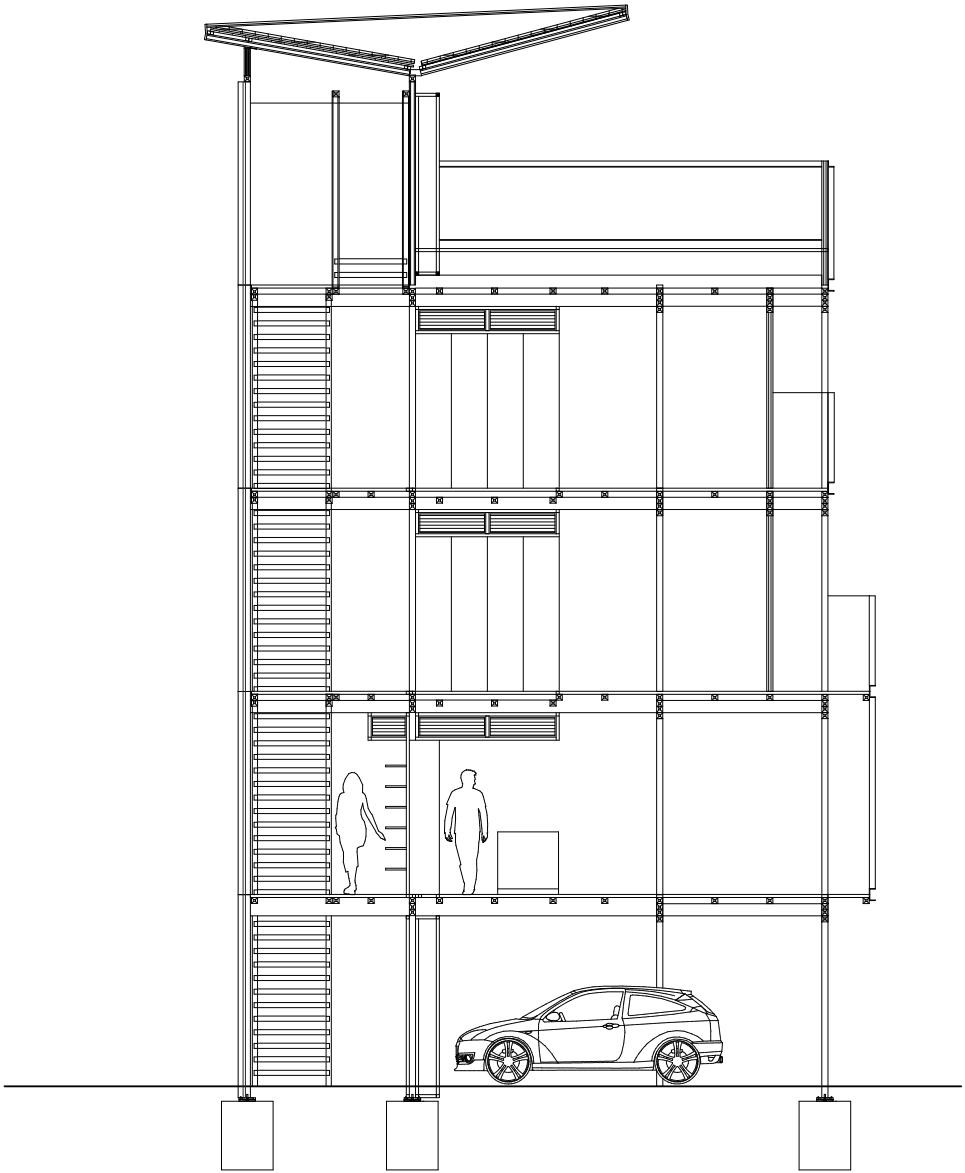


Fig. 22 : Etapes d'assemblage



