



**HAL**  
open science

# Caractères des structures en bois dans l'histoire de l'architecture

Mathieu Sudres

► **To cite this version:**

Mathieu Sudres. Caractères des structures en bois dans l'histoire de l'architecture. Architecture, aménagement de l'espace. 2016. dumas-01764848

**HAL Id: dumas-01764848**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01764848>**

Submitted on 12 Apr 2018

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

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

Copyright

## Mémoire de séminaire : conditions de consultation

Ce document est protégé par le droit d'auteur (art. L. 112-1 du Code de la propriété intellectuelle).

L'auteur du document accorde les droits d'usages suivant :

	OUI	NON
Consultation sur place	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Impression	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diffusion Intranet	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Diffusion Internet	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Exposition	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Publication non commerciale	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

# CARACTÈRES DES STRUCTURES EN BOIS DANS L'HISTOIRE DE L'ARCHITECTURE

MATHIEU SUDRES  
DIRECTRICE DE MÉMOIRE : FRANÇOISE BLANC

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# CARACTÈRES DES STRUCTURES EN BOIS DANS L'HISTOIRE DE L'ARCHITECTURE

MATHIEU SUDRES  
DIRECTRICE DE MÉMOIRE : FRANÇOISE BLANC

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement,

Françoise Blanc qui a encadré ce mémoire avec patience, qui m'a aidé à préciser ma recherche pour établir une méthodologie de travail,

Les enseignants qui m'ont accompagné et conseillé : Professeurs Ari Rahikainen, Maria Pesonen et Hannu Tikka, qui ont toujours été critiques vis-à-vis de mon travail et m'ont permis de développer ma propre culture de l'architecture en bois,

Je remercie aussi Patrick Arotcharen et Lucas Rambeau pour l'attention qu'ils ont porté à mon travail en me faisant partagé leur expérience dans l'utilisation du bois en architecture contemporaine,

Mes remerciements vont également à la fondation Aalto, pour leur dévouement et leur gentillesse et l'aide qu'ils m'ont apportée dans la recherche de documents relatifs à la maison AA d'Alvar Aalto.

Je remercie sincèrement Jouko Loikkanen pour sa précieuse aide dans la traduction et la compréhension de documents relatifs à la AA house d'Alvar Aalto.

Je remercie enfin mes parents, pour leur relecture critique et leurs conseils de rédaction.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# Abstract

Timber construction has been a way to provide shelter and protection for humanity from time immemorial. It is a natural material, available in any part of our world and for that reason, the wood is our faithful partner to build houses and buildings everywhere since ages.

This material has some incredible properties that make it strong but flexible, and can be use in many ways such as beam, pillar and piles. Step by step, year after year, humans have learnt from it new skills and knowledge. They developed news tools in order to perform new mechanical assemblies and new timber construction methods as well.

It is fascinating to see how the human intelligency has provided new efficient construction methods over the time. From just few branches under a tree, they moved toward the hut “the origin of the architecture” said Vitruve in his “traité pour l’architecture”. The hut has been the first shelter made by the human. Even though the concept was quite simple, we will see later how clever and poetic it was in our analysis.

From the origin we will trace the history of the timber construction. The analysis will also go through the wood industry, the prefabrication system, and the new digital tools. Some examples will illustrate those different steps in order to understand how the wood is a support for innovation in architecture. For instance, buildings such as AA house from Aalto, or Viikki Church from JKMM architects will be analysed.

As a last stage, the analysis will move toward new issues in timber construction: forest management and regulation in order to understand how architects could improve this material and its potential in architecture. That part is also concern about new tools in wooden architecture, including digital conception (parametric design for instance), and digital tools (CNC, robot...). They aim to optimize geometry, time, weight, and create new architectural potentials. Following the historical analysis, the goal is to highlight how those tools will once again revolutionize the architecture of tomorrow.

# TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	3
Abstract	4
Sources directes	6
Sources savantes	6
Introduction	7
Méthodologie	8
<b>1.ÉTAT DE L'ART.....</b>	<b>10</b>
1.1 Caractéristiques du bois	11
1.1.1 Quelques grandes données	11
1.1.2 Anatomie du bois	12
1.2 architecture nomade	14
1.2.1 Contexte historique	14
1.2.2 La cabane lapone	15
1.3 Architecture sédentaire	17
1.3.1 Premiers systèmes de fondation	17
1.3.2 La maison en rondins	17
<b>2. INDUSTRIALISATION DES SYSTÈMES .....</b>	<b>21</b>
2.1 La préfabrication	23
2.1.1 Contexte	23
2.1.2 Logiques combinatoire	24
2.2 Cas d'étude	27
2.2.1 Le General Panel System	27
2.2.2 AA House	31
2.2.3 Viikki Church	36
2.2.4 Grille de synthèse	40
<b>3. DES PISTES POUR LE BOIS AUJOURd'HUI... 43</b>	<b>43</b>
3.1 Les gridshells	45
3.2 Le défi de la hauteur	48
3.3 Outils numériques	50
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>52</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>55</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>56</b>
Annexe A : AA House (Alvar Aalto)	57
Annexe B : VIKKI CHURCH	59

## Sources directes

Conférence «*Eléments pour comprendre l'histoire du bois dans l'architecture*»

Jean-Claude Bignon (2012, Les Grands Ateliers)

School of Architecture, Tampere University of Technology : Professeur Ari Rahikainen, Maria Pesonen, Hannu Tikka, cours «*Finnish Wood Architecture*», 2014-2015

JKMM architects, Samuli Miettinen (Viikki Church, rencontre en 2015)

Conférence TED «*Why we should build wooden skyscrapers*» Michael Green (2013, New-York)

Agence d'Architecture Patrick Arotcharen : Patrick Arotcharen, Lucas Rambeau :

- Projet de la Halle des Mécaniques à Toulouse (2014)

- Projet de Brazza à Bordeaux (2015)

## Sources savantes

Bresson Thérèse et Jean Marie, ed. Dunod, «*Maison de bois, Architecture Scandinaves*», 1993

Stungo Naomi, ed. Laurence King Publishing «*The new wood architecture*», 2001

Tiainen Jussi, ed. Rakennustieto Publishing, «*Wood architecture in Finland*», 2008

Oberg, F. R., ed. Technical Press, «*Heavy Timber Construction*», 1968

Desch H. E., ed. Timber Press, «*Timber, its structure properties and utilisation*» 1980

Costz Duran Sergi, ed. Loft Publications, «*New Prefab*», 2009

Ruske W., ed. Denges, Delta & Spes «*Structure en bois*», 1980

Österlund Toni, Tanska Tuuliki, ed. DigiWoodLab, «*Algoritmit Puurakenteisissa*», 2014

Wirz Fulvio, ed. Le Penseur, «*Algorithms aided design*», 2013

Pracht Klaus, ed. Le Moniteur, «*Les systèmes constructifs en bois*», 1981

Kolb Josef, ed. PPUR, «*Bois, système constructif*», 2012

Dickson Michael, Parker Dave, ed. Routledge, «*Sustainable Timber Design*», 2015

Le Moniteur, *Dossier spécial bois*, 3 avril 2015

Wachsmann Konrad, ed. Birkhäuser Architectur, «*Building the wooden house, technique and design*», 1995

Graf Franz, ed. PPUR, «*Architecture industrialisée et préfabriquée: connaissance et sauvegarde*» 2012

Korvenmaa Pekka, Bergdoll Barry, Christensen Peter, ed. Museum of Modern Art, «*Home Delivery: Fabricating the Modern Dwelling*» 2008

Puech Jean Marie, 2008, rapport «*Mise en valeur de la forêt française et développement de la filière bois*»

Bouchain Patrick, ed. Actes Sud, «*Construire Autrement, comment faire ?*», 2006.



# Introduction

Le bois est un matériau fascinant. Il est tendre, accessible, souple, nourrit les rêves des enfants et des architectes. Son histoire est faite d'une succession d'innovations au fur et à mesure que l'Homme a expérimenté des techniques de mise en œuvre de plus en plus perfectionnées, permises par une meilleure connaissance du matériau. En même temps, le développement progressif de l'industrialisation avec des outils de coupes et d'usinage mécanique a accéléré son utilisation avec l'invention des premiers systèmes préfabriqués.

Le bois retranscrit l'intelligence et la créativité humaine tout au long de sa longue histoire, qui s'étend de la préhistoire à aujourd'hui. Son abondance et sa proximité l'ont très vite rendu indispensable comme partenaire d'une construction durable et pérenne. Matériau aux multiples propriétés, il est le support de traditions, de légendes et d'onirisme depuis des millénaires. Depuis les premières cabanes jusqu'aux bâtiments contemporains en ossature bois, il se transforme, évolue, se perfectionne et permet de développer de nouvelles architectures et de nouveaux récits constructifs.

Ainsi, nous proposons une analyse des pratiques constructives essentiellement basée sur l'expérience finlandaise, avec l'objectif de démontrer la capacité du bois à répondre aux défis architecturaux contemporains. Nous tenterons de répondre à la problématique suivante : *sur quels fondements historiques et techniques repose l'architecture en bois contemporaine ?*

Pour répondre à cette question, nous faisons l'hypothèse que l'architecture contemporaine en bois est issue de l'héritage de savoir-faire et de connaissances fondamentales sur le matériau, développées en réponse au contexte socio-économique contemporain. Pour démontrer cette hypothèse, nous dresserons un panorama des architectures en bois en Finlande, avec un regard nécessaire sur les États-Unis, berceau de l'industrialisation de la filière bois. Il permettra d'étayer une réflexion sur les potentiels du bois dans l'architecture de demain. Cette étude s'appuiera également aussi sur une compréhension nécessaire des enjeux de la gestion durable de la ressource.

Ainsi, le plan s'organise autour de trois grandes périodes chronologiques, permettant d'aborder les principales innovations qui jalonnent l'histoire de la construction en bois.

La première partie est consacrée aux fondements de l'architecture en bois en Finlande avec un état de l'art des premières architectures en bois, et l'étude des caractéristiques du matériau.

La seconde partie mettra en avant l'industrialisation de la filière bois avec notamment le développement de la préfabrication à travers l'étude d'un corpus de trois œuvres du XXe siècle.

Enfin, la troisième partie développera les perspectives futures de l'utilisation du bois dans l'architecture contemporaine, prenant en compte l'émergence de nouveaux outils, mais aussi les grandes dominantes des enjeux économiques et environnementaux dans l'industrie du bois.

# Méthodologie

L'architecture en bois est un vaste domaine. Le mémoire n'a pas pour ambition d'accomplir une étude exhaustive, mais plutôt de retracer un enchaînement chronologique des pratiques liées à la construction en bois essentiellement en Finlande. Pour ce faire, la méthode de recherche est guidée par une idée fondamentale : établir les relations de filiation entre les différentes techniques de construction en bois pour comprendre la progression des systèmes et leur développement avec des technologies nouvelles. Par ailleurs, ce mémoire a pour objectif de mettre en exergue la capacité du bois à répondre à des problématiques contemporaines en s'appuyant à la fois sur son héritage et sur les technologies modernes.

L'examen approfondi de travaux déjà effectués<sup>1</sup> a permis d'orienter la recherche vers quelques pistes intéressantes parmi lesquelles figurent notamment celles des caractéristiques du bois avec le travail d'Alvar Aalto ou encore les nouveaux outils numériques. L'année en Finlande a été déterminante dans le choix d'une trame d'étude plus précise. Des lectures sur l'histoire de l'architecture en Finlande et des voyages en Laponie m'ont permis de remonter jusqu'aux origines nordiques de l'architecture en bois et ont été inclus dans le mémoire. Plus encore, l'étude et la découverte du travail d'Aalto sur la préfabrication, avec l'aide de la fondation Aalto, a été une étape particulièrement intéressante dans ma réflexion. Les archives que j'ai eues à disposition ont été précieuses pour appréhender son travail encore assez peu connu sur le logement de masse et l'industrialisation de la filière bois.

Le stage de juin à septembre 2015 à l'agence d'architecture de Patrick Arotcharen<sup>2</sup> a été une réelle opportunité pour enrichir mon travail. L'attachement de l'agence à utiliser le bois pour conduire des projets innovants et diversifiés m'a démontré les qualités incontestables de ce matériau, mais aussi les limites de son utilisation. Des échanges bien souvent informels et spontanés ont nourri ma curiosité, sur les chantiers comme à l'agence. J'ai ainsi pu échanger aussi bien avec des architectes, des ingénieurs, des compagnons, chefs de chantier qui ont tous fait preuve d'un réel enthousiasme dans le travail du bois, d'une passion et de l'envie d'utiliser le bois de manière toujours plus innovante. J'ai partagé avec eux cet enthousiasme tout au long de mon travail, en mesurant l'extraordinaire diversité de l'architecture en bois, décuplée par les outils modernes et les nouvelles technologies.

---

1 Travaux réalisés dans le cadre du S33 «Histoire de l'architecture au XXème siècle» et portant sur l'œuvre d'Alvar Aalto.

2 L'agence est située à Biarritz. Elle reconnue pour son utilisation du bois dans des projets emblématiques comme le siège de Quiksilver à Saint Jean de Luz en 2011.

D'autres rencontres m'ont permis d'étayer ma réflexion sur les nouvelles possibilités du bois dans l'architecture. Les architectes JKMM et les enseignants de l'Université Technologique de Tampere m'ont aidé dans les recherches et dans mon analyse, en mettant à disposition des documents, des références qui ont orienté mon travail.<sup>3</sup>

L'étude s'attache à mettre en évidence les caractères de l'architecture en bois à différentes périodes clés. Pour traduire ces évolutions, une grille d'analyse commune a été mise en place pour chaque œuvre étudiée. Cette grille permet de mettre en vis-à-vis des critères liés au système constructif, aux usages, aux qualités architecturales. Pour étayer ces analyses, l'état de l'art a permis de donner des éléments historiques et techniques fondamentaux qui aident à la compréhension des œuvres étudiées.

Enfin, la réalisation du Pavillon du Fablab festival en 2015, avec notre équipe Simon Hulin, Thibault Pouch et moi-même nous a donné une formidable opportunité pour appréhender de manière concrète l'utilisation des outils numériques en architecture, et pouvoir établir un bilan critique de cette pratique.

La méthodologie repose donc sur une mise en perspective tout au long de l'étude des sources directes avec des sources savantes.

# 1.ÉTAT DE L'ART

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

## 1.1 Caractéristiques du bois

### 1.1.1 Quelques grandes données

Avec l'aide des cours du module «Finnish Wood Architecture», à l'école d'Architecture à l'Université Technologique de Tampere, cette partie montre la richesse des ressources en bois à l'échelle mondiale.

Le bois est une ressource locale, présente de manière abondante à la surface de la planète. Le taux de boisement mondial est estimé à 32%. Prenons la France à titre d'exemple, elle est le quatrième pays Européen qui concentre le plus de ressource forestière, après la Russie, la Suède et la Finlande. On dénombre en France plus de 136 essences différentes, dont les 2/3 sont des arbres feuillus.

Le bois est une ressource durable. Contrairement à d'autres matériaux tels que l'acier ou le béton, il ne nécessite pas beaucoup d'énergie pour le produire. La constitution de 1000 kg de bois totalement sec permet d'éliminer 1851 kg de CO<sub>2</sub> par processus de photosynthèse. La dépense en énergie nécessaire à la transformation du bois (sylviculture, transport, coupe... ) ne nécessite que 15% de l'énergie solaire nécessaire au processus de photosynthèse. Le bois est une ressource recyclable et réutilisable. Les produits de construction en bois présentent une longévité remarquable, avec néanmoins certains traitements chimiques ou naturels. Les bois issus de démolition sont réutilisés, utilisés en tant qu'énergie, ou recyclés.