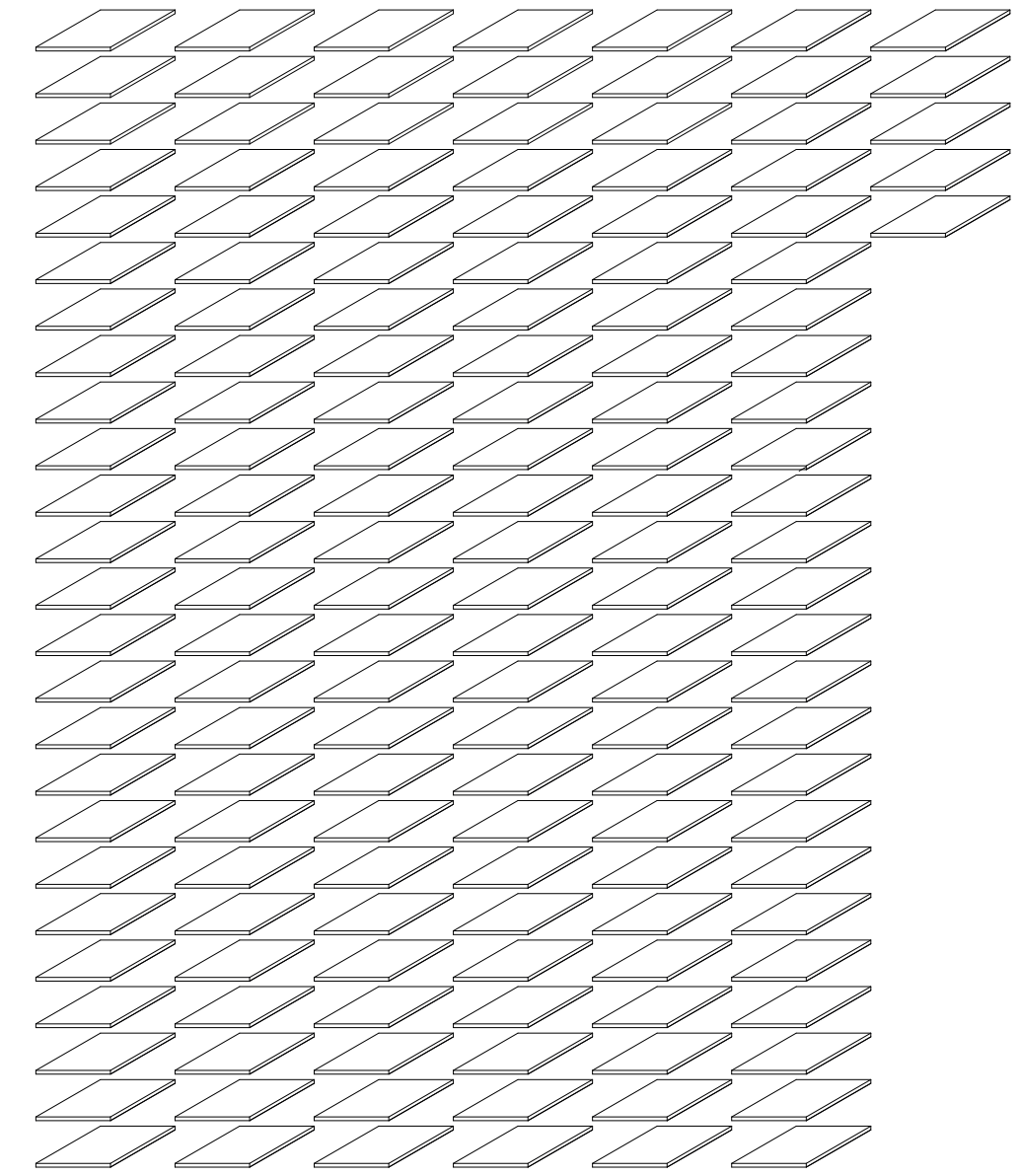
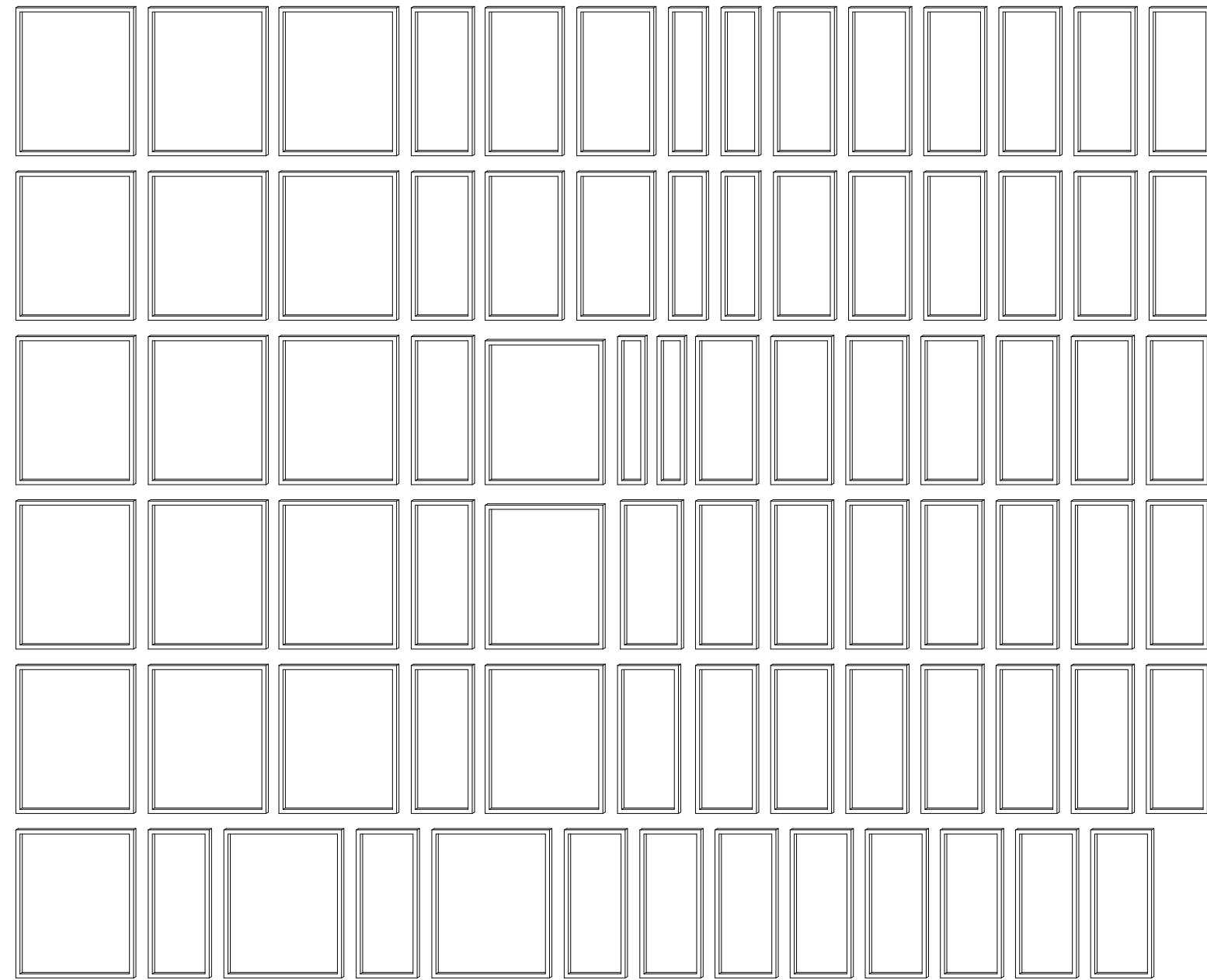
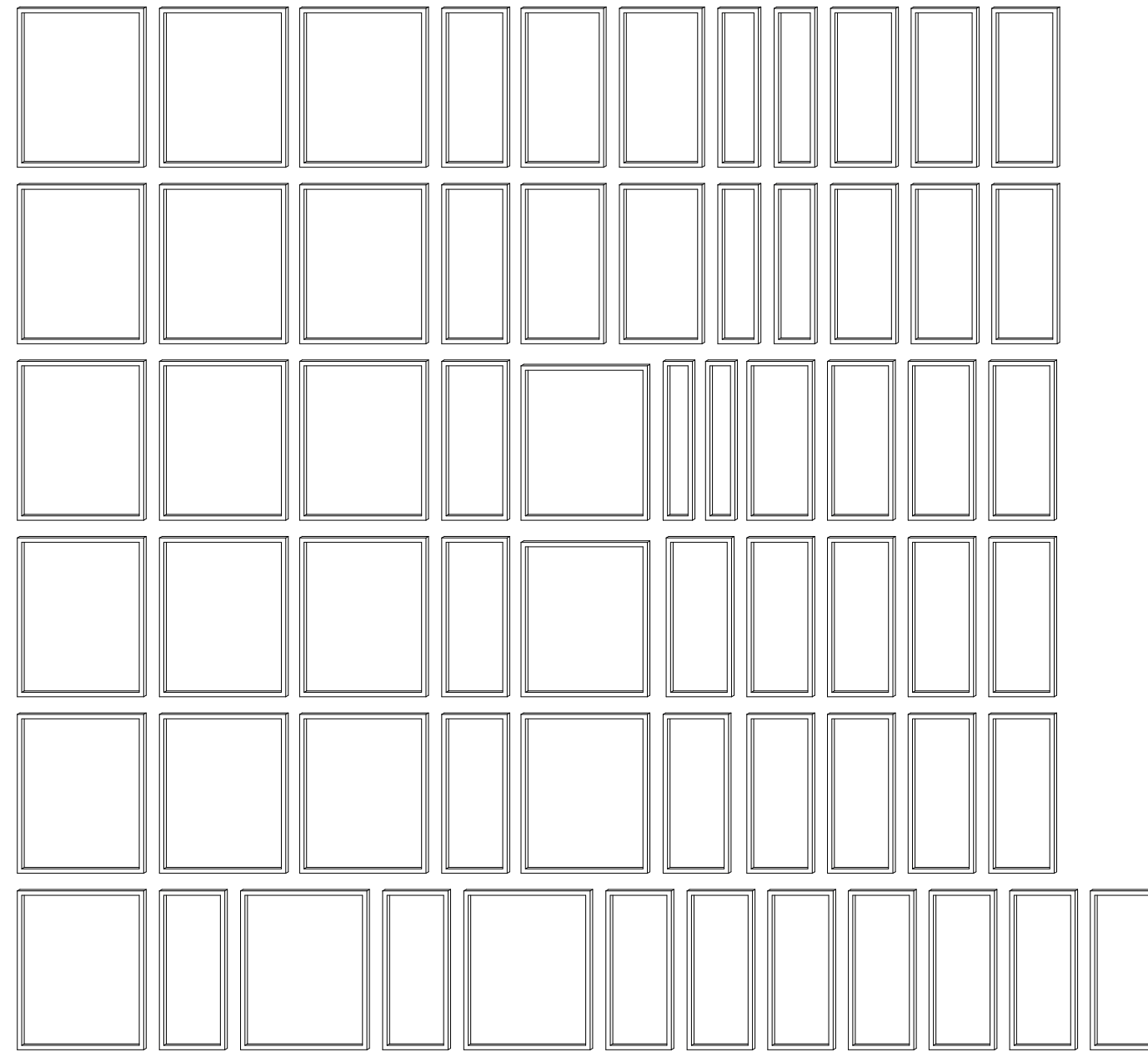