La gestion des forêts est la première étape clé pour la production du bois de construction. Elle est guidée par la disponibilité des ressources en amont, et par la demande et la commercialisation du bois en aval. Des programmes annuels permettent de prévoir la quantité de coupes et les surfaces concernées par exploitation. Ces prévisions sont données à partir d'inventaires réalisés en forêts et sont ajustées selon les aléas climatiques. L'ONF (Office National des Forêts) développe un inventaire annuel des forêts qui permet de recenser les espèces, leur quantité, leur âge, etc. à l'échelle nationale. La sylviculture a un rôle important à jouer. Elle est le gage d'une production de qualité et pérenne. « Nous ne sommes pas dans un système d'exploitation minière de la forêt qui consisterait à prélever tous les bois au gré des besoins » explique Laurence Lefebvre, responsable du département Forêts de l'ONF. Pour atteindre ces objectifs, des programmes d'entretien (éclaircie des arbres), la plantation, le maintien en bonne santé des arbres sont autant de travaux exigeants qui s'étalent sur de nombreuses années avant la coupe (20 ans en moyenne).

Le bois est une ressource naturelle qui a gagné en régularité avec le développement de la sylviculture. Le développement et la croissance des arbres sont mieux maîtrisés et garantissent aujourd'hui une production quasi constante.

### 1.1.2 Anatomie du bois

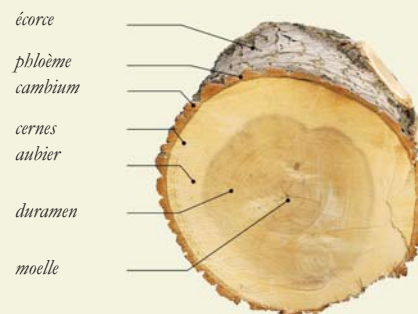
Dans les arbres, le bois exerce trois fonctions : la conduction de la sève brute de la racine vers les branches, le soutien de l'ensemble de l'arbre contre son poids et les forces extérieures (vent, neige) et la réserve des substances nutritives comme l'amidon. Le bois est composé de quatre parties majeures. (source : cours de construction en bois de l'Université technologique de Tampere)

*L'aubier: C'est la partie vivante du bois, ses couches successives servent au transport de la sève brute et à l'accumulation de la matière nutritive.*

*Le duramen: A l'inverse de l'aubier, le duramen est un ensemble de cellules mortes, de couleur foncée appelé aussi bois mort ou bois parfait. Il est composé de membranes épaisses et dures, marqué par l'absence de la circulation des éléments nutritifs.*

*L'écorce: C'est un tissu protecteur constitué anatomiquement par une assise de cellules mortes.*

*Cernes: Le cerne est la matière ligneuse fabriquée par l'arbre au bout de l'année. Chez les résineux des pays méditerranéens, les cernes sont très visibles contrairement aux arbres des pays tropicaux; ils sont de se fait un indice très précieux pour dénombrer l'âge de l'arbre en comptant le nombre de cernes à la base du tronc.*



Source : cours, finish wood architecture

Le bois est généré entre l'aubier et l'écorce, tandis que l'aubier adjacent au bois parfait se convertit en duramen. La proportion d'aubier et de bois parfait varie selon l'âge et l'essence de l'arbre. Le pourcentage volumique des cellules vivantes dans l'aubier varie entre 10 et 40 %.

La structure des cellules détermine les propriétés mécaniques du bois. Les différentes combinaisons de structure des cellules et la composition chimique sont influencées par les facteurs environnementaux et génétiques, et sont responsables des différences entre les essences de bois.

Il y a trois facteurs chimiques qui influencent les propriétés mécaniques du bois :

La structure chimique de la molécule qui constitue la paroi cellulaire, et la structure moléculaire

La distribution des composants chimiques dans la structure cellulaire

La proportion des différents composants chimiques

Les composants chimiques peuvent être classés en deux catégories.

Les composants structurels: ces composants forment la structure des parois cellulaires, sont responsables de la forme des cellules et des caractéristiques mécaniques du bois.

Les composants annexes: ces composants ne participent pas à la structure et sont contenus dans la lumière des cellules, ou dans les vides. Ces composants sont la plupart du temps solubles, et n'influencent que très peu les propriétés du bois.

Le bois est un matériau fibreux. 90% du volume du bois est formé de cellules longitudinales (fibres). Ce sont ces cellules qui assurent un rôle de soutien dans le bois, par leur forme allongée (entre 0.8 et 2.3mm) et leur paroi épaisse et rigide. On estime le volume de ces cellules entre 25% et 75% selon la nature du bois.

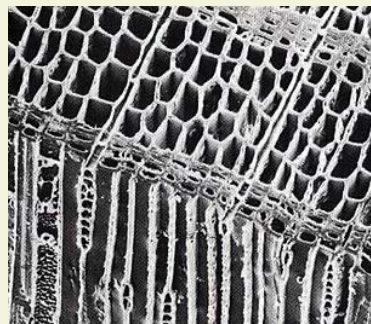
#### *Composition chimique du bois :*

*40-50% de cellulose (propriétés de résistance en traction et compression)*

*20-30% de hemicellulose*

*20-35% de lignine (grande résistance mécanique à la compression, c'est un composant vital pour assurer la rigidité et la résistance du bois)*

*10% de matière extraite*



*Source : cours, finish wood architecture*

Comme nous l'avons vu précédemment, le bois est constitué de fibres orientées: la structure cellulaire du bois est anisotrope. Le bois est un matériau anisotrope. Sa résistance en traction et compression est très forte dans le sens longitudinal, mais il peut se fendre aisément dans le sens radial.

Les propriétés mécaniques du bois sont liées à sa densité. Plus un bois est dense, plus il résiste. La densité du bois représente la quantité de parois cellulaires par unité d'aire. Le calcul permet de connaître la porosité du bois, à partir de la proportion de cellule solide et de cellule vide.

## 1.2 architecture nomade

### 1.2.1 Contexte historique

Le bois est un matériau que les Hommes ont très vite utilisé dans la construction des abris pour son abondance et sa disponibilité. Les scientifiques évoquent l'Alithium, une civilisation du bois antérieure à l'utilisation de la pierre, néanmoins mal connue<sup>1</sup>. Le bois est en effet un matériau vivant et périssable, ce qui n'a permis de conserver que quelques rares traces de ces premières architectures, mais les récits de l'antiquité nous renseignent sur les premières constructions. L'apparition de l'abri est consécutive à la maîtrise du feu : les hommes se retrouvent autour du feu, qui deviendra plus tard le foyer, c'est-à-dire le centre de la cabane.

L'abri est le résultat d'un fait social, celui de réunir les hommes pour constituer les premières tribus. Vitruve, dans son traité de l'Architecture décrit les caractéristiques architecturales des premiers abris. Vitruve, II, 1, 3 : « *Ils [les premiers hommes] commencèrent par dresser des pieux fourchus, y entrelacèrent des branchages et recouvrirent de boue ces parois* ». La structure de l'abri donne l'expression de l'architecture. Elle dessine une forme minimale, en tunnel ou en dôme, qui met en jeu des équilibres triviaux permettant d'assurer la stabilité de la construction. Cette ossature est importante, elle définit l'espace domestique et elle le protège.

Il est intéressant de souligner que ces premières constructions sont perpétuellement développées et enrichies, malgré les outils très rudimentaires.

---

1 Bois, système constructif, Josef Kolb



### 1.2.2 La cabane lapone

Quand les premiers chasseurs arrivent en Laponie après l'âge de glace, ils bâtissent leurs premiers refuges à l'abri d'un épicéa. En Laponie finlandaise, l'origine de ces abris a été découverte dans la région d'Enontekio. En Lapon « Kota » qui signifie tente, est l'abri que les chasseurs de rennes utilisent pour se déplacer avec leur troupeau lors de la grande migration saisonnière. Le proverbe finlandais « écoute l'épicéa en vivant dans ses racines » exprime l'onirisme de l'abri primitif dans la tradition finlandaise explique Maria Pesonen, enseignante à TUT. En plus d'une fonction structurelle, le tronc de l'épicéa est un symbole du Cosmos, le lien entre le ciel et la terre. Progressivement, le tronc est remplacé par des cabanes qui s'émancipent du soutien de l'arbre pour permettre aux chasseurs de se déplacer régulièrement à la recherche de nouvelles ressources. Ils développent pour cela des techniques de construction rapides, temporaires et démontables. L'utilisation de perches en bouleau prolonge la tradition onirique du lien entre terre et ciel : l'axe central de la hutte, symboliquement l'axe du monde, est légèrement incliné pour pointer vers l'étoile Polaire. Les perches sont disposées de manière rayonnante et jointes au sommet sur un chevêtre, qui permet de ménager une ouverture pour l'évacuation des fumées. La forme en cône participe à l'équilibre de la structure et assure un abri de taille suffisante pour loger une ou plusieurs familles dans une pièce centrale.

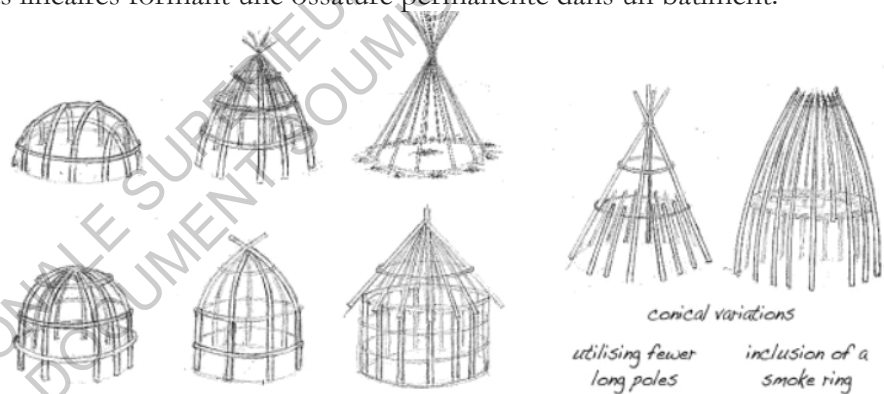


*Cabane Lapone traditionnelle reconstituée à Rovaniemi. Source : bibliothèque - école d'architecture de TUT.*

Une fois la structure primaire assemblée, les végétaux et la boue sont introduits entre les perches en bouleau, assurant une étanchéité rudimentaire. Ils sont peu à peu remplacés par des peaux d'animaux, qui apportent une meilleure étanchéité et peuvent être démontées puis réutilisées.

Progressivement, ces systèmes constructifs vont évoluer vers des assemblages pour faciliter le transport avec des éléments plus légers, et dans le même temps, consolider la structure. L'équilibre atteint par la forme de la structure est renforcé par des systèmes que l'on pourrait assimiler à du tressage, c'est à dire le croisement de plusieurs branches pour réaliser une grille qui stabilise les mouvements de la structure. Ces méthodes, toujours sans l'utilisation d'outils, requièrent l'utilisation de bois plus flexibles, et donc moins solides. La grille est donc importante pour répartir les efforts dans la structure et assurer la résistance de l'ouvrage. Auguste Choisy, dans son ouvrage «Histoire de l'architecture», décrit les premières techniques d'assemblage : «Lorsqu'il s'agit de bâtir des huttes, les assemblages sont autant que possible remplacés par des ligatures plus ou moins semblables à celles qui fixent les instruments de silex à leur manche. La vannerie, qui n'exige aucun outil doit avoir précédé la charpente; et la charpente par ligature devance nécessairement la charpente d'assemblage».

L'apparition des méthodes de ligatures pour bloquer les mouvements de la structure selon certaines directions consolide un peu plus ces structures que l'on peut désormais qualifier de charpente : la combinaison et l'assemblage d'éléments linéaires formant une ossature permanente dans un bâtiment.



development of elementary forms on to a circular plan  
Principe structurel de la tente lapone et évolution des techniques de construction de la structure.  
Source : Simple Shelters: Tents, Tipis, Yurts, Domes and Other Ancient Homes, Jonathan Horning

Ces premières techniques rudimentaires préfigurent la charpente d'assemblage, c'est à dire le remplacement des ligatures par des assemblages mécaniques par encastrement de pièces en bois entre elles, bloquant ainsi les mouvements de la structure.

## 1.3 Architecture sédentaire

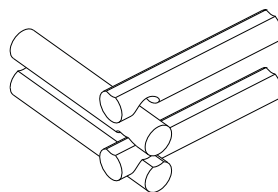
### 1.3.1 Premiers systèmes de fondation

Il y a environ 12000 ans, l'homme invente l'élevage et l'agriculture. N'ayant plus besoin de se déplacer pour trouver sa nourriture, il se regroupe et forme des villages. La sédentarisation des peuples et l'apparition des premières villes apportent de nouvelles réponses constructives au besoin de pérennité et solidité des habitations.

Deux techniques seront mises en œuvre : la méthode de bois fiché dans le sol, c'est à dire le passage d'une logique de simple appui sur le sol à des encastresments qui mécaniquement permettent d'obtenir une plus grande stabilité.<sup>1</sup> La seconde technique est beaucoup plus répandue en Finlande, car les sols sont trop durs pour ficher le bois. Les premiers systèmes de fondations reposent sur des blocs de pierre comme nous le verrons dans le chapitre suivant.

### 1.3.2 La maison en rondins

La maison en rondins fait partie du paysage finlandais. De nombreux exemples de ce type d'habitat peuplent la Laponie. Les premières traces de ces maisons datent de -2500 av. J.-C., mais il semblerait que les techniques de construction plus avancées datent du IXe siècle lorsqu'elles ont été importées de Russie par les Vikings<sup>2</sup>. La proximité des forêts et l'abondance des ressources en bois ont favorisé son développement, malgré une mise en œuvre longue et laborieuse qui nécessite de nombreuses étapes répétitives. Les premières constructions sont en effet extrêmement rudimentaires. Les troncs d'arbres d'épicéa, à peine équarris sont simplement empilés sur un socle en pierre, sans clous ni vis, et les interstices comblés de mousse et de boue. Les angles sont joints par des assemblages à mi-bois.



*assemblage à mi-bois - illustration : mathieu sudres*

Le toit est fait d'écorce, de terre et planté de gazon, supporté par un réseau de chevrons. Il s'agit du premier système constructif qui résout à la fois la structure et l'enveloppe. L'empilement des troncs d'arbres permet grâce aux propriétés mécaniques du bois d'assurer la structure de l'ouvrage par un travail des élé-

<sup>1</sup> Source : Éléments pour comprendre l'histoire du bois dans l'architecture, Jean-Claude Bignon. Ces techniques sont répandus -1800 à -700 av. J.-C. ont été retrouvées près des lacs jurassiens de Neuchâtel.