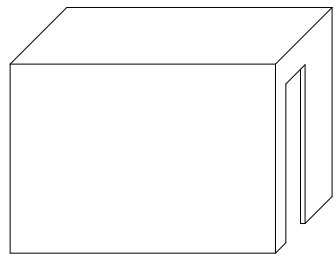
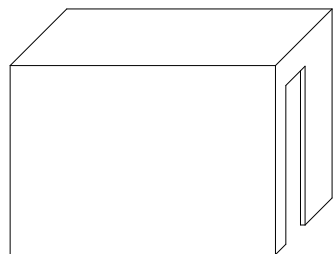
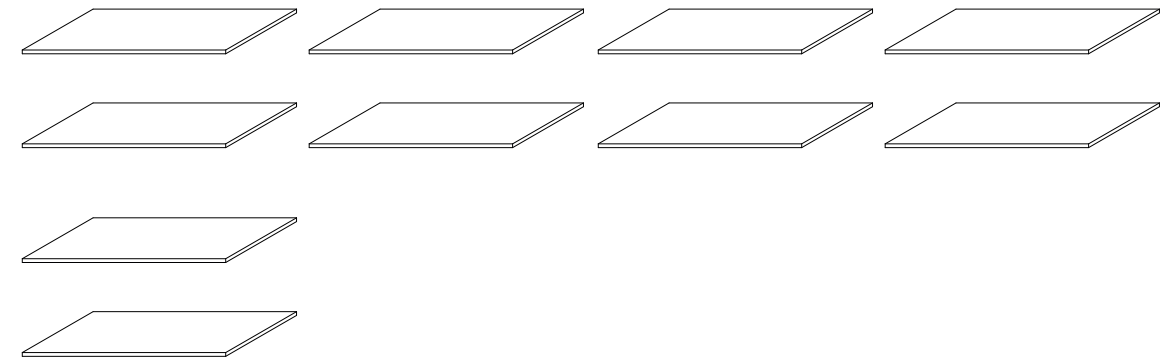
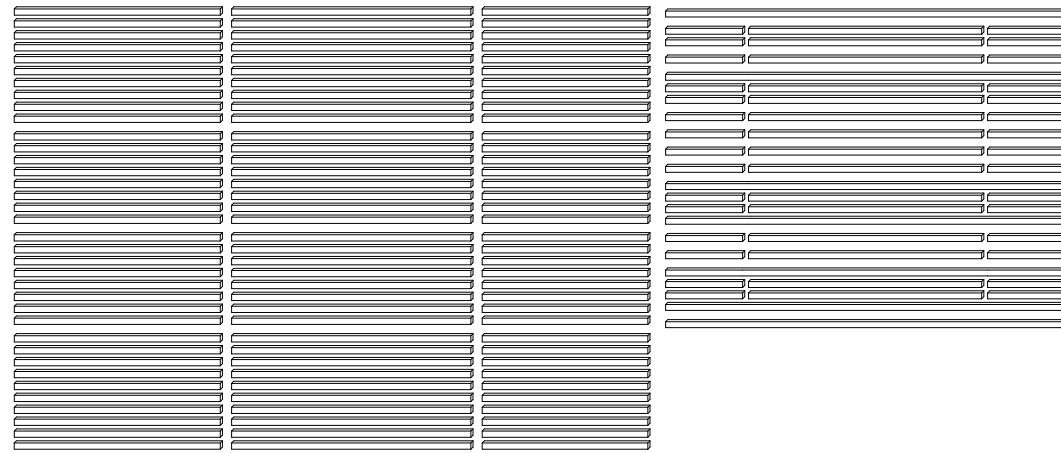
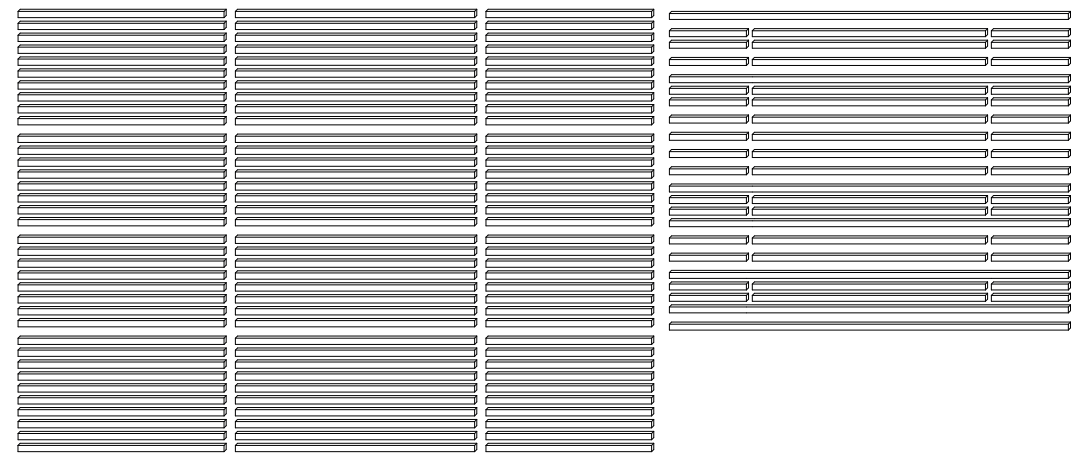
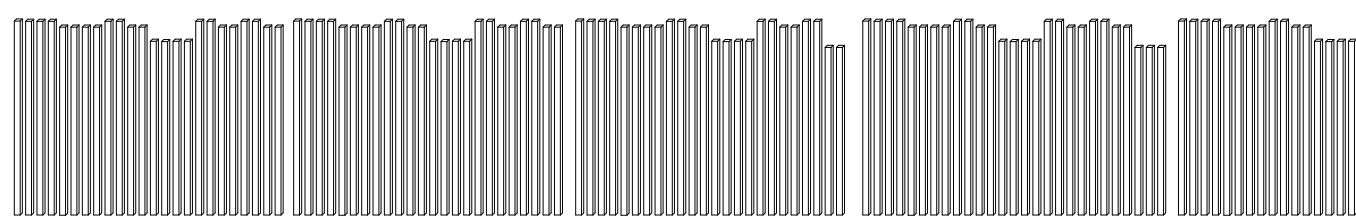
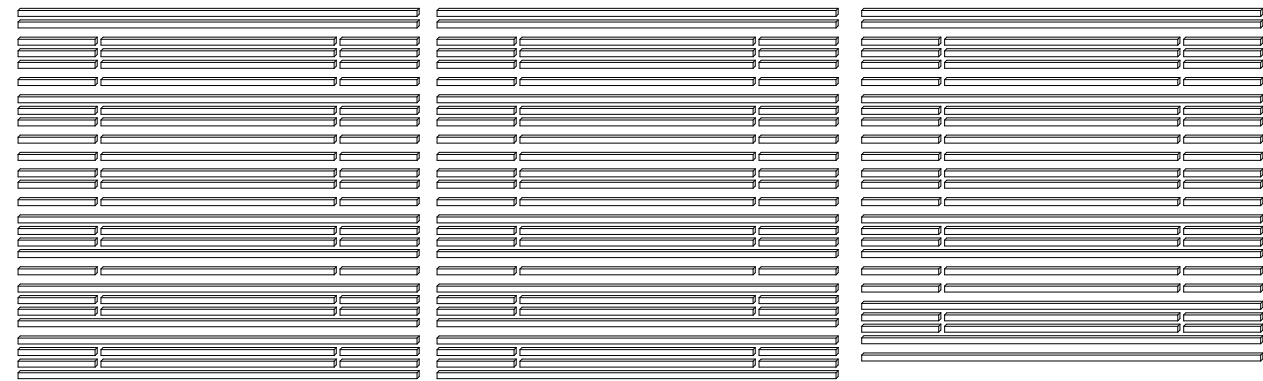
Pages précédentes :

Fig. 23 et 24 : Plan du 1er étage et coupe de Cellophane House

Pages ci-contre:

Fig. 25 : Kit d'éléments préfabriqués de la Cellophane House







### 3.3 La WikiHouse de Architecture 00 ou la dématérialisation de l'architecture

La WikiHouse a été imaginée par le bureau d'architecte Architecture 00 en 2011. Il s'agit d'un projet open-source qui permet de concevoir des maisons. Ce projet est de nature expérimental. Une librairie est disponible en ligne permettant ainsi de personnaliser sa maison grâce à SketchUp. Le but de ce projet est de développer une nouvelle industrie du logement où les habitants et des petites communautés peuvent développer leur propre maison, permettant ainsi de démocratiser le marché du logement. Pour Alastair Parvin, co-fondateur de la WikiHouse, l'architecte doit participer à la démocratisation de la production. Le projet questionne donc le rôle de l'architecte et les implications sociales de ce métier. De plus, l'un des arguments que met en avant l'architecte, c'est de mettre à disposition de la population une maison à basse émission de carbone et qui consomme peu d'énergie.

WikiHouse est soutenu par le « Open System Lab » une société à but non-lucratif situé en Angleterre et aux Pays-de-Galle. C'est un système de construction open-source auquel tout le monde doit pouvoir avoir accès. Toutefois, il est aujourd'hui limité à des constructions à deux étages maximums. Les maisons peuvent être personnalisée selon les envies des propriétaires puis elle serait découpée et assemblée par ses habitants. La construction de ces maisons est faite à partir de panneaux en contre-plaqué produit industriellement. Les pièces sont découpées par une machine CNC (Computer Numerical Control) afin d'obtenir des éléments qui s'assemblent comme un puzzle grâce à des tenon et mortaise. Cette machine utilise un programme qui découpe les éléments automatiquement sans qu'aucun travail manuel ne soit nécessaire. Il s'agit donc d'un système de construction fabriqué numériquement qui permet à tout un chacun de construire sa propre maison. <sup>29</sup>

Selon le « Open System Lab », nous somme aujourd'hui dans

la quatrième révolution industrielle. Celle-ci se caractérise par l'utilisation de l'automatisation, des outils numériques, des matériaux réemployables. Des enjeux de développement durables sont donc au centre de ce projet. En effet, l'un des points importants est la fabrication locale. Les concepteurs de ce projet prônent l'importance du transfert des informations numériques à des fabricant locaux utilisant des CNC. Cela permet à la fois de développer l'économie de la région et d'utiliser du bois local. En combinant l'outil numérique utilisé par les architectes avec l'automatisation en usine, on peut obtenir un kit d'éléments préfabriqués d'une haute précision, à faible coût, et produit localement. La maison est alors facile à assembler car elle est composée d'éléments qui se connectent entre eux comme des lego. De plus, cet assemblage peut se faire facilement par les propriétaires.<sup>30</sup>

Afin que ce projet puisse se réaliser, le propriétaire doit trouver un terrain constructible puis rechercher dans la librairie open-source WikiHouse le fichier du projet qu'il souhaite utiliser. Il doit ensuite obtenir les autorisations nécessaires et son projet doit être approuvé par un architecte ou un ingénieur. Un fabricant local possédant une CNC doit alors lui découper les pièces. Les pièces sont ensuite numérotées selon leur ordre de montage pouvant ainsi être assemblée par des ouvriers peu qualifiés ou même les habitants. Cette maison devient donc comme un grand kit IKEA.

La MicroHouse (Fig. 28 et 29) est un projet d'une maison d'une chambre à coucher d'une surface de 37.5 m<sup>2</sup> qui utilise le système de la WikiHouse et qui est disponible sur « Github repo ». Elle a été conçue pour être construite en Grande-Bretagne en 5 jours. Le dessin des pièces est disponible sur internet et peut être envoyé sur une machine CNC. Les pièces sont découpées dans des planches de contre-plaqué standard de 2440 mm par 1220 mm et de 18 mm d'épaisseur. Une fois que le kit de pièces ont été créés, elles sont transportées

---

30 Open System Lab, « Using WikiHouse : A introductory guide for your project », 2018.

sur le site par camions. Tous d'abord, les fondations doivent être mise en place sur le chantier. Les fondations créées doivent pouvoir supporter les solives sur lesquels reposent le bâtiment. Une plate-forme temporaire d'assemblage est ensuite créée sur ses solives. Elle doit être stable car la connexion entre la pièce se fera par martellement.

La construction se fait par assemblage de plusieurs sections du bâtiment. Chaque section est faite de deux couches qui sont liées ensemble. (Fig. 26) Les sections sont ensuite soulevées à la verticale et positionnée à 600 mm d'intervalles les unes des autres. Des pièces servant de connecteur relient les sections entre elles.

Les panneaux intérieurs et extérieurs qui viennent encapsuler la structure doivent ensuite être installés. C'est lors de ce processus que l'isolation ainsi que les tuyauteries sont mises en place. Ces panneaux doivent généralement encore être vissés bien qu'ils soient également conçus selon le système de tenon et mortaise.

Les ouvertures sont découpées afin d'installer les portes et les fenêtres et la barrière vapeur doit être mise en place. Les revêtement extérieur et intérieur, qui ne font pas partie du kit découpé, sont installés en dernier.<sup>31</sup> (Fig. 27)

Grâce à l'automatisation et au numérique, nous pouvons constater que le détail constructif est standardisé. En effet le système en tenon et mortaise est appliqué à toutes les pièces qui sont manufacturés. En principe, les pièces peuvent même être interchangeables puisque le bâtiment est basé sur une répétition de sections qui sont connectées entre-elles par des pièces qui sont elles aussi interchangeables. Le système est basé sur l'interopérabilité. Il doit donc pouvoir intégrer d'autres composantes présentes sur le marché, tels que les fenêtres, puisqu'il est basé sur des principes de modularité. Cependant, ce bâtiment démontable est fait de pièces spécifiques et qui s'assemblent entre elles. On est donc face à un système fermé. Elles seraient donc difficilement réemployables tel quel pour

---

31 « MicroHouse — Wikifab », consulté le 2 janvier 2020, <https://wikifab.org/wiki/MicroHouse>.

un autre projet. De plus, un système étranger à celui-ci est complexe à intégrer.

Nous pouvons souligner que ce système permet de tenir compte des principes du « Design for Disassembly ». En effet, Le système permet de concevoir en séparant les couches du bâtiment, les assemblages sont réversible, les matériaux sont biodégradables et chaque pièce est identifiable facilement. Malgré tous, des visses sont encore nécessaires afin de fixer certains éléments. De plus, le kit d'élément est surtout pensé pour la structure. (Fig. 30) Contrairement à une conception préfabriquée tel qu'on la fait usuellement, on ne conçoit pas des éléments déjà composés de l'isolation et de l'étanchéité. Ces couches doivent être ajoutée sur le chantier. Les risques qui sont généralement minimiser grâce au travail en usine sont ici plus important surtout que le matériau utilisé est du bois, matériaux qui est extrêmement sensible à l'humidité.

L'architecture open source participe donc à la fois à une production décentralisée et à une nouvelle forme d'économie à faible émission de carbone. L'industrialisation a impliqué la répétition d'élément mais grâce à l'automatisation, le potentiel de la personnalisation et de l'individualité semblent plus important. En effet, Les matériaux sont non seulement biodégradables mais les pièces sont également découpées dans des panneaux standardisés et qui sont présent en abondance sur le marché. Le même type de panneau permet donc de concevoir des bâtiments différents fait de diverses pièces. De plus, le savoir-faire peut être transmis à une machine qui conçoit les éléments de manières sûr et efficace, réduisant ainsi le gaspillage et les déchets.