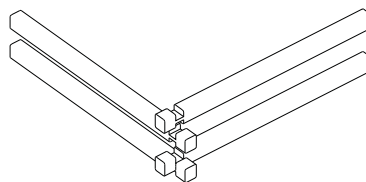
<sup>2</sup> Source : Bresson Thérèse et Jean Marie, ed. Dunod, «Maison de bois, Architecture Scandinaves», 1993

ments en compression. De même, puisque la structure cellulaire du bois contient une grande quantité de cavités remplies d'air, elle permet au bois d'être un excellent isolant thermique.<sup>3</sup>



*La maison en rondin finlandaise, en Laponte. Ici, le toit est recouvert de terre et de gazon pour une meilleur inertie thermique.  
Source : Maison de bois, Architecture Scandinaves, Thérèse et Jean Marie bresson*

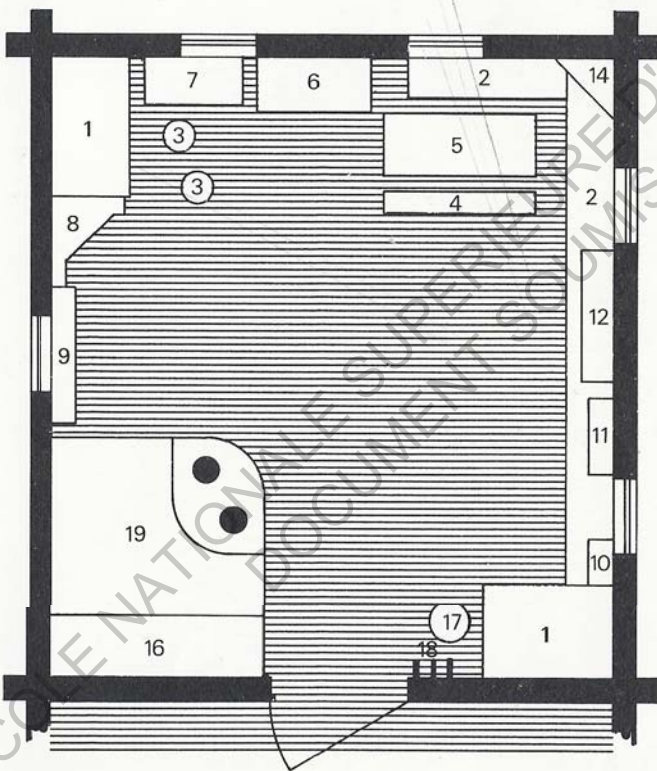
Ce système rudimentaire va progressivement être amélioré : l'équarrissage du bois va permettre d'alléger la structure, d'affiner la silhouette de la maison, et d'améliorer le confort thermique en augmentant la surface de contact entre deux poutres de bois. De nouveaux assemblages seront aussi développés. L'assemblage à tête de bœuf permettra notamment de tenir compte du travail du bois selon sa direction (axiale ou tangentielle), dans le but de minimiser les désordres liés au phénomène de gonflement et dilatation du bois. Ces typologies d'assemblages sont accompagnées du développement de nouveaux outils qui permettent d'obtenir une finesse et une justesse d'exécution dans les jonctions d'éléments.



*Assemblage à tête de bœuf - mathieu sudres*

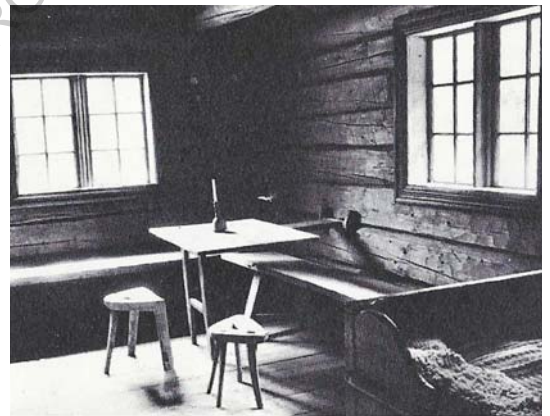
3 Source : Finish wood architecture course (IUT)

La typologie primaire va progressivement s'agrandir. La cabane en rondin devient un espace architectural défini par un sol, des murs et un toit qui délimite un intérieur et un extérieur, en introduisant la notion de seuil par une unique porte d'accès. Le foyer construit à partir de pierre est toujours au centre de l'habitation. Les Hommes et les animaux partagent cette maison pour se protéger du froid. Ensuite, plusieurs pièces sont progressivement aménagées. Le porche sera d'abord ajouté, et permettra la protection contre la neige et le vent. Vers 1300 dans le Häme (province finlandaise), d'autres variations du plan initial vont permettre d'agrandir la maison (*pitti* ou *tupa* en finnois), en ajoutant des pièces supplémentaires (chambre, vestibule, salle des fêtes...) Les meubles sont en bois massifs fixes, puis peu à peu mobiles, et décorés à partir de 1750.



Plan d'une maison traditionnelle en rondins avec une seule pièce.  
Source : Maison de bois, Architecture Scandinaves, Thérèse et Jean Marie bresson

- |   |   |
|---|---|
| 1. lit  | 10. petite armoire suspendue  |
| 2. banc                                       | 11. étagère à Puukko (couteau de chasse)                                |
| 3. tabouret                                   | 12. étagère à outils  |
| 4. banc                                       | 13. étagère à cuillers  |
| 5. table                                      | 14. armoire suspendue   |
| 6. armoire à laitage                          | 15. cheminée  |
| 7. armoire servant de table                   | 16. planche au dessus de la cheminée, pour dormir ou sécher des objets. |
| 8. armoire suspendue                          | 17. tonne à eau   |
| 9. coffre contenant les ustensiles de cuisine | 18. crochet pour les vêtements  |



Intérieur de la maison en rondin  
Source : Maison de bois, Architecture Scandinaves, Thérèse et Jean Marie bresson

Cette première partie nous a permis de comprendre pourquoi le bois depuis l'origine de l'Humanité était privilégié dans la construction. Ses propriétés mécaniques, sa disponibilité et sa flexibilité ont permis d'amorcer deux grands systèmes constructifs :

- L'ossature légère, constituée d'une ossature, remplie ou recouverte
- La construction massive, avec du bois empilé.

La maîtrise des caractéristiques du bois a permis de développer très tôt des systèmes constructifs simples, sans outils, relevant plus du bon sens constructif que d'une logique de rationalité de mise en œuvre. Ces deux systèmes sont mis au point à partir d'une ressource en bois abondante et, de ce fait, ancrent la fabrication de l'édifice in situ. Dans la seconde partie, nous verrons comment l'architecture en bois du XXe siècle s'inscrit en rupture de ces premières techniques en s'orientant vers des logiques de préfabrifications de composants uniques et standards en usines.



*Évolution des techniques de constructions : depuis le dôme vers l'amorce d'une ossature légère.*

*Source : Simple Shelters: Tents, Tipis, Yurts, Domes and Other Ancient Homes, Jonathan Horning*

## 2. INDUSTRIALISATION DES SYSTÈMES

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

L'état de l'Art a donné deux exemples d'architectures primitives en Finlande. Même si la maison en rondins demeure encore aujourd'hui, cette méthode de construction a été rapidement supplantée par des techniques beaucoup plus rapides de mise œuvre et économes en matière. L'industrialisation de la filière bois marque un tournant significatif dans la production architecturale au XXe siècle.

La Finlande est un exemple particulièrement intéressant. Aalto s'est très vite intéressé à la préfabrication, en proposant de nombreuses typologies à partir de composants produits en usine. Cette production comme nous le verrons a été largement influencée par les méthodes expérimentées aux États-Unis et dont Aalto s'inspire pour son modèle finlandais. Aussi, nous proposons d'étudier l'œuvre de Walter Gropius et Konrad Wachsmann, le «General Panel System» qui propose un modèle de maison entièrement préfabriquée. Enfin, le troisième cas d'étude mettra en avant l'appropriation de ces techniques par la jeune génération d'architecte finlandais, qui amène le bois à l'échelle d'un bâtiment public.

Ces trois œuvres reflètent ainsi l'évolution de la préfabrication et son influence sur la production architecturale finlandaise, mais aussi aux États-Unis, le berceau de la préfabrication.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



## 2.1 La préfabrication

### 2.1.1 Contexte

Sous l'influence du Taylorisme et du Fordisme dans les années 1920, les architectes s'intéressent timidement à l'industrie. Walter Gropius aux États Unis, ou Le Corbusier en France sont les premiers à développer des théories d'architecture standardisées dès la Première Guerre mondiale. En avançant l'idée que la préfabrication mécanisée peut apporter de nouvelles réponses à la construction de logement, ils dépassent le statut d'architecte et entrent dans une logique d'architecte inventeur. L'idéologie de la «*Machine à habiter*», c'est-à-dire fabriquer de manière industrielle et systémique, commence à se développer.

La Seconde Guerre mondiale marque un tournant dans la production de l'architecture préfabriquée. La reconstruction des villes, le besoin urgent de logements et le peu de moyens sont les vecteurs du développement de ces nouvelles techniques. La construction préfabriquée se développe dans l'Europe à partir de 1940, mais avec une plus grande intensité dans les pays du nord et de l'Est, notamment en Finlande.

Aalto est l'un des architectes qui a le plus contribué à l'émergence de la préfabrication en Europe. Après son expérience en Amérique, il exporte son savoir-faire et participe à la reconstruction des villes de l'Europe du Nord avec Aarne Ervi et Viljo Revell. En Amérique, les chiffres de la reconstruction après guerre avec des systèmes préfabriqués sont impressionnants. En seulement 3 ans, 200 000 maisons sont préfabriquées, à une fréquence de 1000 maisons par mois, créant ainsi 12% du patrimoine immobilier américain.

Du XXe siècle à nos jours, la préfabrication a impacté la production de logements. De nombreux systèmes ont été mis au point, aussi bien en préfabrication «2D» ou préfabrication en volume. Le bois a été le premier matériau à être utilisé pour la préfabrication, du fait de la possibilité de l'utiliser aussi bien en poutre qu'en poteau. Le développement des nouveaux systèmes d'assemblage métallique et le développement de l'industrie du bois amorcent de nouvelles méthodes dans la construction bois.

Mais si la préfabrication apporte une réponse technique innovante dans la production de logements, l'image des premiers systèmes développés par les industriels et les architectes restera longtemps associée à des logements petits, uniformes et de mauvaise qualité. Les architectes ont peu à peu développé de nouvelles possibilités grâce à des performances accrues et des systèmes constructifs modulables. En réinterprétant l'esthétique de la maison traditionnelle, ils ont proposé des logements plus familiaux, moins industriels mais surtout plus confortables. Encore aujourd'hui, cette recherche se poursuit et permettra peut-être de répondre à la demande exponentielle de logements en France comme dans de nombreux pays.

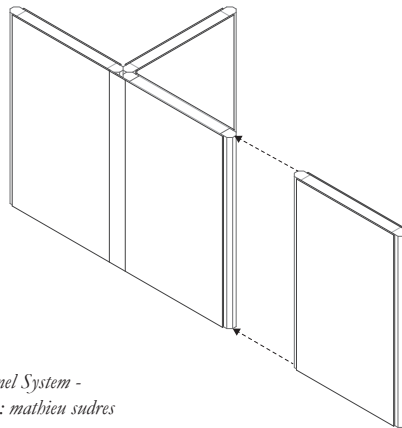
## 2.1.2 Logiques combinatoire

Même si le degré de préfabrication dépend des projets, des systèmes constructifs et des moyens disponibles en atelier, les systèmes de construction en bois sont toujours préfabriqués. Héritée du colombage qui porte l'idée de l'ossature et d'un remplissage, l'industrialisation a permis de réinterpréter avec les outils modernes ce système constructif.

Dans la pratique, la mise en œuvre est similaire à la technique du colombage, un assemblage bout à bout d'éléments en bois, mais connectés par des systèmes de platines métalliques ou par des boulons. Le développement de ces systèmes bien plus précis fait suite à l'invention d'outils, notamment la machine à fabriquer les clous en acier, ou d'outils d'équarrissage mécanique beaucoup plus performants.<sup>1</sup>

L'assemblage des éléments préfabriqués avec la tolérance d'un matériau naturel comme le bois exige un choix rigoureux dans les connexions et les détails qui assureront la pérennité du bâtiment après une mise en œuvre parfaite sur le site. A chaque étape depuis la conception architecturale jusqu'à la mise en œuvre sur le chantier, les caractéristiques mécaniques du bois différentes en tension, traction ou compression doivent être prises en compte. Ses propriétés mécaniques autorisent une large variété de fonctions, aussi bien en poutre (travail en flexion) qu'en poteaux (travail en compression). Cette polyvalence a permis d'adapter le bois aux trois grandes familles structurelles :

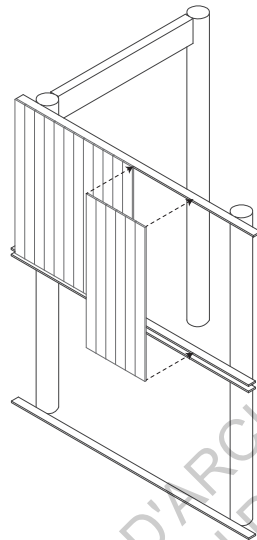
- Panneaux module. Les éléments en bois, porteurs se décomposent suivant une trame régulière sur la hauteur d'un étage. Les panneaux atteignent un degré de préfabrication élevé en incluant les couches d'isolant et de finition. Les dimensions de la construction sont alors inscrites dans une trame.



*General Panel System -  
Illustration : mathieu sudres*

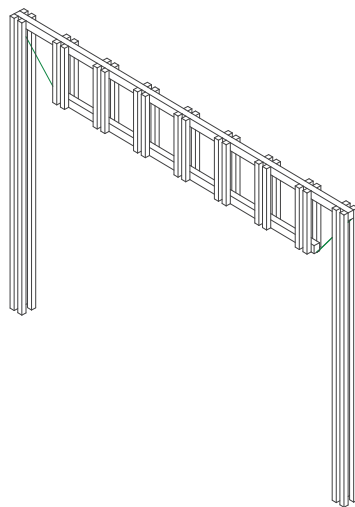
<sup>1</sup> la balloon frame house sera aux Etats-Unis la première maison construite sur ce principe d'ossature légère clouée, en 1800 près de Chicago.

- Pans de bois. Cette technique est surtout utilisée pour des bâtiments à usage domestique. La préfabrication se limite alors à la découpe des montants verticaux, horizontaux et des panneaux en usine, les composants sont ensuite assemblés sur le chantier.



*AA House -  
Illustration : mathieu sudres*

- Les structures poteaux poutre. Les éléments de structure sont découpés en atelier et assemblés en modules, les modules sont ensuite transportés sur le site et assemblés entre eux. Ces mégastructures permettent de franchir des portées importantes adaptées aux édifices publics, tout en optimisant le montage et le chantier.



*Poutre préfabriquée - Vükkä Church  
Illustration : mathieu sudres*

Le besoin de rationalisation et d'optimisation des processus de fabrication et de construction atteint cependant des limites dans la variabilité des bâtiments. En effet, même si la logique de composants permet une certaine modularité, le système est contraint par les éléments de connexions et la dimension des composants. La préfabrication en bois reste néanmoins capable de s'adapter à de nombreuses configurations. En fonction des contraintes techniques (incendie, acoustique, thermique), selon la configuration du bâtiment et de sa structure, les combinaisons de différents composants peuvent conduire à une optimisation du projet à travers :

- les coûts (choix de section adéquate selon les charges à reprendre)
- le planning de chantier (cadencement régulier de la construction, fabrication en amont ...)
- la rationalisation de la structure du bâtiment avec des trames régulières, autorisant une souplesse dans l'organisation des volumes intérieurs....

Mais la variabilité des systèmes reste néanmoins encore à démontrer. Elle est difficile à mettre en pratique pour des raisons techniques (les outils de production sont peu adaptés à des logiques de personnalisation massive des éléments, les logiques de structure et les descentes de charges sont complexes).