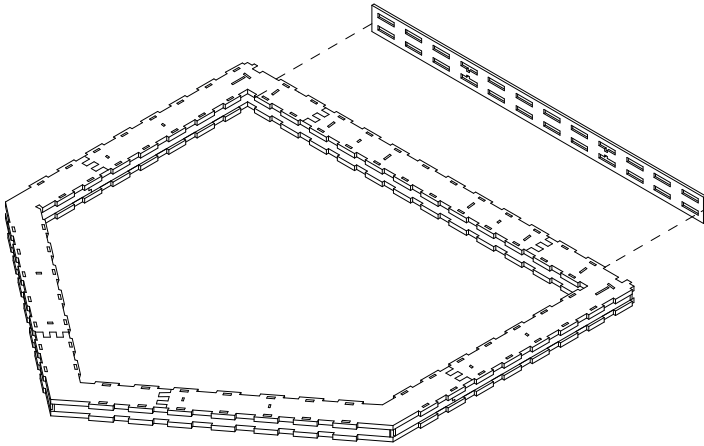


Fig. 26 : Assemblage d'une section

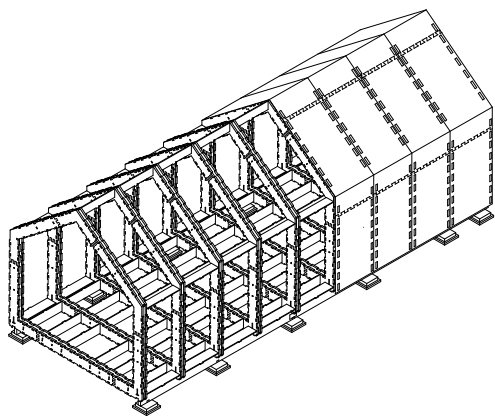
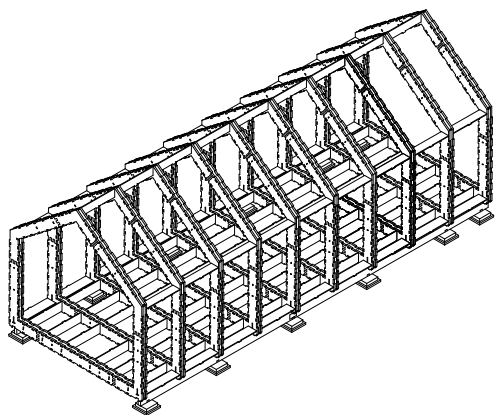
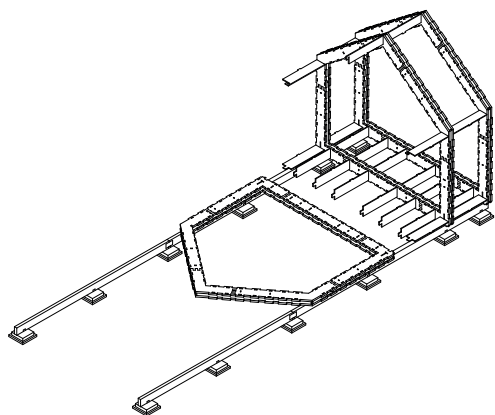
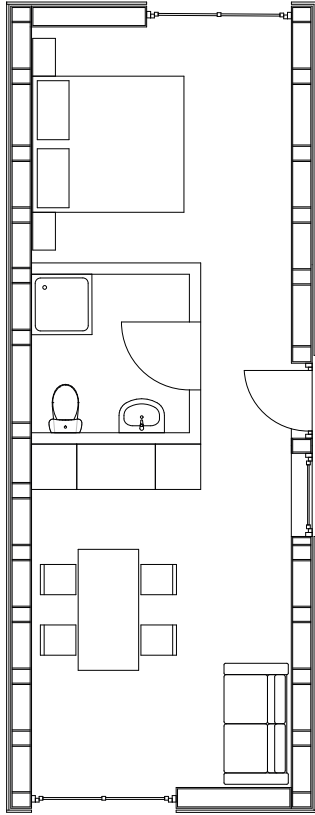
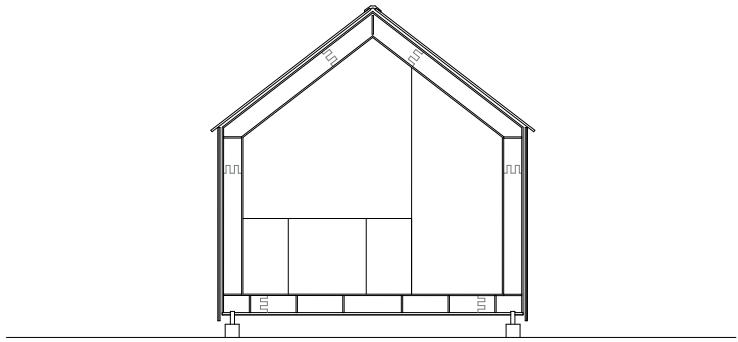


Fig. 27 : Etapes d'assemblage





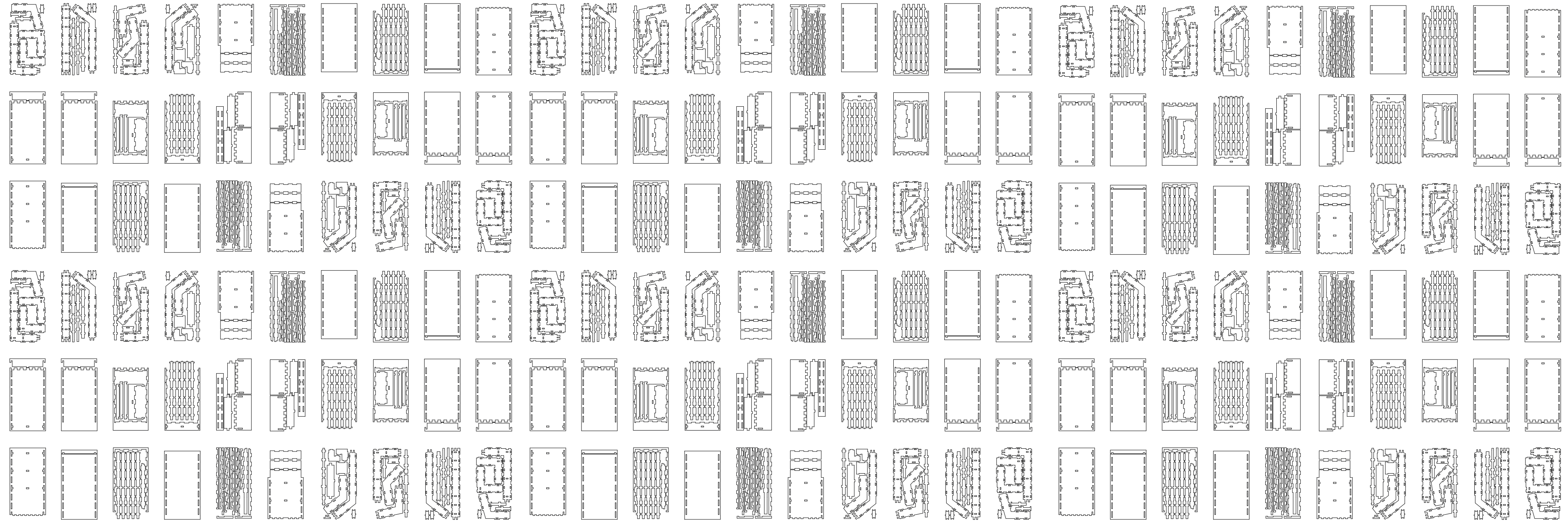


Pages précédentes :

Fig. 28 et 29 : Plan et coupe de MicroHouse

Page ci-contre:

Fig. 30 : Kit d'éléments préfabriqués de la MicroHouse





### 3.4 Les enseignements apportés

La construction à partir d'un kit d'élément préfabriqué est aujourd'hui utilisée non plus uniquement pour des raisons sociales ou économiques mais également environnementales.

De nos jours, le secteur de la construction est l'un des plus grands consommateurs d'énergie et producteur de déchets et d'émission carbone. Durant le cycle de vie d'un bâtiment, l'énergie consommée est attribuée à l'énergie grise, soit l'énergie nécessaire à la production, au transport et à l'assemblage des éléments de construction, ainsi qu'à l'énergie opérationnelle qui est l'énergie utilisée sur l'entier du cycle de vie du bâtiment afin de chauffer ou refroidir l'édifice.

Comme nous l'avons déjà fait précédemment, nous allons comparer les trois projets précédents. Il est intéressant de constater que chacun de ces projets souhaitent permettre une adaptabilité aux besoins des habitants. De plus, à partir d'éléments standardisé, un kit d'élément est créé ou réinterprété et doit permettre de concevoir une diversité de projets en utilisant des matériaux réemployables.

Stephen Kieran et James Timberlake ont conçus leurs projets en préfabriquant ces éléments en kit et en se concentrant sur les enjeux environnementaux. Dans le cas de la Loblolly House, le joint entre les éléments préfabriqués est pensé afin de permettre un assemblage aisé sur le chantier avec des outils banales mais également permettre un démontage futur. La connexion entre les élément constituant la structure devient donc capitale puisqu'il est visible à l'intérieur du bâtiment. Cependant, la connexion entre la structure et les panneaux préfabriqués est moins affirmée. Ce sont donc des connecteurs assez simples mais d'une grande précision dans leur conception. Les éléments utilisés dans le bâtiment sont des produits standardisés et produits en série sur le marché et qui sont ici réutilisés et réinterprété dans le bâtiment.

Pour la Cellophane House, les mêmes principes sont utilisés

mais le concept de base est poussé plus loin car la maison est conçue comme un prototype. En effet, la structure est faite des mêmes barres d'aluminium standardisées mais cette fois-ci, les architectes ont conçus la maison avec des modules tridimensionnelle préassemblés en usine. La quantité de matériaux utilisés est toutefois moins rationnelle. En effet, le nombre de barres d'aluminium à été démultiplier et un grand nombre de détails de connection ont du être développés. Le système constructif a donc une forte influence sur l'architecture qu'il produit mais subit le choix préalable de l'aluminium comme matériau de construction. Contrairement à ces deux exemples où l'ossature est affirmée, dans le cas de la WikiHouse, l'ossature de la maison finit par être recouvertes par les revêtement intérieur et extérieur. Le joint n'est même plus affirmé. Les pièces sont toutes similaires et sont toutes découpée dans des panneaux en contreplaqué de mêmes dimensions. La conception du détail est donc laissée à une machine et l'architecte ne conçoit plus le bâtiment dans sa globalité.

Le volume de ces projets sont également très différents. La Cellophane House est basée sur des modules tridimensionnels permettant un agrandissement et une personnalisation de la maison en utilisant le même système. La Loblolly House n'a pas un sens d'agrandissement prédéterminée. Elle donne donc plus de liberté aux architectes. Dans le cas de la WikiHouse, l'agrandissement se ferait de manière linéaire en rajoutant des sections supplémentaires. La largeur de la maison est cependant prédéterminée par le dimensionnement initial des sections, ce qui donne moins de liberté aux architectes.

Afin de répondre au problème énergétique et à l'augmentation des déchets, les architectes tentent de mettre en place des approches permettant de prolonger le cycle de vie des bâtiments et des matériaux. Les méthodes digitales et le numérique sont entrain de changer la manière dont les bâtiments sont conçus mais également la façon dont les matériaux sont utilisés et assemblés. En construisant des édifices qui soient adaptables

et qui puissent être réparés ou déconstruits permettrait de réduire l'énergie utilisée pour les rénovations ou les démolitions.





## Conclusion

Aujourd'hui, le secteur industriel pourrait jouer un rôle majeur dans la réponse aux enjeux de développement durables. L'architecte ne peut pas non plus se contenter de subir les conséquences environnementales et doit également collaborer davantage avec les industriels et les ingénieurs.