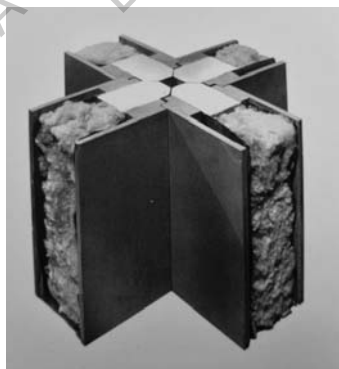
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

## 2.2 Cas d'étude

### 2.2.1 Le General Panel System

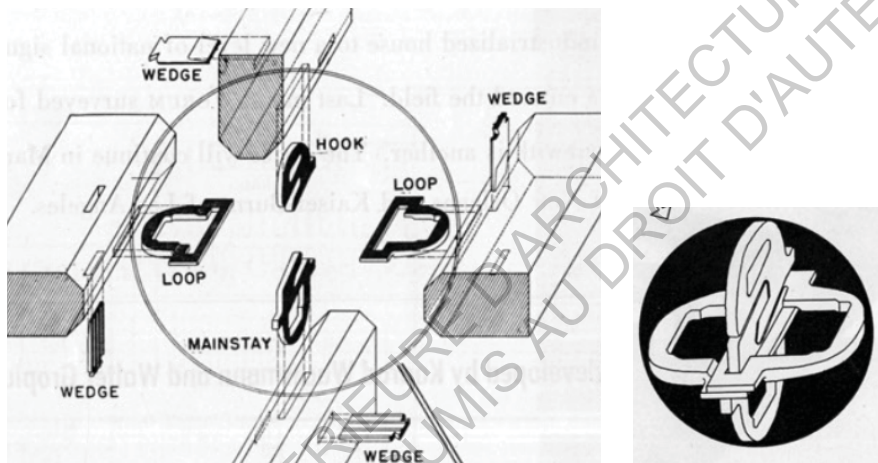
Les innovations technologiques successives dans l'industrie et la créativité des architectes ont ouvert la voie à des degrés de préfabrication de plus en plus élevés tout en offrant des systèmes constructifs de plus en plus modulables. Le passage d'un élément unique produit en série à des logiques de combinaison de plusieurs éléments préfabriqués a donné un nouveau souffle à la préfabrication. Walter Gropius et Konrad Wachsmann sont les deux premiers architectes à émettre l'idée de logique combinatoire à travers le «General Panel System» qu'ils développent ensemble aux États-Unis en 1941. Ils imaginent la «peace-time dream House», la maison rêvée par tous les Américains, abordable, et individuelle : ce projet donne naissance à la *General Panel Corporation*, entreprise qu'ils fondent ensemble dans le but de commercialiser cette maison. Pour Wachsmann et Gropius, l'idée n'est plus de concevoir des modules habitables en série, mais de proposer un minimum de composants qui puissent être combinés et reproduits pour constituer la structure et l'enveloppe de la maison.

Les premiers panneaux de façade en bois (40x120 pouces) sont produits en usine en Amérique. Ils innovent en faisant apparaître pour la première fois un composant préfabriqué, qui comprend la couche de finition, l'armature et l'isolation et pouvant être utilisé aussi bien à l'horizontale qu'à la verticale. Le panneau est composé d'un cadre en bois en séquoia et d'une « peau tendue » en contreplaqué. Le contreplaqué est fabriqué de manière industrielle par des particules de bois liées avec une colle. Ce procédé permet d'obtenir un panneau de bois aux dimensions standards, léger et peu onéreux. Les cadres sont placés dans des gabarits métalliques, puis collés. L'isolant est intégré dans l'épaisseur du cadre, puis le panneau est refermé avec les deux couches de contreplaqué. L'ensemble est ensuite collé avec une presse électronique, puis peint de deux couches de peinture. Les panneaux rectangulaires obtenus, de dimensions identiques s'assemblent librement pour former le sol, les murs et le plafond.



Vue en écorché de la connexion de 4 panneaux.  
Source : archives EPFL.

La seconde innovation est le système de connexion métallique développé par Wachsmann qui permet d'assembler la maison en un temps record. L'enjeu de la jonction des panneaux entre eux dépasse le simple objectif de rentabilité. Pour réaliser l'idée d'un système souple et modulaire pouvant être adapté à différentes configurations, Wachsmann sait qu'il doit proposer un procédé universel qui puisse connecter deux, trois ou quatre panneaux selon la configuration de la maison. Son raisonnement ne s'arrête pas là. Le procédé doit être universel, le même détail d'assemblage doit pouvoir connecter indifféremment un mur avec un mur, un plancher avec un mur ou un plancher avec un plancher. Autrement dit, le système de connecteur doit être standard et surtout unique pour l'ensemble du système, sans distinction du nombre de panneaux à connecter entre eux et de leur positionnement.



Principe de connexion du general panel system  
 Source : *Architecture industrialisée et préfabriquée: connaissance et sauvegarde*, Franz Graf, Yvan Delemontey

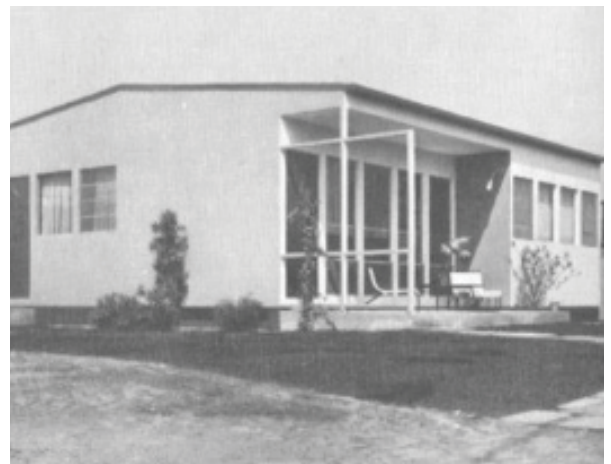
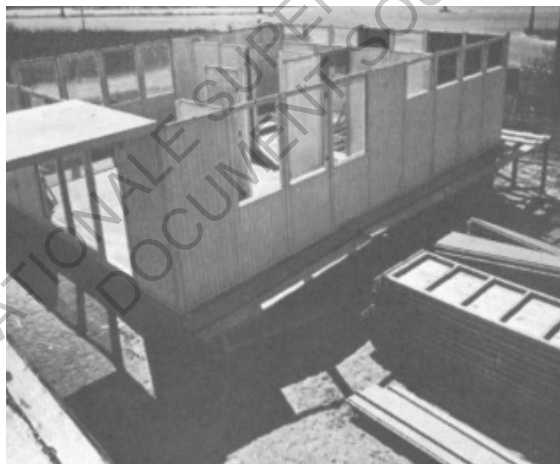
Après de nombreuses itérations et versions, il propose en 1945 un nouvel assemblage particulièrement ingénieux qui permet d'optimiser la taille et la forme des connecteurs tout en améliorant la mise en œuvre, en remplaçant par exemple les opérations de vissages par de simples rivets à enfoncer à l'aide d'un marteau.

Gropius et Wachsmann ne perdent jamais de vue cette idée de rentabilité et de mise en œuvre dans le développement du système. Le procédé qu'ils mettent en place ira même jusqu'à reprendre l'idée de «supply chain» inspirée de la production automobile. Les panneaux en bois sont acheminés sur une chaîne de production et progressivement transformés sur lors de leur passage sur différents postes de travail : collage, ajout de l'isolant, vernis, ajout des crochets de fixation etc. En bout de chaîne, les panneaux sont directement positionnés sur les remorques, permettant de livrer le chantier et d'assembler la maison en moins de

huit heures, par des ouvriers non qualifiés.

Ce système inventé par Wachsmann et Gropius est donc mixte, il est composé de bois pour les panneaux et en acier pour les montants et les connecteurs. L'utilisation du bois associé avec de l'acier est rendue possible par la précision identique de l'usinage du bois et du métal, au demi-millimètre près. En outre, ce système de connecteur métallique associé à des panneaux de bois permet, malgré des matériaux différents, d'exploiter les propriétés mécaniques de chacun des matériaux pour assurer la stabilité de l'ensemble de l'ouvrage (le bois travaille en compression et les parties métalliques en traction dans ce système).

Ces recherches intenses sur le couple connecteur-panneaux préfabriqués auront permis d'amorcer une réflexion riche sur l'intégration d'un système ou plus globalement d'un processus de fabrication dans la production architecturale. Comme le montrent les photographies de ces maisons, l'homogénéité des façades démontre la ressemblance de ces maisons avec des typologies traditionnelles. En apparence, rien ne présage d'un système préfabriqué à partir de panneaux, avec un parfait contrôle du système de connecteurs.



*Maison test «General Panels» Queens N.Y. 1946*

Ce système permet en outre de s'affranchir de la contrainte de la préfabrication qui impose souvent la division de l'habitation en cellule avec leur propre autonomie structurelle. De ce point de vue, le système de panneaux peut être vu comme un système qui n'est pas prédéterminé, mais qui s'adapte à une variété de configurations, selon l'architecte, le lieu et l'usage. Chaque nouvelle maison peut donner lieu à une nouvelle combinaison illimitée de panneaux en fonction de chaque contexte. Cette liberté est néanmoins réduite à trois conditions préalables :

- D'une part, l'obligation de rester dans une trame liée à la taille du module, ce qui contraint la géométrie de la maison à des multiples de la dimension d'un panneau
- D'autre part, l'impossibilité de déroger au système, et par conséquent, l'obligation d'utiliser uniquement des composants développés pour le système du General Panel (fenêtre, porte, etc.)
- L'impossibilité de changer la finition des panneaux, leur matérialité. Chaque maison devient visuellement identique.

Malgré ces contraintes, les trois exemples de plans ci-dessous peuvent témoigner des possibles compositions de volumes à partir d'un système de panneaux préfabriqués connectés. Mais malgré la performance du système et les brevets qui en découlent, seules 200 maisons auront été construites avec ce système car le coût reste encore trop élevé pour le marché.



*Exemple de variations de plans proposé par la General Panel Corporation à partir d'un module standardisé*

*Source : Architecture industrialisée et préfabriquée: connaissance et sauvegarde, Franz Graf, Yvan Delemontey*



## 2.2.2 AA House

En Finlande, les bâtiments en bois ont continué à être construits de manière traditionnelle, c'est à dire en rondins jusque dans les années 30. Contrairement aux États-Unis où la maison en ossature légère en bois est bien établie depuis les débuts de l'époque coloniale, la maison en bois massif à partir de rondins empilés continue à être produites jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. Comme nous l'avons vu, le bois massif permet d'apporter une isolation thermique pour l'habitation. Or, jusqu'à l'invention des matériaux d'isolation, il n'y avait aucune autre alternative pour se protéger du froid nordique.

Le pays était jusqu'alors essentiellement rural, et très peu urbanisé. À cette époque, l'industrie du bois est particulièrement développée et prospère. Aussi, pour loger les ouvriers près des usines, les entreprises ont rapidement dû construire des logements. En Finlande, la production des maisons de bois préfabriquées était alors partie intégrante d'un système de production où une même compagnie pouvait exploiter la forêt, transformer le bois, gérer la production, le design et la vente. La production de maison était considérée comme un nouveau produit de l'industrie forestière finlandaise. Ainsi, l'entreprise A. Ahlstrom Oy, une des plus prospères dans l'industrie du bois, engage Aalto en 1937 pour travailler sur un système de maison préfabriquée en bois.

Aalto a toujours eu un réel intérêt pour la culture et les méthodes de production américaine. Il est l'un des architectes qui ont le plus participé à l'émergence de la préfabrication sous l'impulsion des crises du logement après la Première et la Seconde Guerre mondiale, particulièrement en Finlande. Il développe en 1930 un premier modèle de maison préfabriquée inspirée du modèle de la maison individuelle américaine. Il développe ensuite avec A. Ahlstrom Oy une douzaine de prototypes de maisons préfabriquées en bois, à partir de composants standardisés : menuiseries, éléments d'ossature. L'objectif est de rendre ce système abordable, mais surtout aisé à assembler, ne nécessitant pas de compétence technique ou de qualification particulière. La production de ces premiers logements démarre en 1938, à Varkaus, où se situe l'usine de la compagnie Ahlström. Ce premier modèle lui permet d'appliquer pour la première fois des méthodes de production normalisées à partir de système en bois produit en série.

En 1940, Aalto rentre des États-Unis avec une nouvelle idée qu'il a développée au MIT. Plutôt que de préfabriquer massivement le même modèle de maison, il introduit l'idée de variabilité à partir d'un système unique. Il propose ainsi 93 variantes, à partir de composants standards. Ce nouveau programme est réduit à 69 modèles, qu'il nomme AA House, et qui correspond à Ahlström/Aalto House. En réalité, ce modèle de maison n'est pas totalement préfabriqué, mais utilise des logiques de production de masse pour réaliser une production de composants standardisés en bois produits en série. Aalto utilise la souplesse de l'ossature légère en bois pour faire varier le plan et la morphologie de l'habitation.



*AA house - photographie d'archive de la construction (Musée de l'Architecture Finlandaise, Helsinki).*

Ce modèle s'appuie sur la double expérience américaine et finlandaise qu'Alvar Aalto a développée les années passées, aussi bien sur les méthodes de production que sur la flexibilité des logements. Ce système est par ailleurs introduit auprès de Albert Evans, alors responsable de la Croix rouge aux États-Unis pour lui proposer une maison familiale d'urgence. Sa déclaration mérite d'être

soulignée :

«It is quite clear that the project is motivated from a desire to meet the needs of families rather than as an outlet of some given type of structure or material. Most of the work in our country in pre-fabricated homes and structures has been motivated by the desire to find an increased market for some type of product. This, I think, explains why we have made so little progress in the field of mass production»<sup>1</sup>. Cette citation met en lumière les principales divergences entre les gouvernements, les architectes du mouvement moderne et l'industrie américaine. Albert Evans reconnaît la motivation d'Alvar Aalto à répondre aux désirs et aux attentes des familles, plutôt que de développer un système uniquement dicté par des matériaux ou des logiques constructives. Même si ce travail est unanimement salué, un contexte économique et social tendu entrave le développement de la maison AA, et seules quelques typologies traditionnelles et facilement commercialisables sont réellement construites. De 1941 à 1943, des exemples de ces maisons ont été construits à Tampere, dans le quartier Nekala, pour les travailleurs et les ouvriers sans logement après la guerre. Des plans de ces habitations sont représentés en annexes.

Nous pouvons retenir du travail d'Aalto sur la préfabrication trois idées particulièrement intéressantes, même si elles n'ont jamais été complètement éprouvées.

- Tout d'abord, la possibilité d'offrir une grande diversité de typologies, permise par la variabilité d'un système constitué de composants standardisés en bois. Cette diversité de typologies répond à des contextes différents qui prennent en compte l'environnement (topographie, orientation, végétation) et les usages (taille de la famille, besoins). Cette diversité, même si les matériaux et les proportions des logements sont sensiblement les mêmes, permet tout de même de répondre aux aspirations de la société en développant un système abordable et rapide à construire. En outre, ces maisons démontrent la capacité du bois à absorber une mise en œuvre rapide, avec une main d'œuvre peu ou pas qualifiée. Avec ce système, Aalto défend d'une part l'industrialisation des processus de fabrication des éléments de construction en usine et d'autre part, la mise en œuvre et l'assemblage artisanal in-situ par les ouvriers.



Inauguration du quartier Nekala à Tampere en 1943 peu après sa construction  
Source : (Musée de l'Architecture Finlandaise, Helsinki).

<sup>1</sup> MIT Archives, Burchard collection, Office memorandum from the American Red Cross National Headquarters, Washington DC, Sept. 17 1940.



*Quartier Nekala -  
Source : <http://www.berrycom.fi/>*

- Ensuite, une capacité du système à répondre à des contextes différents: maisons en bandes, maisons larges, maison de vacances... À Tampere, ce système inclut un jardin pour chaque maison, qui est utilisé comme potager, permettant de pallier à la rationalisation de la nourriture peu après la guerre. Les morphologies de ces maisons s'émancipent des schémas plus traditionnels des maisons finlandaises. Le toit asymétrique ou encore les murs discontinus et les baies horizontales donnent une apparence moderne, alors que les éléments de charpente des avant-toits et des porches rappellent le vocabulaire plus classique de la maison en rondins. Dans le quartier de Nekala, Aalto introduit des variations dans le plan original d'une manière intéressante en orientant le salon d'une manière différente dans les maisons. Dans une typologie, la terrasse est prise en alcôve dans le volume du salon, alors qu'une ouverture en angle ouvre une vue généreuse dans le jardin pour l'autre maison.