Les architectes qui ont conçus des maisons préfabriquées ont souvent privilégié l'expression des matériaux, les techniques et la technologie utilisées pour construire l'édifice. Les industriels ont tendance à se positionner différemment. Ils se contentent de répliquer un style communément accepté par la population afin de faire du bénéfice. Ces deux approches sont visibles non seulement au début de l'industrialisation mais encore aujourd'hui.

Les architectes du début de l'industrialisation ont essayé d'inventer de nouveaux systèmes préfabriqués. De plus, ils ont aussi tenté d'implanter des technologies et des systèmes analogues à ceux de l'industrie automobile. Cette approche est encore visible aujourd'hui. En effet, la préfabrication est à la fois synonyme de rapidité, de moindre coût mais également d'économie de matière et de diminution de déchets.

Entre le début de l'industrialisation et aujourd'hui le secteur a évolué grâce au numérique et à l'automatisation. Grâce au développement technologique, il serait donc possible de fabriquer des éléments qui soient plus rationnelles et standardiser permettant ainsi un réemploi des composants et des éléments de construction.

Le rôle de l'architecte a également évolué. En effet, les architectes du début du XIX<sup>e</sup> siècle concevaient leur propre système de construction et leur propre kit. Ils participaient à la conception des édifices dans leur globalité. Face aux développements technologiques, les produits de construction se sont complexifiés mais également standardisés. Face au

enjeux environnementaux, l'architecte est plutôt amené à réinterpréter et réutiliser les matériaux déjà présents sur le marché ou dans la région.

De la même manière que les architectes tels que Jean Prouvé concevaient les édifices dans leur globalité, l'outil numérique et l'automatisation peuvent aujourd'hui aider l'architecte à participer à la conception du projet dans ses moindres détails. Le rôle de l'architecte est donc de servir d'intermédiaire entre les maîtres d'ouvrage et les industriels en concevant des bâtiments qui puissent non seulement s'adapter aux besoins et aux goûts des habitants et qui puissent également être déconstruits afin de répondre aux enjeux environnementaux.

La construction en kit d'éléments préfabriqués donne donc la possibilité aux architectes de concevoir des bâtiments démontables. Le kit peut répondre aux enjeux de développement durable car les édifices peuvent être conçus en minimisant les déchets grâce aux procédés de préfabrication et peuvent permettre de concevoir des bâtiments adaptables aux besoins et envies des propriétaires et dont les éléments sont réemployables.





## Bibliographie

Debons, Maurice. « Fabrication sur mesure: Réflexion autour d'une architecture préfabriquée sur la base de trois exemples choisis », 2014.

Downs, Jill, Jim Morrow, et Christopher Baas. « A new standard for living : Lustron Houses in Indiana », s. d.

« Erection Manual Table of Contents ». Consulté le 31 décembre 2019. <http://ohiohistory.org/visit/exhibits/ohio-history-center-exhibits/1950s-building-the-american-dream/lustron-about/lustron-library/erection-manual-toc>.

Franceschi, Marine. « Préfabrication, développement durable et réversibilité : Le recours à la préfabrication permet-il de concevoir une architecture durable et réversible ? » s. d.

Giedion, Sigfried. *Walter Gropius : l'homme et l'oeuvre*. Paris: Editions Albert Morancé, 1954.

Graf, Franz, Yvan Delemontey, et École polytechnique fédérale de Lausanne, éd. *Architecture industrialisée et préfabriquée: connaissance et sauvegarde ; [Journées d'études internationales - Lausanne, Laboratoire des Techniques et de la Sauvegarde de l'Architecture Moderne (TSAM), Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC), Ecole Polytechnique Fédérale 23 - 24 juin 2011]* = *Understanding and conserving industrialised and prefabricated architecture*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2012.

Guy, Brad, et Nicholas Ciarimboli. « DfD: Design for Deconstruction in the built environment; a guide to closed-loop design and building ». The Pennsylvania State University., 2016.

Herbert, Gilbert. *The dream of the factory-made house: Walter Gropius and Konrad Wachsmann*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1984.

Ishii, Isamu. « Kcjima Technical Research Institute », 1999.

Kieran, Stephen, et James Timberlake, éd. *Cellophane House: KieranTimberlake*. Philadelphia: KieranTimberlake, 2011.

Kieran, Stephen, et James Timberlake, *Loblolly House: elements of a new architecture*. 1st ed. New York: Princeton Architectural Press, 2008.

Knerr, Douglas. *Suburban steel: the magnificent failure of the Lustron Corporation, 1945-1951*. The urban life and urban landscape series. Columbus: Ohio State University Press, 2004.

Licess-Torres, Cynthia, et Kim A. O'Connell. « The illustrious Lustron: A guide for the disassembly and preservation of america^s modern metal marvel », 2007.

« MicroHouse — Wikifab ». Consulté le 2 janvier 2020. <https://wikifab.org/wiki/MicroHouse>.

Open System Lab. « Using WikiHouse : A introductory guide for your project », 2018.

Prouvé, Jean. *Jean Prouvé: la maison tropicale = Jean Prouvé: the tropical house*. Paris: Centre Pompidou, 2009.

Prouvé, Jean, et Claire Stoullig. *Jean Prouvé*. Paris : Nancy: Somogy ; Musée des beaux-arts, 2012.

« Loblolly House | Prefabricated Architecture Integrated with Nature ». Consulté le 24 novembre 2019. <https://kierantimberlake.com/>.

Staib, Gerald, Andreas Dörrhöfer, et Markus Rosenthal. *Components and Systems: Modular Construction – Design, Structure, New Technologies*. Walter de Gruyter, 2013.

« Cellophane House | Prefabricated Architecture & Design for Disassembly ». Consulté le 24 novembre 2019. <https://>

kierantimberlake.com/.

« WikiHouse ». Consulté le 2 janvier 2020. <https://www.wikihouse.cc/Resources>.





## **Crédits photographiques**

Toutes les images ont été redessinées par l'auteur de l'énoncé à partir des références provenant de la bibliographie. Les images réalisés par l'auteur sont les Figures 5, 6, 10, 14, 19, 20, 25, 30.