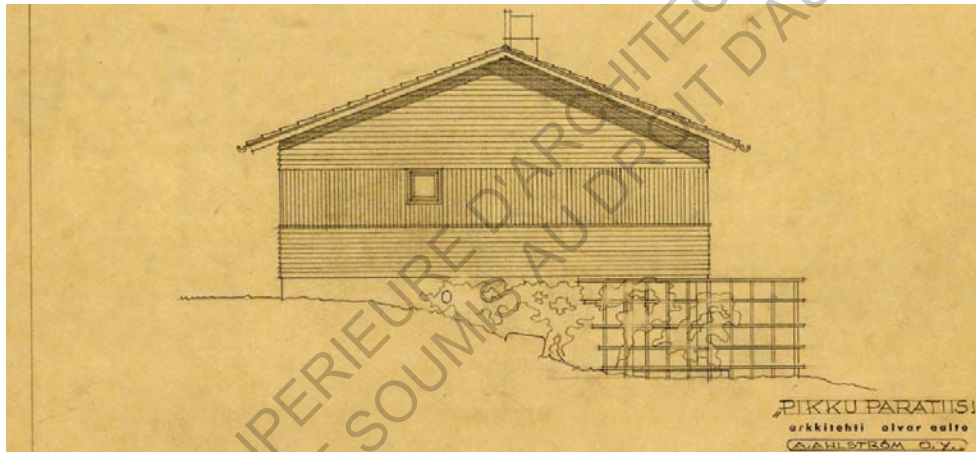
- Enfin, une attention particulière sur la relation avec le paysage, composante essentielle du travail d'Alvar Aalto : ouvertures larges, parfois des vérandas pour ouvrir la maison vers le jardin, ouverture en angle. Il cherche aussi à réintroduire la notion de fusion architecture-nature essentielle dans son travail en réutilisant par exemple des troncs de bois pour supporter les avant-toits, de la même manière qu'à la villa Mairea. Aalto s'appuie aussi sur son travail dans des maisons particulières pour enrichir les logements préfabriqués. Ils apportent un soin particulier à l'intimité des familles en orientant les terrasses et les porches d'entrée dans des directions différentes, et en utilisant la végétation comme un filtre naturel.



*Le quartier Nekala aujourd'hui (Tampere, Finlande)  
Source : Jouko Loikkanen*



Photographie depuis le jardin d'une maison du quartier Nekala (Tampere) - source : Jouko Luikkanen



Coupe sur la maison RRT, construite à Varkaus (Finlande)

La flexibilité de ces maisons n'a jamais été démontrée, car très peu d'exemplaires ont été finalement construits. Ces maisons aujourd'hui demeurent dans le quartier de Nekala, dans un très bon état. En apparence, très peu de modifications ont été faites sur les maisons. Les familles se sont appropriés les jardins et les terrasses comme de véritables extensions du salon. À l'intérieur, le confort a été amélioré en agrandissant la cuisine (considérée comme trop petite à l'origine).

Ce système, beaucoup moins complexe et moins abouti en terme de préfabrication, tend à «humaniser» le logement préfabriqué en mettant en avant le travail manuel d'assemblage des éléments d'ossature par les ouvriers. Aalto met ici en exergue le caractère individuel du logement en variant les modénatures des porches d'entrée, en préservant l'intimité et en introduisant la végétation comme un lien entre l'architecture et son contexte.

### 2.2.3 Viikki Church

L'église Viikki est située dans la banlieue d'Helsinki. Dessiné par les architectes JKMM, l'édifice a été ouvert en 2005 après 16 mois de travaux au cours desquels de nombreux partenaires et entreprises ont été mobilisés. L'église Viikki est en effet l'un des premiers édifices publics construits en bois à l'époque et a nécessité un grand nombre d'experts et d'ingénieurs associés aux architectes. Ce bâtiment a vocation à démontrer la faisabilité et la sécurité d'une construction en bois à l'échelle d'un édifice de plus de 1000m<sup>2</sup>, pouvant recevoir plus de 500 personnes à la fois. L'église, posée sur un socle en pierre est constituée de deux volumes majeurs habillés de bardeaux de bois. Un troisième volume, plus bas, ouvre l'édifice vers la ville et crée une transition en les deux volumes plus hauts et l'échelle du quartier. Le dessin du bâtiment est étroitement lié à la tradition des églises Finlandaises en réinterprétant le plan en croix et l'utilisation du bois dans l'architecture traditionnelle. Il est nourri par un onirisme qui puise son inspiration aussi bien dans l'image de la forêt et de l'arbre que dans la spiritualité.

Les objectifs imposés pour la construction du bâtiment et la maîtrise du coût ont rapidement orienté les architectes vers des techniques de préfabrication. La démarche expérimentale du projet a autorisé une certaine liberté dans la conception architecturale, en recherchant en parallèle des solutions de mise en œuvre innovantes. Ainsi, le dessin de la charpente imaginé par les architectes traduit la métaphore de l'arbre et des branchages, et ne pouvait pas être réduit à une simple poutre treillis comme il est coutume de le faire dans des constructions publiques pour associer économie et grands franchissements. Le choix s'est donc porté sur une grille structurelle, avec des poutres verticales en bois massifs, et des poutres horizontales renforcées par des tiges en acier noyées dans le bois. Des tirants permettent de ramener les efforts de la poutre inférieure vers le support, tout en ménageant un vide entre les poutres et les murs.

La conception des poteaux concilie les contraintes structurelles avec le dessin des architectes. Pour obtenir un poteau fin, malgré les efforts à reprendre, les architectes et ingénieurs ont travaillé à une solution qui a consisté à réaliser une matrice 4 poteaux fins reliés à intervalles réguliers, plutôt que d'utiliser un seul poteau épais. Les panneaux en bois massifs qui réalisent l'enveloppe et la toiture permettent d'assurer le contreventement, en assurant également l'isolation thermique. La préfabrication des poutres en atelier à grandement amélioré la qualité du bois, en supprimant les défauts et les imperfections, et a rendu possible la mise en œuvre par une grue des poutres une à une. Des détails de construction sont visibles en annexes.

La structure de l'église, aussi imposante soit-elle, apporte un le sentiment de protection, d'abri. Elle oriente le regard vers le plafond, baigné par la douce

lumière qui se diffuse sur le bois. Fruit d'une prouesse aussi bien architecturale que technologique, elle apporte la preuve que le bois est un matériau souple qui permet avec une bonne connaissance de ses propriétés de s'affranchir des solutions conventionnelles et standardisées. Ce projet démontre que la préfabrication prend aujourd'hui une nouvelle dimension grâce à l'amélioration des outils industriels de fabrication qui permettent des formes non standards.

Avec ce bâtiment, les architectes prouvent aussi la capacité à atteindre des tailles de bâtiments bien plus importantes, pouvant accueillir du public et des grands rassemblements.

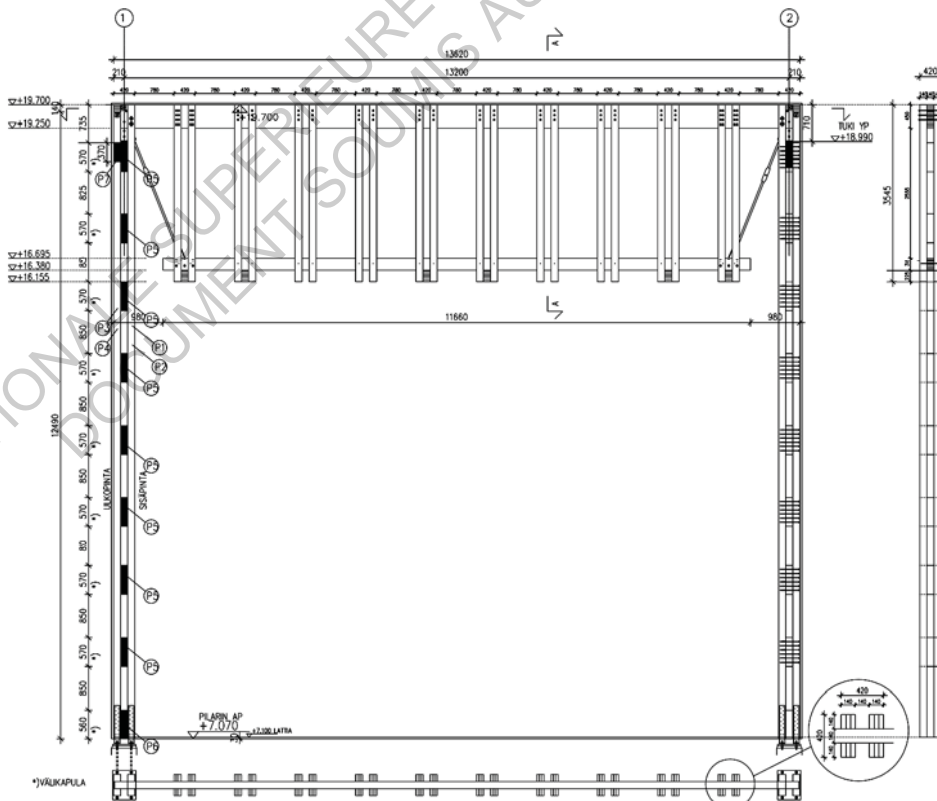


*vue intérieure de l'église Viikki. Un dispositif de lumière de lumière indirect naturel derrière l'autel apporte une lumière diffuse sur les panneaux d'épicéa.*

*Illustration : Mathieu Sudres*



mise en place des poutres et des poteaux à l'aide d'une grue. la rigidité totale du bâtiment n'est obtenue qu'après la pose des panneaux de façade nécessaire au contreventement.  
Illustration : JKMM Architects



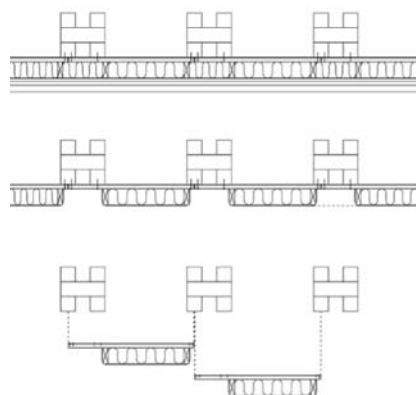
principe structural des portiques composés de poteaux et d'une poutre de hauteur statique égale à 1,2m.  
Illustration : JKMM Architects



A la différence des deux premiers exemples, ce bâtiment bien plus récent est un édifice public. Il a nécessité des moyens industriels bien plus importants aussi. Les poutres en bois sont préfabriquées sur toute leur longueur en usine. Cette préfabrication permet d'assembler les éléments de la poutre avec une précision rigoureuse permise par les outils de découpe numérique. Les moyens de manutention disponibles aujourd'hui permettent de transporter des éléments beaucoup plus importants et de les lever au moyen de grues sur le chantier.

La préfabrication sur ce projet est apparue comme un impératif pour respecter le planning de chantier et les délais, mais surtout pour contrôler de manière rigoureuse le processus de fabrication des poutres. Ce projet rappelle que le bois est un matériau naturel irrégulier et donc imprévisible. Pour obtenir les performances requises pour la sécurité d'un établissement recevant du public, le bois (ici de l'épicéa) a subi une sélection drastique pour éliminer les défauts visibles qui pourraient altérer la solidité de l'ouvrage. Le bois a ensuite été séché pour abaisser son taux d'humidité à 8%, puis découpé et enfin trié selon sa qualité. Les lattes ont été ensuite assemblées par un système d'enture. Cette recherche du bois le plus parfait, et le gaspillage qui en découle doivent nous interroger sur la viabilité écologique de tels ouvrages en bois reconstitué.

Enfin, ce projet appelle une dernière remarque concernant la préfabrication. Il est important de remarquer, comme dans les deux précédents projets étudiés, l'importance du processus de mise en œuvre. La préfabrication permet la mise en place de systèmes. Ces systèmes ont leur propre logique de montage, avec des outils et des méthodologies spécifiques, qui impactent la conception architecturale. L'extrait de plan suivant montre, par exemple, le dessin du calepinage des modules de paroi préfabriqués en fonction de la trame structurale, mais aussi de la taille des outils de découpe et des gabarits routiers pour les transports des modules sur le site. Tous ces facteurs sont à prendre en compte dans le dessin d'un bâtiment préfabriqué.



*Calepinage des modules des parois verticales en fonction de la structure et des contraintes de fabrication et transport.  
Illustration : JKMM Architects*

## 2.2.4 Grille de synthèse

### Contexte

Ouvrage	<b>Maison «General Panel System»</b>
Localisation	États-Unis
Maître d'ouvrage	Particuliers
Programme	Maison d'habitation
Année de construction	1942-1952
Architecte	Wachsmann, Gropius

### Construction

Type de bois	Panneaux bois composite
Principe structurel	La structure de la maison repose sur un ensemble de panneaux préfabriqués porteurs qui déterminent l'enveloppe de la maison. Ces panneaux sont connectés par des platines métalliques.
Mise en œuvre	Les panneaux sont préfabriqués en usine et délivrés par camion sur le site. Le système de connecteur mis au point permet de connecter les panneaux entre eux sans vissage, mais par emboîtement.
Autres matériaux	Le métal est utilisé pour ses propriétés en traction pour connecter les panneaux entre eux.

### Qualités architecturales

Les usages	Le plan de la maison peut être adapté selon différentes configurations. Sa morphologie et sa distribution ne présagent en rien d'un système industriel.
Impact de la préfabrication sur l'architecture	La préfabrication de la maison rend homogènes sa morphologie et son apparence. Il n'y a aucune variation possible de la matérialité en façade. D'autre part, la composition du plan est très étroitement liée à la géométrie des panneaux préfabriqués.

<b>AA House</b>	<b>Viikki Church</b>
Finlande	Finlande
Gouvernement Finlandais principalement	The Parish Union (Helsinki)
Maison d'habitation	Église
1937-1945	2004-2005
Alvar Aalto	JKMM
Épicéa sapins (bois finlandais)	Lamellé collé en épicéa, lamellé collé renforcé avec des tiges en acier
Ossature légère en bois, panneaux et bardage rapportés.	Système préfabriqué en usine composé de poutres (hauteur statique d'environ 1,20m) et de poteaux (matrice de 4 fins poteaux reliés entre eux)
Les composants préfabriqués tels que portes, fenêtre, poutres et poteaux en bois sont amenés puis assemblés sur site.	L'ensemble des composants de l'église a été préfabriqué en usine puis assemblé sur le site. D'abord la structure primaire composée des poutres et des poteaux, puis les murs préfabriqués en panneaux Kerto avec l'isolant intégré.
Du béton et des briques sont utilisés pour les sous-bassements et parfois pour les rez-de-chaussée.	Le métal est utilisé pour ses propriétés en traction pour connecter renforcer les poutres.
Le système <i>AA House</i> peut être utilisé avec une variété de configurations. Aalto développe plusieurs variations du plan selon le contexte et l'usage.	La réalisation des poutres renforcées a autorisé de grandes portées libres à l'intérieur des deux halles (environ 12m). Les éléments porteurs sont ramenés en périphérie.
La structure légère en bois permet une liberté de conception. Elle ne se voit pas, mais des poteaux inclinés supportent les avants-toits, comme une référence à forêt, et permettent de rendre la pré-fabrication moins uniforme.	La structure est très présente à l'intérieur du hall, elle souligne les lignes de force de la composition aussi bien au plafond qu'en toiture. La verticalité des éléments de bois dessine une trame très forte, semblable à une forêt. La trame autorise des sections plus fines, mais un réseau de poutres plus dense qui reconstitue l'idée d'un squelette primaire solide, pérenne et renvoie à l'image de l'abri vernaculaire.

A travers cette deuxième partie, nous avons étudié la diversité des architectures en bois produites de manière industrielle. Les nouveaux outils mécaniques plus performants, la création de bois modifiés, mais aussi l'urgence de la reconstruction après guerre ont provoqué l'émergence de nouveaux systèmes constructifs en bois. Cette architecture des systèmes extrêmement aboutis d'un point de vue technique a cependant prouvé ses limites pour des raisons tour à tour économique, sociale ou formelle. C'est pourquoi la préfabrication s'est progressivement détachée d'un modèle de production en série pour tendre vers des systèmes préfabriqués non standards, profitant des avantages d'une production en usine précise et rapide sans contraindre la forme architecturale. Chacun de ces systèmes a interrogé la relation entre architecture et industrie à travers l'utilisation du bois. Ils apportent la preuve que le bois, de par ces propriétés mécaniques, est un matériau idéal pour la construction d'ouvrages variés allant de l'habitation à l'équipement public.

Encore aujourd'hui se pose la question de la liberté de ces systèmes, et des possibilités de variations qu'ils offrent. Des progrès dans l'industrie ont déjà permis de produire des composants multiples ouvrant un large panel d'éléments en « catalogue » et pouvant répondre à la majorité des contextes avec des solutions rationnelles, comme Aalto le propose avec la AA House. L'enjeu est de dépasser cette logique de catalogue pour associer la préfabrication à la notion d'unicité et d'adaptation à toutes les configurations pour rompre avec l'idée que la préfabrication doit forcément être assimilée à une production en série d'un même composant. Comme nous le verrons un peu plus loin, un des principaux leviers en faveur de la préfabrication sur-mesure viendra d'une nouvelle génération d'outils de conception et de fabrication qui permettra de s'orienter vers une prise en compte plus sensible des besoins et des usages.

Un des enseignements de cette partie est aussi la recherche d'une identité dans les systèmes préfabriqués, qui ne peut pas s'arrêter à la variation d'un plan, mais qui doit de manière plus globale réfléchir à la perception, aux ambiances, aux signes. En ce sens, les deux exemples finlandais traduisent ces orientations vers la recherche d'onirisme et de liens entre architecture et nature.

La troisième partie est une ouverture vers la modernisation future de la filière bois et ses promesses pour l'architecture de demain. Nourris par des échanges croisés entre des architectes français et finlandais, les différents chapitres abordent des notions complémentaires sur l'exploitation durable du bois et sa mise en application dans les bâtiments de demain.

### 3. DES PISTES POUR LE BOIS AUJOURD'HUI

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

La seconde partie a mis en évidence l'intérêt du bois dans la production de système préfabriqué dans un contexte socio-économique particulièrement favorable à l'émergence de tels systèmes. Mais le retard technologique et normatif des constructions en bois a ralenti sa progression, et l'a même éloigné d'un grand nombre de projets dans les villes, au profit du béton et de l'acier. En Finlande, l'absence de toute réglementation sur la construction bois de grande hauteur ou d'équipement public explique, alors que le pays est un des plus gros producteurs de bois, le faible taux de structure en bois dans les bâtiments. Le béton et l'acier se sont imposés comme des alternatives crédibles et accessibles au bois dans le contexte d'une économie de plus en plus globalisée.

Presque dix ans après le bâtiment de JKMM que nous venons de voir, les constructions en bois ne sont plus considérées comme des expérimentations, mais présentent un véritable potentiel pour la construction de tous types de bâtiment. Paradoxalement, ces potentiels reviennent d'une certaine manière aux origines de l'architecture en bois : d'une part, les structures tressées légères, d'autre part, les structures en bois massif. Cette partie propose de comprendre, à partir d'exemples contemporains quelle sont les outils qui ont permis de remettre à jour ces systèmes.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

## 3.1 Les gridshells

Les structures tridimensionnelles en bois, aussi appelé *GridShell*, puisent leur origine dans l'architecture des cabanes et des yourtes mongoles, où le croisement et la juxtaposition d'éléments fins en bois permettent d'obtenir une maille structurelle solide. Ce type de structure ingénieux dans sa mise en œuvre permet une économie de matière et une légèreté qui ont très rapidement inspiré les architectes et ingénieurs. Aujourd'hui, les *gridshell* sont la combinaison d'un niveau d'ingénierie très pointu associée à la créativité des architectes. Ces structures en apparence complexes sont un hommage aux qualités et à l'intelligence collective avec les architectes, ingénieurs, compagnons et artisans.

Un *gridshell*, c'est une coque qui est obtenue par la déformation élastique d'une grille bi-dimensionnelle, généralement rectangulaire ou carrée. Le résultat donne une surface à double courbure. Cette grille, pour suivre la forme dessinée par l'architecte doit être articulée à chaque nœud pour être manipulée, ce qui a pour conséquence une absence de résistance au cisaillement dans la structure. Pour obtenir cette résistance, une barre est ajoutée dans une troisième direction et sert de contreventement. À l'origine, ce type de montage permettait d'assembler la grille à plat puis de la soulever avec des grues. Aujourd'hui, les grilles sont assemblées directement sur des étais permettant de construire des formes plus complexes. Les premiers *gridshells* sont dessinés empiriquement à l'aide de maquettes suspendues : ces maquettes prennent naturellement une forme qui leur permet de résister à une charge uniforme et répartie qui simule le poids propre, sans flexion. Cette première méthode dite du «filet renversé» a été introduite par Frei Otto pour la construction du Mannheim Bundesgartenschau Multihalle *gridshell* en 1975. Aujourd'hui, des outils numériques permettent de remplacer cette approche empirique pour optimiser la forme des *gridshells* selon les dessins de l'architecte grâce à des algorithmes de relaxation dynamique, qui reproduisent les effets des maquettes inversées.

Le bois est un matériau très bien adapté à ce type de structure. Comme nous l'avons vu, le principe du *gridshell* repose sur la discrétisation d'une coque en barre. Mais tout comme les dômes ou les coques, ce type de structure travaille essentiellement en compression<sup>1</sup>, or le bois particulièrement efficace dans ce type de travail mécanique. Le matériau utilisé pour un *gridshell* ne doit pas être trop fragile de manière à résister aux différents efforts qui s'appliquent à la structure durant la mise en œuvre.

Le bois a été choisi pour ce type de structure en raison de sa faible densité et

<sup>1</sup> d'après la classification de Schlaich

de sa déformation à rupture élevée (environ 2 %)<sup>2</sup>. On retrouve ici une utilisation raisonnée du bois permettant de valoriser ses propriétés mécaniques et économiques, en optimisant la structure pour plus de légèreté et d'économie de matière.

En outre, si ce type de structure propose un haut niveau d'ingénierie aujourd'hui, elle rend aussi possible l'accomplissement de nouvelles formes architecturales aux multiples propriétés. L'utilisation de ces formes permet de couvrir de vastes espaces et de s'affranchir d'éléments porteurs tels que les poteaux ou les voiles. Ces structures en plan libre sont de ce fait très bien adaptées aux vastes espaces comme les halles d'expositions et les musées. De nombreux exemples ont utilisé ces techniques, par exemple le Savill Building par les architectes Glen Howells et Buro Happold. Ces structures ont aussi vocation à être utilisées dans d'autres contextes où les contraintes appellent des interventions légères, solides, facilement montable et démontable. Elles peuvent être utilisées pour des habitats temporaires ou nomades, des refuges... Enfin, l'originalité et la délicatesse de ces structures deviennent une source inépuisable de formes, permettant de s'adapter à de nombreux contextes et programmes en proposant une variété de lumière, de volumes, d'épiderme ...



*Savill Buildin, 2006 (Angleterre) - illustrations : p 126 : sustainable timber design*

2 (source : Recherche de forme de Grid Shells, L. Bouhaya, O Baverel, C. Douthe, J.F Caron)



Ce travail sur les *gridshells* dans le cadre du Mémoire de Mobilité a ouvert la possibilité d'expérimenter de manière concrète les principes de mise en œuvre de cette structure avec des charpentiers lors d'un workshop en mars 2016. Cette expérimentation avait pour but de rassembler sur une même travée l'ensemble des détails d'une structure *gridshell* évoqués précédemment. La réalisation a consisté en l'assemblage d'une grille plane, puis sa déformation grâce à l'articulation de chaque nœud, à la flexibilité du bois et à l'absence de rigidité en cisaillement.



1. grille plane : la grille est assemblée, les cordes de contreventement sont mises en place sans être tendues. Elles sont simplement passées dans les mâchoires et légèrement pincées. Les articulations à chaque nœud sont libres.  
Illustration : mathieu sudres



2. La grille est ensuite poussée pour obtenir sa forme finale. Chaque nœud est ensuite bloqué, puis les cordes de contreventement sont mises en tension. La structure est stable et rigide.  
Illustration : mathieu sudres

## 3.2 Le défi de la hauteur

Le bois aujourd'hui entre en compétition avec des matériaux concurrents comme l'acier et le béton. Il doit être capable d'apporter des réponses dans l'édification de bâtiments de plus en plus haut. Mais contrairement au béton ou à l'acier qui se sont rapidement imposés dans la construction des gratte-ciels dès le 19<sup>e</sup> siècle, le bois n'a encore aucun précédent. Les techniques, les normes, et la frilosité des bâtisseurs ont ralenti sa progression. Aujourd'hui, les réponses techniques sont en partie trouvées et les normes assouplies. Toutes les conditions sont réunies pour aboutir plusieurs projets en bois dépassant les 50 étages. Bordeaux, Nantes sont les premières villes qui pourraient accueillir des tours en bois. Mais c'est à Vienne qu'une tour de 84m de hauteur verra le jour dans les prochaines années.

Comme dans toute la longue histoire du bois il est intéressant de remarquer un retour à des principes empiriques pour bâtir ces gratte-ciel en bois. La construction en ossature est peu adaptée pour reprendre les descentes de charges de plusieurs étages. Les éléments poteaux-poutres seraient sur-dimensionnés. Dans la construction en bois empilé, les charges sont réparties de manière linéaire, et évitent de concentrer les efforts dans des éléments ponctuels. L'industrie et les ingénieurs ont développé le CLT (Cross laminated Timber), qui est un panneau de bois préfabriqué structural, et qui est capable de concurrencer les propriétés mécaniques d'un mur en béton, tout en économisant près de 2800 tonnes de CO<sub>2</sub> sur une tour de 84m par rapport à l'utilisation du béton. Par voie de conséquence, alors que l'histoire du bois a toujours été marquée par l'optimisation de la matière et la légèreté, les panneaux CLT consomment près de trois fois plus de bois pour leur fabrication. Mais ces panneaux offrent définitivement une nouvelle dimension au bois, en ouvrant les possibilités du bois à une grande échelle comme l'explique l'architecte Michael Green dans sa conférence «Why we should build wooden skyscrapers» en 2013.

Concrètement, les panneaux sont constitués de couches assemblées et collées à plis croisés, souvent à 90°. Il est ainsi possible de bénéficier d'une descente de charge répartie sur deux axes — une propriété qui était jusque-là le privilège des structures en béton armé. Dans la construction en CLT, les architectes doivent faire face à plusieurs enjeux. D'abord, les connexions entre les panneaux doivent être suffisamment résistantes pour assurer la cohésion de la structure et reprendre les différents efforts. Ces connexions sont souvent réalisées au moyen de pièces en métal, mais l'utilisation de fraiseuse numérique permet d'utiliser de plus en plus fréquemment des assemblages mécaniques à mi-bois, ou tenon-mortaise par exemple. Un des autres enjeux de la construction en CLT est la sécurité incendie. Indéniablement, le bois reste plus sensible à un incendie que du béton, même si le CLT est capable de supporter des chaleurs en dessous de 150°C. Les immeubles de grande hauteur en bois, ou même les collectifs de plus de 3 étages sont obligés de renforcer la sécurité incendie par des systèmes de

sprinklage ou en doublant les panneaux de CLT avec une épaisseur de plâtre. Le bénéfice de l'utilisation d'un panneau de bois préfabriqué est malheureusement souvent perdu, car il entraîne des surcoûts et décourage les maîtres d'ouvrage. De plus, alors que le bois est plébiscité pour son bilan carbone neutre et sa finition haut de gamme, l'ajout d'une plaque de plâtre s'inscrit à contre-courant de ces objectifs.

Bien sûr, le développement du CLT dans la construction de grande hauteur s'accompagnera sans aucun doute d'une recherche intensive dans l'optimisation des structures et l'amélioration de la stabilité au feu comme l'explique l'entreprise de charpente COPPET sur le chantier de la Halle du conservatoire des mécaniques à Toulouse. La réponse optimale viendra plutôt de système constructif mixte, alliant les qualités du bois au béton par exemple qui apportera de l'inertie et de la stabilité au feu. C'est en ce sens que nous avons abordé à l'agence d'architecture Patrick Arotcharen la construction de collectifs de R+7 à Bordeaux, alliant ces deux techniques dans la recherche d'un système constructif rationnel mais qui utilise intelligemment les propriétés du bois.



Logements collectifs à Brazza. Architecte : Patrick Arotcharen - phase APS - illustration mathieu sudres.

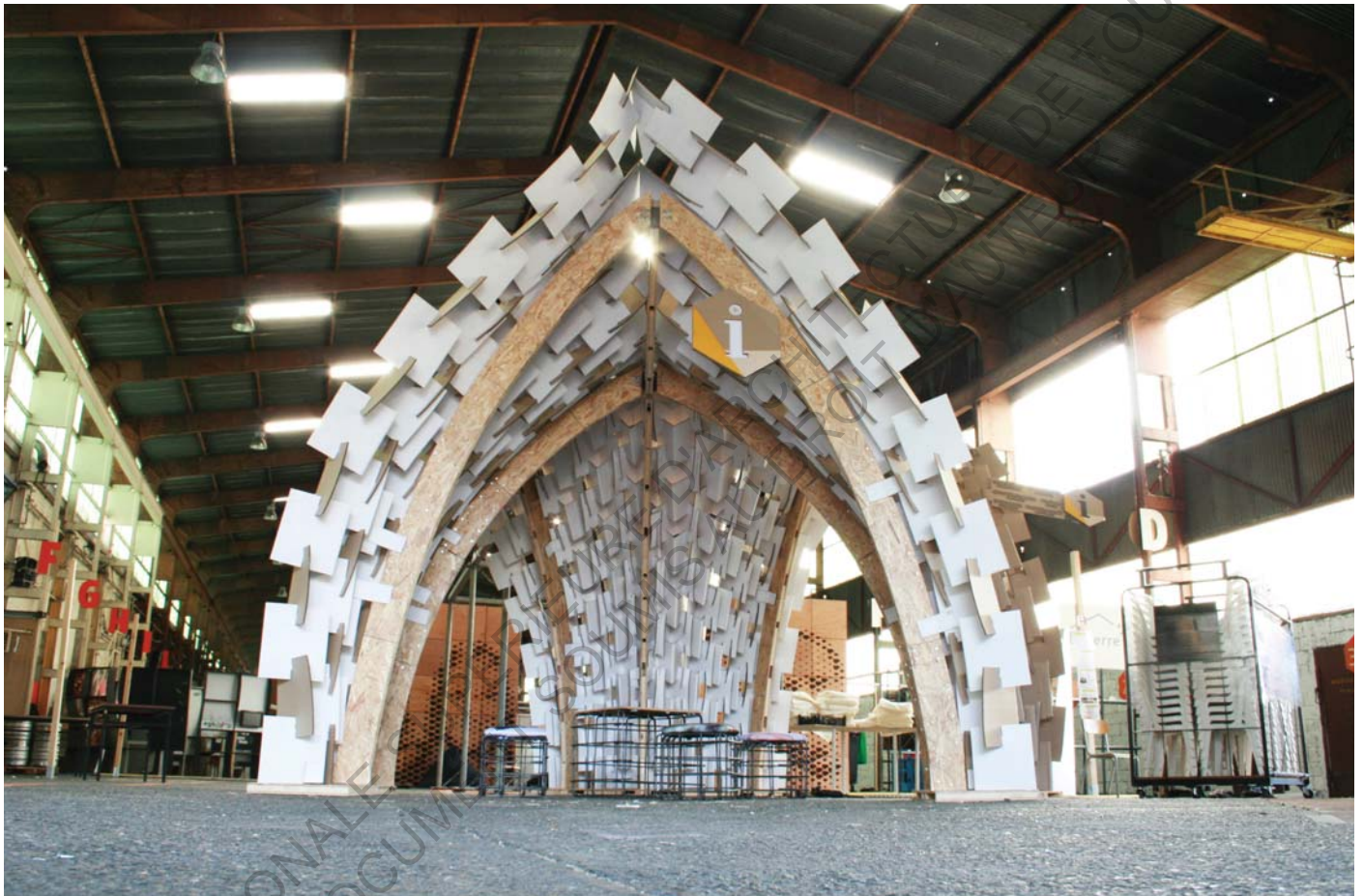
### 3.3 Outils numériques

La fabrication a toujours été une étape clé dans le processus de construction d'un bâtiment. Cette partie est l'analyse d'une expérience concrète avec la réalisation d'un pavillon en mai 2015 à la lumière de l'ouvrage de Fulvio Wirz, *Algorithms aided design*. Elle permet d'aborder l'apport des nouveaux outils de fabrication numérique dans l'architecture en bois.

D'abord, ils ont la capacité de produire des pièces optimisées et non standard. L'histoire de la construction bois nous a montré que les premières habitations ont été construites à partir de branches à peine retaillées, simplement mis en place selon leur taille pour assurer la cohérence de l'ouvrage. La préfabrication a inversé la logique en délivrant des éléments bois aux dimensions standardisées, qui ont influencé la production architecturale. L'utilisation des outils numériques permet aujourd'hui de retrouver une flexibilité d'utilisation du bois dans le sens où les éléments de bois sont découpés aux dimensions fixées par l'architecte.

Les outils numériques de conception et de fabrication ouvrent de nouveaux potentiels de structure en permettant des usinages de plus en plus précis. Dans le cadre du FabLab festival 2015, la structure en bois et carton qui a été construite traduit cette nouvelle orientation. A partir d'un même processus conçu sous la forme d'un «script», les étapes de conception s'enchaînent pour donner progressivement au projet la définition nécessaire à la réalisation, en incluant en étape ultime le paramétrage des assemblages, la création de la nomenclature de chacune des pièces, et la préparation des fichiers d'usinage. Sur ce pavillon, 600 pétales en cartons constituent l'enveloppe. Chacune a plusieurs entailles, positionnées de manière précise pour imbriquer les pétales supérieurs et restituer la courbure de la voûte. Chaque pétale est donc unique et a une place précise sur le pavillon. Avec cette méthode d'assemblage, les encastrement ont suffi à éviter l'utilisation de système de fixation mécanique par colle, vis ou agrafes.

Cette logique de mise en œuvre doit nous rappeler les premiers systèmes d'assemblage développés dans les maisons en rondins. Leur complexité de réalisation a été un frein à leur développement et l'invention de systèmes de clous, plus rapides et moins onéreux les a très vite remplacés. Aujourd'hui, les robots ou les fraiseuses numériques peuvent réaliser ce type d'assemblage avec précision et rapidité. Néanmoins, il est important de souligner que la bonne utilisation des outils numériques de fabrication passe par une réflexion adossée à des techniques constructives éprouvées et à des références architecturales et patrimoniales. En effet, l'ordinateur ne pourrait se substituer à l'intelligence et à la sensibilité humaine dans le processus de création. De même, il ne pourrait remplacer l'ingéniosité d'un architecte dans le dessin d'assemblages et de détails de mise en œuvre. Ces processus ne sont que des méthodes pour aider l'architecte à développer des solutions techniques dans la mise en œuvre.



*Pavillon d'accueil du FabLab festival 2015.  
Maître d'ouvrage : Artilect Fablab toulouse  
équipe de projet : Simon Hulín, Thibault Pouch, Mathieu Sudres  
structure bois OSB : découpée sur fraiseur numérique  
pétales en carton découpées au laser.*

*Le pavillon s'inspire du couvent des Jacobins à Toulouse, et de la structure de ses arches remplies de modules de pierre. Il ré-interprète les techniques de construction en empilement travaillant en compression, en proposant une interprétation moderne et légère grâce à des pétales en carton*

# CONCLUSION

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Au terme de notre analyse, nous avons appréhendé l'histoire des systèmes en bois au cours des différentes périodes, le développement des outils et des pratiques. Nous pouvons résumer ainsi les caractères de l'architecture en bois :

- Les premiers systèmes requièrent des méthodes de mise en œuvre simples et sans outils, à partir d'éléments en bois souvent brut. Ces systèmes se décomposent en deux familles : les ossatures légères en branchages, comme les cabanes adaptées aux populations nomades. Ces systèmes utilisent des éléments tressés pour répartir les efforts et assurer la stabilité de la structure. Les systèmes plus évolués en troncs de bois, pour les populations sédentaires, qui assurent la structure et la paroi de la maison, mais avec une consommation de matière très forte.

- Le XXe siècle, avec le développement de l'industrie, permet une économie de matière et donc de coût à partir des systèmes d'ossatures légères et d'éléments en bois produits en série dans les usines. L'architecture devient préfabriquée, d'abord dans une production standardisée et uniforme, puis avec une recherche intense sur la modularité et la flexibilité des systèmes. Ces systèmes viennent rompre avec la production in-situ des premières architectures en bois et transfèrent la fabrication en usines. L'industrialisation de la filière bois s'accompagne aussi d'une évolution des assemblages. L'acier est utilisé pour ses propriétés en traction plus importantes, notamment dans des assemblages rapides à partir de clous ou de rivet.

- Concurrencé par le béton ou l'acier, le bois cherche aujourd'hui à retrouver une place dans la construction. Pour cela, deux stratégies sont mises en places, revenant aux fondamentaux de l'architecture en bois. D'abord avec l'ossature légère, qui à partir d'une multitude d'éléments en bois fins croisés produit des mailles structurales (*gridsbell*). D'un autre côté, le bois massif est réinterprété par les nouveaux procédés industriels. L'industrie du bois produit aujourd'hui des panneaux de bois massifs qui peuvent être considérés comme un voile béton, avec la même liberté formelle, tout en ayant la même résistance.

Associées aux outils numériques, ces techniques de construction nous amènent à penser que le bois représente un formidable potentiel pour la production de bâtiments de toutes tailles, de toutes formes, de tous usages dans les prochaines années, en retrouvant cette intelligence dans le développement d'assemblage en bois, d'utilisation raisonnée de la matière et d'optimisation structurelle. Ces outils questionnent aujourd'hui les process de fabrication, car tout en s'inscrivant dans des logiques industrielles, ils permettent d'introduire une plus grande variété dans la préfabrication de composants.

Néanmoins, une utilisation rigoureuse de cette ressource naturelle doit être en-

cadrée pour veiller à la régénération de la forêt pour les générations futures. Alors qu'il ne fait plus aucun doute que le changement climatique est en cours, les architectes doivent avoir une vision transversale des enjeux climatiques, sociaux et législatifs de la construction en bois.

Délaissé par le béton et l'acier au 19<sup>e</sup> siècle, il retrouve aujourd'hui une utilisation dans le secteur de la construction. Un secteur qui est l'un des plus gros producteurs d'énergie fossile et de déchets et qui doit maintenant se tourner vers des solutions durables et pérennes. Le bois est une des solutions, mais reste néanmoins sous-développé à cause d'une préférence pour des matériaux comme l'acier et le béton qui sont mieux maîtrisés par les constructeurs. Il reste aussi légèrement plus onéreux. Malgré cela, les recherches et les progrès dans l'industrie permettent aujourd'hui d'utiliser le bois dans les bâtiments avec de multiples applications et à travers toutes les échelles. Mais l'utilisation de ce matériau de manière durable reste subordonnée à une condition *sine qua non* à son développement : la gestion durable du bois et des forêts. De 1990 à 2000, plus de 14,2 millions d'hectares de forêts ont disparu avec des conséquences quasi irréversibles à notre échelle. Cette tendance s'est alourdie puisque de 2000 à 2012, 23 millions d'hectares de forêts ont été détruits.<sup>1</sup>

Alors, il apparaît comme une nécessité de pérenniser cette ressource naturelle, et de s'interroger, en temps qu'architecte, sur la provenance des matériaux, mais aussi sur le cycle de vie des bâtiments en bois.

**L'utilisation économe du bois associée à des méthodes innovantes de construction permettra-t-elle la renaissance de nouvelles formes d'architecture nomade en bois ?**

---

<sup>1</sup> (Source : notre-planete.info <http://www.notre-planete.info/environnement/deforestation.php>)



# GLOSSAIRE

Anisotrope

*Ce dit d'un matériau dont les propriétés varient suivant la direction.*

Bardeaux

*Planchette employée pour la couverture des maisons.*

Charpente

*Combinaison et assemblage d'éléments linéaires (en bois, métal, béton armé) formant soit un support provisoire (échafaudage), soit une ossature permanente, dans un bâtiment (poteaux et poutres, toiture), un ouvrage d'art, un engin (de levage, de manutention...), un navire.*

Balloon Frame House

*Système constructif inventé aux États Unis, avec un volume de bois restreint et un budget réduit, propose une maison rapide à construire, sans qualification particulière grâce aux assemblages avec les clous.*

Déforestation

*Action de détruire une forêt.*

Discrétisation

*Action de découper en groupe homogène.*

Équarrissage

*Action d'équarrir une pièce de bois, la pierre.*

Équarrir

*Tailler sommairement une pièce de bois, un bloc de pierre, de marbre, etc., pour lui donner une forme carrée.*

Fraiseuse

*Machine servant à fraiser les métaux.*

Photosynthèse

*Transformation par les plantes du gaz carbonique de l'air à l'aide de l'énergie solaire.*

Préfabriquer

*Mot issu du latin «pre fabricare» signifiant transformer en avance des matières en objets d'usage courant.*

Relaxation dynamique

*En mécanique des structures, la relaxation dynamique est une technique de modélisation informatique utilisée pour la recherche de forme (processus dit de form-finding) des structures souples (câbles et nappes).*

Script

*Programme qui va exécuter une fonction définie.*

Sprinklage

*Dispersion automatique d'eau en cas d'incendie.*

Sylviculture

*Exploitation des forêts.*

Ossature

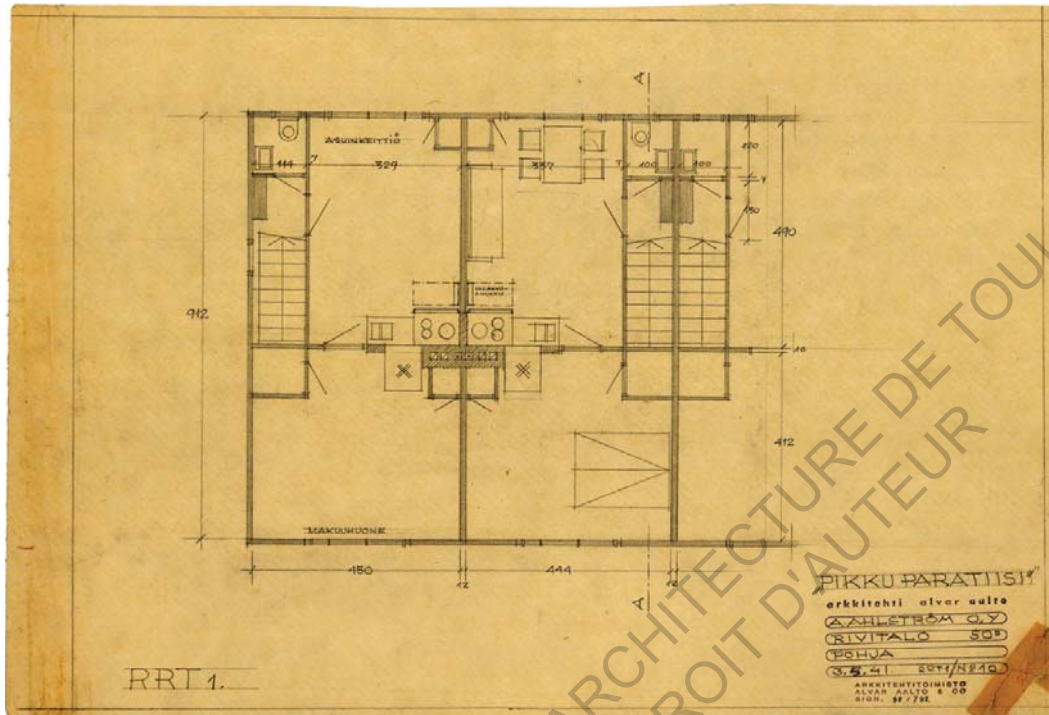
*Structure qui soutient un tout*

# ANNEXES

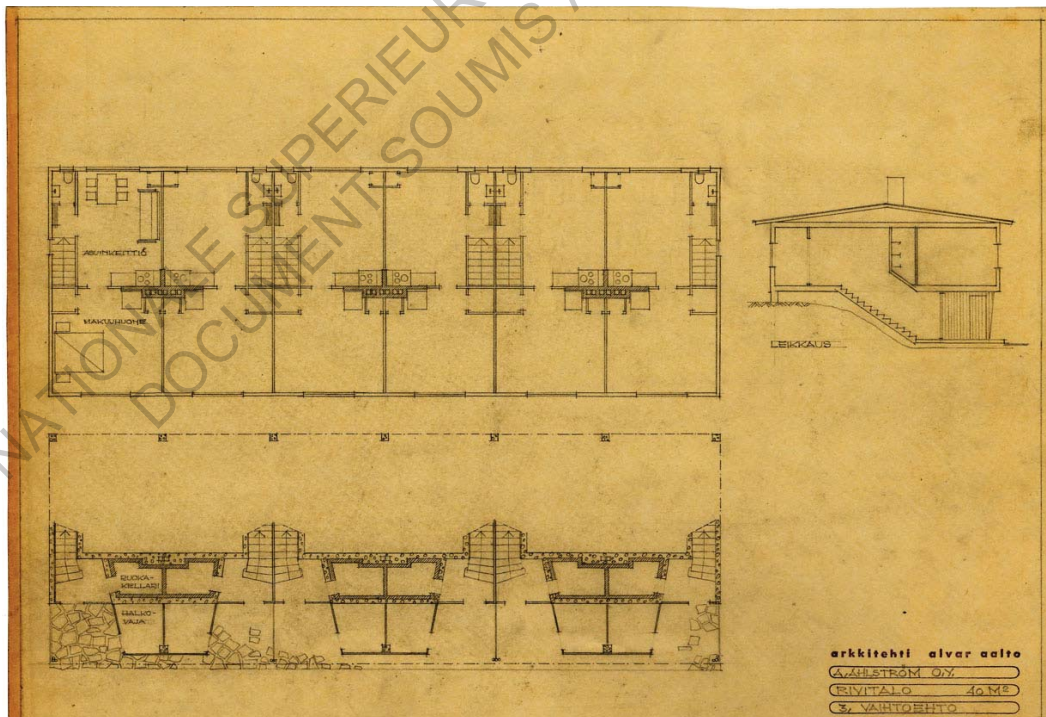
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE  
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

# Annexe A : AA House (Alvar Aalto)

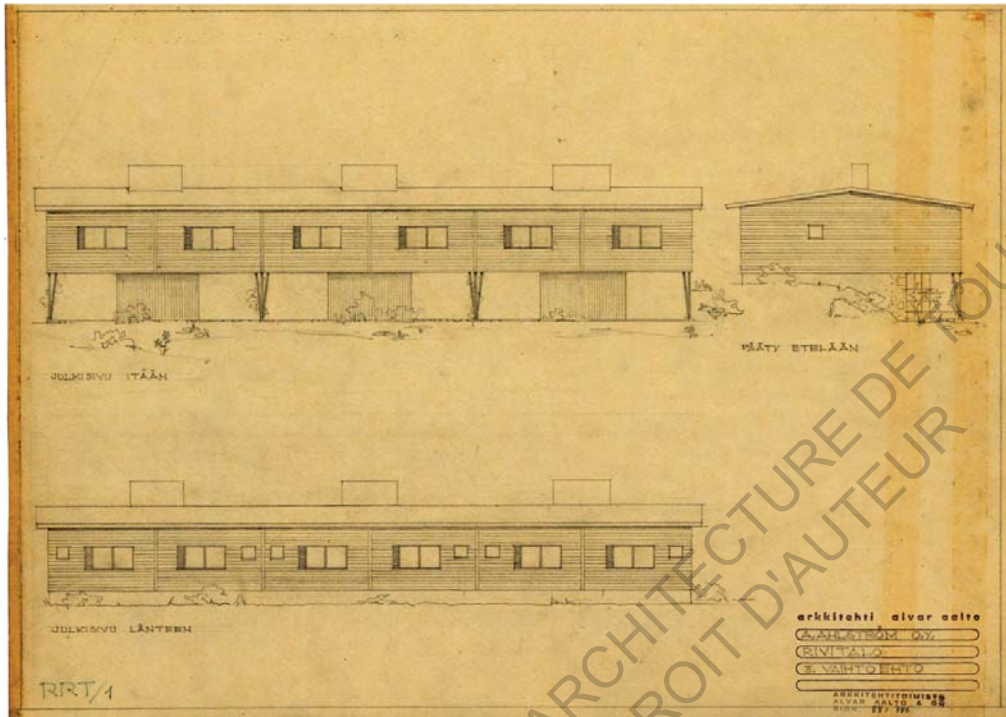
Documents scannés de la Fondation Aalto. Plans originaux d'une typologie de la maison AA House développée par Aalto.



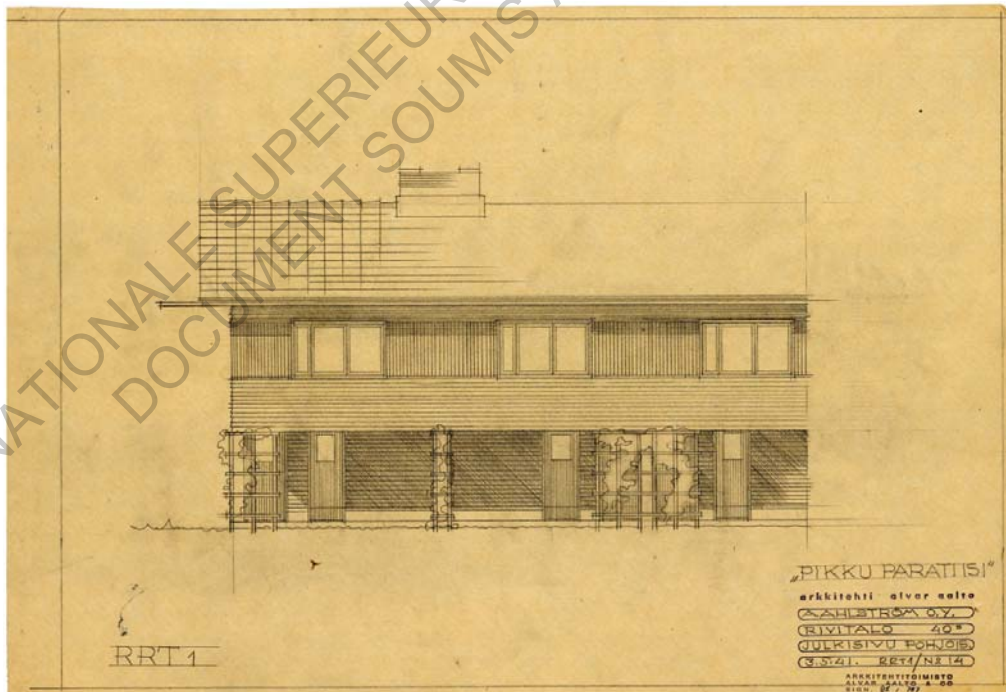
Vue en plan R+1



Vue en plan RDC



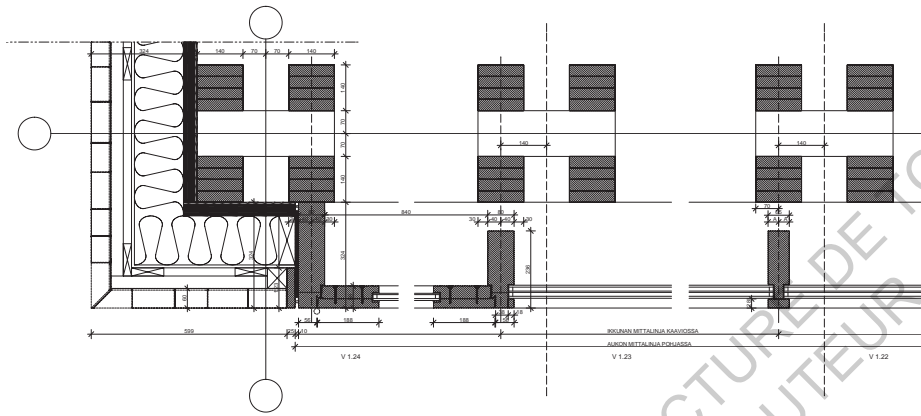
Élévation



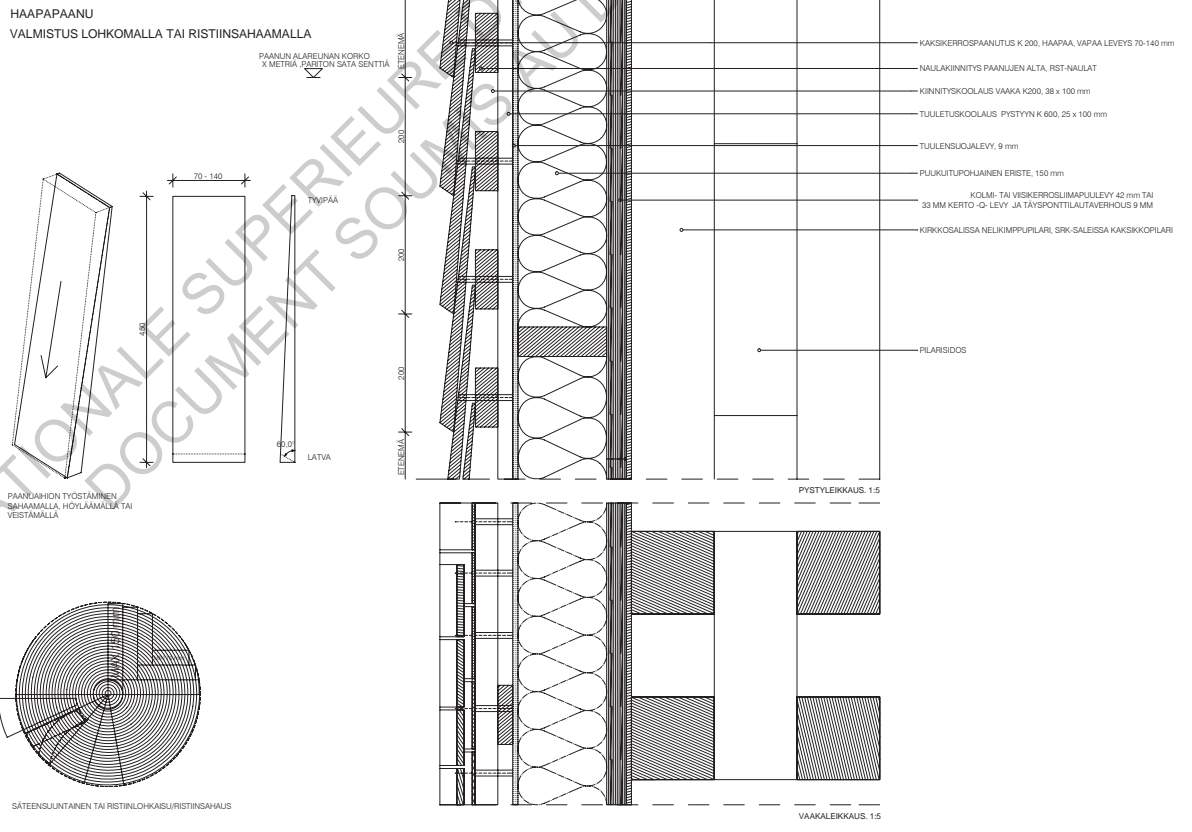
Élévation

# Annexe B : VIIKKI CHURCH

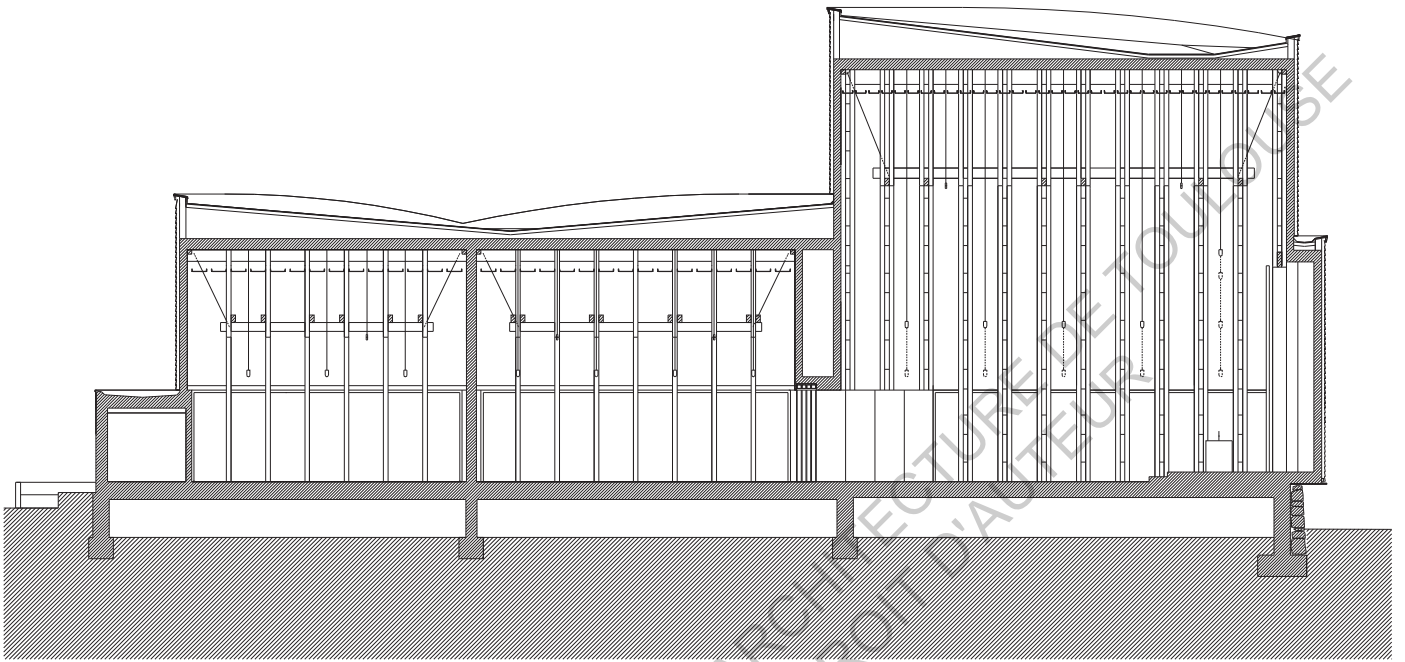
Documents des architectes JKMM



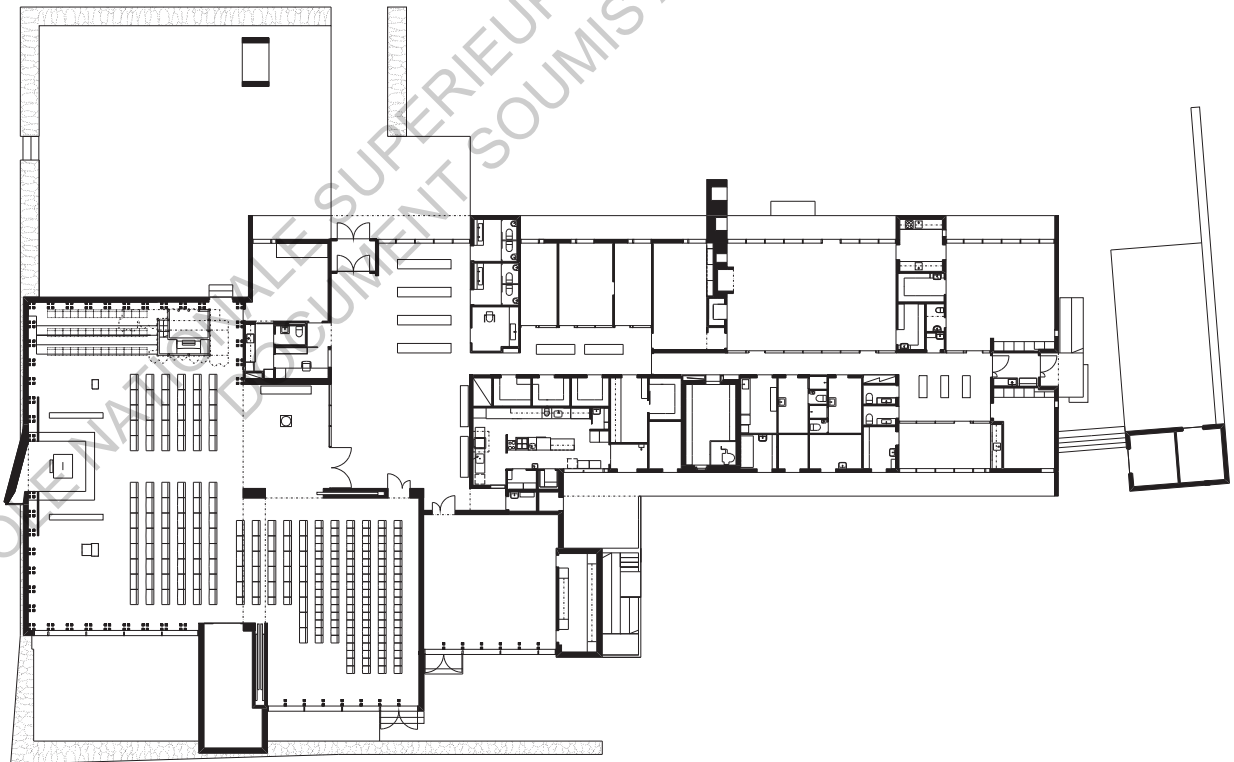
Détails des poteaux.



Détails de l'enveloppe et de la structure porteuse du bâtiment.



Coupe sans échelle sur la charpente.



Plan sans échelle.